
ОСНОВЫ
КОСМИЧЕСКОЙ
БИОЛОГИИ
И МЕДИЦИНЫ

Академия наук СССР

Национальное управление по аэронавтике
и исследованию космического пространства США

Academy of Sciences of the USSR

National Aeronautics and Space Administration USA

FOUNDATIONS OF SPACE BIOLOGY AND MEDICINE

Joint USA/USSR Publication
in Three Volumes

Co-chairmen

MELVIN CALVIN (USA) and OLEG G. GAZENKO (USSR)

Volume I

SPACE
AS A HABITAT



Scientific and Technical Information Office
NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION
Washington, D.C., 1975

ОСНОВЫ КОСМИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ

Совместное советско-американское издание
в трех томах

Под общей редакцией
О. Г. ГАЗЕНКО (СССР) и М. КАЛЬВИНА (США)

Том I

КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО
КАК СРЕДА ОБИТАНИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА, 1975

Посвящается светлой памяти

Анатолия Аркадьевича
БЛАГОНРАВОВА

и **Хью Л. ДРАЙДЕНА,**

положивших начало сотрудничеству

в области изучения

и использования космоса

в мирных целях

между

Академией Наук

Союза Советских

Социалистических Республик

и Национальным Управлением

Соединенных Штатов Америки

по авиации и исследованию

космического пространства

От имени Академии наук СССР и Национального управления США по авиации и исследованию космического пространства мы приветствуем выход в свет совместного советско-американского труда по космической биологии и медицине.

«Основы космической биологии и медицины» представляют собой фундаментальный научный труд, подводящий итоги развития этой новой области знания за последние полтора десятка лет. Он включает в себя результаты медицинских и биологических исследований, выполненных в лабораторных и летных экспериментах, и целый комплекс вопросов, относящихся к обеспечению безопасности космических полетов человека.

Мы полагаем, что этот труд заслуживает внимания не только благодаря своему содержанию, но и потому, что он служит примером успешного сотрудничества советских и американских ученых.

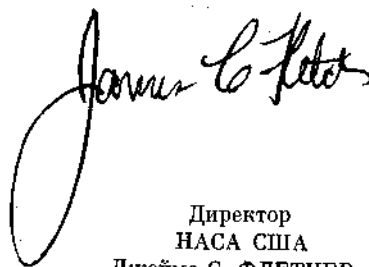
Мы также считаем, что этот труд является важным достижением в научном сотрудничестве между нашими странами в области изучения космоса, начало которому было положено на переговорах между академиком А. А. Благоврадовым, председателем Комиссии по исследованию и использованию космического пространства Академии наук СССР, и доктором Хью Драйденом, заместителем директора Национального управления США по авиации и исследованию космического пространства.

Академия наук СССР и Национальное управление США по авиации и исследованию космического пространства добились больших успехов в подготовке экспериментального полета «Союз — Аполлон» в 1975 г., целью которого является проверка совместимых средств сближения и стыковки космических кораблей и станций.

Мы рады, что за столь короткое время пройден большой путь — от совместных усилий по публикации научных трудов до совместной работы по обеспечению реального космического полета. Это открывает нам широкие перспективы, когда мы сможем более тесно сотрудничать друг с другом и с другими странами в исследовании космического пространства, которое принадлежит всему человечеству.



Президент
Академии наук СССР
М. В. КЕЛДЫШ



Директор
НАСА США
Джеймс С. ФЛЕТЧЕР

Редколлегия

Бурназян А. И., Васильев П. В., Газенко О. Г.,
Генин А. М., Имшенецкий А. А., Петров Г. И.,
Черниговский В. Н. (СССР)

Кальвин М., Краусс Р. В., Марбаргер Дж. П.,
Рейнольдс О. Е., Тальбот Дж. М. (США)

Ответственные секретари

Панченкова Э. Ф. (СССР),
Джонс У. Л. (США)

Редакторы I тома

Имшенецкий А. А., Петров Г. И. (СССР),
Краусс Р. В. (США)

Editorial Board

Burnazyan A. I., Vasilyev P. V., Gazenko O. G.,
Genin A. M., Imshenetskiy A. A., Petrov G. I.,
Chernigovskiy V. N. (USSR)

Calvin M., Krauss R. W., Marbarger J. P.,
Reynolds O. E., Talbot J. M. (USA)

Executive Secretaries

Panchenkova E. F. (USSR),
Jones W. L. (USA)

Volume I Editors

Imshenetskiy A. A., Petrov G. I. (USSR).
Krauss R. W. (USA)

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРОВ

«Основы космической биологии и медицины» — коллективный научный труд, представляющий собой обзор основных проблем, достижений и перспектив развития космической биологии и медицины. Его цель — передать в распоряжение специалистов и тех, кто готовится ими стать, обобщенные и систематизированные сведения по основным проблемам космической биологии и медицины, накопленные в изучении и освоении человеком космического пространства за последние 10—15 лет.

Труд издан в трех томах, в аутентичных русском и английском вариантах.

Начало работ по совместному труду следует отнести к периоду обмена корреспонденцией между Академией наук СССР и Национальным управлением США по авионавигации и исследованию космического пространства в целях развития сотрудничества в космосе. Результатом переписки между академиком А. А. Благонравовым и доктором Хью Л. Драйденом явилась серия соглашений, одно из которых, достигнутое в октябре 1965 г., предусматривало подготовку и издание совместного научного труда «Основы космической биологии и медицины».

Для осуществления соглашения в начале 1966 г. была образована Объединенная редакционная коллегия, сопредседателями которой стали ныне покойный академик Н. М. Сисакян (на место которого был назначен в марте того же года профессор О. Г. Газенко) и профессор М. Кальвин. В состав советской части Объединенной редакционной коллегии вошли: академик А. А. Имшенецкий, покойный академик В. В. Парин (и сменивший его после смерти в 1971 г. профессор П. В. Васильев), академик В. И. Черниговский, академик Г. И. Петров, профессора А. И. Бурназян и А. М. Генин. В состав американской части Объединенной редакционной колле-

гии — покойный профессор Л. Д. Карлсон, профессор Р. В. Краусс и Д. П. Марбаргер, покойный профессор В. В. Вишняк, доктор О. Е. Рейнольдс и бригадный генерал ВВС (в отставке) Д. М. Тальбот.

В дискуссиях, начавшихся между доктором О. Е. Рейнольдсом, профессорами Р. В. Крауссом и А. А. Ничипоровичем, обсуждались вопросы о структуре и содержании совместного труда; затем на серии совещаний члены Объединенной редакционной коллегии тщательно разработали и согласовали проспекты глав труда, процедуру работы и инструктивные материалы для авторов. Решено было разделить весь материал на 45 глав в трех томах.

Том I. «Космическое пространство как среда обитания». Редакторы: академик А. А. Имшенецкий, академик Г. И. Петров (СССР), покойный профессор В. В. Вишняк (которого сменил в декабре 1973 г. профессор Р. В. Краусс) (США).

Том II. «Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины». Редакторы: покойный академик В. В. Парин (которого сменил в декабре 1971 г. профессор П. В. Васильев) (СССР), профессор Дж. П. Марбаргер (США).

Том III. «Космическая медицина и биотехнология». Редакторы: профессор А. М. Генин (СССР), бригадный генерал ВВС (в отставке) Дж. М. Тальбот (США).

Работа, которую предстояло выполнить Объединенной редакционной коллегии, по своему характеру и масштабу была беспрецедентной, по крайней мере для тех, кто ее выполнял. Было признано необходимым разработать специальную процедуру подготовки совместного труда и определить порядок и график отдельных этапов работы. Так, для того чтобы обеспечить наиболее тщательный и полный отбор материалов для каждой гла-

вы труда, обе стороны назначили составителей обзора (на них сделаны ссылки в каждой главе), которые подготовили исчерпывающие сводки работ и библиографий по материалам своих стран, а также использовали наиболее существенные данные мировой литературы. Произошел обмен и оценка собранного материала. Затем каждая страна предложила назначить авторов соответствующих глав, а Объединенная редакционная коллегия провела окончательный их отбор. В результате 20 глав подготовили авторы СССР, 19 — США и 6 написаны совместно.

За небольшими исключениями все главы написаны разными авторами. По понятным причинам их взгляды по отдельным вопросам не всегда совпадают. Более того, некоторые авторы придерживаются разных точек зрения в рамках обсуждаемых проблем. Поэтому самой трудной задачей было установить логическую взаимосвязь между главами, по возможности согласовать противоречивые точки зрения, устранить повторения и восполнить пробелы. С этой целью были разработаны и разосланы всем авторам подробные планы каждой главы, а также общие правила подготовки рукописей. Помимо этого, все главы рецензировали как советские, так и американские эксперты.

Тем не менее мы отдаем себе отчет в том, что, несмотря на все предпринятые усилия, нам не удалось подготовить монографию, однородную по манере изложения, с едиными мнениями и отчетливой последовательностью представления материала. Однако мы сделали все необходимое, чтобы обеспечить авторам возможно более полную свободу, в расчете на то, что высокая квалификация авторов сможет вполне компенсировать недостаточную внутреннюю гармонию структуры труда.

Таким образом, издание этих трех томов представляет собой успешное завершение одного из проектов сотрудничества между Академией наук СССР и Национальным управлением по аэронавтике и исследованию

космического пространства США в области космической биологии и медицины.

Этот труд теперь поступает для использования специалистами всего мира. Мы полагаем, что он имеет ценность не только по своему содержанию, но является также свидетельством того, что ученые двух стран могут эффективно работать вместе для достижения общей цели.

Мы считаем, что работа Объединенной редакционной коллегии по составлению совместного труда была не только эффективной и полезной, но и приятной, так как дала повод полнее и лучше узнать друг друга, глубже ознакомиться с наукой, культурой и традициями наших двух стран, работать в обстановке взаимопонимания и конструктивного решения стоявших перед нами задач.

Мы официально отмечаем эффективную деятельность членов Объединенной редколлегии, продолжавшуюся почти восемь лет, что позволило успешно завершить эту сложную работу. Существенный вклад внесли и другие лица, в том числе ответственные секретари советской и американской части редколлегии Э. Ф. Панченкова (СССР) и У. Л. Джонс, бывшие ответственные секретари В. М. Болтон, д-р Дж. Джекобс, д-р С. С. Уайт и д-р Э. Дж. Маклофлин (США), помощники ответственных секретарей Г. Я. Тверская, Л. Н. Зилле и Т. Б. Касаткина (СССР), У. Б. Салливан, Р. Р. Уайз и И. Молер (США), ученый секретарь Комиссии по исследованию и использованию космического пространства АН СССР Г. С. Балаян, консультанты по международным вопросам Ю. П. Хоменко (СССР) и д-р О. Э. Андерсон и Ф. А. Тибило (США), а также сотрудники Посольства СССР в Вашингтоне и Посольства США в Москве, способствовавшие нашим контактам и обмену материалами.

Объединенная редколлегия выражает сердечную признательность работникам издательств, которые сделали все возможное, чтобы придать книге внешнюю привлекательность и форму, удобную для читателя.



О. Г. ГАЗЕНКО

Институт медико-биологических проблем
МЗ СССР, Москва



М. КАЛЬВИН

Калифорнийский университет,
Беркли, Калифорния

Том I

КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО
КАК СРЕДА ОБИТАНИЯ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	13
Часть I. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ИХ БИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ	
Глава 1. Теория происхождения и природа Вселенной	17
КАМЕРОН А. Г. В.	
Глава 2. Физические характеристики межпланетного пространства	47
ВЕРНОВ С. Н., ПОГАЧЕВ Ю. И., ПИСАРЕНКО Н. Ф.	
Часть II. ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ С ФИЗИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧЕК ЗРЕ- НИЯ	
Глава 3. Луна и ее природа	121
ЮРИ Г. К.	
Глава 4. Планеты типа Земли (Меркурий, Венера, Марс)	139
ДАВЫДОВ В. Д., МАРОВ М. Я.	
Глава 5. Планеты-гиганты и их спутники, малые планеты, метео- риты и кометы	198
НЬЮБОРН Р. Л., ГАЛКИС С.	
Часть III. ПРОБЛЕМЫ ЭКЗОБИОЛОГИИ	
Глава 6. Биологические эффекты экстремальных условий окружаю- щей среды	271
ИМШЕНЕЦКИЙ А. А.	
Глава 7. Теоретические и экспериментальные предпосылки экзо- биологии	317
ОПАРИН А. И.	
Глава 8. Поиск и исследование внеземных форм жизни	355
РУБИН А. Б.	
Глава 9. Карантин планет: принципы, методы и проблемы	391
ХОЛЛ Л. Б.	
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	418

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последнее десятилетие человек начал исследование Вселенной с помощью совершенно новых средств — пилотируемых и непилотируемых космических летательных аппаратов, которые позволяют вести наблюдения за небесными телами с более близкого расстояния, чем это казалось возможным еще несколько лет назад. Насколько глубоко человек познает Вселенную, зависит в конечном счете от будущих поколений. Однако уже и сейчас с помощью прямых и косвенных измерений мы постоянно получаем новые сведения о солнечной системе. Накапливается огромное количество информации, обработка которой потребует многих лет. Можно сказать, что за сравнительно короткий отрезок времени человечество сократило расстояние до Солнца и планет солнечной системы.

Понимание физических и химических характеристик солнечной системы волновало любознательный ум человека и заставляло искать ответы на вопросы, которые раньше представлялись неразрешимыми. Эксперименты по изучению сил, вещества и излучений, открытых в межпланетном пространстве, могут теперь проводиться быстро и с высокой точностью. Опытная проверка космологических концепций происхождения Вселенной способствовала получению новых данных, которые уточнили наши представления о том, как материя и энергия распространялись во Вселенной. Возможность непосредственного исследования космоса привела к созданию приборов, гораздо более совершенных, чем можно было ожидать. Однако эти приборы все еще остаются примитивными для решения стоящих перед нами проблем. В настоящее время открываются возможности проверить существующие теории происхождения жизни не только в масштабе нашей планетарной системы, но также в звездных

мирах и других галактиках. Запуски космических аппаратов заставили человека ощутить скромное место, которое он занимает во Вселенной, и в то же время помогли вселить в него веру в способность человеческого разума познать Вселенную, хотя для этого потребуются определенное время и соответствующие усилия. Ученых всех стран объединяет стремление обмениваться результатами исследований с тем, чтобы создать основы космологии, которая органически сольется с единой теорией поля общей физики.

Первый том настоящего труда представляет собой результат усилий многих авторов, которые попытались изложить известные в настоящее время данные о строении Вселенной, и прежде всего о природе нашей солнечной системы и Галактики, в которой она находится. Авторы стремились вооружить как специалиста, так и рядового читателя пониманием проблем, стоящих перед биологами, — не только при экспериментальном исследовании космоса и проверке тех или иных теорий, но и при практическом обеспечении возможности существования человека в том огромном пространстве, которое исследуется космонавтами. Настоящий том состоит из двух разделов (трех частей). В первых пяти главах излагаются представления о природе Вселенной с точки зрения космологии. Очень существенно, что читатель получит представление не только о планетах солнечной системы, но также и о межпланетном пространстве. Луна как наиболее полно исследованное и подробно описанное космическое тело является моделью для тех, кто изучает геологию, геохимию и геофизику небесных тел. В первый том включены данные классической астрономии, а также результаты последних полетов космических аппаратов, которые позволили получить информацию о других планетах, расположенных к нам достаточно близко, если

мыслить космическими категориями, но в то же время и очень далеко, если иметь в виду ограничения, обусловленные современным уровнем развития ракетно-космической техники.

В остальных главах (6—9) рассмотрены общие аспекты биологии, в частности вопросы происхождения жизни на Земле и возможности существования жизни на других небесных телах. Проблемы экзобиологии освещены с учетом современных достижений биохимии и биофизики. Кроме того, сделана попытка разъяснить дилемму, стоящую перед учеными и конструкторами, занятыми созданием приборов для поисков форм внеземной жизни. В этих главах описаны условия, существующие на поверхности планет, в том числе и на Земле, определяющие возможность возникновения и развития жизни.


Соредакторы тома бережно отнеслись к текстам глав, подготовленным авторами. В целом главы служат выражением собственной точки зрения советских и американских авторов. В распоряжение автора одной страны была предоставлена литература, опубликованная в другой стране. Естественно, авторы лучше знакомы с исследованиями в своей стране. Поэтому редакторы обращали внимание авторов на материалы, которые могли выпасть из их поля зрения, однако ответственность за подбор материалов полностью ложится на авторов. Редакторы сделали все возможное, чтобы подобрать полезные данные из самых разных источников. В главах освещены основные понятия из области астрономии и космологии. Некоторые главы служат основой для изучения факторов, которые необходимо принимать во внимание при решении вопроса, следует ли рассматривать космос как

исследовательскую лабораторию для проверки биологических теорий или как неблагоприятную среду обитания, в которой человек может находиться в различные периоды времени.

Космическое пространство за пределами земной атмосферы, пожалуй, не является враждебным, но требует специальной подготовки для встречи с ним. Первые полеты человека доказали его способность находиться и вести научные исследования в космосе. Эти полеты следует рассматривать как гигантский шаг в познании человеком проблем происхождения и развития жизни.

Это предисловие не было бы полным без признания заслуг покойного профессора В. Вишняка из Рочестерского университета, который принимал участие в создании трехтомного труда, начиная с самых первых этапов, включая разработку планов всех глав. Доктор Вишняк превосходно владел английским и русским языками, и это помогло во многом преодолеть языковые барьеры и ускорить завершение работы. Его преждевременная гибель, постигшая его в научной экспедиции, глубоко опечалила всех нас. С глубоким уважением и любовью к ушедшему от нас коллеге соредакторы тома посвящают этот том его памяти.

Соредакторы также выражают искреннюю признательность составителям и рецензентам, которые помогали авторам в подборе материалов. Полный список лиц, принимавших участие в подготовке труда, помещен в последнем томе. Без их квалифицированной помощи том оказался бы менее удачным. Соредакторы присоединяются к авторам в выражении искренней благодарности всем, кто участвовал в создании этого тома.



А. А. ИМШЕНЕЦКИЙ
Институт микробиологии
АН СССР



Г. И. ПЕТРОВ
Институт космических
исследований АН СССР



Р. В. КРАУСС
Факультет естественных наук
Орегонского университета

Часть I

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
И ИХ БИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ**



Галактическая туманность NGC 6514 (Мессье 20)
в созвездии Стрельца

NGC 6514 — типичная эмиссионная туманность, свечение которой возбуждается горячими звездами ранних спектральных классов. Туманность находится на рас-

стоянии 2300 световых лет от Земли. Ее диаметр оценивается в 30 световых лет. (Фотография печатается с разрешения Калифорнийского технологического института, обсерватории Хейла и Вашингтонского института им. Карнеги)

ТЕОРИЯ ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ПРИРОДА ВСЕЛЕННОЙ

А. Г. КАМЕРОН

Обсерватория Гарвардского колледжа,
Кембридж, Массачусетс, США

КОСМОЛОГИЯ

Радиотелескопы и оптические телескопы дают нам возможность вести наблюдения лишь весьма ограниченной части Вселенной, поэтому все наши познания в области физики и астрономии распространяются на относительно небольшой объем Вселенной. Отсюда возникает необходимость экстраполировать наши знания к гораздо более крупным временным и пространственным масштабам. При построении гипотезы поведения Вселенной космолог в качестве отправного пункта принимает какой-либо общий физический принцип — так называемый космологический принцип. Следует иметь в виду, что любой такой принцип является чисто предположительным и требует экспериментальной и наблюдательной проверки, как и всякий закон физики. В настоящее время космолог может лишь выбрать такой общий принцип в качестве исходного, принять некоторые границы применимости общей теории относительности, разработать математические следствия из модели Вселенной и проверить, подтверждаются ли экспериментально и наблюдениями предсказанные явления. Обзоры общего характера, посвященные этому вопросу, приведены в работах [3, 39, 47, 58].

В основу большинства космологических систем положен принцип, согласно которому в среднем в данное космологическое время любая точка в пространстве ничем не отличается от других точек космического пространства.

Отдельные точки в пространстве как таковые наблюдаться не могут. В пространстве могут наблюдаться лишь объекты, поэтому космологический принцип применим лишь к космическим телам, которые поддаются наблюдению. В пространстве каждая частица вещества имеет свою иерархическую структуру и обладает своим собственным, прису-

щим ей движением. Поэтому следует рассматривать среднее движение многих частиц вещества, существующих в определенной области пространства, чтобы получить общую картину поведения данной области. Космолог также должен игнорировать то обстоятельство, что наблюдаемое в пространстве вещество способно собираться, образуя компактные тела, причем большая часть пространства между ними остается относительно пустой. При построении теории он принимает, что масса компактных тел размазана в пространстве со средней плотностью, и не обращает внимания на какие-либо специальные эффекты, которые могут быть вызваны конденсацией вещества в плотные тела.

Согласно общей теории относительности, сформулированной Эйнштейном, истинно статической может быть лишь Вселенная, совершенно не содержащая материального вещества. Если Вселенная содержит вещество, то она должна находиться либо в состоянии расширения, либо в состоянии сжатия. Соответствующие решения уравнений нашел А. А. Фридман. Наблюдаемая нами Вселенная расширяется. Находящееся на большом удалении вещество Вселенной, гравитационно не связанное с нашей локальной системой галактик, все более удаляется от нас. В соответствии с космологическим принципом наблюдатель, находящийся на любой из этих отдаленных частиц вещества, должен со своей точки зрения видеть такую же картину Вселенной, как и мы со своей. При этом все далекие массы вещества будут удаляться от наблюдателя.

Если в настоящее время отдаленные массы вещества Вселенной удаляются от нас со скоростью, пропорциональной расстоянию до них, то по мере возвращения в прошлое можно было бы установить, что местная плотность материи непрерывно возрастает. Если

дойти в прошлое достаточно далеко, можно отметить непрерывно происходящее стягивание вещества, пока в какой-то конечный момент в еще более раннем прошлом оно не оказалось сосредоточенным в одной точке. Эта картина описывается в космологии как «большой взрыв», так как согласно ей в прошлом в определенный конечный момент произошел выброс вещества из области с бесконечной плотностью, что можно рассматривать как своего рода случай созидания. На такой точке зрения основываются относительно простые математические космологические модели, получившие название моделей Вселенной Фридмана и послужившие основой для многих дискуссий о космологических процессах.

Ряд английских космологов выразили неудовлетворение описанным выше космологическим принципом. Одно из следствий общей теории относительности Эйнштейна состоит в том, что время, как оказалось, имеет много свойств, очень сходных со свойствами, присущими категории пространства. В четырехмерной геометрии пространства-времени пространство и время объединены. Поэтому упомянутые английские ученые спрашивали: почему следует космологический принцип применять только к пространству и почему нельзя его применять также и ко времени? Они предложили принять более общий космологический принцип, названный совершенным космологическим принципом, в котором постулируется, что в среднем (в крупном масштабе) любой наблюдатель во Вселенной должен в каждой точке пространства и в любой момент времени видеть одну и ту же картину.

Согласно этому принципу, Вселенная в среднем должна была бы всегда характеризоваться одним и тем же поведением. Поскольку наблюдения показывают, что Вселенная расширяется, и поскольку совершенный космологический принцип требует, чтобы средняя плотность вещества в пространстве оставалась неизменной, то необходимо постулировать, что в пространстве должно образовываться дополнительное вещество, компенсирующее собой уменьшение плотности вещества при расширении Вселенной. Так как наблюдения показывают, что во Вселенной вещество разлетается в виде галактик и скоплений галактик, то, естественно, следует вывод, что вновь образующееся вещество должно конденсироваться с образованием новых систем галактик. Такая общая картина получила название космологии стационарного состояния Вселенной.

Следует подчеркнуть, что предположение о непрерывном образовании вещества является лишь гипотезой физического процесса, который никогда не наблюдался. Таким образом, «совершенный космологический принцип» требует принятия новых, непроверенных законов физики, неприемлемых для космологических теорий, основывающихся только на обычном космологическом принципе.

Во времена, когда Эйнштейн впервые применил свою общую теорию относительности в космологии, общепринятым было считать Вселенную статической. Поэтому, когда Эйнштейн обнаружил, что его общая теория относительности предсказывает существование расширяющейся или сжимающейся Вселенной, он провел видоизменение формы уравнения и пришел к выводу, что может ввести в свое общее уравнение новый член, так называемую космологическую постоянную, дающий возможность считать Вселенную почти статической на протяжении очень продолжительных отрезков времени. После того как выяснилось, что Вселенная в действительности расширяется, Эйнштейн прекратил эксперименты с космологической постоянной, однако другие космологи продолжали такие попытки и создали различные космологические модели, основывающиеся на этой постоянной.

Расширение Вселенной открыл Хаббл, проведший работы по измерению спектров галактик. Хаббл обнаружил, что чем слабее галактика, тем больше смещение спектральных линий в спектре излучаемого этой галактикой света в сторону красной части спектра. Красное смещение спектральных линий истолковывается как доплеровское смещение и свидетельствует об удалении от нас далеких галактик. Скорость, с которой отдаленная галактика удаляется от нас, как оказалось, пропорциональна расстоянию до нее. Зависимость эта получила название закона Хаббла (закона красного смещения). Если движения далеких галактик экстраполировать во времени назад, то оказывается, что «большой взрыв» должен был произойти примерно $(1-2) \cdot 10^{10}$ лет назад.

До середины 60-х годов нашего столетия наблюдения красного смещения галактик были, по существу, единственными конкретными данными, которыми располагала космология. В 1965 г. Пензиас и Вилсон открыли микроволновое фоновое радионизлучение¹.

¹ Идея очень горячей начальной среды была высказана Гамовым [25] (см. об этом далее). Он предсказал температуру фонового излучения 6°K

Они установили, что Земля подвергается непрерывному облучению радиоволнами с длиной волны 7,5 см, приходящими с одинаковой интенсивностью со всех направлений космического пространства. Это открытие было подтверждено другими исследователями, зарегистрировавшими радиоизлучение во всем наблюдаемом диапазоне радиоволн, а наблюдения за межзвездными молекулами показали, что до длины волны порядка 1 мм излучение совпадает по форме спектра с излучением абсолютно черного тела с температурой 2,7° К. Простейшим объяснением этого фонового излучения может служить предположение о том, что названное радиоизлучение представляет собой остаточное явление, сохранившееся от стадии первоначального горячего состояния Вселенной, когда ее вещество было очень плотным и, естественно, имело гораздо более высокую температуру, чем в настоящее время. При достаточно высокой плотности и температуре вещества оно ионизируется и его излучение приобретает характер излучения абсолютно черного тела. Когда температура вещества падает до достаточно низкого уровня, так что вещество, состоящее преимущественно из водорода, получает возможность рекомбинации в нейтральную форму, взаимодействие между излучением и веществом становится очень слабым и излучение может свободно уходить в пространство, расширяясь вместе с Вселенной. При таком расширении интенсивность излучения уменьшается и фотоны претерпевают красное смещение, в результате чего спектр излучения сохраняет форму спектра абсолютно черного тела, а температура при этом продолжает постепенно снижаться.

Не все астрономы согласны с тем, что изотропное излучение фона имеет тепловое происхождение или что оно подчиняется закону Планка. Высказывались различные предположения о том, что источниками излучения могут служить неизвестные излучатели, в больших количествах изотропно распределенные в космическом пространстве. Большинство таких предположений основывается на очень сложных моделях этих неизвестных из-

лучателей и многих произвольных предположениях. Очевидно, необходима некоторая альтернативная модель (возможно, и сложная), если истинная космологическая модель должна быть стационарной, например, такой, которая никогда не проходила в своем развитии фазы высоких плотности и температуры.

Если, исходя из общего смысла модели расширяющейся Вселенной Фридмана, предположить, что плотность вещества Вселенной в настоящее время меньше некоторой критической величины — несколько меньше 10^{-29} г/см³, то Вселенная будет расширяться постоянно и мы можем считать ее открытой. С другой стороны, если плотность больше критической величины, то расширение со временем прекратится и снова начнется сжатие в сторону бесконечной плотности. Такую космологическую модель мы называем замкнутой Вселенной. Критическая плотность вещества при этом зависит от точного значения постоянной закона Хаббла.

Предлагалось много вариантов общей теории относительности Эйнштейна. Все они вносили лишь незначительные изменения в соответствующие космологические теории. В настоящей статье будет рассмотрено лишь одно из таких предложений, привлекающее к себе довольно большое внимание за последние годы — скалярно-тензорная общая теория относительности. Теория относительности Эйнштейна, характеризуемая тензорным гравитационным полем, дополняется скалярным гравитационным полем. Эта теория позволяет предсказывать некоторые особенности поведения космологической модели, отличающие ее от модели Вселенной Фридмана. К этим особенностям относятся очень быстрое расширение на ранней стадии развития космологической модели и изменение со временем гравитационной постоянной закона тяготения Ньютона. Прямые, поддающиеся измерению результаты сложения скалярного поля с тензорным весьма незначительны, и экспериментальные исследования пока не дают оснований отдать предпочтение какой-либо из этих двух теорий [39].

ФИЗИКА РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

За последние несколько лет между двумя областями науки — физикой частиц высоких энергий и космологией — отмечалось довольно тесное взаимодействие, которому в значительной степени способствовало открытие фонового микроволнового излучения, позволившее предположить, что Вселенная когда-то

вместо наблюдаемых на сегодняшний день 2,7° К. А. Т. Дорошкевич и И. Д. Новиков [2] указали, что излучение фона будет превосходить суммарное излучение источников радиоизлучения и звезд в диапазоне 0,1—10 см. Дикс и др. [20] предприняли экспериментальный поиск фонового излучения; когда им стали известны результаты, полученные Пензиасом и Вилсоном, то они не сразу их объяснили.

была весьма плотной и очень горячей и что она возникла при «большом взрыве». Одним из очень важных следствий такого взаимодействия явилась постановка проблемы — симметрична ли Вселенная относительно вещества и антивещества или несимметрична и обладает ли избытком одного или другого. Такое различие могло оказывать важное влияние на поведение Вселенной на очень ранней стадии ее развития, а в некоторых отношениях может иметь значение и в настоящее время, если допустить возможность проверки степени симметричности Вселенной. Сначала рассмотрим поведение несимметричной Вселенной, предполагая, что все видимые в пространстве галактики состоят из обычного вещества.

Рассмотрение начнем с момента, когда возраст Вселенной составлял приблизительно 10^{-43} сек. Характерный размер Вселенной, так называемый радиус Хаббла, выражается равенством $r=ct$, т. е. возрастом Вселенной, умноженным на скорость света. Это расстояние равно всего лишь $3 \cdot 10^{-33}$ см для $t = 10^{-43}$ сек, что намного меньше характерного радиуса любой из элементарных частиц, с которыми мы имеем дело во Вселенной сегодня, так называемого комптоновского радиуса; величина его обратно пропорциональна массе частицы. Радиусы обычных нейтронов и протонов составляют величину порядка 10^{-13} см, поэтому можно было бы сказать, что Вселенная, возраст которой равен 10^{-43} сек [27], еще недостаточно «стара», чтобы содержать в себе обычные нейтроны и протоны.

Если и возможно существование на этой стадии во Вселенной какого-либо вещества, то оно должно представлять собой либо нейтроны и протоны в сильно возбужденном барионном состоянии, либо какую-нибудь совершенно неизвестную нам форму вещества. Во всяком случае, можно предполагать, что во Вселенной, имеющей возраст 10^{-43} сек, частицы должны иметь массу порядка 10^{-6} г, чтобы они могли уместиться в пределах радиуса Хаббла. Такие частицы — чисто гипотетические, выходящие далеко за пределы существующей теории частиц и ее экстраполяций.

Состояние Вселенной в это время лучше всего описывается как хаотическое. Хаббловский радиус имеет величину, сравнимую с ожидаемыми квантовыми флуктуациями в строении Вселенной, если в какой-то степени объединить общую теорию относительности с квантовой механикой. Если умножить возраст Вселенной на энергосодержание (вклю-

чая массу покоя) объема, заключенного в пределах радиуса Хаббла, то в результате можно получить число порядка постоянной Планка \hbar . Это космологическое выражение принципа неопределенности Гейзенберга. Задаваться вопросом, что происходило во Вселенной в период более ранний, чем 10^{-43} сек, не имеет никакого физического смысла, так как отрезки времени такой величины тоже не имеют смысла вследствие энергетической неопределенности.

По мере развития Вселенной радиус Хаббла возрастает и число содержащихся в нем видов частиц растет. Эти частицы могут взаимодействовать друг с другом и достигать состояния термодинамического равновесия, а массы частиц, которые могут существовать во Вселенной, по мере увеличения радиуса Хаббла прогрессивно уменьшаются.

Характер физических явлений, происходящих во Вселенной в эту эпоху ее расширения, продолжает оставаться неопределенным, так как неизвестна форма спектра возбуждения массы бариона. Хагедорн предположил, что число состояний бариона, приходящихся на единицу интервала масс, возрастает экспоненциально, на основе чего можно ожидать, что Вселенная будет иметь конечную максимальную температуру, которая может быть достигнута на ранней стадии ее развития, порядка 10^{12} °К. Эта предельная температура достигается асимптотически по мере того, как масса покоя имеющих барионов растет до бесконечности. В варианте ранней космологии Хагедорна при расширении ранней Вселенной, обладавшей этой предельной температурой, характерные массы присутствующих в ней частиц должны прогрессивно уменьшаться [26]. Согласно этой картине могут происходить значительные изменения соотношения барионов и антибарионов. И только после того, как Вселенная достаточно расширилась, так, что большинство частиц, как ожидается, стали бы нейтронами и протонами, температура ее понизилась бы заметно ниже 10^{12} °К.

Однако если число состояний бариона, имеющих разную массу, возрастает с увеличением массы несколько медленнее, чем по экспоненте, то не существует верхнего предела температуры вещества и она может стать неограниченно высокой. В таком случае Вселенная на самой ранней стадии должна была в изобилии содержать как вещество, так и антивещество с небольшим преобладанием вещества над антивеществом по крайней мере в том районе Вселенной, в котором произошло образование нашей Галактики. По такой

космологической гипотезе вещество и анти-вещество постепенно аннигилировали до тех пор, пока после снижения температуры ниже 10^{12} °K не остались лишь избыточные барионы (превышавшие по количеству антибарионы), в результате эта локальная область Вселенной стала содержать вещество только в виде барионов (см., однако, соображения ниже).

При температурах Вселенной от 10^{11} до 10^{12} °K барионные пары не могут существовать вместе, однако λ - и μ -мезоны могут существовать в изобилии. По мере дальнейшего расширения и охлаждения Вселенной исчезают λ -мезоны, а затем и μ -мезоны. В результате содержание оставшейся материи характеризуется наличием некоторого количества нейтронов и протонов, электрон-позитронных пар с небольшим преобладанием электронов, мюонного нейтрино и антинейтрино, электронного нейтрино и антинейтрино, а также фотонов. После исчезновения μ -мезонов μ -мезонное нейтрино и антинейтрино больше не взаимодействуют с оставшимися частицами. При снижении температуры ниже $5 \cdot 10^9$ °K электронные нейтрино и антинейтрино больше не взаимодействуют с обычным веществом и электрон-позитронные пары вскоре после этого исчезают вследствие аннигиляции (см. [3, 36, 58]). Электронные нейтрино отсоединились (перестали взаимодействовать) от остальной материи раньше, чем наступили температуры, соответствующие уровню диссипации электрон-позитронных пар. Как электронные, так и мюонные нейтрино и антинейтрино вносят свой вклад в плотность энергии и давление, что способствует расширению Вселенной, однако влияние этих частиц на физические события во Вселенной ограничивается лишь таким косвенным воздействием [39].

В то время когда в расширяющейся Вселенной присутствовали электрон-позитронные пары, они взаимодействовали с присутствующими нейтронами и протонами, вследствие чего происходило их взаимное превращение друг в друга. В результате между протонами и нейтронами установилось равновесие, при котором протонов оказалось несколько больше, чем нейтронов, так как их масса несколько меньше, чем масса нейтронов. Предполагается, что ко времени, когда электрон-позитронные пары исчезли вследствие аннигиляции, число протонов примерно в семь раз превышало число нейтронов [39].

Когда температура снизилась до 10^9 °K, стало возможным существование сложных

ядер. Первое ядро возникло в результате сближения нейтрона с протоном, что привело к созданию дейтерия. Нейтрон и протон могут образовать ядро дейтерия с излучением фотона, но в то же время поглощение фотонов радиационного поля образовавшимися ядрами дейтерия снова приводит к их фоторасщеплению на нейтроны и протоны. Первоначально доминирует процесс фоторасщепления и может существовать лишь очень немного дейтерия. Но по мере снижения температуры равновесное состояние смещается в сторону увеличения количества дейтерия, присутствующего в среде.

В свою очередь, дейтерий может захватывать нейтроны, в результате чего образуется литий. Ядро этого элемента радиоактивно и имеет период полураспада 12 лет, что во много раз превышает рассматриваемое нами время расширения Вселенной, возраст которой составляет на этой стадии всего несколько минут. В результате происходящих между дейтерием и литием термоядерных реакций образуется гелий. При плотностях вещества, ожидаемых на этой стадии расширения Вселенной, указанные реакции проходят почти полностью до конца, в результате чего почти все нейтроны смеси преобразуются в гелий. Так как в веществе присутствует больше протонов, чем нейтронов, избыточные протоны так и остаются до окончания ядерных реакций. При этих условиях около четверти всего вещества становится гелием. К моменту, когда расширяющаяся Вселенная достигает возраста получаса, в ней остается очень мало дейтерия и лития [39].

Интересно, что количество образовавшегося таким образом гелия сравнимо с количеством гелия, присутствующего в настоящее время во всех звездах, как очень старых, так и совсем молодых. Количество гелия, образующегося в результате космологического синтеза ядер, колеблется от примерно 28% для замкнутой Вселенной до примерно 24% для открытой Вселенной. Различные теоретические исследования и данные наблюдений свидетельствуют о том, что такая распространенность гелия характерна для звезд почти повсеместно во Вселенной, однако, правда, пока еще не известно, достаточно ли одинакова по величине распространенность гелия на этих звездах, чтобы можно было причиной этого считать один и тот же процесс космологического синтеза ядер.

Количество дейтерия и He^3 , образующихся в модели замкнутой Вселенной, пренебрежимо мало, однако вполне возможно, что в от-

крытой Вселенной количество образующегося дейтерия и He^3 сравнимо с предполагаемым их количеством в первичной солнечной туманности, из которой могла возникнуть солнечная система. Если не будет выдвинута какая-нибудь иная версия образования дейтерия и He^3 , то высказанная нами гипотеза может явиться очень убедительным доказательством в пользу упомянутой несимметричной модели Вселенной и в пользу открытой модели нашей Вселенной [42, 55]. Однако до тех пор, пока все иные предположения об образовании дейтерия и He^3 не будут отвергнуты как несостоятельные, эту гипотезу нельзя считать справедливой.

Расширение Вселенной продолжалось. При этом в ее состав входили водород, гелий, электроны, фотоны, а также различные виды нейтрино и антинейтрино, не взаимодействующие, однако, с другими частицами. Фотоны продолжают интенсивно взаимодействовать с веществом, и, поскольку давление связано в основном с фотонами, вещество на данной стадии расширения Вселенной не способно разделяться на самогравитирующие тела, такие, как галактики или скопления галактик.

Когда возраст расширяющейся Вселенной достигает приблизительно миллиона лет, температура вещества и излучения падает примерно до 3000°K . К этому времени уже завершится рекомбинация гелия в нейтральную форму, и при такой температуре вследствие рекомбинации происходит образование нейтральных атомов водорода. В результате картина взаимодействия между веществом и излучением коренным образом меняется. До тех пор, пока водород был ионизованным, фотоны излучения могли проходить лишь относительно небольшие расстояния, прежде чем претерпеть комптоновское рассеяние на свободных электронах. Однако после рекомбинации возможно лишь релеевское рассеяние на нейтральных атомах водорода, и средняя длина свободного пробега фотонов начинает превышать хаббловский радиус Вселенной. Следовательно, после рекомбинации водорода фотоны могут неограниченно расширяться в пространстве, и именно они в данном типе космологической модели создают изотропный микроволновый фон с температурой $2,7^\circ \text{K}$. И только после такого отделения от излучения появляется возможность развития гравитационных неустойчивостей в веществе.

Теперь рассмотрим, что необходимо для симметричной Вселенной, в которой имеется одинаковое количество вещества и антивеще-

ства среди видимых галактик Вселенной. Предположительно всегда можно считать, что отсутствие баланса между веществом и антивеществом является следствием флуктуаций соотношения барионов и антибарионов в различных областях ранней расширяющейся Вселенной. Такое предположение носит временный характер, не дающий, естественно, объяснения явлениям. В последние годы Омнес предпринял попытку, исходя из тесных микроскопических смесей барионов и антибарионов, найти процессы, способные привести к разделению вещества и антивещества в масштабе по крайней мере галактики. Последующие теоретические разработки принадлежат главным образом Омнесу.

Упоминания в первую очередь заслуживают некоторые новые сообщения Паркера, сделанные на семинаре по физике ранней Вселенной в Аспене в июне 1972 г. Вернемся снова к хаотической Вселенной, когда ее возраст составлял 10^{-43} сек. При этом под хаосом следует понимать то, что различные области Вселенной, охватываемые хаббловским радиусом $3 \cdot 10^{-33}$ см, вносят флуктуирующие гравитационные потенциалы, содержащие огромное количество энергии. Паркер изучил последствия быстрого неанізотропного расширения Вселенной при указанных условиях и обнаружил, что при этом может происходить образование барионов — антибарионов, при котором сильные хаотические градиенты в гравитационном потенциале преобразуются главным образом в массу покоя и кинетическую энергию барион-антибарионных пар. Кроме того, образование пар происходит на расстояниях, несколько превышающих величину хаббловского радиуса, что дает возможность ввести механизм, способный обеспечить крупномасштабную однородность расширения Вселенной. Этот очень импонирующий механизм предсказывает создание равного количества барионов и антибарионов в любом микроскопическом объеме.

Я. Б. Зельдович и А. А. Старобинский [4, 57] объяснили важность образования пар в анизотропно расширяющейся Вселенной. Влияние образованных пар состоит в придании расширению изотропного характера, что является шагом вперед в объяснении закона расширения Фридмана.

Основная гипотеза Омнеса состоит в том, что при температурах, превышающих $3 \cdot 10^{12}^\circ \text{K}$, происходит фазовое разделение барионов и антибарионов [33]. Существование этих фаз представляется очень спорным, и мы здесь не будем касаться деталей этого во-

проса. Достаточно лишь сказать, что, согласно гипотезе Омнеса, в статистическом смысле барионы и антибарионы не могут очень сильно сближаться друг с другом и сохраняют свою индивидуальность, в то время как барионы к барионам и антибарионы к антибарионам могут приближаться бесконечно близко. Это приводит к ожидаемому обособлению барионов и антибарионов в две конденсированные фазы, причем ко времени, когда температура Вселенной снизилась примерно до $3 \cdot 10^{12}$ °К, размер отдельных капель барионов и антибарионов достиг величины порядка $3 \cdot 10^{-4}$ см, причем каждое сгущение содержит около 10 кг вещества.

После падения температуры ниже $3 \cdot 10^{12}$ °К термодинамические условия, способствовавшие до этого разделению барионной и антибарионной фаз, больше не являются низшим состоянием термодинамической энергии. Омнес предполагает, что на этой стадии в обособленных сгущениях начинается взаимная диффузия барионов и антибарионов, ведущая к аннигиляции. Процесс взаимного уничтожения длился до тех пор, пока температура Вселенной не упала примерно до $3 \cdot 10^8$ °К. К этому времени большая часть первоначального вещества и антивещества исчезла вследствие взаимного уничтожения, отдав энергию в фотонное поле, в результате чего количество барионов или антибарионов сократилось примерно до 10^{-8} на один фотон.

На этой стадии развития Вселенной все еще существуют две обособленные фазы вещества и антивещества. По границе между этими двумя областями продолжает происходить аннигиляция барионов и антибарионов. Но по мере дальнейшего снижения температуры во Вселенной в ней начинается новый процесс, который Омнес называет стадией соединения. Вследствие аннигиляции возникают относительные движения отдельных образований вещества и антивещества, причем скопления вещества отталкиваются от скоплений антивещества, что обусловлено процессом аннигиляции по общей границе. Однако при встрече отдельных фрагментов вещества (или фрагментов антивещества) друг с другом они сливаются.

Следует отметить, что в этих условиях, когда температура Вселенной составляла около 10^8 °К, гелий или другие легкие элементы образовываться не могут. Тогда окружающее пространство уже не представляет собой плазму из электрон-позитронных пар, и, следовательно, при указанной температуре взаимопревращения нейтронов в протоны не проис-

ходит. Так как нейтроны, оставшиеся после исчезновения электрон-позитронных пар, обладают способностью более быстрой диффузии, чем протоны, уничтожение нейтронов, а также антинейтронов на стадии аннигиляции происходит несколько эффективнее. Таким образом, в симметричной Вселенной этого типа образование больших количеств первичного гелия (или антигелия) не происходит, а в рассматриваемой космологической модели требуются какие-то иные процессы, которые могли бы послужить причиной образования больших количеств гелия на догалактической стадии развития Вселенной.

По мере расширения Вселенной количество материала в отдельных сгущениях вещества и антивещества на стадии соединения продолжало быстро расти. Частично это происходило потому, что во Вселенной на данной стадии развития стали возможными движения вещества и излучения с довольно большой скоростью в связи с тем, что скорость звука не намного меньше скорости света. Однако при снижении характерной температуры излучения до 3000° К, при которой происходит рекомбинация водорода в нейтральную форму, скорость звука в несвязанном веществе резко падает и скорость движения такого вещества во Вселенной сильно замедляется. Все это привело к окончанию стадии соединения, а практически и к прекращению взаимного уничтожения вещества и антивещества на границе между отдельными фазами. По подсчетам Омнеса, на этой стадии эволюции Вселенной отдельные скопления содержат в себе вещество, по количеству соответствующее по крайней мере типичной галактике. Вопрос о том, что сгущения должны содержать вещество в количестве, достаточном для образования скопления галактик, не снимается с обсуждения. Космологическая теория Омнеса, рассматриваемая в следующем разделе, была бы более последовательной, если допустить, что к этому времени сгущения вещества выросли до размера скоплений галактик.

В заключение следует отметить, что модели как симметричной, так и несимметричной Вселенной ведут к получению очень сходных результатов, причем космологическая модель симметричной Вселенной предполагает, что все скопления галактик состоят либо из вещества, либо из антивещества, а космологическая модель несимметричной Вселенной предполагает, что все видимые галактики состоят из вещества. Имеющиеся в нашем распоряжении средства не позволяют прямым

наблюдением подтвердить достоверность той или иной гипотезы. Тем не менее сторонники космологической модели симметричной Вселенной отрицают возможность образования больших количеств гелия в результате космологического синтеза ядер, а сторонники несимметричной модели синтеза ядер не только предсказывают образование в результате космологического ядерного синтеза гелия в больших количествах, но, возможно, и дейтерия, и He^3 , если допустить, что мы живем в открытой Вселенной.

ПРЕДГАЛАКТИЧЕСКАЯ ЭПОХА

Проблема гравитационной неустойчивости среды, обладающей собственным тяготением, была впервые рассмотрена много лет назад сэром Джеймсом Джинсом. Согласно теории Джинса, существует критическая длина, получившая название длины волны неустойчивости Джинса, при которой возмущения с длиной волны, большей, чем длина волны неустойчивости, нестабильны в условиях гравитационного сжатия среды, в то время как возмущения с меньшей длиной волны претерпевают затухание и распространяются в виде гигантских звуковых волн.

Е. М. Лившицем [7] было проведено всестороннее изучение возмущений, наложенных на изотропное однородное решение Фридмана, в том числе одновременные возмущения излучения и плотности вещества, вращательное движение и гравитационные волны. А. Т. Дорошкевич, И. Д. Новиков и Я. Б. Зельдович [1] добавили к этому еще возмущение плотности вещества на фоне невозмущенного фонового излучения. Такие возмущения остаются скрытыми до тех пор, пока не произойдет рекомбинация водорода в расширяющейся Вселенной.

Если допустить, как это сделали Пиблз и Дике [40], что после стадии рекомбинации водорода во Вселенной вещество содержит возмущения плотности очень разных масштабов, то те из наиболее частых возмущений, которые могут стать гравитационно неустойчивыми, должны иметь длину волны, близкую к длине волны неустойчивости Джинса. Однако теоретической основы, позволившей бы определить ожидаемую величину таких флуктуаций плотности Вселенной того времени, сейчас не существует. Если флуктуации плотности очень малы, то для проявления ее в расширяющейся Вселенной требуется длительное время, так же как потребуются длительное время на то, чтобы произошла

фрагментация флуктуирующего вещества и его обособление от соседнего вещества. Следовательно, время фрагментации в расширяющейся Вселенной может быть очень большим.

На стадии рекомбинации атомов водорода вещество и излучение расширяются вместе со Вселенной. По окончании рекомбинации расширение излучения продолжается вместе с расширением Вселенной. Вещество обладает высокой скоростью внешнего расширения, а рост возмущений плотности происходит намного медленнее. Таким образом, любой фрагмент вещества должен пройти длительный период расширения, прежде чем в нем начнут преобладать силы собственного тяготения, способные приостановить дальнейшее расширение, вслед за чем последует сжатие в более плотное состояние.

Чем слабее флуктуации плотности вещества после стадии рекомбинации, тем сильнее последующее расширение фрагмента вещества до достижения им минимальной плотности. Так, например, если флуктуации плотности, происходящие после рекомбинации, достигают 1%, то последующее расширение и реколлапс вещества займут около 3 или $4 \cdot 10^9$ лет. Быстрое образование галактик во Вселенной возможно лишь при условии, что флуктуации плотности намного превышают 1%. Скорее всего, такие флуктуации плотности происходят в сильно возбужденной Вселенной типа Вселенной Омнеса, чем в однородной несимметричной Вселенной.

После стадии рекомбинации длина волны неустойчивости Джинса охватывает вещество с массой около 10^6 солнечных масс. На основании этого Пиблз и Дике [40] сформулировали теорию образования первичных шаровых скоплений с массой около 10^5 — 10^6 солнечных масс. Однако не следует придавать очень большого значения величине 10^6 солнечных масс, поскольку она представляет собой минимальную массу, не устойчивую к гравитационному коллапсу. Все флуктуации плотности, характеризующиеся большими массами вещества, тоже нестабильны в отношении гравитационного коллапса. Подобные флуктуации плотности могут достигать больших размеров и содержать вещество с массой, равной массе галактики и даже скопления галактик. Такие крупномасштабные флуктуации плотности, по-видимому, уступают по амплитуде флуктуаций плотности меньшим по размерам флуктуациям, близким к длине волны неустойчивости; поэтому более вероятно, что рост флуктуаций меньшего размера в расширяющейся Вселенной проис-

ходит быстрее. Таким образом, вырисовывается картина, в соответствии с которой гравитационная неустойчивость может иметь место в очень широком диапазоне масштабов длины, причем происходит конденсация отдельных масс размером порядка 10^6 солнечных масс, которые сосредоточиваются вокруг общих гравитационных центров, которые, в свою очередь, концентрируются вокруг других более крупных гравитационных центров и т. д.

Однако следует отметить, что по мере того, как вещество продолжает расширяться (к состояниям все меньшей плотности), его количество, охваченное джинсовской длиной, все более уменьшается. При этом происходит разделение вещества и излучения и в состоянии максимального расширения вещество может стать крайне холодным. Эта температура может упасть ниже 1°K . При таких условиях длина волны неустойчивости может охватить только 1000 солнечных масс. Значит, можно предположить, что масса наиболее распространенных флуктуаций в расширяющейся Вселенной характеризуется величиной порядка нескольких тысяч солнечных масс.

По мере обратного возвращения вещества из состояния максимального расширения рост температуры, вызванный адиабатическим сжатием, в конечном итоге затормаживается, что обусловлено процессами охлаждения, протекающими внутри газа. Наиболее важен процесс охлаждения в результате образования молекул водорода, обусловленного присутствием немногочисленных электронов, оставшихся после стадии рекомбинации в ходе расширения Вселенной. При захвате таких электронов атомами водорода могут образоваться отрицательные ионы водорода, способные легко присоединять другие атомы водорода, что приводит к образованию молекулы водорода и высвобождению электрона. Таким образом, электрон в этом процессе играет роль катализатора, и это происходит до тех пор, пока он не встречает положительный ион водорода и после захвата этим ионом не образует с ним нейтральный атом водорода. При температуре, достаточно высокой (порядка 250°K) для того, чтобы вызвать значительное возбуждение низких энергетических состояний молекулы водорода, инфракрасное излучение, сопровождающее успокоение молекул, может вызвать охлаждение сжимающегося газа. По мере ускорения сжатия газа процесс образования молекул водорода ослабевает в связи с постепенным уничтожением всех оставшихся электронов, а быст-

ро возрастающее сжатие газа постепенно ведет к повышению температуры, которая достигает такого уровня, что начинается термическое разложение молекул водорода. На этой стадии, когда плотность вещества достигла приблизительно 10^{10} атомов водорода на 1 см^3 , длина волны неустойчивости в сжимающейся материи способна вместить всего лишь около 60 солнечных масс. Предположительно газ может разделяться таким образом на звезды, имеющие массу в пределах от 10^2 до 10^3 солнечных масс [56].

Естественно ожидать, что прямым следствием расширения и сжатия вещества Вселенной на ранней стадии ее эволюции было образование ряда очень массивных догалактических звезд. Эти звезды могут состоять из чистого водорода, если справедлива модель симметричной Вселенной, или четверть их массы может состоять из гелия. В любом случае их поведение отличается от поведения обычных звезд Вселенной в наше время. Исследованием массивных звезд, состоящих только из водорода и гелия, занимались Эзер и Камерон [22]. В отличие от обычных звезд такой же массы, эти звезды гораздо более плотны, так как для преобразования водорода в гелий при отсутствии на первых порах ядер-катализаторов таких элементов, как углерод, азот и кислород необходима очень высокая внутренняя температура. Это означает, что радиусы звезд аномально малы, а температура их поверхности составляет величину порядка $10^5 \text{ }^\circ \text{K}$. Рассматриваемые звезды характеризуются огромным потоком ультрафиолетового излучения, которое, естественно, будет вызывать ионизацию всего оставшегося водорода и остатков гелия во Вселенной, не принявших участия в образовании звезд на данной стадии эволюции.

Исследование звезд, состоящих из чистого водорода, в соответствии с симметричной моделью Вселенной еще не получило достаточного развития. Возможно, что динамический коллапс, послуживший причиной образования этих звезд, мог привести к такому их разогреву, что в результате захвата электронов произошло внезапное превращение водорода в нейтроны, сопровождавшееся образованием больших масс гелия и взрывом звезды. Если эти звезды способны к образованию устойчивых объектов, то по своему поведению они не должны отличаться от описанных выше водородно-гелиевых звезд. Основным вопросом заключается в том, способны ли звезды образовывать такую большую массу гелия и выбросить его в пространство в таком количестве,

чтобы оставшийся в пространстве газ мог содержать $\frac{1}{4}$ часть гелия, что могло бы объяснить распространенное в большинстве современных звезд Вселенной соотношение водорода и гелия, по-видимому, восходящее к догалактическому образованию гелия.

В конечном итоге в процессе эволюции этих массивных звезд могли произойти вспышки сверхновых звезд или массивные звезды могли коллапсировать с образованием черных дыр. Не исключено, что могло случиться и то и другое. Можно предполагать, что эти звезды первоначального поколения концентрировались в пространстве в массы по меньшей мере порядка скоплений галактик. Видимо, количества вещества галактик в скоплениях галактик недостаточно, примерно на порядок величины, для обеспечения гравитационной связи галактик в таких скоплениях, которая могла бы их удерживать от рассеяния в пространстве в процессе развития Вселенной. Это несоответствие массы можно было бы объяснить тем, что большинство звезд первоначального поколения претерпели коллапс с образованием остатков черных дыр, распределенных более или менее равномерно в объеме, занятом скоплением галактик [52].

С другой стороны, некоторые факты свидетельствуют в пользу того, что вспышки сверхновых звезд должны были иметь также место и среди звезд первого поколения. Трудно объяснить наблюдаемое присутствие в составе звезд галактической короны тяжелых элементов, если не признать, что содержащиеся в этих звездах тяжелые металлы не образовались также в догалактическую эпоху. Если вспышки сверхновых звезд происходили среди некоторых водородно-гелиевых или чисто водородных звезд первого поколения, то следует ожидать, что вещество при этом каким-то образом трансформировалось, как будет показано в следующем разделе, в более тяжелые элементы. Эти элементы рассеялись в газовой среде, из которой потом при конденсации образовались галактики [52].

Во всяком случае, представляется, что разреженный газ, который не участвовал в образовании звезд начального поколения, совместно с газом, выброшенным в результате вспышек сверхновых звезд или возникшим в результате звездной переменности и звездного ветра, подвергается сильному нагреву. Интенсивное ультрафиолетовое излучение звезд начального поколения нагревало относительно разреженный газ до температуры порядка 10^5 °К. Кроме того, вспышки сверхновых звезд, происходящие в такой газовой

среде, могли, как показали А. Т. Дорощкевич, Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков [1], привести к нагреву газа до еще более высокой температуры. Это могло вызвать расширение разреженного газа по всему объему, занимаемому скоплением галактик, и образование по всему этому объему общей газовой оболочки. В эту оболочку случайно могут быть занесены продукты синтеза ядер звездного вещества, в том числе тяжелые металлы и, возможно, большие количества гелия. В частности, тяжелые металлы должны были сильно увеличить эффективность охлаждения газа и привести к возникновению внутри газа локальных холодных областей.

Поскольку местные охлаждения в газовой среде должны были вызвать местные снижения давления, то в таких холодных областях должна была увеличиться плотность и возникнуть флуктуации плотности, вокруг которых в газовой среде мог начаться рост гравитационной неустойчивости. Так можно представить себе механизм образования ядер галактик внутри общей газовой оболочки, окружающей скопление галактик. После образования галактического ядра могло продолжаться падение вещества в направлении таких галактических ядер, в результате чего увеличивались размеры галактик. Имеется много данных, свидетельствующих о том, что выпадение такой массы все еще продолжается в нашей Галактике и сейчас [34].

В литературе не существует единого мнения относительно того, как эти вновь образовавшиеся галактики могли приобрести угловой момент движения. По предположению Пиблза [37], угловой кинетический момент движения приобретается галактиками в результате приливных возмущений, имеющих место во время процесса фрагментации на стадии расширения Вселенной. Оорт [34] подверг сомнению эту теорию с количественной точки зрения, но в дальнейшем Пиблз [38] продолжал ее отстаивать. В свою очередь, Оорт выступил с гипотезой, согласно которой в расширяющейся Вселенной, которая содержит высокотурбулентное вещество, галактики приобрели свой угловой момент движения под влиянием вихрей турбулентного вещества.

Турбулентная теория также развивалась Л. М. Озерным и др. [8]. Сторонниками точки зрения, состоящей в том, что начальные возмущения — это акустические волны в смеси фотонов с ионизированным газом, являются А. Т. Дорощкевич, Р. А. Сюняев, Я. Б. Зельдович [21, 58] (см. обзор в [3]).

ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

Каков бы ни был механизм, вызвавший начало коллапса галактических масс газа и последовавшее за этим образование галактик, по морфологическим формам галактик мы почти не можем давать каких-либо выводов о характере этого коллапса. Галактики отличаются большим разнообразием форм, и не исключено, что причиной этого являются незначительные различия в распределении угловых моментов движения первоначально коллапсировавших облаков газа.

Можно начать с эллиптических галактик, характеризующихся почти сферично-симметричным распределением звезд в пространстве. Подобное распределение возможно только при условии, что звезды имеют почти радиальные орбиты. Такие звезды проходят близ центра своих галактик, а затем удаляются от центра на значительные расстояния. Общий угловой момент движения таких галактик очень невелик. С увеличением общего углового момента галактики степень сплюснутости ее растет. Когда система звезд становится достаточно уплощенной, в центральной плоскости галактики начинают появляться газ и межзвездная пыль, а в ходе дальнейшего увеличения сплюснутости количество газа и пыли еще более возрастает. Очевидно, звезды в таких галактиках имеют почти круговые орбиты, и, конечно, звезды, образовавшиеся из газа и пыли, должны иметь почти круговые орбиты, лежащие в центральной плоскости галактики.

Системы, в которых газ и пыль присутствуют в больших количествах, характеризуются обычно наличием спиральных рукавов. Они становятся все более заметными, так как спиральные рукава являются местом образования звезд в таких галактиках, и горячие массивные голубые звезды ясно отмечают положение рукавов. Кривизна спиральных рукавов и число их оборотов вокруг центра галактики заключены в широких пределах.

В некоторых галактиках распределение звезд в центральной области — почти сферическое, а в других образуется вытянутая перемычка. Центральные полосы спиральных галактик с перемычками, по-видимому, образовались вследствие особенностей распределения углового момента поступающего извне газа. Если такой газ, приняв форму диска, вращается примерно с постоянной угловой скоростью, то, не обладая достаточной устойчивостью, он неизбежно деформируется и принимает вид перемычки.

Некоторые галактики совсем не имеют сильной концентрации звезд к центру. Такие системы характеризуются высоким отношением количества газа к звездам и называются неправильными галактиками.

Рассмотрим сначала некоторые характеристики спиральных галактик. Мы располагаем наиболее полными знаниями о галактиках этого типа, так как наша собственная Галактика, очевидно, представляет собой типичную спиральную галактику.

Время, необходимое для того, чтобы первоначальный галактический газ коллапсировал из объема пространства, занимаемого в настоящее время галактическим гало (короной), и образовал диск, составляет около $2 \cdot 10^8$ лет. Эта величина получена на основе неизбежно грубых расчетов, так как первоначальный объем, занимаемый газом в начале коллапса, мог значительно превышать объем, который занимают звезды в настоящее время в почти сферическом галактическом гало. Естественно поэтому предполагать, что звезды галактической короны образовались в результате конденсации газа на стадии коллапса. Движения звезд галактической короны характеризуются наличием больших радиальных компонент.

Обилие тяжелых элементов в звездах галактической короны обычно в три раза меньше, чем на Солнце, и лишь в некоторых крайне редких случаях в несколько сотен раз. Маловероятно, что коллапсирующий газ имеет достаточно времени для образования первоначальной популяции звезд, в которых могли бы в процессе развития образоваться путем ядерного синтеза тяжелые элементы, выбрасываемые при вспышках сверхновых звезд обратно в коллапсирующий газ, вслед за чем могло последовать образование второго поколения звезд, содержащих тяжелые элементы. Таким образом, присутствие в этих звездах тяжелых элементов может служить аргументом в пользу существования стадии догалактического звездного ядерного синтеза.

После того как газ принял форму диска, происходило образование звезд с почти круговыми орбитами в плоскости диска. После образования такой звезды ее орбита может подвергаться гравитационным возмущениям в результате сближения с другими звездами, скоплениями звезд или облаками межзвездного газа. Вследствие таких возмущений, по мере старения, звезда может отклоняться на все более значительные расстояния от центральной плоскости галактики. Более старые звезды, относящиеся к населению диска на-

шей Галактики, имеют распределение по расстояниям от центральной плоскости галактики, соответствующее толщине порядка 400 парсек. Звезды же, образовавшиеся в более близкие к нам эпохи развития галактики, ограничены меньшей толщиной, порядка 200 парсек.

Наиболее разработанной количественно и самой перспективной современной теорией спиральных рукавов является, по-видимому, теория волн плотности [30, 31, 44, 45]. Согласно этой теории, звезды в галактическом диске могут в течение длительного времени под действием гравитационных сил группироваться. Такое гравитационное сгущение, или волна плотности, начинает распространяться через распределение звезд в диске галактики со скоростью, примерно равной половине скорости обращения самих звезд. Например, можно ожидать, что на расстоянии Солнца от центра галактики такая звезда, как Солнце, затратит около 10^8 лет на перемещение от одного спирального рукава до другого, а затем еще 10^8 лет на перемещение в пределах следующего спирального рукава. К концу своего перемещения она совершит один оборот вокруг центра галактики. Это относится к простой модели спиральной галактики с двумя рукавами. В действительности модель нашей Галактики может оказаться несколько более сложной.

Для того чтобы понять, как происходит образование звезд в пределах нашей Галактики в настоящее время, необходимо прежде всего рассмотреть некоторые свойства межзвездной среды [48]. Межзвездное вещество включает газ и пыль, расположенные между звездами. Пыль состоит из мелких твердых частиц размером несколько менее микрона и сильно перемешана с межзвездным газом. Именно присутствием межзвездной пыли объясняется интенсивное поглощение света звезд в некоторых направлениях в нашей Галактике, проявляющееся в виде темных пятен на фотографиях отдельных участков Млечного Пути.

Состав межзвездного газа близок к составу Солнца. Около $\frac{3}{4}$ его массы составляет водород, около $\frac{1}{4}$ — гелий и лишь около 1,5% — тяжелые элементы, в большинстве случаев сконденсированные в межзвездные пылинки.

При облучении атомов межзвездного водорода электромагнитным излучением с энергией фотонов выше 13,6 эв может произойти ионизация водорода. Рассмотрим водород, находящийся вблизи очень горячей, массивной звезды высокой светимости. Благодаря высо-

кой температуре на поверхности такой звезды большая часть излучаемой ею энергии будет приходиться на ультрафиолетовую область спектра. Большинство излучаемых ею фотонов могут обладать энергией, близкой к 13,6 эв и выше. Поэтому под действием мощного потока ультрафиолетового излучения водород, находящийся по соседству со звездой, очень быстро ионизируется.

Рассмотрим теперь окружающее такую звезду непрерывное водородное облако большой протяженности. Под действием ультрафиолетового излучения в нем происходит ионизация ближайших к звезде масс водорода. Ионизированный водород перестает поглощать излучение звезды, которое начинает проникать все дальше в окружающее пространство, ионизируя на своем пути новые массы водорода. Если бы ионизированный водород продолжал оставаться в состоянии ионизации, то описанный процесс мог бы продолжаться бесконечно долго и можно было бы ожидать, что звезда будет ионизировать газ на неопределенно большом расстоянии.

Однако водород не остается в ионизированном состоянии неограниченно долгое время. В нем происходят непрерывные процессы рекомбинации, вновь возвращающие его в нейтральное состояние. Атомы такого нейтрального водорода тоже не остаются нейтральными неопределенно долгое время, так как под действием ультрафиолетового облучения они снова ионизируются. Однако чем больше расстояние, на котором происходит ионизация звездой окружающего ее водорода, тем больше область, в которой одновременно происходит рекомбинация водорода. В ходе этого процесса происходит ослабление интенсивности ультрафиолетового излучения, распространяющегося все далее по мере ионизации нейтрального водорода.

Таким путем достигается естественный предел дальности ионизации водорода звездным светом. Этот предел достигается тогда, когда общее число нейтральных атомов водорода, ионизирующихся в каждую секунду, становится равным общему числу атомов водорода, рекомбинирующих в нейтральное состояние в каждую секунду. В результате вокруг такой горячей звезды может образоваться сфера ионизированного водорода с очень резким переходом от ионизированного водорода к нейтральному на поверхности сферы.

Поглощение нейтральным водородом фотонов ультрафиолетового излучения приводит к нагреву образующегося при этом ионизиро-

ванного водорода. Большинство поглощаемых фотонов обладает энергией, несколько большей, чем 13,6 эв. Поэтому в процессе поглощения на расщепление атома водорода затрачивается 13,6 эв, а оставшая энергия превращается в кинетическую энергию высвобождающихся при этом протона и электрона. Эта избыточная энергия быстро распределяется между другими участвующими в процессе частицами, вызывая сильный нагрев ионизированного газа.

Охлаждение ионизированного газа может происходить тоже по-разному. Типичным можно считать процесс, при котором происходит столкновение между протоном и электроном с излучением фотона, но без рекомбинации протона и электрона. При этом уходящий от протона электрон обладает меньшей кинетической энергией, чем во время сближения. Образовавшийся при этом фотон обычно свободно покидает зону своего образования, унося с собой часть тепловой энергии зоны.

Приход энергии в зоне ионизированного водорода ограничен числом излучаемых горячей звездой фотонов, которые могут поглощаться нейтральными атомами водорода рассматриваемой зоны. С другой стороны, скорость эмиссии, вызываемой столкновениями протонов и электронов, быстро возрастает с увеличением температуры, следовательно, при некоторой температуре достигается равновесие, когда скорость поступления энергии в результате поглощения ультрафиолетовых фотонов становится равной скорости излучения энергии, высвобождающейся при столкновении протонов с электронами. Температура, при которой устанавливается равенство между поглощаемой и излучаемой энергией ионизированного водородного газа, составляет около 10 000° K.

Таким образом, в области межзвездной среды, где водородный газ нейтрален, ультрафиолетовый спектр звездного света обрывается по уровню энергии, несколько превышающему 13,6 эв, — уровню потенциала ионизации водородного атома. Фотоны с энергией, превышающей этот предел, поглощаются ионизированным водородом в зоне ионизации.

В области нейтрального водорода происходит ионизация некоторых элементов с потенциалом ионизации ниже 13,6 эв, в том числе всех тяжелых элементов. Помимо водорода, основными элементами, которые не подвергаются ионизации, являются гелий, азот, кислород и неон. Около $\frac{3}{4}$ ионов, содержащих-

ся в области нейтрального водорода, — ионы углерода.

Процессы ионизации, происходящие в областях нейтрального водорода, служат также источником тепловой энергии для этих областей, однако в значительно меньшей степени, чем для ионизированных областей. В областях нейтрального водорода протекают различные процессы охлаждения, связанные со столкновением электронов, ионов, нейтральных атомов, молекул и межзвездных пылевых частиц. Такое охлаждение происходит при столкновениях, в результате которых одна из частиц переходит в более высокое энергетическое состояние, что может сопровождаться деэвозбуждением путем излучения и выходом излучения за пределы области нейтрального водорода. Равновесие между нагревом и охлаждением газа наступает при температуре около 100° K, а в более плотных областях нейтрального водорода при несколько меньшей температуре (см. [5]).

Давление газа пропорционально его плотности и температуре. Рассмотрим пограничные зоны областей нейтрального и ионизированного водорода. Если бы плотность частиц в этих областях была одинаковой, то давление в ионизированной области превышало бы давление в нейтральной области примерно в 100 раз, и в результате такого дисбаланса давлений газы пришли бы в бурное динамическое движение. Равенство давлений могло бы быть достигнуто, если бы плотность области ионизированного водорода была в 100 раз меньше, чем плотность области нейтрального водорода, т. е. обратно пропорциональна температурам этих областей. Можно считать, что межзвездная среда всегда и всюду стремится к такому равновесию, при котором плотность областей ионизированного водорода в общем намного ниже, чем плотность областей нейтрального водорода. Однако образование звезд и вспышки сверхновых постоянно вносят изменения в местные скорости поступления тепловой энергии в межзвездную среду, поэтому процесс перестройки конфигурации, связанный с выравниванием давлений, происходит непрерывно, приводя к значительным динамическим перемещениям газа в межзвездной среде.

Предполагается, что в межзвездной среде количества водорода в ионизированном и нейтральном состоянии сравнимы. Поскольку плотность ионизированного газа намного меньше, чем плотность нейтрального газа, очевидно, что нейтральный газ будет занимать малую долю объема межзвездной среды.

Происходящее при этом скопление нейтрального водорода позволяет описывать межзвездную среду как состоящую из облаков нейтрального водорода, включенных в ионизированную область.

Описанная схема весьма упрощена, так как существуют и другие источники ионизации межзвездной среды, например космические лучи и мягкие рентгеновские лучи. Эти источники могут лишь повлиять на детали приведенной выше картины, не изменяя наиболее существенных ее характеристик.

В типичном межзвездном облаке силы собственного притяжения, стремящиеся сжать облако, обычно намного слабее сил теплового давления, стремящихся расширить облако. Расширению препятствует давление, существующее в окружающей среде (меньшей плотности) и равное давлению в облаке. Наличие давления во всей межзвездной среде обуславливается тем фактом, что газ удерживается полем общего гравитационного потенциала галактики. Таким образом, при нормальных условиях нет тенденции к сжатию какой-либо части межзвездной среды, а следовательно, и отсутствуют условия для образования звезд.

Рассмотрим последовательность процессов, совершающихся при поступлении газа межзвездной среды в спиральный рукав [44, 45]. Поскольку спиральный рукав представляет собой сосредоточение звезд, образующих гравитационную потенциальную яму, газ при входе в рукав претерпевает ударное замедление, нагреваясь при этом и уплотняясь. Межзвездное магнитное поле, силовые линии которого связаны с ионами, находящимися в межзвездном газе, и перемещаются вместе с газом, также сжимается и усиливается вследствие ударного эффекта при вхождении в спиральный рукав. Очевидно, при этом в конфигурации магнитного поля возникает неустойчивость, причем крупные участки поля становятся плавучими и начинают выпираться из галактической плоскости, позволяя газу, связанному с силовыми линиями, двигаться вдоль силовых линий и собираться в мешки, или облака, около галактической плоскости. Таков, по-видимому, общий механизм, при помощи которого образуются межзвездные облака при вхождении газа в спиральный рукав.

После образования облака в нем происходит постепенное уменьшение содержания тяжелых элементов и ионов, многие из которых определяют процессы охлаждения, протекающие в облаке. При своем обычном теп-

ловом движении внутри газа эти атомы и ионы, соударяясь с межзвездными частицами, прилипают к их поверхности. Таким образом, температура вновь образовавшегося облака вначале может быть относительно низкой, но со временем, по мере уменьшения количества охлаждающих агентов внутри облака, она возрастает.

С увеличением температуры облака соответственно падает его плотность, и не исключено, что по мере выхода газа из спирального рукава после пребывания там в течение $\sim 10^6$ лет облака расширяются и растворяются в среде, которая снова становится довольно однородной по плотности. Данные о присутствии облаков межзвездного газа в области между спиральными рукавами отсутствуют.

По-видимому, для коллапса межзвездного облака с последующим образованием звезд оптимален период его образования, так как некоторые облака могут иметь большую плотность, чем другие, в результате чего силы собственного притяжения становятся больше. Однако некоторые облака, подвергаясь поверхностному нагреву под влиянием нарождающихся поблизости горячих массивных звезд или вспышки близкой сверхновой звезды, могли претерпеть динамическое сжатие на более поздних стадиях своего развития.

Типичное межзвездное облако может обладать массой в несколько сотен или несколько тысяч масс Солнца, более вероятно, что коллапсу с последующим образованием звезд подвергаются облака, обладающие большей массой. Очевидно, при коллапсе облака происходит многократный процесс его дробления на отдельные центры конденсации, завершающийся в конечном итоге образованием большого количества молодых звезд. Если в образовании новых звезд участвует лишь часть газа, а остальной газ быстро удаляется из области образования звезд под действием ионизации ультрафиолетовыми лучами, сопровождающей образование новых горячих звезд, то вновь образующиеся звезды, не будучи гравитационно связанными друг с другом, могут свободно расходиться в пространстве. В Галактике наблюдается очень много таких расширяющихся ассоциаций, содержащих массивные и очень яркие звезды.

Очевидно, необходимо, чтобы газ в межзвездной среде обладал определенной минимальной плотностью для того, чтобы образование звезд могло проходить в потоке газа, подвергающегося ударному воздействию в спиральном рукаве [41]. Можно ожидать, что

эта минимальная плотность достигается вследствие истощения газа при образовании звезд вскоре после коллапса газа и образования галактического диска. В изолированной галактике дальнейшее образование звезд может происходить только при условии возвращения газа в межзвездную среду в ходе эволюции звезд. Хотя, как показывают наблюдения, этот процесс имеет место, есть сомнения в том, что количество газа, возвращающегося в межзвездное вещество, достаточно для объяснения наблюдаемого числа вновь возникающих в настоящее время в Галактике звезд.

Интересно отметить, что некоторые облака, обладающие высокой скоростью и наблюдаемые в галактической короне, интерпретировались как газ, впервые вторгшийся в Галактику из межгалактической среды [34]. Если такое вторжение газа продолжается непрерывно, что не противоречит картине, нарисованной в предыдущем разделе, то этот газ мог бы накапливаться в межзвездной среде и создавать избыточную плотность, необходимую для обеспечения стабильности процесса образования звезд при входе газа в спиральные рукава [41].

В эллиптической галактике возможны только первые стадии галактической эволюции этого типа. Сжатие газа, сопровождающееся образованием галактики, приводит, вероятно, к образованию звезд непосредственно из коллапсирующего газа. Из-за малой величины углового кинетического момента системы остаточный газ, сохранившийся после образования звезд в процессе коллапса, по-видимому, сосредоточивается около центра галактики, образуя звезды в окрестностях центра. В дальнейшем поступление в такую систему новых масс газа ведет к накоплению его около центра и образованию там звезд и т. д. Однако скорость образования звезд в такой галактике будет довольно низкой, если при этом не будет постоянного и достаточного по количеству поступления газа из галактической среды, как это, по-видимому, имеет место в нашей Галактике.

Пока еще не разработано какой-либо теории, объясняющей взаимодействие между газами и звездами в неправильных галактиках. Такие системы обладают неправильной и сложной геометрией, что затрудняет применение к ним теории волн плотности, однако по наличию в неправильных галактиках множества молодых горячих звезд можно судить о происходящем в них активном непрерывном процессе звездообразования.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД И СИНТЕЗ ЯДЕР

Звезда представляет собой огромный шар из раскаленного газа, сохраняющий свою форму благодаря действию собственных сил притяжения (подробнее о структуре звезд смотри работу [19]). С течением времени структура звезды заметно не меняется. Отсюда мы делаем вывод о том, что внутренние части звезд находятся в гидростатическом равновесии. Внутри звезды существует строгое равновесие между силой тяжести, направленной вниз, и тепловым давлением газа, противодействующим силе тяжести. В любой точке внутри звезды давление газа должно быть достаточным для того, чтобы поддерживать вес вышележащих слоев. При перемещении от этой точки внутрь масса вышележащих слоев вещества возрастает, и для того, чтобы поддерживать увеличивающийся вес этой массы, требуется более высокое давление. Давление возрастает от поверхности звезды к центру, и в общем плотность и температура газа также возрастают с приближением к центру. Для центральных областей обычных звезд, таких, как Солнце, типична температура порядка нескольких миллионов градусов по шкале Кельвина. При таких условиях электроны в атомах срываются со своих орбит и все компоненты газа полностью ионизируются. Поэтому газ ведет себя как идеальный при плотностях, превышающих плотность воды более чем в 100 раз (что, в частности, характерно для центра Солнца), так как ядра атомов по размерам во много раз меньше самих атомов и частицы располагают вполне достаточным простором для движения между соударениями.

В нормальных условиях возникающая внутри звезды энергия излучается ее поверхностью в виде электромагнитных волн. Для того чтобы энергия, рождающаяся в недрах звезды, могла достичь поверхности, необходимо непрерывное понижение температуры от высоких значений в центре до малых у поверхности. В принципе возможны три вида передачи энергии внутри тела звезды: теплопроводность, излучение и конвекция. Теплопроводность внутри звезды очень слаба, и поэтому ее участие в передаче энергии незначительно. Если температурный градиент внутри звезды не очень велик, то перенос энергии осуществляется главным образом путем распространения лучистой энергии. При этом излучение энергии происходит во всех точках внутри звезды, но поскольку интенсивность излучения пропорциональна четвер-

той степени температуры, то в областях с более высокой температурой интенсивность излучения больше, чем в областях с меньшей температурой. Поэтому диффузия фотонов внутри звезды происходит из областей с более высокой температурой в области с меньшей температурой.

При достаточно большой величине температурных градиентов становится возможным конвективный перенос. При конвекции тепло переносится веществом. Так, зародившийся где-либо в глубине звезды пузырек газа под действием сил плавучести начинает подниматься вверх и, пройдя некоторое расстояние, разбивается на более мелкие части, которые смешиваются с окружающим их веществом.

При этом газ, перемещающийся в звезде вертикально вверх, обладает более высокой температурой, чем газ, с которым он затем смешивается, в результате чего происходит эффективный перенос тепловой энергии массой движущегося газа.

Для того чтобы можно было теоретически определить структуру звезды, необходимо не только потребовать точного баланса давлений в любой точке (условие гидростатического равновесия), но необходимо также определить, как переносится энергия внутри звезды.

Удовлетворительными можно считать те модели звезд, в которых совместно решаются различные дифференциальные уравнения, описывающие эти процессы.

Энергия, излучаемая звездой в течение нескольких миллиардов лет, возникает в результате ядерных реакций, протекающих глубоко в ее недрах. Это реакции синтеза, при которых два относительно легких ядра сталкиваются и, сливаясь, образуют одно, более тяжелое ядро. Такие реакции синтеза сопровождаются выделением энергии. Поскольку скорости протекания термоядерных реакций очень сильно зависят от температуры, то высвобождающаяся в результате этих реакций энергия имеет значительную концентрацию вокруг центра звезды, где температура максимальная.

В типичной звезде, такой, например, как Солнце, $\frac{3}{4}$ массы состоит из легчайшего элемента — водорода. Так как на каждое ядро приходится только одна единица заряда, из всех возможных комбинаций ядер лишь между двумя протонами силы отталкивания Кулона будут наименьшими. Вследствие этого синтез ядер водорода в процессе термоядерной реакции будет происходить при наимень-

ших температурах, так как для достаточного сближения двух протонов необходимо минимальное количество относительной кинетической энергии.

Следует при этом отметить, что наиболее эффективными процессами генерации энергии являются процессы с участием ядер водорода.

Синтез четырех протонов с образованием ядра гелия может происходить различными путями. Некоторые из этих процессов начинаются с реакции между двумя протонами, в результате которой образуется дейтерий.

При захвате дейтерием еще одного протона образуется He^3 . При взаимодействии ядер He^3 друг с другом может образовываться He^4 с высвобождением двух протонов. В свою очередь, He^3 , взаимодействуя с ядром He^4 , может образовать изотоп бериллия Be^7 и после еще нескольких ядерных реакций захватить дополнительный протон и образовать ядро He^4 с высвобождением первоначального ядра He^4 , игравшего в этих реакциях роль катализатора.

В других ядерных реакциях происходит взаимодействие водорода с изотопами углерода, азота и кислорода. В результате этих реакций возникают связанные пары циклов ядерных реакций, в ходе которых ядра углерода, азота и кислорода последовательно преобразуются друг в друга.

Таким образом, все эти элементы выступают как бы в роли катализаторов процесса, конечным продуктом которого является одно ядро He^4 , образовавшееся из четырех ядер водорода.

Звезды, в центральной области которых происходит превращение водорода в гелий, называются звездами главной последовательности. Поскольку высвобождение имеющейся ядерной энергии в результате ядерных преобразований происходит в основном на стадии выгорания водорода и обращения его в гелий, то основная доля времени активной жизни звезды приходится на эту стадию. Предполагается, что Солнцу необходимо около 10^{10} лет на превращение водорода его центральной области в гелий, причем около половины этого времени уже прошло. После того как примерно 10% массы водорода в звезде типа Солнца в центральной области полностью превратилось в гелий, звезда не может долго оставаться стабильной и ее структура начинает относительно быстро меняться.

После того как весь водород в ядре такой звезды обратится в гелий, генерация энергии

внутри ядра прекращается. Поток энергии от центра звезды к ее поверхности должен продолжаться, поэтому энергия, которая раньше выделялась в центре звезды в ходе ядерных реакций, генерируется при сжатии центральных областей звезды. Однако уплотнение центральных областей длится не очень долго, поскольку сжатие ядра звезды приводит к повышению температуры вещества не только в центральных, но и в других внутренних областях звезды. Скоро эта температура повышается до уровня, достаточного для того, чтобы вызвать сгорание водорода в ходе термоядерных реакций в областях, окружающих ядро и еще содержащих водород. В результате этих реакций образуется слоевой источник энергии, поток которой, направляясь к поверхности, снова поддерживает звезду в состоянии относительно длительного равновесия, хотя при этом структура звезды изменяется гораздо быстрее, чем раньше, когда происходило сгорание водорода на стадии главной последовательности. Поскольку структура звезды снова становится относительно стабильной, то отпадает необходимость в высокой температуре в центре ядра звезды для поддержания энерговыделения. Поэтому передача энергии из центра звезды в менее нагретые области приводит к тому, что по всему ядру звезды, к этому времени полностью состоящему из гелия, устанавливается почти одинаковая температура.

В дальнейшем по мере выгорания водорода внутри слоевого источника значительное количество водорода внутри звезды превращается в гелий, присоединяющийся к гелиевому ядру звезды. Между тем слоевой источник сгорания водорода перемещается в массе звезды наружу. Ядро продолжает расти по массе и медленно сжиматься, оставаясь приблизительно изотермическим. В то же время внешние области звезды характеризуются несколько иным поведением. Расчеты, связанные с эволюцией звезд, показывают, что при наличии слоевого источника, в котором происходит сгорание водорода, и связанной с ним неравномерности состава звезды, имеющей гелиевое ядро и оболочку (в основном водородную), одновременно со сжатием ядра должно происходить расширение внешней оболочки звезды. В то же время в связи с тем, что энерговыделение происходит ближе к поверхности относительно распределения масс в такой звезде, ее яркость возрастает. Тем временем внешняя оболочка звезды расширяется. В связи с этим площадь поверхности звезды возрастает, и при данной светимости

звезды температура, необходимая для обеспечения выхода энергии, падает. Температура поверхности звезды, таким образом, снижается, и теперь относительно большие звезды приобретают красный цвет. Такие звезды получили название красных гигантов.

Проведено немного расчетов, посвященных эволюции звезд после стадии красных гигантов. Однако имеющиеся расчеты указывают на ряд особенностей эволюции. У звезды, ставшей красным гигантом, масса ядра которого уже достаточно увеличилась за счет сгорающего в оболочке водорода, ядро начинает довольно быстро сжиматься. Энергия такого ядра уже не успевает излучаться со скоростью, достаточной для поддержания приблизительно изотермического состояния, поэтому температура центрального ядра начинает значительно превышать температуру слоевого источника, где происходит сгорание водорода. Когда эта температура достигает величины порядка $(1 \div 2) \cdot 10^8$ К, начинаются термоядерные реакции сгорания гелия. В ходе этих реакций три ядра гелия могут соединиться и образовать одно ядро C^{12} , которое при захвате еще одного ядра гелия может преобразоваться в O^{16} . В звезде с относительно малой массой с началом сгорания гелия начинается довольно значительное расширение ядра, и подобно тому, как раньше уплотнение ядра вызывало расширение оболочки, сейчас расширение ядра вызывает сжатие оболочки и разогрев поверхности звезды. С этого момента звезда перестает быть красным гигантом и становится так называемой звездой горизонтальной ветви по ее положению на диаграмме, на которой нанесены светимости звезд в зависимости от их поверхностных температур (диаграмма Герцшпрунга — Рассела). В несколько более массивных звездах происходят в основном те же процессы, однако сжатие внешней оболочки выражено при этом значительно слабее.

Проведенные расчеты звездной эволюции указывают, что процесс выгорания гелия в ядре будет протекать до конца, после чего опять ядро должно сжиматься. В результате начнутся термоядерные реакции сгорания гелия в среде, окружающей углеродно-кислородное ядро, и звезда на этой стадии своего развития может иметь, кроме оболочки сгорания водорода, еще и оболочку сгорания гелия. Эти оболочки снова будут продвигаться через массу звезды к ее поверхности, добавляя гелий в область, расположенную под оболочкой сгорания водорода, и добавляя углерод и кислород центральному ядру звезды, лежащему

под оболочкой сгорания гелия. Если на этой стадии масса звезды не превышает верхнего предела устойчивости для белого карлика, т. е. около $\frac{1}{4}$ массы Солнца, то, вероятно, по прошествии некоторого времени слоевой источник сгорания гелия прекратит свое существование, а слоевой источник сгорания водорода подойдет очень близко к поверхности звезды.

Весьма вероятно, что при таких условиях на данной стадии развития большинство звезд будут белыми карликами. В такой звезде электроны образуют вырожденный газ, подерживающий давление на уровне, достаточно высоком, чтобы воспрепятствовать дальнейшему гравитационному сжатию. Внешний слой водорода, который все еще может присутствовать на этой поздней стадии эволюции звезды, по-видимому, выбрасывается тем или иным путем. Возможными причинами такого отделения внешнего слоя водорода могут быть звездный ветер, выброс вещества оболочки с образованием ядра планетарной туманности или вспышки новой звезды, при которых выброс водородной оболочки имеет взрывной характер. Детали эволюции, которые могут привести к выбору одной из этих гипотез, еще недостаточно изучены. Поскольку на стадиях красного гиганта звезды могут терять значительное количество массы (возможно, под влиянием каких-либо процессов, связанных со звездным ветром), массы звезд, которые впоследствии становятся белыми карликами, первоначально могли значительно превышать массу Солнца и, может быть, обладать массой, равной пяти солнечным.

Мнения астрофизиков-теоретиков относительно подробностей конечной стадии эволюции звезды, обладающей слишком большой массой, для того чтобы стать устойчивым белым карликом, весьма противоречивы. Согласно общему ходу развития должно продолжаться увеличение температуры и плотности ядра таких звезд. Можно допустить две гипотезы: это либо полный коллапс (взрыв, направленный внутрь), либо ядерный взрыв звезды [51].

До последнего времени считалось, что разрушение звезд с первоначальной массой в пределах 4—8 масс Солнца в процессе вспышек сверхновых звезд происходило следующим образом. С увеличением размеров ядра, состоящего из углерода и кислорода, и подъемом оболочки сгорания водорода и гелия сквозь массу звезды к ее поверхности ядро продолжает постепенно уплотняться все быстрее и быстрее, а температура звезды на-

чинает быстро возрастать. Когда температура становится выше 10^9 °K, начинаются термоядерные реакции с участием углерода, в ходе которых ядра углерода, взаимодействуя друг с другом, образуют различные более тяжелые ядра. Так как в ядре содержится вырожденный электронный газ, уравнение состояния такого газа сильно отличается от уравнения состояния идеального газа, характеризуясь почти уникальным соотношением между давлением и плотностью и слабой зависимостью давления от температуры.

Таким образом, рост температуры в ядре не оказывает заметного влияния на структуру ядра. Однако так как скорость совершающихся при этом термоядерных реакций зависит от высокой степени температуры, то начало термоядерных реакций с участием углерода ведет ко все более ускоряющемуся процессу энерговыделения и в результате этого — к разогреву центральной области звезды. Этот разогрев продолжается до тех пор, пока в ходе термоядерных реакций не израсходуется весь углерод и не начнутся термоядерные реакции с участием кислорода. В процессе этих реакций два ядра кислорода, взаимодействуя друг с другом, образуют более тяжелые ядра. Можно ожидать, что все эти реакции совершаются до того, как в структуре звезды начнутся существенные изменения и температура за это время поднимается настолько, что центральная часть ядра звезды перестает быть вырожденной.

Этого достаточно для возникновения в центре взрывной волны, которая распространяется к внешней границе ядра, взрывая на своем пути ядра углерода и кислорода и, вероятно, создавая условия для термоядерных реакций всюду до области железа, где ядра обладают максимально возможной энергией ядерной связи на нуклон и где их обилие определяется при помощи принципов ядерного статистического равновесия. Если развитие описанного процесса продолжается и в дальнейшем таким же образом, то вся энергия, образовавшаяся в ядре в результате термоядерного взрыва, создает гигантскую ударную волну, которая, проходя через поверхностные слои звезды, выбрасывает их в межзвездное пространство. Так происходит вспышка сверхновой звезды.

Но такая схема связана с очевидной трудностью, так как она ведет к полному взрыву звезды, после которого не остается никаких остатков. Однако в то время, как статистика наблюдений за сверхновыми звездами в нашей и других галактиках показывает, что

звезды с небольшой массой, порядка 4 солнечных масс, неизбежно должны участвовать в процессах образования сверхновых звезд, статистика пульсаров, которые, как считают, являются нейтронными звездами — остатками взрыва сверхновых, показывает, что такие нейтронные звезды должны образовываться в результате большинства вспышек сверхновых звезд в этом диапазоне масс.

Решение этой загадки можно найти в работах Б. Пашинского [35], который отметил, что, когда в ядре звезды начинаются термоядерные реакции с участием углерода, в центре ядра зарождается конвективный процесс, необходимый для отвода части тепла, выделяющегося в ходе термоядерных реакций с участием углерода. Затем в центре ядра начинается конвективный процесс URCA, являющийся мощным механизмом охлаждения. При высокой плотности ядра вырожденные электроны могут обладать энергией Ферми порядка нескольких мегаэлектронвольт. Энергии этих электронов будут достаточно высоки, чтобы вызвать захват электронов некоторыми тяжелыми ядрами, присутствующими в ядре. Когда такое ядро переносится конвекцией в область с более высокой плотностью, происходит захват электронов с излучением нейтрино, а при последующем переносе этого же ядра в область с меньшей плотностью высвобождается электрон и ядро трансформируется в первоначальный вид с высвобождением антинейтрино. Возникающие в ядре звезды нейтрино и антинейтрино отводят, таким образом, огромное количество энергии, не допуская развития термоядерных реакций до взрывного состояния и в то же время позволяя протекать процессу сгорания углерода.

При таких условиях в ядре может продолжаться процесс сгорания углерода и кислорода, сменяющийся затем процессом сгорания кремния и образованием равновесного пика железа, если в ядре не начнется интенсивный процесс захвата электронов, способный привести к коллапсу и увеличению плотности ядерного вещества ядра звезды и образованию остатков нейтронной звезды. Вполне вероятно, что механизм излучения пульсаров, не достаточно понятый в настоящее время, не являющийся черпающий энергию у энергии вращения нейтронной звезды, вполне может привести к достаточно быстрому накоплению энергии в центре звезды, способной прорвать ее внешнюю оболочку, вызвав вспышку сверхновой.

Предполагается, что в более массивных звездах сгорание углерода и кислорода про-

исходит при меньшей плотности ядра, прежде чем произойдет вырождение электронов ядра звезды. После того как ядро такой звезды претерпит коллапс и образуется остаток нейтронной звезды, излучение вновь образовавшегося пульсара может оказаться недостаточным для выброса слишком больших по массе вышележащих слоев звезды, и при дальнейшем нарастании массы на этом остатке нейтронной звезды нейтронная звезда может оказаться подавленной общерелятивистскими эффектами и коллапсировать с образованием объекта общего релятивистского коллапса, носящего название черной дыры. В этих случаях вспышка сверхновой звезды наблюдаться не будет.

Звезды с еще большей массой, порядка 50 солнечных масс и более, характеризуются несколько иным поведением. Большая часть массы рассматриваемых звезд может иметь очень высокую температуру, около 10^9 °K, несмотря на то что плотность в этой части относительно невысока. При таких условиях электрон-позитронные пары приходят к равновесию с полем излучения фотонов, созданным энергией фотонов, в связи с чем звезда становится неустойчивой к коллапсу [24]. Однако область, в которой происходит образование электрон-позитронных пар, содержит огромное количество углерода и кислорода, и коллапс будет продолжаться только до тех пор, пока в этом углероде и кислороде не произойдет термоядерный взрыв. В результате происшедшего термоядерного взрыва все массивные внешние слои звезды выбрасываются в межзвездное пространство. Пока еще не ясно, можно ли ожидать при этом образование остатков звезды, однако, во всяком случае, мы можем еще раз ожидать вспышки сверхновой.

За последнее десятилетие ученые значительно продвинулись в понимании связи ядерных реакций, протекающих в процессе эволюции звезд, с распространенностью элементов в природе [51]. В значительной степени этому пониманию способствовало составление хорошей кривой распределения элементов в веществе солнечной системы. Частично эта кривая основана на спектроскопических определениях обилия элементов на Солнце, однако коэффициент достоверности для любого из элементов в редких случаях был лучше двух, и использование далеко не точных данных о распространенности элементов на Солнце не позволяет выявить другие, более точные закономерности распространенности ядер элементов. Знание распространенности эле-

ментов в веществе Земли имеет небольшую ценность, потому что Земля подверглась широкой химической дифференциации, в связи с чем определение общей распространенности какого-либо элемента в Земле представляет большую трудность. С другой стороны, некоторые виды метеоритов могут быть исключительно ценными источниками информации о распространенности элементов, и можно считать, что в отношении нелетучих элементов каменные метеориты, известные под названием углистых хондритов I типа, обладают в основном такими же нелетучими составляющими и в таком же количественном соотношении, как и межзвездная среда.

Водород составляет около $\frac{3}{4}$ всей массы вещества солнечной системы, а гелий является вторым по распространенности элементом, составляющим около $\frac{1}{4}$ части массы солнечной системы. Возможно, что основная масса гелия возникла в процессе космологического ядерного синтеза, как было описано выше, или, возможно, в процессе зарождения звезд первого поколения, возникших до начала образования галактик, после первоначального коллапса вещества Вселенной, вскоре после его разделения с излучением. Все остальные элементы, вместе взятые, составляют всего лишь около 1,6% массы вещества солнечной системы; из них для третьего по распространенности элемента — кислорода число атомов в 10^{-3} раз меньше числа атомов водорода в солнечной системе.

Следующие за ними элементы: литий, бериллий и бор — распространены очень мало, в то время как углерод, азот и кислород гораздо более обильны. Сгорающий в звездах гелий преобразуется непосредственно в углерод и кислород, а промежуточные элементы разрушаются внутри звезд. Это позволяет понять непосредственную связь между этой весьма характерной особенностью распространенности элементов и особенностями ядерных реакций, протекающих внутри звезд. Азот при этом является продуктом совокупных циклов реакций с участием изотопов углерода, азота и кислорода, в ходе которых водород в звездах главной последовательности преобразуется в гелий.

Расчеты, проведенные в последнее время в области теории ядерного синтеза, указывают на то, что элементы в ряду от неона до никеля образовались при вспышках сверхновых звезд в ходе взрывных процессов с участием углерода, кислорода и кремния. Элементы этого ряда характеризуются промежуточной распространенностью в природе, и, конечно,

к ним относятся наиболее важные элементы, присутствующие на таких планетах, как Земля. Из нелетучих элементов в этом ряду наиболее распространены магний, кремний и железо, обилие которых сравнимо. Значительно менее обильны такие элементы, как натрий, алюминий и кальций. Сера распространена вдвое меньше, чем кремний, но, так как она отличается повышенной летучестью по сравнению с названными элементами, ее обилие в твердом веществе солнечной системы очень неодинаково. Из числа описанных ранее процессов, связанных с образованием сверхновых звезд, условиям образования этих элементов наиболее отвечает процесс развития массивных звезд, обладающих массой около 50 и более солнечных масс, прошедших в своем развитии стадию вспышки сверхновой звезды в результате неустойчивости электрон-позитронных пар.

Проводящиеся в настоящее время исследования по ядерному синтезу дают возможность судить о том, как элементы, стоящие после никеля, могут образовываться в процессе эволюции звезд в результате различных вторичных реакций. Некоторые из этих элементов образуются в результате медленно протекающего процесса захвата нейтронов, в ходе которого нейтроны, возникшие вследствие термоядерных реакций на относительно малых компонентах среды при сгорании гелия, захватываются на ядрах пика железа, присутствующего в среде и ведущего, после процессов захвата нейтронов и β -распада, к образованию тяжелых элементов. В результате этого процесса могут образоваться только такие тяжелые элементы, как свинец и висмут, а у большинства из этих элементов — только несколько изотопов.

Другим процессом, могущим привести к образованию тяжелых элементов, является быстро протекающий захват нейтронов. Проведенные в последнее время расчеты показывают, что наиболее вероятной астрофизической средой, в которой возможен такой захват могло быть вещество внешней части ядра звезды, претерпевшее направленный во внутрь взрыв с образованием ядерных плотностей. Это вещество подвергается сжатию и преобразуется в основном в нейтроны вследствие захвата электронов протонами, прежде чем будет выброшено в пространство в ходе процесса, еще не получившего объяснения. Было показано, что при расширении любого вещества в ходе взаимодействия заряженных частиц образуются различные ядра со средним массовым числом, которые затем

захватывают оставшиеся окружающие его нейтроны, образуя много более тяжелые ядра. Этот процесс служит источником образования всех существующих в природе элементов, тяжелее висмута, включая все тяжелые радиоактивные ядра, встречающиеся в природе.

Остальные изотопы тяжелых элементов, образующихся не в процессе захвата нейтронов по той или иной временной шкале, по-видимому, образовались путем захвата протонов, происшедшего по быстрой шкале времени, в ходе вспышек сверхновых звезд. Такие процессы могут иметь место во внешних областях взрывающейся звезды при прохождении ударной волны через область, еще содержащую первоначальный водород. При этом тяжелые элементы, содержащиеся в веществе со времени образования звезды, могут захватывать протоны и образовывать ядра с недостатком нейтронов.

В настоящее время ядерно-физические аспекты ядерного синтеза, вообще говоря, изучены количественно лучше, чем астрофизические аспекты. Наблюдения распространенности элементов в звездах показывают, что очень малое число звезд обеднено элементами, более тяжелыми, чем гелий, по сравнению с Солнцем в 100 раз и более. Большинство звезд в космическом пространстве характеризуются распространенностью этих элементов, отличающейся от солнечной не более чем в три раза. На основании этих результатов, а также некоторых попыток проследить историю ядерного синтеза нашей Галактики был сделан вывод о том, что скорость образования звезд была, по-видимому, очень большой на самых первых порах существования нашей Галактики или даже еще в предгалактический период, так что по шкале галактического времени образование тяжелых элементов тоже проходило довольно быстро [52]. Вероятно, вследствие этого большинство звезд, образовавшихся в космическом пространстве после раннего периода быстрого образования звезд, содержало тяжелые элементы в количестве, достаточном для того, чтобы обладать системами планет, характеризующимися условиями, близкими к земным.

ОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Проблема происхождения солнечной системы занимает ученых со времен Декарта, т. е. в течение уже более трех столетий. На протяжении большей части этого времени ученые располагали ничтожно малым количеством фактов о солнечной системе, необходимых

для ее объяснения. К этим фактам можно отнести правильность орбит планет, ориентацию векторов моментов количества движения в пределах солнечной системы и медленное вращение Солнца. Теперь очевидно, что последнее свойство не имеет ничего общего с происхождением солнечной системы. Первоначально высокая скорость вращения Солнца могла быть легко уменьшена до нынешнего уровня под влиянием магнитного взаимодействия Солнца и испускаемого им солнечного ветра. Не удивительно, что такое малое число граничных условий может послужить началом для самых разнообразных теорий, пытающихся дать им объяснение. За последние два десятилетия вся проблема происхождения солнечной системы в целом претерпела существенные изменения в связи с установлением новых граничных условий. К ним относятся данные о физических и химических свойствах, основанные на изучении метеоритов, результаты исследования отдаленных тел солнечной системы с помощью космических зондов, а также сведения, полученные при исследовании человека Луны. Это привело к ограничению теорий происхождения солнечной системы, однако и сейчас их существует еще довольно много.

Почти все теории происхождения солнечной системы, появившиеся за последние три века, можно подразделить на монистические и дуалистические. Монистические теории исходят из того, что развитие Солнца и планет происходит в пределах замкнутой системы, не связанной с какими-либо внешними системами. Дуалистические же теории, наоборот, признают участие в космогоническом процессе и внешних систем, обычно других звезд. Есть теории, которые, признавая отдельные дуалистические посылки, носят в основном монистический характер. Несмотря на возможную двусмысленность, такая классификация все же полезна.

Автором первой монистической теории был Декарт, опубликовавший в 1634 г. теорию образования солнечной системы из газового вихря. Первая из дуалистических теорий появилась в 1745 г., когда Бюффон высказал предположение о том, что планеты образовались из вещества, оторванного от Солнца кометой, пронесшейся в непосредственной близости к нему. В те времена считалось, что кометы обладают массами, близкими к массе Солнца, и это была, по существу, первая дуалистическая теория, допускавшая вторжение посторонней звезды. Со времени появления этих двух теорий и вплоть до настоящего

времени, за исключением последних 30 лет, не существовало какой-либо одной определенной точки зрения на происхождение солнечной системы, причем мнение об этом вопросе постоянно колебалось между сторонниками монистических и дуалистических теорий. Читатель, интересующийся историческим развитием этих теорий, может ознакомиться с историческим обзором Тер-Хаара и Камерона [49].

В настоящее время любые формы дуалистических теорий совершенно отвергнуты астрономами. Попытки объяснить процесс образования планет за счет отрыва вещества от Солнца встречаются с многими трудностями. Среди них следует отметить различные трудности гидродинамического характера: вещество, оторванное от Солнца, должно быть очень горячим и, следовательно, стремиться расширяться и рассеяться в пространстве, а не образовывать планеты после химических превращений. Было также показано, что при отрыве вещества от Солнца вследствие близкого прохождения другой звезды момент количества движения, приобретаемый основной массой оторванного вещества, должен быть настолько мал, что оторванное вещество должно упасть снова на Солнце после удаления звезды. Современная теория эволюции Солнца указывает на то, что уничтожение первоначально имевшегося в составе Солнца дейтерия должно было произойти в результате термоядерных реакций на ранних стадиях эволюции Солнца, тогда, когда оно было полностью конвективным и, следовательно, полностью перемешано. Поэтому присутствующий в составе океанов Земли дейтерий не мог быть получен от Солнца ни на одной из стадий после очень ранней стадии сгорания дейтерия на Солнце, и можно поэтому предполагать, что остальное вещество Земли тоже не солнечного происхождения.

Большинство современных теорий образования солнечной системы носят монистический характер и включают некоторые предположения о свойствах первичной солнечной туманности, из которой, как принимается, образовались планеты, а, возможно, также и Солнце.

Вероятно, наибольшее исключение из этой общей картины составляет теория Аррениуса и Альвена [13]. Эти авторы считают, что доминирующую роль в образовании планет и их спутников играют неравновесные плазменные процессы. Аррениус и Альвен полагают, что межзвездные газы, приближающиеся к Солнцу, уплотняются и частично ионизиру-

ются. Образующаяся при этом плазма во время движения через солнечную систему может частично захватываться магнитными полями, причем из плазмы могут конденсироваться различные твердые частицы, аккумулирующиеся в более крупные тела под влиянием гравитационных самофокусирующихся процессов, формирующих, как они назвали, «струйные потоки». Согласно этой теории, предполагается, что Солнце образовалось как изолированное тело под действием некоего механизма, еще не получившего объяснения, что во время образования планет Солнце обладало магнитным полем, гораздо более сильным, чем в настоящее время, и что не было никакого солнечного ветра, который мог бы предотвратить приближение межзвездной плазмы в непосредственные окрестности Солнца. В некотором смысле эту теорию можно считать дуалистической, хотя в качестве внешней системы здесь участвует газ межзвездной среды, а не постороннее звездное тело и для образования планет не предполагается отрыв вещества от Солнца.

Современные теории первичной солнечной туманности можно подразделить на две группы: теории минимально малой солнечной туманности и теории массивной солнечной туманности. Минимально малая солнечная туманность содержит около 0,1 массы Солнца, т. е. столько способного к конденсации вещества, сколько нужно для образования современных планет, а также большого избыточного количества летучих веществ, удаляемых в процессе образования планет. Массивная солнечная туманность может содержать около двух масс Солнца и от минимальной солнечной туманности отличается тем, что первоначально не имеет в своем центре Солнца. Она просто представляет собой вращающийся газовый диск, из которого должно образоваться Солнце.

Большинство теорий солнечных туманностей, появившихся за последние три десятилетия, относятся к теориям минимально малой солнечной туманности. К наиболее ранним из этих теорий принадлежит теория фон Вейцекера, Койпера и Тер-Хаара [49]. В этих теориях делался акцент на роль турбулентности в физических процессах, протекающих в первичной солнечной туманности.

Однако хотя турбулентность и играет очень большую роль в солнечной туманности, по-видимому, нельзя признавать доминирующей роль, приписываемую ей в этих теориях. Авторы этих теорий исходят из предположения

о том, что турбулентность обязательно должна присутствовать в системе с очень большим числом Рейнольдса, что практически неизбежно для любой большой космической газовой системы. Однако они не дали определенных механизмов (рассчитанных детально), с помощью которых в большие вихри могла бы поступать энергия, необходимая для поддержания турбулентности и компенсации потерь при естественных процессах рассеяния. Тем не менее эти теории сыграли очень большую историческую роль, так как они впервые указали на турбулентность как на процесс, который следует принимать во внимание в теории происхождения солнечной системы, а также показали, что газодинамические процессы могут привести к весьма быстрому рассеянию солнечной туманности, при этом шкала времени для диссипации может выражаться всего лишь 10^2 или 10^3 годами.

Тем временем были предложены монистические теории в России. О. Ю. Шмидт [10], выдвинул теорию происхождения солнечной системы, согласно которой планеты возникли в результате аккреции мельчайших частиц из роя частиц, захваченных когда-то Солнцем и образовавших вокруг него диск. Впоследствии О. Ю. Шмидт развил свою теорию, высказав предположение о возможности присутствия в окружающей Солнце туманности не только пыли, но и газа. Дальнейшее развитие эти идеи получили у Б. Ю. Левина [6] и В. С. Сафронова [9], сделавших попытку более подробно рассчитать образование планет из диска, содержащего пыль и газ, а также изучить происходящие при этом процессы диссипации.

Под термином «минимально малая солнечная туманность» понимают количественный процесс, рассмотренный Хойлом [28] в теории, выдвинутой около 10 лет тому назад и развитой затем Фоулером, Гринстейном и Хойлом [23]. При этом Хойл отмечал, что ледяные и каменные компоненты вещества солнечной системы составляют около 0,015 массы, а одни только каменные компоненты — около 0,003 массы. Таким образом, минимальное количество массы, из которой должна была состоять солнечная туманность, должно было быть примерно в 300 раз больше масс внутренних планет, каменных по своему составу, включая массы Юпитера и Сатурна, которые Хойл считал в основном типичными по составу для солнечной системы, а также включая 60—70 масс Урана и Нептуна, состоящих, по мнению Хойла, преимущественно из льда и камня. Следует от-

метить, что любая подобная теория минимально малой солнечной туманности требует, чтобы подходящий конденсирующийся материал собирался в планеты с почти 100%-ной эффективностью.

Согласно теории Хойла, предполагается, что под действием момента, возникающего под влиянием межзвездного магнитного поля, взаимодействующего с межзвездным веществом, окружающим облако, фрагмент коллапсирующего межзвездного облака теряет значительную долю своего момента количества движения. Затем происходит дальнейший коллапс вещества до радиуса, несколько меньшего радиуса орбиты Меркурия. Далее часть межзвездного магнитного поля сжимается с коллапсирующим материалом в протосолнце, а сразу по окончании коллапса под действием этого магнитного поля в экваториальных областях протосолнца возникает момент, раскручивающий их и вызывающий образование туманности, радиус которой, увеличиваясь, возрастает до нескольких десятков астрономических единиц. В развитие этой теории Фоулер, Гринстейн и Хойл высказали предположение, что внутри такой туманности могут происходить химические конденсации с образованием тел, с типичной величиной диаметра порядка нескольких десятков метров, которые, по мере того как происходит дальнейшее ускорение газа и увеличение радиуса туманности, остаются сзади. Предполагается, что вслед за этим в протосолнце попадает большое количество магнитной энергии и часть этой энергии вызывает ускорение заряженных частиц до нескольких сотен миллионов электронвольт. Эти частицы высокой энергии бомбардировали затем скопившиеся тела, оставшиеся во внутренней части солнечной системы, и в результате ядерных реакций расщепления образовали легкие элементы, не образующиеся в ходе обычных ядерных реакций внутри звезд: литий, бериллий и бор. Предполагается, что дейтерий в метеоритах и Земле образовался в результате непосредственного расширения, а также захвата нейтронов, образовавшихся при расщеплении, водородом, содержащимся в ледяных массах этих тел.

Аспекты теории Фоулера, Гринстейна и Хойла, связанные с бомбардировкой частицами высокой энергии, были встречены всеобщим недовольством, поскольку они предсказывали вариации в некоторых изотопных соотношениях определенных элементов в метеоритах, которые многие ученые усиленно пытались искать, но не нашли. Эта теория

позволяла сделать несколько вполне определенных предсказаний относительно существования таких вариаций и таким образом стимулировала проведение большой исследовательской работы с метеоритами с целью обнаружения этих вариаций. Однако другие аспекты подхода к образованию солнечной туманности в этой и других теориях минимально малой солнечной туманности не позволяют делать каких-либо детальных предсказаний; таким образом, эти аспекты не могут быть легко проверены и, следовательно, приняты или отвергнуты.

Главным сторонником теории массивной солнечной туманности является Камерон [15, 17, 18]. В этой теории делается попытка увязать образование солнечной системы с уже рассмотренными нами выше процессами образования звезд в галактическом пространстве. Случайная турбулентность в коллапсирующем межзвездном газовом облаке передает настолько большой момент количества движения той части облака, из которой впоследствии образуется солнечная система, что под его действием газ принимает форму плоского диска, не имеющего в центре какого-либо центрального звездного тела. Количество вещества в массивной первичной солнечной туманности намного превышает массу Солнца по двум причинам: согласно наблюдениям у вновь образовавшихся звезд происходит быстрая потеря массы в пространство (на так называемой стадии Т Тельца), не вся масса первичной солнечной туманности сгущается в Солнце: некоторая часть массы должна оставаться на значительном удалении и поглотить момент количества движения, утраченный веществом, образующим Солнце. Впоследствии, когда начинается потеря Солцем массы на стадии Т Тельца, этот газ будет выброшен. Камерон и Пайн [18] рассчитали довольно подробные численные модели массивной первичной солнечной туманности, в которых термодинамические условия увязывались с историей стадии коллапса межзвездного облака. Камерон и Пайн нашли, что отдельные элементы их моделей характеризовались неустойчивостью к конвекционному теплообмену, а некоторые другие элементы проявляли тенденцию к радиационному равновесию. Указанными авторами были высказаны предположения о том, что в связи с внутренним переносом момента количества движения под действием циркулирующих внутри диска потоков через несколько тысяч лет должно произойти рассеяние их моделей с образованием Солнца.

Вывод об этих повторяющихся кратковременных периодах диссипации явился как бы вызовом всем теориям первичной солнечной туманности. Объединение твердых частиц в более крупные тела гораздо легче происходит в газе, чем в вакууме. В настоящее время в условиях вакуума твердые тела сталкиваются в зоне малых планет и в результате дробятся на более мелкие, а не объединяются в более крупные. В газовой среде тела разного размера движутся с различными относительными скоростями, что способствует их столкновению, но благодаря присутствию газа скорости сталкивающихся тел не настолько велики, чтобы вызвать их дробление.

Камерон [17] провел исследование общих процессов аккумуляции масс в свете своей теории первичной солнечной туманности большой массы. Он установил, что началом для быстрого скопления планетных тел в присутствии газа послужили процессы аккумуляции, происходившие на стадии коллапса межзвездного облака, из которого образуется первичная солнечная туманность. Под влиянием происходящих в таком газе турбулентных явлений зерна межзвездного вещества приобретают довольно высокие относительные скорости, и если допустить, что при столкновении они объединяются, то ко времени образования первичной солнечной туманности должно произойти объединение таких зерен в тела, достигающие в радиусе нескольких сантиметров. В дальнейшем эти тела могут довольно быстро аккумулятироваться у центральной плоскости первичной солнечной газовой туманности, где под влиянием градиентов давления газа будет происходить движение конденсирующихся твердых тел и продолжаться их дальнейшее быстрое объединение в еще более крупные тела. По расчетам, проведенным Камероном, небесные тела могут таким образом вырасти до размера планеты за время порядка нескольких тысяч лет в пределах большей части пространства, занимаемого первичной солнечной туманностью, от областей с относительно небольшими радиальными расстояниями, где происходит образование планет земного типа, до значительно более далеких от центра областей, где образуются планеты, состоящие в основном из льда. Пожалуй, наибольшее сомнение в этих расчетах вызывает предположение о том, что тела при столкновении соединяются. Слишком мало известно о природе поверхностей химически сконденсировавшегося вещества первичной солнечной туманности, для того чтобы можно было оценить вероят-

ность объединения при столкновении тел, двигающихся с различными скоростями.

По мере дальнейшего развития теорий образования солнечной системы они, несомненно, будут обогащаться благодаря изучению метеоритов новыми важными сведениями, которые послужат основой для новых суждений о физической природе первичной солнечной туманности. К таким новым достижениям относятся космотермометры и космобарометры, разработанные Андерсом и его коллегами [11]. При образовании метеоритов при какой-то определенной температуре в первичной солнечной туманности многие элементы, содержащиеся ранее в газе, целиком войдут в состав метеоритов, другие элементы в основном останутся в газе, а в состав метеоритов они войдут лишь в виде незначительных «следов». С другой стороны, конденсация некоторых элементов в метеориты может произойти только частично и распространенность их в различных метеоритах может быть самой различной. Эти последние элементы могут выполнять роль космотермометра: метеорит, содержащий большее количество такого элемента, должен образоваться при меньшей температуре, чем метеорит с меньшим содержанием этого элемента, а точный термодинамический анализ разброса распространенности элемента позволяет определять эти температуры. Такая методика определения температуры позволяет предположить, что образование обычных хондритных метеоритов в первичной солнечной туманности протекало при температуре $400-500^{\circ}\text{K}$, в то время как образование углистых хондритов происходило ближе к 300°K . В качестве космотермометра могут служить также относительные изотопные отношения кислорода. Определенные минеральные фазы, в которые конденсируются некоторые элементы, могут выступать в роли грубых космобарометров, так же как и парциальное давление абсорбированных газов, например аргона в метеоритах.

Все эти средства познания указывают на то, что аккумуляция обычных хондритных метеоритов в первичной солнечной туманности происходила при общих давлениях порядка 10^{-5} атм. Такие термодинамические условия при соответствующей величине радиуса характерны для моделей массивной первичной солнечной туманности, предложенных Камероном. Однако модели солнечной туманности минимальной массы характеризуются гораздо меньшими давлениями, чем давления, определенные с помощью указанных космобарометров, хотя эти модели и мо-

гут быть в некотором смысле произвольными в связи с допущением, что распределение температуры в таких моделях определяется тепловой энергией солнечных лучей при обычно незначительной экранизации, создаваемой пылевым веществом.

СИСТЕМА ЗЕМЛЯ — ЛУНА

Проблемы, связанные с образованием Луны, рассматривались большей частью отдельно от общих космогонических теорий солнечной системы, описанных выше. Луна представляет собой довольно аномальное тело солнечной системы. Она обладает гораздо большей массой по сравнению с массой своей главной планеты, в отличие от любого другого спутника в солнечной системе. Луна характеризуется необычно низкой плотностью: в среднем всего лишь $3,34\text{ г/см}^3$, что ниже плотности метеоритов и намного меньше средней плотности внутренних планет типа Земли. Эти необычные характеристики дали повод многим ученым для утверждения, что образование Луны довольно необычное событие в истории солнечной системы.

Существует четыре основных типа теорий, пытающихся объяснить происхождение Луны [29, 50]. Это теории деления, теории атмосферной конденсации, теории двойных планет, согласно которым Луна образуется на орбите вокруг Земли, и теории захвата, допускающие возможность образования Луны где-то в другом месте солнечной системы и ее последующего захвата Землей. Все эти теории имеют своих приверженцев и в настоящее время. Проведенные в последнее время исследования Луны и лунных пород дали в руки ученых большое количество граничных условий, которым должны удовлетворять эти теории, но не дающие пока возможности остановить выбор на какой-либо одной из них.

В теории деления предполагается, что Луна оказалась на орбите вокруг Земли в результате какой-то катастрофы, происшедшей с Землей. Впервые такая теория была выдвинута Джорджем Дарвином в последние годы XIX столетия. Дарвин полагал, что первоначально период вращения Земли составлял около 4 час., т. е. что он примерно в два раза превышал резонансный период Земли. Вследствие этого на Земле могли возникнуть огромные приливные горбы, в результате отделения одного из которых и образовалась Луна. Эта теория в 1930 г. была подвергнута серьезной критике Джеффрисом, согласно которо-

му приливная диссипация должна быть слишком велика, чтобы могло произойти отделение Луны. Несколько позднее появились модифицированные приливные теории, согласно которым предполагалось, что Земля на ранних стадиях своего развития вращалась еще быстрее, в режиме, близком к ротационной неустойчивости, причем такая ротационная неустойчивость, имевшая место во время образования железного ядра Земли, снижает момент инерции и повышает скорость вращения до уровня, превышающего скорость, достаточную для разрыва. Если бы Земля действительно вращалась настолько быстро, чтобы это могло произойти, то ее первоначальный момент количества движения намного превышал бы теперешний угловой кинетический момент системы Земля — Луна, в связи с чем потребовалось бы искать процесс, объясняющий уменьшение момента количества движения.

Теории атмосферной конденсации, или, по выражению Рингвуда [43], теории осадков, исходят из предположения образования Луны с небольшим содержанием внутреннего железа. Сторонники этих теорий считают, что Земля образовалась в пространстве очень быстро, так что растущая Земля сохраняла большое количество гравитационной энергии аккумуляции, а ее внешние слои должны были быть в таком сильном разогревом состоянии, что силикаты, а также продукты их распада присутствовали в этих слоях в газобразной форме. Если такая система приходит в столкновение с крупной планетезималью, то под ее влиянием она начинает быстро вращаться, при этом внешняя часть атмосферы может быть вовлечена в орбитальное движение и из нее может произойти выпадение кремниевых веществ, требующихся для образования Луны [15]. Из этих кремниевых обломков на орбите вокруг Земли и образуется затем Луна.

Многие исследователи высказывали предположение о том, что Луна образовалась поблизости от Земли как самостоятельное тело в процессе формирования солнечной системы. Основная трудность, возникающая перед сторонниками этой гипотезы, состоит в том, что необходимо дать объяснение низкой плотности Луны, причем до сих пор еще не было предложено никакого простого механизма, который помог бы объяснить, каким образом могла возникнуть Луна с плотностью, намного уступающей плотности Земли, если вещества, из которых образовались эти два небесных тела, подобны. Луна должна была обра-

зоваться довольно близко к Земле. Некоторые расчеты орбитального движения Луны, проведенные при обратном отсчете времени, показывают, что Луна была близка к Земле значительно позднее того времени, когда образовалась Земля, однако эти расчеты обычно допускают постоянное запаздывание приливной фазы, а неопределенность в фактическом запаздывании фазы приливной волны вносит соответствующую неопределенность в шкалу времени. Высказывались различные варианты образования простейшей двойной планеты. Так, например, два возможных варианта теории были предложены Мак-Дональдом [32]. Согласно первому варианту, на орбите около Земли образовался небольшой спутник Земли. Этот спутник столкнулся с приблизившимся более крупным небесным телом, в результате чего произошел захват последнего. Согласно второму варианту, около земной орбиты происходила аккумуляция множества мелких тел, подобно спутникам планет-гигантов, причем наиболее близко расположенное к центру и наиболее массивное из них удалялось от Земли под влиянием приливного торможения, захватывая при своем удалении другие тела.

Существует много различных гипотез захвата Луны. Они имеют как геохимический, так и динамический характер. В геохимическом варианте теории захвата рассматриваются возможные условия, способные объяснить низкую среднюю плотность лунного вещества, однако остаются в стороне детали динамики захвата. Динамическая теория, наоборот, игнорирует геохимические аспекты, концентрируя все внимание на механизме диссипации независимого движения Луны, ведущем к ее захвату, и последующей динамической истории лунной орбиты. В последнее время относительно подробно динамические теории рассматривались Каулом [29]. В своем первоначальном виде, по мнению Герстенкорна, теории захвата исходят из того, что на первых порах Луна сближалась с Землей, двигаясь по орбите в обратном направлении, а затем над полюсом Земли произошло обращение этой эллиптической орбиты в орбиту прямого движения. Все эти варианты теории встречаются с трудностями, так как они пренебрегают важными деталями динамики. Наиболее современная формулировка динамической теории захвата Луны с орбиты прямого движения принадлежит Зингеру. По окончательному мнению Каулы, динамические теории захвата Луны маловероятны, но не исключены.

Перед всеми этими теориями стоит важнейшая задача: дать объяснение низкой средней плотности Луны. Сторонникам теории распада и атмосферной конденсации необходимо найти приемлемый единый механизм химической дифференциации, действующий до разделения Земли и Луны. Этот механизм, имеющий важное значение, выпадает из теорий, допускающих аккумуляцию Луны на околоземной орбите из вещества, подобного земному, что является главным недостатком этих теорий. Несколько лучше положение с теориями захвата, если иметь в виду, что условия для образования небесного тела лунного состава существуют в других частях солнечной туманности.

Несколько лет назад считалось, что обилие железа по отношению к кремнию на Солнце значительно меньше, чем в метеоритах или планетах земного типа. Это послужило для Юри [54] отправным моментом при построении теории происхождения Луны, согласно которой Луна образовалась из конденсированной фракции солнечного вещества и поэтому характеризуется относительно низким содержанием железа и невысокой средней плотностью. Согласно этой теории, Луна представляет собой всего лишь одно из многих небесных тел солнечной системы, возникших в результате первичной конденсации. Предполагается, что в результате столкновения большинства этих тел друг с другом происходило фракционирование силикатов и железа и сосредоточение железа в выживающих планетах. Луна не была затронута этим процессом и была захвачена Землей как первичный небесный объект. Однако в последнее время было установлено, что в оценке сил осцилляторов лунный желез, используемых для определения обилия железа на Солнце, была допущена ошибка и что отношение обилий железа и кремния на Солнце в общем соответствует обилию этих элементов в метеоритах и планетах земного типа.

Проведенные недавно анализы образцов лунного вещества показали, что верхние слои Луны обогащены алюминием, кальцием и титаном. То, что окислы и силикаты этих металлов являются в первую очередь теми основными жаропрочными материалами, которые могли конденсироваться из газа при высокой температуре, позволило Гасту предположить, что, когда Луна оформилась как небесное тело, ее внешние слои образовались из таких конденсатов с очень высокой температурой. Эта точка зрения была развита недавно Андерсоном [12], высказавшим

мысль о том, что вся Луна в целом явилась продуктом полного химического фракционирования таких высокотемпературных конденсатов. Если эта точка зрения верна, то образование Луны должно было произойти в области первичной солнечной туманности с гораздо более высокой температурой, чем та, в которой образовалась основная часть Земли. В связи с этим Камерон [16] предположил, что такая гипотеза позволяет считать местом образования Луны пространство в пределах орбиты Меркурия, где вследствие возмущений первоначальной лунной орбиты под влиянием Меркурия лунная орбита приняла форму сильно вытянутого эллипса. С этой орбиты Луна была захвачена Землей, что одновременно послужило и причиной необычайно большого эксцентриситета орбиты Меркурия.

Ученые, посвятившие себя изучению Земли, собрали огромное количество сведений, относящихся к физической и химической истории ее развития. Однако их выводы еще порой содержат противоречия принципиального характера, немало снижающие достоверность нашего знания раннего периода эволюции Земли. Возраст древнейших пород, определенный по распаду радиоактивных элементов, содержащихся в Земле, составляет всего лишь около $4 \cdot 10^9$ лет. С другой стороны, большое количество данных указывает на то, что возраст солнечной системы составляет $4,6 \cdot 10^9$ лет. Первые несколько сотен миллионов лет эволюции Земли продолжают оставаться для ученых, занимающихся прямыми геологическими исследованиями, загадкой.

Один из основных спорных моментов — была ли Земля во время ее образования очень холодной или очень горячей. В самые первые годы нашего столетия геологи склонны были считать, что Земля на ранних стадиях своего существования находилась в полностью расплавленном состоянии, и, несомненно, что утверждению этой точки зрения способствовали дуалистические теории образования солнечной системы, согласно которым Земля представлялась как тело, сконденсировавшееся в горячем состоянии из оторвавшегося от Солнца волокна горячих газов. Однако около двух десятилетий назад против этой господствовавшей точки зрения выступил Юри [53], указавший, что некоторые летучие элементы, присутствующие в больших количествах в Земле, не могли бы входить в состав Земли, если бы она образовалась путем конденсации из такого очень го-

рячего газового волокна. На основании этого Юри сделал вывод о том, что Земля образовалась из остывшего сконденсировавшегося вещества, температура которого не превышала нескольких сотен градусов Цельсия. При этом вполне допустимо, что сливавшиеся с Землей небольшие сконденсировавшиеся тела были довольно холодными, так как сам процесс аккумуляции может привести к образованию очень горячего тела, однако удерживать весьма летучие вещества такое тело становится способным только после того, как оно приобретает довольно значительную массу.

Первоначальная внутренняя температура Земли в сильной степени зависела от времени, необходимого для аккумуляции Земли. Если представить тело, которое растет непрерывно за счет аккумуляции сравнительно небольших частиц на гораздо большем по размерам ядре, то в момент, когда эти частицы приходят в контакт с поверхностью увеличивающегося в размерах тела, происходит высвобождение энергии гравитационного потенциала. Основная доля высвобождаемой энергии гравитационного потенциала излучается поверхностью в окружающее пространство. Однако чем выше скорость аккумуляции, тем выше должна быть температура поверхности, из которой происходит излучение в пространство основной доли энергии. Эта температура излучающей поверхности становится меридом внутренней температуры Земли. Если образование Земли происходит по шкале времени, характерной для газовой диссипации первичной солнечной туманности, т. е. в течение времени порядка 10^3 лет, то внутренние температуры Земли должны быть порядка $5000-10\,000^\circ\text{K}$ [17]. При таких высоких температурах большая часть твердых веществ может существовать только в газообразном виде, образуя горячую протяженную атмосферу Земли. Такая гипотеза может служить основой для теорий атмосферной конденсации происхождения Луны. Однако вскоре эта горячая атмосфера должна потерять большую часть своего тепла за счет излучения в пространство, и, вероятно, через несколько тысяч лет должна была произойти ее конденсация в расплавленную каменистую массу.

В тесной связи с неопределенностями тепловой истории Земли находится проблема происхождения атмосферы и океанов Земли. В 1951 г. Руби [46] собрал большое число данных геологических исследований, свидетельствующих в пользу мнения о том, что океаны были образованы за счет выделения

газов из внутренней части Земли. Руби сделал вывод, что такой процесс выделения газов был очень длительным, выделение воды все еще происходит и в настоящее время. Однако мнение о том, что выделение первичной воды из недр Земли все еще продолжается, не нашло подтверждения, а исследования воды, поступающей в настоящее время из недр, показывают, что это в основном вода, рециркулировавшая с поверхности в недра Земли.

В то же время Браун [14] указывал, что распространенность кислорода и азота в земной атмосфере на несколько порядков больше распространенности редких газов. Это позволяет считать, что атмосфера образовалась в основном некоторым другим путем за счет выделения газов изнутри Земли, поскольку в Землю небольшими остывшими телами, участвовавшими в процессе аккумуляции, могли быть привнесены в больших количествах только химически связанные элементы. Таким образом, имеющиеся в нашем распоряжении в настоящее время данные указывают на то, что как океаны, так и атмосфера Земли образовались в основном за счет выделения газов из недр Земли.

Обилие на Земле редких газов не сходно с их распространенностью на Солнце, а носит скорее сильно фракционированный характер, свойственный распространенности редких газов, абсорбированных метеоритами. Таким образом, видимо, даже редкие газы, присутствующие в земной атмосфере в небольших количествах, были занесены на Землю телами небольшого размера.

Эти соображения имеют важное значение для проблем, связанных с изучением происхождения жизни на Земле. Имеющиеся в распоряжении ученых данные указывают на то, что первичная атмосфера, образовавшаяся на Земле после ее конденсации из солнечной туманности, была, по-видимому, сметена очень сильным солнечным ветром на стадии звезды Т Тельца. А уже после этого произошло выделение из недр Земли теперешней атмосферы и океанов. Многие биохимические исследования, связанные с изучением происхождения жизни на Земле, допускают, что по своему составу первичная атмосфера Земли должна быть близка к составу Солнца и составляющими ее газами должны были являться водород, аммиак, метан и водяные пары. Однако вторичная атмосфера содержит значительно меньше водорода. Выделение азота частично могло происходить в форме аммиака, углерода — в виде метана или дру-

гих газовых органических соединений, а выделение основной массы углерода, по-видимому, происходило в виде двуокиси углерода. Поэтому при биохимическом изучении ранней стадии развития жизни на Земле лучше исходить из предположения, что по составу атмосфера состоит в основном из водяных паров и двуокиси углерода, а также из небольшого количества избыточного водорода в виде аммиака и метана.

Таким образом, происхождение жизни на Земле представляется нам как естественная последовательность длинной цепи физических и химических процессов, связанных с эволю-

цией Вселенной, многие стороны которой остаются для нас не разгаданными. Под влиянием этой кажущейся неизбежной последовательности процессов сложилось мнение о том, что планетные системы имеют очень широкое распространение в нашей Галактике и во всей Вселенной, что в значительной части этих планетных систем существуют планеты, пригодные для жизни, что общие геохимические условия этих планет сходны с геохимическими условиями на Земле и что развитие жизни и, возможно, разумных существ является весьма распространенным явлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорошкевич А. Т., Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Возникновение галактик в расширяющейся Вселенной. *Астрон. ж.*, 1967, 44, вып. 2, 295.
2. Дорошкевич А. Т., Новиков И. Д. Средняя плотность излучения в метagalктике и некоторые вопросы релятивистской космологии. Докл. АН СССР, 1964, 154, 809.
3. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Релятивистская астрофизика. М., «Наука», 1967.
4. Зельдович Я. Б., Старобинский А. А. Рождение частиц и поляризация вакуума в анизотропном гравитационном поле. *ЖЭТФ*, 1971, 61, 2161.
5. Каплан С. А., Пикельнер С. Б. Межзвездная среда. Физматгиз, 1963.
6. Левин Б. Ю. Строение Земли и планет и метеоритная гипотеза их происхождения. *Природа*, 1949, № 10, 3.
7. Лифшиц Е. М. О гравитационной устойчивости расширяющегося мира. *ЖЭТФ*, 1946, 16, 587.
8. Озерной Л. М., Чернин А. Д. О фрагментации вещества в турбулентной метagalктической среде. I. *Астрон. ж.*, 1967, 44, 1131.
9. Сафронов В. С. Размеры наибольших тел, падавших на планеты. *Астрон. ж.*, 1965, 42, 1270.
10. Шмидт О. Ю. Астрономический возраст Земли. Докл. АН СССР, 1945, 46, № 6, 293.
11. Anders E. Physico-Chemical Processes in the Solar Nebula, as Inferred from Meteorites. In: *On the Origin of the Solar System*. H. Reeves (Ed.). Paris, Cent. Nat. de Rech. Sci., 1972, p. 179—201.
12. Anderson D. L. Structure and Composition of Terrestrial Planets. In *Cosmochemistry*. A. G. W. Cameron (Ed.). Boston, Reidel, 1973.
13. Arrhenius G., Alfvén H. Fractionation and Condensation in Space. *Earth Planet. Sci. Letters*, 1971, 10, 253.
14. Brown H. Rare Gases and the Formation of the Earth's Atmosphere. In: *The Atmosphere of the Earth and Planets*. G. P. Kuiper (Ed.). Univ. Chicago Press, 1952, p. 258.
15. Cameron A. G. W. Formation of the Earth-Moon System. EOS, Trans. Amer. Geophys. Union, 1970, 51, 628.
16. Cameron A. G. W. The Orbital Eccentricity of Mercury and the Origin of the Moon. *Nature*, 1972, 242, 299.
17. Cameron A. G. W. Accumulation Processes in the Primitive Solar Nebula. *Icarus*, 1973, 18, N 3, 407.
18. Cameron A. G. W., Pine M. R. Numerical Models of the Primitive Solar Nebula. *Icarus*, 1973, 18, № 3, 377.
19. Cox J. P., Giuli R. T. Principles of Stellar Structure (2 vols). N. Y., Gordon and Breach Sci. Publ., 1968.
20. Dicke R. H., Peebles P. J., Roll P. G., Wilkinson D. T. Cosmic Black-Body Radiation. *Astrophys. J.*, 1965, 142, 414.
21. Doroshkevich A. T., Sunyaev R. A., Zeldovich Ya. B. The Formation of Galaxies in Friedmanian Universes. In: *IAU Symposium*, N 63. M. Longair (Ed.), 1973, p. 200.
22. Ezer D., Cameron A. G. W. The Evolution of Hydrogen-Helium Stars. *Astrophys. Space Sci.*, 1971, 14, 399.
23. Fowler W. A., Greenstein J. L., Hoyle F. Nucleosynthesis during the Early History of the Solar System. *Geophys. J.*, 1962, 6, 148.
24. Fraley G. S. Supernovae Explosions Induced by Pair-Production Instability. *Astrophys. Space Sci.*, 1968, 2, 96.
25. Gamov G. On the Temperature of the Hot Universe. *Kgl. Danske vid. selskab. Mat.-fys. medd.*, 1953, 27, N 10.
26. Hagedorn R. Thermodynamics of Strong Interactions at High Energy and Its Consequences for Astrophysics. *Astron. and Astrophys.*, 1970, 5, 184.
27. Harrison E. R. Particle Barriers in Cosmology. *Comments Astrophys. and Space Phys.*, 1972, 4, 187.
28. Hoyle F. On the Origin of the Solar Nebula. *Quart. J. Roy. Astron. Soc.*, 1960, 1, 28.
29. Kaula W. M. Dynamical Aspects of Lunar Origin. *Revs. Geophys. Space Phys.*, 1971, 9, 217.
30. Lin C. C., Shu F. H. On the Spiral Structure of Disk Galaxies. *Astrophys. J.*, 1964, 140, 646.
31. Lin C. C., Shu F. H. On the Spiral Structure of Disk Galaxies. III. Comparison with Observations. *Astrophys. J.*, 1969, 155, 721.
32. MacDonald G. J. F. Tidal Friction. *Revs Geophys.*, 1964, 2, 467.
33. Omnes R. On the Origin of Matter and Galaxies. *Astron. and Astrophys.*, 1971, 10, 228.
34. Oort J. H. The Formation of Galaxies and the Origin of the High-Velocity Hydrogen. *Astron. and Astrophys.*, 1970, 7, 381.
35. Paczynski B. Carbon Ignition in Degenerate Stellar Cores. *Astrophys. Letters*, 1972, 11, 53.

36. *Peebles P. J. E.* Primeval Helium Abundance and the Primeval Fireball. *Phys. Rev. Letters*, 1966, 16, 410.
37. *Peebles P. J. E.* Origin of the Angular Momentum of Galaxies. *Astrophys. J.*, 1969, 155, 393.
38. *Peebles P. J. E.* Rotation of Galaxies and the Gravitational Instability Picture. *Astron. and Astrophys.*, 1971, 11, 377.
39. *Peebles P. J. E.* *Physical Cosmology*. Princeton Univ. Press, 1971.
40. *Peebles P. J. E., Dicke R. H.* Origin of the Globular Star Clusters. *Astrophys. J.*, 1968, 154, 891.
41. *Quirk W. J.* On the Gas Content of Galaxies. *Astrophys. J.*, 1972, 176, L9.
42. *Reeves H., Audouze J., Fowler W. A., Schramm D. N.* On the Origin of Light Elements. *Astrophys. J.*, 1973, 179, 909.
43. *Ringwood A. E.* Origin of the Moon: The Precipitation Hypothesis. *Earth Planet. Sci. Letters*, 1970, 8, 131.
44. *Roberts W. W.* Large-Scale Shock Formation in Spiral Galaxies and Its Implications on Star Formation. *Astrophys. J.*, 1969, 158, 123.
45. *Roberts W. W., Yuan C.* Applications of the Density Wave Theory to the Spiral Structure of the Milky Way System. III. Magnetic Field: Large-Scale Hydromagnetic Shock Formation. *Astrophys. J.*, 1970, 161, 877.
46. *Rubey W. W.* Geologic History of Sea Water. An Attempt to State the Problem. *Bull. Geol. Soc. America*, 1951, 62, 1111.
47. *Sciama D. W.* *Modern Cosmology*. Cambridge Univ. Press, 1971.
48. *Spitzer L., Jr.* *Diffuse Matter in Space*. N. Y., Intersci. Publ., 1968.
49. *Ter Haar D., Cameron A. G. W.* Historical Review of Theories of the Origin of the Solar System. In: *Origin of the Solar System*. R. Jastrow and A. G. W. Cameron (Eds.). N. Y., Acad. Press, 1963, p. 4.
50. *The Earth-Moon System*. B. G. Marsden, A. G. W. Cameron (Eds.). N. Y., Plenum Press, 1966.
51. *Truran J. W.* Theories of Nucleosynthesis. In: *Cosmochemistry*. A. G. W. Cameron (Ed.). Boston. Reidel, 1973.
52. *Truran J. W., Cameron A. G. W.* Evolutionary Models of Nucleosynthesis in the Galaxy. *Astrophys. Space Sci.*, 1971, 14, 179.
53. *Urey H. C.* *The Planets. Their Origin and Development*. New Haven, Yale Univ. Press, 1952.
54. *Urey H. C.* Primary and Secondary Objects. *J. Geophys. Res.*, 1959, 64, 1721.
55. *Wagoner R. V., Fowler W. A., Hoyle F.* On the Synthesis of Elements at Very High Temperatures. *Astrophys. J.*, 1967, 148, 3.
56. *Yoneyama T.* On the Fragmentation of a Contracting Hydrogen Cloud in an Expanding Universe. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1972, 24, 87.
57. *Zeldovich Ya. B.* *Magic without Magic*. N. Y., W. H. Freeman, 1972.
58. *Zeldovich Ya. B., Novikov I. D.* *Relativistic Astrophysics*, v. 2. Univ. Chicago Press, 1974.

Глава 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖПЛАНЕТНОГО ПРОСТРАНСТВА

С. Н. ВЕРНОВ, Ю. И. ЛОГАЧЕВ

Институт ядерной физики МГУ,
Москва, СССР

Н. Ф. ПИСАРЕНКО

Институт космических исследований,
Москва, СССР

СОЛНЦЕ

Свойства межпланетного пространства в значительной степени, если не полностью, определяются центральным телом солнечной системы — Солнцем. Солнце является источником мощных потоков корпускулярной и электромагнитной радиации, оно же ответственно за структуру межпланетных магнитных полей.

Многие явления на Земле тесно связаны с процессами, протекающими на Солнце. Механизм этой связи пока понят не до конца, но уже ясно, что большую роль в этих процессах играют солнечный ветер, корпускулярные потоки и коротковолновые электромагнитные излучения Солнца. Прежде чем описать проявления солнечно-земных связей, остановимся на элементах солнечной активности.

Солнечная активность

Солнечная активность — комплекс различных явлений, происходящих в атмосфере Солнца и характеризующихся значительными изменениями физических характеристик различных слоев солнечной атмосферы. Очевидна тесная связь между активными процессами в фотосфере (пятна, факелы), хромосфере (вспышки, флоккулы), короне (протуберанцы, конденсации, корональные лучи) и большое значение магнитного поля в этих процессах.

Локальные магнитные поля, обнаруженные в солнечной атмосфере повсеместно, играют весьма существенную, а в ряде случаев даже основную роль в физических процессах на Солнце. Обнаружено также общее магнитное поле Солнца. Поле Солнца различно на разных широтах. В полярных областях ($|\varphi| > 55^\circ$) его напряженность ~ 1 гс, и оно несколько

отличается от дипольного: силовые линии магнитного поля над полюсами, если судить по конфигурации полярных корональных лучей, расходятся медленнее, чем в случае обычного диполя, и не обнаруживают тенденции изгибаться в направлении к экватору. Поле напряженностью ~ 1 гс, наблюдаемое вблизи полюсов Солнца в фотосфере, уменьшается до 0,5 гс на высоте $\sim 3 \cdot 10^5$ км. Измерения с высоким разрешением показали, что общее поле состоит из множества мелких элементов разной полярности и размеров. Напряженность поля в некоторых элементах достигает 10—20 гс, причем обычно одна полярность преобладает. При наблюдениях с малым разрешением в результате усреднения измеряется слабое поле одного знака.

В умеренных и низких широтах ($|\varphi| < 50^\circ$) наблюдаются локальные магнитные поля, которые, как правило, совпадают с активными образованиями на Солнце. К крупномасштабным локальным образованиям относятся биполярные (BM) и униполярные (UM) магнитные области. Чаще всего наблюдаются BM-области. Напряженность поля в них меняется в широких пределах — от 0,2 до сотен гаусс, причем знак поля различен в разных частях области. Напряженность поля в области BM и размеры области связаны обратной зависимостью и проходят определенный цикл развития от начала до конца существования области BM (несколько месяцев): наибольшая напряженность поля в области наблюдается через несколько недель после ее возникновения, затем она уменьшается, а площадь области начинает увеличиваться и может достичь $\sim 0,3 R_\odot$.

Внутри области BM иногда располагаются группы пятен. Напряженность поля в них составляет от ~ 500 до ~ 4000 гс. Биполярные области, по-видимому, являются первопри-

чиной развития групп пятен. ВМ-области и пятна обычно вытянуты по параллели и в соответствии с направлением общего вращения Солнца первые части областей и групп пятен называются ведущими и обозначаются буквой «р», а последние — замыкающими и обозначаются буквой «f». Поля ведущих пятен областей ВМ имеют противоположные полярности в северном и южном полушариях Солнца и меняют знак с началом нового цикла солнечной активности (законы полярности Хойла). Эти законы полярности лучше выполняются для ВМ-областей, чем для пятен.

Униполярные магнитные области по сравнению с биполярными имеют меньшую напряженность поля, большую площадь и большее время жизни: напряженность поля ≤ 2 гс, размеры $\sim 0,1 R_{\odot}$, время жизни $\sim 6-8$ месяцев. Поля УМ, по-видимому, замыкаются высокоширотным полем и являются остатками исчезающих областей ВМ.

Развитие ВМ- и УМ-областей предшествует появлению активных областей на Солнце и завершается после их исчезновения.

Наблюдения на современных приборах с большим разрешением выявили короткоживущие мелкомасштабные магнитные поля, промежуточные по напряженности между полями ВМ-групп и полями пятен. Они связаны с флоккулами, порами, мелкими пятнами и другими активными образованиями в атмосфере Солнца.

Солнечные пятна — относительно темные участки на поверхности Солнца, состоящие из тени и полутени. В области тени заметна грануляция, область полутени состоит из радиальных волокон. Область тени пятна расположена ниже фотосферы, а полутень образует как бы воронку. Эффективная температура тени $\sim 4270^{\circ}\text{K}$, полутени $\sim 5380^{\circ}\text{K}$. Растекание газа из центра пятна (эффект Эвершеда) в области полутени происходит со скоростью ~ 2 км/сек, на краю полутени движение пропадает. Скорость растекания убывает с высотой и в пределах хромосферы меняет направление, так что газ течет уже к центру пятна. Есть указания и на вращательное движение пятна как целого. Вокруг полутени наблюдается светлое кольцо, яркость которого на 3—4% выше яркости фотосферы. Диаметры пятен заключены в пределах от тысяч до десятков тысяч километров. Маленькие пятна без полутени называются порами и составляют большинство от общего числа пятен. Пятна редко бывают одиночными, обычно наблюдаются группы пятен протяженностью до 100 тыс. км.

Классификация групп по полярности: униполярная (тип α , 10% всех групп) — все пятна имеют одинаковую полярность; биполярная (тип β , 90%) — два главных пятна обладают противоположными полярностями; сложная (тип γ , $\sim 1\%$) — пятна различных полярностей расположены беспорядочно. Группы пятен наблюдаются в так называемых «королевских» зонах ($5^{\circ} \leq |\varphi| \leq 45^{\circ}$).

Число пятен, видимых на поверхности Солнца, испытывает периодические изменения со средним периодом $\sim 11,2$ года. За меру числа пятен берется относительное число пятен (число Вольфа): $W = k(10g + f)$, где g — число групп пятен, f — общее число пятен, k — редукционный множитель порядка единицы.

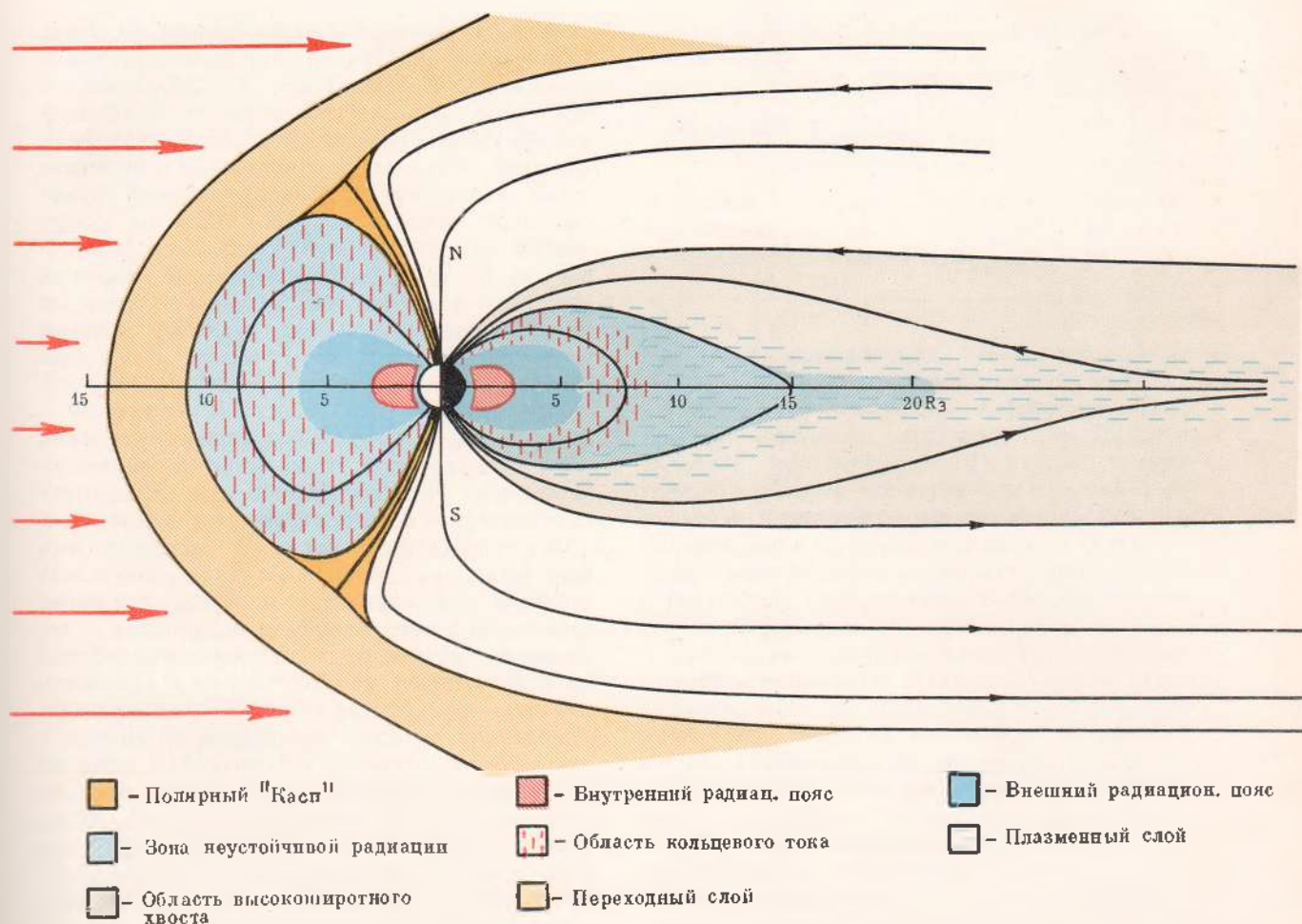
Сведения о числе солнечных пятен публикуются в [118, 129].

Расположение пятен на диске меняется с фазой цикла солнечной активности, хотя положение самого пятна за время его существования меняется мало. В начале цикла пятна возникают на широтах около $\pm 35^{\circ}$, вблизи максимума — на широтах $\pm 16^{\circ}$, а в конце цикла — около $\pm 8^{\circ}$ (закон Шперера).

Однако в последние годы в эту закономерность вносятся некоторые уточнения.

Магнитное поле в центре тени пятна почти вертикально и не бывает меньше 200 гс, а во время максимальной фазы развития достигает 2000—4000 гс. В полутени поле горизонтально по направлению и на краю его величина составляет ~ 300 гс. Роль конвективного переноса энергии, незначительная в фотосфере, в области пятен, по-видимому, возрастает. Группы пятен обычно вытянуты вдоль параллелей, но ведущее пятно расположено ближе к экватору. Развитие типичной группы начинается с появления пор, из которых развиваются пятна. В течение нескольких дней возрастает их площадь и магнитное поле. Как правило, через 2—3 недели группа достигает максимального развития и начинает разрушаться: сначала исчезает хвостовое пятно и большинство мелких, группа становится униполярной; ведущее пятно сохраняется до тех пор, пока его диаметр не станет меньше 30—45 тыс. км, тогда оно быстро разрушается. Группа может существовать от нескольких часов до нескольких месяцев.

Факелы. Солнечные пятна всегда сопровождаются светлыми волокнистыми образованиями в фотосфере — факелами, но последние могут существовать и без пятен. Факелы появляются раньше пятен и сохраняются



Разрез магнитосферы Земли

после их исчезновения в течение нескольких солнечных оборотов. Широтный диапазон их несколько больше, чем у пятен. В белом свете факелы не видны в центре диска. В течение 3—4 дней факелы можно наблюдать вблизи восточного и западного краев диска. Верхние части факелов горячее окружающей фотосферы на $\sim 200-300^\circ$, а нижние холоднее. Факелы локализуются в местах, где напряженность магнитного поля $H > 2-5$ гс. На широтах около $\pm 70^\circ$ наблюдаются полярные факелы, имеющие меньшие размеры, меньшее время жизни ($\sim 0,5$ часа) и округлую форму.

Флоккулы. Верхние слои фотосферных факелов переходят в хромосферные факелы, или флоккулы, которые могут наблюдаться в фиолетовых линиях ионизированного кальция H и K (кальциевые флоккулы) и в красной линии водорода H_α (водородные флоккулы). Последние характеризуются меньшими размерами и меньшей устойчивостью. Флоккулы — неоднородные образования с большими колебаниями яркости, температуры, скорости движения и напряженности магнитного поля в разных местах. Время их жизни больше, чем у пятен: от нескольких дней до нескольких месяцев. Наблюдаются флоккулы и без пятен, но тогда они менее устойчивы. В отличие от пятен, они располагаются по всему видимому диску, но вблизи полюсов менее яркие, неустойчивые и более круглые. Тонкая структура флоккулов тесно связана с магнитными полями; большая часть их волоконцев ориентирована вдоль силовых линий магнитного поля. Интенсивность флоккулов повышается в дни появления и исчезновения пятен.

Солнечные вспышки — наиболее активные образования на Солнце, появляющиеся внешне на небольшой площади (поперечник несколько десятков тысяч километров). Слабые вспышки длятся 5—10 мин., а мощные — несколько часов. Появляются в верхней хромосфере или короне всегда над факельным полем вблизи сложных групп пятен типа γ и вблизи нейтральных линий продольного магнитного поля, где наблюдаются большие градиенты поля. Крупным вспышкам соответствуют градиенты 0,1 гс/км. Число вспышек балла 1 N на порядок больше числа вспышек балла 3.

Классификация вспышек устанавливается табл. 1 [119].

Вспышка сопровождается спорадическим ультрафиолетовым, рентгеновским и радиоплучением и выбросом заряженных частиц разных энергий вплоть до высокоэнергичных

Таблица 1. Классификация вспышек

Оценка относительной яркости вспышки	Площадь вспышки, кв. град.				
	<2,0 суб-вспышка	2,1—5,1	5,2—12,4	12,5—24,7	>24,7
F — слабая	sF	1F	2F	3F	4F
N — обычная	sN	1N	2N	3N	4N
B — яркая	sB	1B	2B	3B	4B

солнечных космических лучей (см. раздел «Электромагнитное излучение Солнца»). По-видимому, генерация высокоэнергичных частиц — основная характеристика вспышек. Жесткое рентгеновское излучение генерируется в области вспышки или над ней в результате тормозного излучения электронов, ускоренных в процессе вспышки, а сантиметровый радиовсплеск возникает одновременно в результате синхротронного излучения этих же электронов.

Выброс вещества, по-видимому, также присущ всем вспышкам. Наиболее частым типом выброса вещества является возвратный протуберанец: скорость выброса от 50 до 5000 км/сек, выброшенный поток затем опускается вниз. Извержение вещества в межпланетное пространство должно происходить со скоростями, превышающими критические, обусловленные гравитацией Солнца.

Испускание солнечных космических лучей высокой энергии наблюдалось почти всегда при очень сильных вспышках. Помимо редких случаев испускания частиц высокой энергии, было обнаружено, что Солнце гораздо чаще излучает частицы малой энергии, тоже связанные со вспышками.

Протонные вспышки, т. е. вспышки, во время которых генерируются энергичные протоны (с энергией выше нескольких Мэв), обычно сопровождаются радиоизлучением IV типа (непрерывным) и внезапными возмущениями земной ионосферы, причиной которых является усиленная ионизация нижней части D-области ионосферы рентгеновским излучением Солнца с $\lambda \leq 5$ Å.

Полная энергия солнечных космических лучей, выбрасываемых мощной вспышкой, достигает $10^{31}-10^{32}$ эрг.

Сложные явления во вспышках, связанные с генерацией солнечных космических лучей, еще не объяснены. Предполагается, что появление вспышек связано с неустойчивостью солнечной плазмы около нейтральных линий при больших градиентах поля сложной кон-

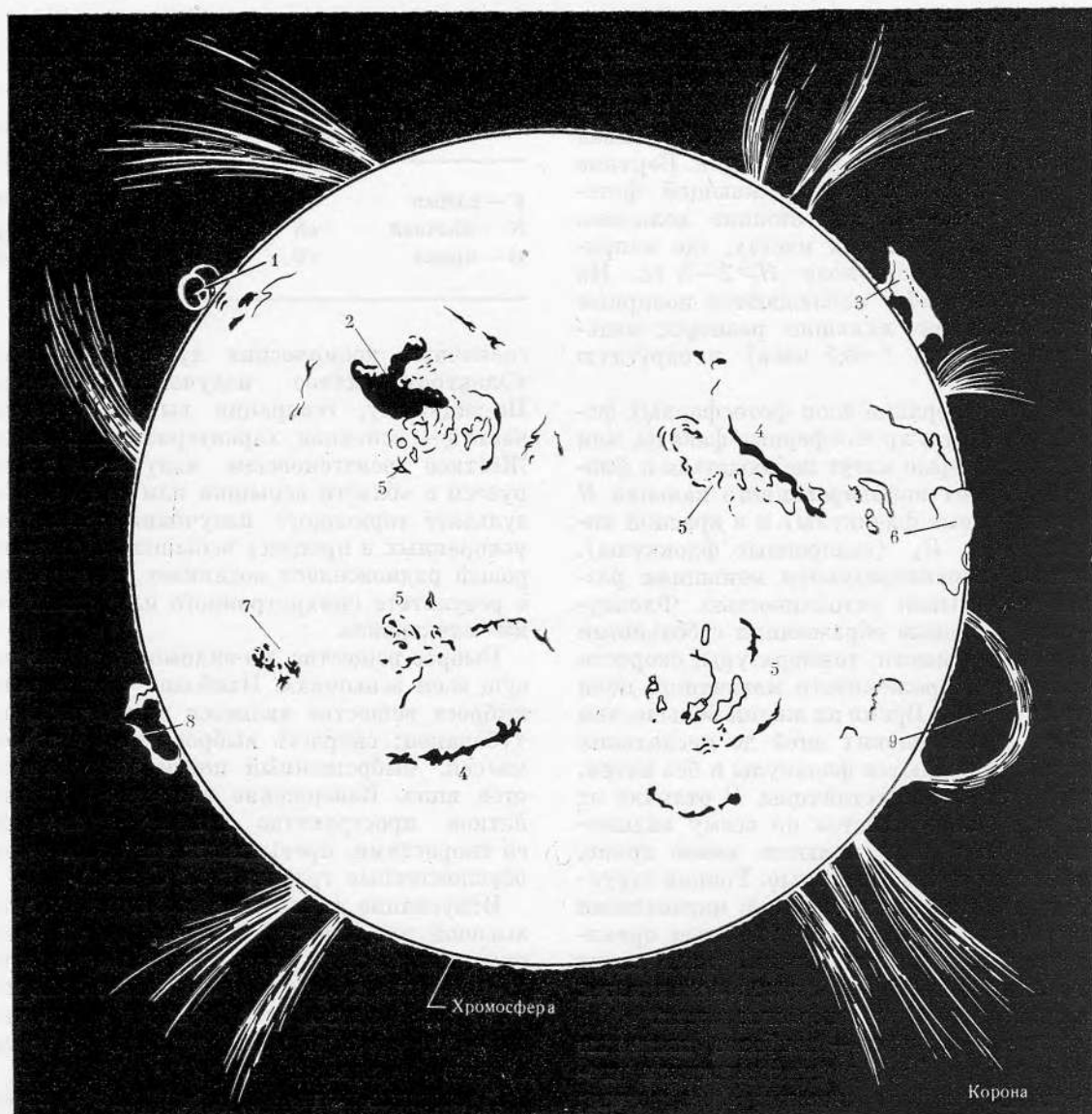


Рис. 1. Схематическая картина активного Солнца

- 1 — петельный протуберанец;
- 2 — вспышка;
- 3 — протуберанец типа «частокол»;
- 4 — волокно;
- 5 — флоккул;
- 6 — протуберанец типа «частокол», пересекающий лимб;
- 7 — группа пятен;
- 8 — протуберанец типа «дуга»;
- 9 — протуберанец типа «возвратный выброс»

фигурации в хромосфере, в результате чего магнитная энергия переходит в другие формы [24, 135]. После вспышки магнитное поле обычно упрощается, градиенты уменьшаются и поле ослабляется. Энергетические оценки показали, что уничтожение поля в 50—100 тс

в области вспышки достаточно, чтобы компенсировать выделяющуюся энергию.

Протуберанцы — массы сравнительно холодного и плотного газа ($n \sim 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$), поднимающиеся над хромосферой. На краю диска видны в виде светлых облаков, а в центре — в виде темных волокон, называемых *водородными волокнами*. Вблизи экватора они располагаются вдоль меридианов, а на высоких широтах — вдоль параллелей. Различаются три типа протуберанцев: спокойные, активные и эруптивные. Спокойные протуберанцы встречаются на границах активных областей преимущественно с высокоширотной стороны, но иногда и внутри области. Размеры: длина $\sim 100 - 200$ тыс. км,

высота несколько тысяч километров, толщина ~ 10 тыс. км. Время жизни — несколько месяцев. Скорость движения отдельных струй ~ 10 км/сек. Активные протуберанцы невелики и встречаются внутри активных областей, часто вблизи пятен. Форма их разнообразна и быстро меняется. Время жизни — несколько часов или дней, часто связаны со вспышками. Скорость движения отдельных элементов до 100 км/сек. Эруптивные протуберанцы — довольно редкий тип. Отличаются очень бурным развитием, неустойчивостью форм, скачкообразным ростом скорости движения до сотен км/сек и внезапным исчезновением. Время жизни — несколько минут.

Температура протуберанцев $\sim 10^4$ °К, плотность в ~ 100 раз больше, чем окружающего их коронального газа. Это позволяет предположить, что протуберанец, возможно, конденсируется из коронального вещества в результате охлаждения, связанного с уменьшением магнитного поля в основании короны, или образуется при сжатии некоторого объема какими-то внешними силами, например магнитным полем.

На рис. 1 из работы [128] приведены различные элементы солнечной активности на диске Солнца.

Центры активности. Развитие различных активных образований во всей солнечной атмосфере представляет единый процесс, который может быть рассмотрен как развитие центра активности (раньше центр активности назывался активной областью, куда относили только факельную площадку с пятнами и вспышками). Развитие типичного центра активности можно подразделить на четыре стадии.

I стадия — появление слабого униполярного (или сложной конфигурации) магнитного поля, одновременно возникает яркий факел и в хромосфере развивается флоккул. В самом ярком месте флоккула возникают темные точки (поры), из которых развиваются пятна. Площадь, занимаемая полем, увеличивается, и оно становится биполярным. I стадия длится несколько дней.

II стадия — активная. Она характеризуется бурным и неустойчивым развитием и длится несколько недель. За это время площади и интенсивности М-областей (ВМ и UB) и флоккулов достигают максимума, появляются вспышки, активные протуберанцы. Через месяц группа пятен начинает разрушаться, флоккул разрастается, но темнеет.

III стадия — устойчивое состояние, длится несколько месяцев. Группа пятен становится

униполярной и потом исчезает. Факелы и флоккулы постепенно слабеют. Спокойные протуберанцы и значительно ослабленная М-область пока сохраняются.

IV стадия длится несколько месяцев. Исчезают протуберанцы, биполярная магнитная область превращается в униполярную и затем рассасывается.

Центры активности распределены в солнечной атмосфере далеко не равномерно. Преимущественные широты — это «королевские зоны», но в годы максимальной активности центры появляются и на широтах $>|\pm 40^\circ|$, хотя там они менее устойчивы. Существуют долготные интервалы, в которых чаще всего возникают центры активности, так называемые активные долготы.

Активные долготы сохраняются в течение двух и более 11-летних циклов, испытывая колебания в разные стороны. По-видимому, активные долготы характеризуют физическое состояние более глубоких внутренних, подфотосферных слоев, которым присуще не дифференциальное, а жесткое вращение.

Индексы солнечной активности. Солнечная активность может характеризоваться разными индексами:

- 1) относительное число пятен — число Вольфа;
- 2) суммарная площадь групп пятен;
- 3) максимальная напряженность магнитного поля пятен;
- 4) вспышечный индекс;
- 5) суммарная площадь протуберанцев;
- 6) индекс короны (средние интенсивности линий);
- 7) поток радиоизлучения на данной длине волны (от метров до сантиметров). Обычно используют $\lambda = 10,8$ см.

Сведения о различных индексах солнечной активности публикуются в [23, 118, 129, 130].

Циклы солнечной активности. Солнечная активность характеризуется несколькими циклами различной длительности; наибольший интерес представляют 11- и 22-летний циклы, относящиеся к категории циклов с возмущениями, а также 80-летний цикл.

11-летний цикл солнечной активности лучше выделяется по числу групп пятен. Нумерация циклов ведется с цикла, начавшегося в 1745 г. 11-летние циклы имеют разные длительности (от 7 до 17 лет) и среднюю продолжительность $\sim 11,2$ года. Временной ход активности в цикле несимметричен: от максимума числа пятен до минимума (ветвь спада) проходит в среднем $\sim 6,7$ года, а от минимума до максимума (ветвь роста) $\sim 4,6$ года.

Циклы отличаются и по среднегодовым максимальным значениям чисел Вольфа W (от 46 до 190, а в конце 1957 г. среднеквартальное число Вольфа было $W=235$). Интенсивность цикла связана с его продолжительностью: чем мощнее цикл, тем меньше его продолжительность, тем короче ветвь роста, тем больше асимметрия цикла и тем на более высоких широтах появляются его первые группы пятен. У слабых циклов ветвь роста почти равна ветви спада, у очень слабых — даже наоборот. Полярность ведущих пятен в северном и южном полушариях меняется от цикла к циклу. Эпохи максимума в них иногда отличаются на 1—2 года. Самые мощные явления солнечной активности наблюдаются обычно не в год максимума пятен, а в конце ветви роста или в начале ветви спада.

22-летний магнитный цикл характеризуется изменением знака общего магнитного поля и полей магнитных областей пятен. В нечетных циклах ведущие пятна и общее поле имеют положительный знак в северном полушарии и отрицательный в южном. 22-летний цикл начинается с четного 11-летнего цикла. По-видимому, 22-летнему циклу подчиняется также индекс средней площади групп пятен и индекс частоты вспышек, а также сумма среднегодовых чисел Вольфа.

80-летний цикл — это, прежде всего, квазипериодическое изменение максимумов 11-летних циклов. Максимумы 80-летних циклов приходятся примерно на 1775, 1855 и 1930 гг., а минимумы — на 1815, 1900 и 1980 гг. Поэтому ближайшие минимумы в 11-летнем цикле солнечной активности ожидаются более глубокими по сравнению с предыдущими.

Исследованию и описанию солнечной активности посвящена многочисленная литература, например [7, 67, 69, 79, 101, 128].

Электромагнитное излучение Солнца

Спектр электромагнитного излучения Солнца простирается от радиоволнового диапазона до рентгеновской области. Коротковолновая граница спектра обычно лежит при нескольких ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$; энергия кванта с длиной волны $\lambda = 1 \text{ \AA}$ равна 12,4 кэВ) в условиях «спокойного» Солнца и может смещаться до нескольких сотен кэВ во время вспышек.

Солнечная постоянная за границей земной атмосферы составляет $1,36 \cdot 10^6 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$, или $1,95 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$. Прямое измерение солнечной постоянной с учетом коротковолновой

Таблица 2. Спектральное распределение солнечного излучения на верхней границе земной атмосферы для среднего расстояния Земля — Солнце

$\lambda, \text{ \AA}$	$t_\lambda, \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{ \AA}$	Относительная энергия для области короче $\lambda, \%$
10	10^{-6}	10^{-9}
100	10^{-3}	10^{-6}
1 000	10^{-3}	10^{-4}
2 000	1,4	10^{-2}
3 000	61	1,3
5 260	196	26
6 070	178	36
6 880	148	46
10 000	73	73
20 000	11	95
30 000	2,7	98
50 000	0,4	99,8

части спектра было выполнено лишь в конце 1967 г. Точность ее определения составляет около 1,0%.

Распределение энергии в различных областях солнечного спектра приведено в табл. 2. Общий вид солнечного спектра за пределами земной атмосферы приведен на рис. 2, взятом из [93].

Земная атмосфера полностью поглощает солнечное излучение с длиной волны меньше 2900 \AA . От 3000 до 40 000 \AA атмосфера прозрачна (так называемое «оптическое окно»). Следующее окно прозрачности начинается при миллиметровых волнах и простирается примерно до 15 м (так называемое радиоокно). Радионизлучение заметно ослабляется

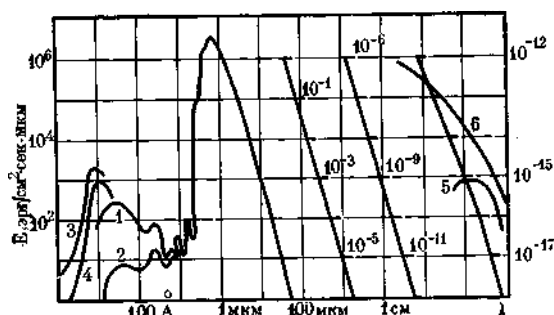


Рис. 2. Распределение энергии в спектре Солнца

- 1 — в максимуме солнечной активности;
- 2 — в минимуме;
- 3 — во вспышке класса 3+;
- 4 — во вспышке класса 2+;
- 5 — во время шумовой бури;
- 6 — во вспышке

ионосферой при длинах волн, больших 15 м, и полностью «обрезается» при длине волны около 40 м.

Видимый свет. Большая часть видимого света испускается фотосферой в виде непрерывного спектра, на который накладываются фраунгоферовы линии поглощения. Возникающие глубоко внутри Солнца рентгеновские фотоны высокой энергии, проходя путь от глубоких слоев до солнечной атмосферы, в процессе многократного энергообмена путем излучения и поглощения в большом диапазоне частот порождают непрерывный спектр излучения. Энергия видимого света ($\lambda\lambda$ 3800—7600 Å) составляет около 20% энергии солнечного излучения.

Фотосферное вещество имеет высокий коэффициент поглощения излучения и практически на глубине 300—400 км становится непрозрачным.

На непрерывный спектр накладываются десятки тысяч фраунгоферовых линий поглощения, большинство из них образуется в верхних слоях фотосферы, а некоторые — в хромосфере. Линии поглощения заметно изменяют распределение энергии в спектре солнечного излучения. 13 элементов имеют каждый более 100 линий поглощения, из них 2 элемента (Ti, Cr) — более 1000, а Fe — более 3000 линий поглощения. Наблюдаемая размытость фраунгоферовых линий обусловлена, как правило, совместным действием доплер-эффекта и различных типов затухания. Наиболее сильные фраунгоферовы линии в видимой области приведены в табл. 3.

Таблица 3. Сильные фраунгоферовы линии

λ , Å	Атом	λ , Å	Атом	λ , Å	Атом
3820,44	Fe	4226,74	Ca	5172,70	Mg
3933,68	Ca ⁺	4340,48	H _{γ}	5185,62	Mg
3968,49	Ca ⁺	4383,56	Fe	5889,97	Na
4045,82	Fe	4861,34	H _{β}	5895,94	Na
4101,75	H _{δ}	5167,33	Mg	6562,81	H _{α}

Излучение в видимой области почти постоянно, в то время как в ультрафиолетовой и радиообласти оно меняется с периодом ~11 лет, а также испытывает колебания, связанные с развитием активных областей.

Земная атмосфера, непрозрачная к значительной части излучения, производит допол-

нительное искажение солнечного света в виде экстинкции (общее ослабление спектра, усиливающееся к фиолетовому концу) и в виде теллурических линий и молекулярных полос поглощения, плотность которых тоже возрастает к фиолетовому концу, а в красной области они даже преобладают над солнечными линиями поглощения.

Коротковолновое излучение Солнца. Излучение с длиной волны короче 3000 Å, что соответствует энергии квантов больше 4 эв, принято называть коротковолновым. По сравнению с корпускулярными ионизирующими излучениями солнечных вспышек энергия квантов коротковолнового излучения невелика. Однако поток энергии коротковолнового излучения Солнца в тысячи раз превышает зарегистрированные в космосе максимальные потоки энергии других ионизирующих излучений. Из-за малой глубины проникновения коротковолновое излучение может существенно изменять поверхностные свойства различных конструктивных материалов. Таким образом, при моделировании условий космоса в лабораториях необходимо детальное знание потоков энергий в различных участках спектра коротковолнового излучения Солнца.

Основной вклад в коротковолновое излучение Солнца вплоть до 1600—1500 Å дает фотосфера; интенсивность этого излучения практически не меняется во времени. В области спектра короче 1500 Å основной вклад в излучение дают хромосфера и корона, а при длинах волн менее 300 Å — корона Солнца. Излучение с длиной волны короче 1300 Å и в особенности короче 100 Å сильно изменяется в зависимости от уровня активности Солнца.

Известны вариации потока излучения Солнца на протяжении 11-летнего цикла его активности, а также 27-дневные вариации, вызванные видимым перемещением активных областей по диску при вращении Солнца. Наибольшие возрастания потока излучения, особенно вблизи коротковолновой границы спектра, наблюдаются, однако, при кратковременных рентгеновских всплесках, часто сопровождающих хромосферные вспышки. Длительность всплесков в зависимости от класса составляет обычно от нескольких минут до часов. Длительность всплесков существенно зависит также от длины волны рентгеновского излучения. Например, в участке спектра короче 10 Å наблюдаются всплески, продолжающиеся десятки минут, сравнимые по длительности с хромосферными вспышками. В то же время в области короче 1 Å длительность обычно не превышает нескольких

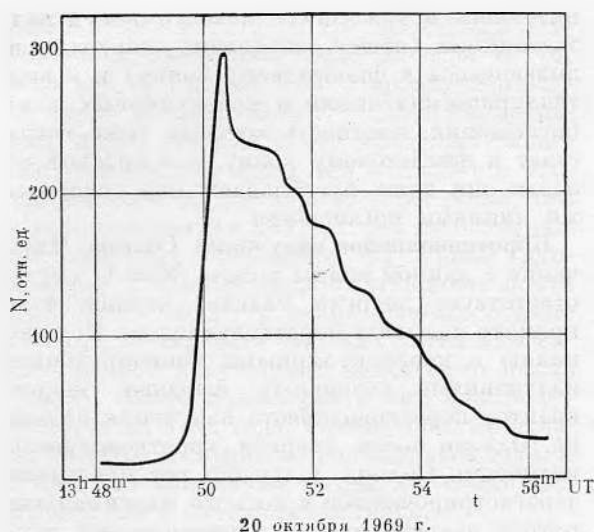


Рис. 3. Развитие рентгеновской вспышки в области спектра короче 1 Å (13 час. 50 мин. 20 октября 1969 г.)

Таблица 4. Поток солнечной энергии в коротковолновой области спектра ($\lambda < 3000$ Å) за пределами земной атмосферы на расстоянии 1 а.е.

Границы интервалов, Å	Поток энергии, эрг/см ² ·сек	Границы интервалов, Å	Поток энергии, эрг/см ² ·сек	Границы интервалов, Å	Поток энергии, эрг/см ² ·сек	Границы интервалов, Å	Поток энергии, эрг/см ² ·сек
3025	3050	2125	145	1225	5,10	350	0,41
2975	3150	2075	90	1200	0,19	300	0,19
2925	2600	2025	70	1150	0,10	250	0,23
2875	1700	1975	55	1100	0,09	200	0,36
2825	1200	1925	41	1050	0,17	180	0,39
2775	1100	1875	28	1000	0,13	160	0,07
2725	1250	1825	19	950	0,14	140	0,04
2675	1000	1775	12	900	0,18	120	0,02
2625	700	1725	8,2	850	0,12	100	0,06
2575	560	1675	5,0	800	0,10	80	0,05
2525	380	1625	3,2	750	0,05	60	0,04
2475	390	1575	1,7	700	0,05	40	0,02
2425	340	1525	0,95	650	0,13	30	0,005
2375	320	1475	0,50	600	0,10	20	0,002
2325	360	1425	0,26	550	0,07	10	0,00001
2275	350	1375	0,26	500	0,08	<10	0,000001
2225	310	1325	0,18	450	0,06		
2175	240	1275	0,37	400	0,13		
2125		1225		350			

минут. Развитие характерной рентгеновской вспышки во времени приведено на рис. 3.

В табл. 4 приведены данные об абсолютных значениях потока излучения в области спектра короче 3000 Å при отсутствии вспышек (спокойное Солнце) вблизи фазы минимума 11-летнего цикла активности.

При переходе от минимума к максимуму 11-летнего цикла солнечной активности суммарный поток излучения с длиной волны короче 1300 Å возрастает в 2—3 раза. На протяжении 27-дневного периода этот поток может изменяться в 1,5—2 раза. Поток в наиболее интенсивной линии водорода L_{α} 1215,7 Å изменяется от 3 до 6 эрг/см²·сек. Кратковременные изменения интенсивности излучения в области короче 1300 Å, по-видимому, незначительны.

В области спектра короче 100 Å за время 11-летнего солнечного цикла поток излучения варьирует от 0,1 до 1 эрг/см²·сек и может изменяться в 3—5 раз в течение нескольких часов или дней. Однако в области спектра короче 10 Å эта величина возрастает от минимума к максимуму солнечного цикла на два порядка и может изменяться в десятки раз в течение 27-дневного цикла. Во время солнечных вспышек интенсивность излучения с длиной волны <10 Å может достигать величины $5 \cdot 10^{-2}$ эрг/см²·сек. Поток в области короче 5 Å для спокойного Солнца, вероятно, достигает 10^{-6} эрг/см²·сек и может возрастать во время вспышек почти на три порядка.

В области спектра короче 1 Å поток во время вспышек может достигать 10^{-4} эрг/см²·сек.

На рис. 4 и 5 из работы [49] изображено распределение энергии в коротковолновом

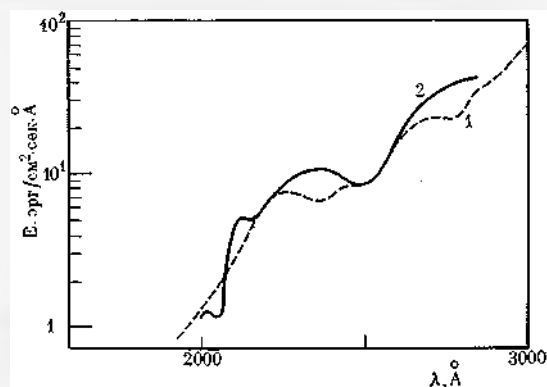


Рис. 4. Распределение солнечной энергии в области спектра 3000—2000 Å

1 — 19 апреля 1960 г. (Tousey);
2 — 13 января 1967 г. (Bonnet)

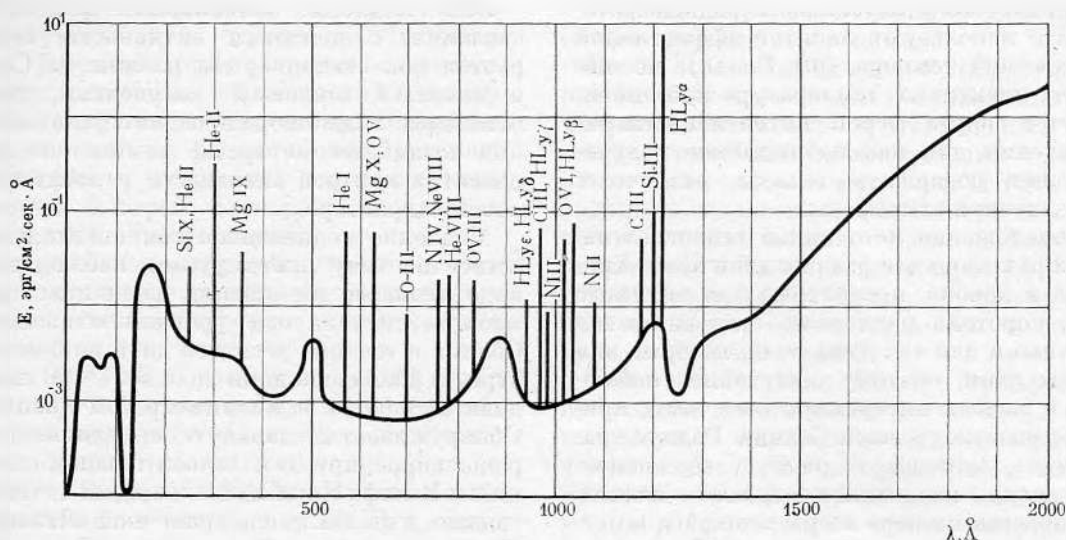


Рис. 5. Распределение солнечной энергии в области спектра короче 2000 Å

спектре Солнца. Рис. 5 относится к спокойному Солнцу вблизи фазы минимума 11-летнего цикла активности. На рисунке отмечены наиболее интенсивные эмиссионные линии, причем их ординаты численно равны потоку энергии в линии (эрг/см²·сек). Близкие линии совмещены, ордината в этом случае соответствует суммарному потоку.

Следует иметь в виду, что в настоящее время экспериментальный материал о коротковолновом солнечном излучении все еще ограничен.

Приведенные в табл. 4 данные получены в разное время различными методами.

Часть измерений выполнена на ракетах, и результаты измерений экстраполированы за пределы земной атмосферы. Таким образом, приведенные данные надо рассматривать как приближенные, в дальнейшем они будут уточняться.

Исследованию коротковолнового излучения Солнца посвящены работы [36, 37, 51, 86, 117, 136].

Радиоизлучение Солнца. Радиоизлучение Солнца может наблюдаться на поверхности Земли лишь в «радиокне» на длинах волн от $\lambda \sim 8$ мм до $\lambda \sim 15$ м. Коротковолновая граница определяется поглощением молекул H_2O и O_2 , а длинноволновая — значением критической частоты ионосферы.

Солнце является переменной радиозвездой. Радиоволны излучаются солнечной атмосферой, в основном хромосферой и короной, т. е.

плазмой с температурой 10^4 — 10^7 °К и электронной концентрацией 10^7 — 10^8 см $^{-3}$.

Солнце испускает три типа радиоизлучения.

1) Постоянный континуум спокойного Солнца (фон), наблюдаемый по всему спектру.

2) Медленно меняющуюся компоненту, лучше всего наблюдаемую на волнах от 3 до 60 см, связанную с пятнами и флоккулами.

3) Спорадическое радиоизлучение — шумовые бури, всплески пяти типов, микроволновые всплески и дециметровый континуум. Источники связаны с центрами активности, а некоторые типы всплесков непосредственно коррелируют со вспышками.

В равновесной высокотемпературной плазме спокойного Солнца излучение электронов является тепловым и некогерентным. Нетепловое излучение возникает при отклонении распределения скоростей от максвелловского и связано с активными образованиями на Солнце. Для теплового излучения можно пренебречь влиянием общего магнитного поля Солнца. Спорадическое нетепловое радиоизлучение связано с теми областями солнечной атмосферы, где существуют сильные локальные магнитные поля, поэтому оно поляризовано и наблюдается в виде обыкновенной и необыкновенной компонент.

Электроны генерируют в основном три типа солнечного радиоизлучения: тормозное, магнитно-тормозное (для релятивистских электронов называемое синхротронным, а для нерелятивистских — циклотронным) и черенковское, дающие разные вклады в различные типы солнечного радиоизлучения.

Для теплового и нетеплового радиоизлучения часто используют понятие эффективной или яркостной температуры $T_{\text{эф}}(\lambda)$, но она не всегда идентична температуре источника, а является скорее мерой интенсивности радиоизлучения, так как наблюдаемое излучение может содержать вклады различных слоев солнечной атмосферы.

Местоположение источников теплового излучения различно для разных длин волн. Хромосфера и корона, прозрачные для видимого света и коротких радиоволн, становятся непрозрачными для тех длин волн, которые они излучают сами, поэтому излучение, наблюдаемое в разных интервалах длин волн, приходит от разных уровней Солнца. Радиус «радиосолнца», близкий к радиусу R_{\odot} оптического диска на миллиметровых волнах, увеличивается по мере возрастания λ и в метровом диапазоне составляет $\sim (1,5-3,0)R_{\odot}$.

Радиоизлучение «спокойного» Солнца (фон или B -компонента) наблюдается во всем диапазоне волн от миллиметровых до метровых. Оно определяется во время наименьшей солнечной активности. Частотный спектр, характеризуемый $T_{\text{эф}}(\lambda)$, меняется от $6 \cdot 10^3$ °К для миллиметровых волн до $\sim 10^6$ °К в метровом диапазоне; $T_{\text{эф}}(\lambda)$ — немонотонная функция, она имеет максимум при $\lambda = 4$ мм, минимум на $\lambda \sim 6$ мм и затем сильно возрастает к метровым волнам. Вопрос об 11-летних вариациях B -компоненты пока не ясен. B -компонента имеет тепловой характер, не поляризована, в стационарной атмосфере Солнца представляет собой в основном тормозное излучение электронов с малым вкладом черенковского. Миллиметровые волны генерируются в нижней хромосфере; с ростом λ высота области генерации увеличивается и метровые волны идут от короны. По типу излучения B -компонента является континуумом, т. е. имеет стационарный характер и широкий спектр частот, что свидетельствует о некогерентном механизме генерации.

Спорадическое радиоизлучение Солнца связано с солнечной активностью, неоднородно по составу и наиболее интенсивно и разнообразно проявляется в метровом диапазоне. Для классификации лучше положить в основу динамический спектр радиоизлучения (зависимость частоты от времени), что облегчит поиски механизмов генерации.

С солнечной активностью связаны: медленно меняющаяся компонента (S -компонента), шумовые бури и всплески I типа, всплески II, III, IV и V типов, микроволновые всплески и дециметровый континуум.

Если медленно меняющаяся компонента, связанная с центрами активности, генерируется при стационарном режиме на Солнце и является тепловым излучением, то все остальные виды спорадического радиоизлучения возникают во время «активной» фазы развития центров активности и носят нетепловой характер.

Медленно меняющаяся компонента, являющаяся по типу континуумом, наблюдается в виде плавного повышения величины принимаемого сигнала над уровнем «спокойного» Солнца в течение десятков дней не более чем втрое в диапазоне длин волн $3 \leq \lambda \leq 50$ см и на доли процентов в миллиметровом диапазоне. Обнаруживает 27-дневную периодичность, хорошо коррелирует с относительным числом пятен Вольфа и с общей площадью пятен, т. е. связана с фазой цикла солнечной активности. Источники — локальные области на диске Солнца на высоте $\sim 0,03 R_{\odot}$ от поверхности Солнца, т. е. на границе между хромосферой и короной; тесно связаны с пятнами и особенно с флоккулами и, по-видимому, расположены в областях повышенной электронной концентрации в нижней короне над центрами активности, содержащими пятна и флоккулы. Медленно меняющаяся компонента существует дольше, чем связанный с ней флоккул.

Наблюдения S -компоненты над активными областями можно использовать для прогноза протонных вспышек: было показано, что большинство протонных вспышек происходит тогда, когда отношение плотностей потоков S -компоненты на длинах волн $\lambda = 3,2$ см и $\lambda = 7,5$ см превышает единицу.

Шумовые бури и всплески I типа представляют собой радиоизлучение типа континуума с налагающимися на него узкими всплесками. Наблюдаются главным образом в метровом диапазоне, в дециметровом более редки и менее интенсивны. Наибольшая интенсивность приходится на длины волн $\lambda = 2-4$ м. Занимаемый интервал частот не более 250 Мгц. Поток во время всплесков может в 10^2-10^3 раз и более превышать среднее спокойное значение. Континуум обычно возникает постепенно и наблюдается в течение нескольких часов и дней, а многочисленные кратковременные всплески I типа имеют длительность от доли секунды до минуты.

Излучение шумовых бурь и всплесков I типа сильно поляризовано, не дает дрейфа по частоте и является нетепловым. Механизм генерации пока точно неизвестен; возможно, это некогерентный магнитно-тормозной меха-

низм. Есть предположение, что области генерации шумовых бурь служат как бы резервуаром, удерживающим энергичные частицы благодаря «ловушке», образованной биполярными магнитными полями пятен. Появление всплесков I типа на фоне шумовой бури можно, по-видимому, объяснить дополнительным ускорением быстрых электронов в какой-то ограниченной области короны.

Другим возможным источником могут быть также плазменные волны, время затухания которых сравнимо с временем жизни всплесков I типа.

Всплески II типа (медленно дрейфующие по частоте) — мощные всплески радиоизлучения в метровом и декаметровом диапазонах длительностью от нескольких минут до десятков минут. Сначала всплески II типа возникают на высоких частотах ~ 200 МГц, затем перемещаются в низкие; большинство их загорает на частоте $f=25$ МГц ($\lambda=12$ м). Скорость дрейфа по частоте составляет доли МГц/сек. Интенсивность в 100—1000 раз больше фона. Это одно из наиболее редких явлений в радиоизлучении Солнца: даже в период максимальной активности в среднем наблюдается один всплеск за 50—100 час. Всплески II типа обычно возникают во время крупных вспышек балла 2 и 3. Запаздывание всплеска II типа относительно максимума оптической вспышки в среднем 7 мин. Ширина полосы частот всплеска в каждый момент составляет $\sim 0,3f$, где f — частота максимальной интенсивности. Поляризация мала.

Наиболее выдающаяся особенность всплесков II типа — появление второй гармоники (в 75—80% случаев), причем структура всплесков на основном тоне и на второй гармонике одинакова. Появляются они одновременно и на большой высоте в короне, но вторая гармоника генерируется, по-видимому, глубже в короне, чем основной тон.

Частотный дрейф в сторону низких частот, видимый на динамическом спектре всплесков II типа, можно объяснить согласно «плазменной» гипотезе движением агента из области вспышки через корону. «Плазменная» гипотеза связывает частоту радиоизлучения с собственной частотой колебаний плазмы. По мере удаления от фотосферы концентрация электронов убывает, и, следовательно, частотный дрейф всплеска II типа будет направлен в сторону низких частот. Агентом, вызывающим всплески этого типа, являются ударные волны в плазме с «вмороженным» магнитным полем, возникающие во взрывной фазе вспышки и движущиеся со скоростью

10^3 км/сек. Всплески генерируются в процессе прохождения через корону.

Связь всплесков II типа с выбросом материи из области вспышки и с солнечными геоактивными потоками подтверждается появлением геомагнитных возмущений через 1—2 дня после сильных всплесков II типа и совпадением скорости движения сгустка со скоростями этих потоков. Было найдено, что индексы A_p и K_p возрастают через 1,5—2,2 суток после всплесков II типа. Но только в 45% случаев после них начинаются магнитные бури и полярные сияния.

Всплески III типа (быстро дрейфующие) наблюдаются в метровом диапазоне. Подобно всплескам II типа, это нетепловое излучение, возникающее при трансформации в электромагнитные волны плазменных волн в системе корпускулярный поток — корональная плазма. Соответствующий корпускулярный поток, выходящий из области вспышки, движется в короне со скоростью $\sim 10^3$ км/сек.

Основное отличие всплесков III и II типов заключается в том, что первые быстро дрейфуют по частоте, а именно развиваются в ~ 100 раз быстрее, чем всплески II типа, длительность всплесков III типа ~ 3 —15 сек. Скорость движения в короне агента, вызывающего всплеск III типа, на два порядка больше, чем для II типа. Кроме того, всплески III типа наблюдаются гораздо чаще: на 100 час. наблюдений приходится в среднем 300 всплесков III типа и меньше одного II типа. Обычно начало всплеска III типа связано с началом оптической вспышки, а не с ее максимумом. Всплески III типа часто появляются группами. Значительная часть их сильно поляризована. Наблюдается тесная связь всплесков II и III типов: 60—80% всплесков II типа сопровождается всплесками III типа, среднее запаздывание 5,5 мин.

Разновидностью всплеска III типа является U-всплеск, когда происходит обращение направления движения возбуждающего агента, а частотный дрейф сначала идет в сторону низких частот, а затем в сторону высоких. Появляется редко и обусловлен либо особой конфигурацией магнитного поля биполярных групп пятен, либо наличием локальных неоднородностей в короне.

Всплески IV типа являются излучением типа континуума, покрывающего очень широкую полосу частот (иногда больше 8 октав). Длительность — от минут до нескольких часов, интенсивность постепенно уменьшается. Наибольшая интенсивность — в метровом диапазоне ($\lambda > 1,2$ м). Наблюдается постепен-

ный дрейф по частоте в сторону низких частот.

Всплески IV типа часто (~70%) следуют за всплесками II типа, они связаны с сильными вспышками и достигают максимума через 10—30 мин. после взрывной фазы оптической вспышки.

От континуума шумовых бурь, с которыми они обычно вместе не наблюдаются, эти всплески отличаются более устойчивым характером, меньшей продолжительностью, более широким диапазоном частот (в сторону высоких), тесной связью со всплесками II типа, механизмом генерации и перемещением области генерации в короне на расстоянии более $\sim 6 R_{\odot}$.

Структура всплесков IV типа очень сложная, их подразделяют на несколько подтипов, но стандартная классификация еще отсутствует. Динамический спектр имеет часто три максимума: в метровом (тип IV m), дециметровом (тип IV dm) и сантиметровом (тип IV c) диапазонах. В метровом диапазоне различаются еще два подтипа, отличающиеся состоянием движения источника: стационарный и движущийся.

С другой стороны, было показано, что существует два класса всплесков IV типа, связанных с хромосферными либо с корональными вспышками.

Высокая корреляция всплесков II и IV типов и перемещение их областей генерации примерно с одинаковой скоростью говорят о том, что, по-видимому, оба явления вызваны одним агентом, движущимся в короне из области вспышки со скоростью 10^3 км/сек, например, ударной волной в плазме. Если для всплесков II типа определяющим является скорость движения ударной волны, то всплески IV типа образуются синхротронным излучением релятивистских электронов внутри плазменного сгустка и связаны с его магнитным полем. Возможно, что ускорение электронов до необходимых энергий происходит непосредственно внутри сгустка еще на стадии существования всплеска II типа. Поляризация радиоволн подтверждает гипотезу о синхротронном механизме генерации.

Всплески IV типа имеют узкую направленность; чем дальше от центра солнечного диска наблюдаются вспышки, тем реже регистрируются радиовсплески IV типа. Они хорошо коррелируют с различными явлениями: геомагнитными бурями с внезапным началом, появлением солнечных космических лучей, полярными блекаутами. Вероятность появления магнитной бури возрастает, если всплеск

IV типа следует за всплеском II типа. Время наступления полярных блекаутов определяется геометрией магнитных полей в солнечной атмосфере и межпланетном пространстве: при благоприятных условиях наступает спустя ~ 40 мин. после всплеска IV типа, но иногда может наступать и одновременно с магнитной бурей, т. е. через 1—2 дня.

Всплески V типа — широкодиапазонное излучение в метровом диапазоне типа континуума, полоса частот — от нескольких десятков до сотни МГц. Наблюдается лишь на частотах < 150 МГц ($\lambda \geq 2$ м), максимум интенсивности обычно на $\lambda \geq 3$ м. Время жизни всплеска $\sim 0,5$ —3,0 мин. Частотного дрейфа не обнаружено. Скорость перемещения источника $\sim 3 \cdot 10^3$ км/сек. Отличается от IV типа тесной связью со всплесками III типа, примерно на два порядка меньшей интенсивностью, а также направленным излучением.

Область генерации находится в верхней короне. Поскольку всплески V типа следуют за всплесками III типа, возбуждаемыми потоками быстрых частиц, по-видимому, электронов, движущихся со скоростью $\sim 10^6$ км/сек, не исключено, что эти частицы, попадая в высокие слои короны, служат там источником всплесков V типа, возможно, при синхротронном излучении электронов, захваченных между точками отражения дугообразного магнитного поля. Обнаружена тесная корреляция между событиями III, V типов, сантиметровыми всплесками и вспышками.

Микроволновое излучение — излучение типа континуума главным образом в сантиметровом диапазоне. Оно менее разнообразно, чем излучение в метровом диапазоне, и менее изучено. Делится на три вида в зависимости от формы, продолжительности и размера области генерации:

тип А — нарастание и спад быстрые, время жизни 1—5 мин., область генерации мала (диаметр — $1' - 1',6$), излучение поляризовано;

тип В — быстрое нарастание и медленный спад, время жизни от нескольких минут до нескольких часов, область генерации велика ($> 2',5 - 3',0$);

тип С — нарастание и спад постепенные, время жизни от нескольких десятков минут до нескольких часов, область генерации мала ($0',8$).

Эти три типа могут существовать отдельно или накладываться друг на друга. Наиболее мощные всплески бывают типа А или В и сопровождаются излучением в дециметровом континууме.

Источники излучения локализованы в тех районах диска Солнца, откуда исходит медленно меняющаяся компонента. По типу излучения может быть нетепловым для сильных всплесков и тепловым для более слабых. Предполагаемые механизмы генерации: тип А — магнитно-тормозное излучение энергичных электронов, появляющихся во вспышке, в локальных магнитных полях центра активности; типы В и С — совместное действие магнитно-тормозного и тормозного механизмов в короне над частью центров активности.

Мощные микроволновые всплески тесно связаны со вспышками рентгеновского излучения Солнца, с которыми, в свою очередь, связаны геофизические явления, наблюдаемые практически одновременно с событиями на Солнце (внезапные ионосферные возмущения, полярные блекауты). Полярные блекауты обнаруживают с микроволновыми всплесками даже более тесную связь, чем со всплесками IV типа; практически все они следуют за микроволновым всплеском.

Была установлена прямая зависимость потока протонов, регистрируемых после вспышек, от интенсивности микроволновых всплесков в диапазоне длин волн $\lambda = 3 \div 10$ см, хотя временами эта зависимость маскируется условиями распространения протонов в межпланетном пространстве.

Общая картина спорадического радиоизлучения может быть представлена, по-видимому, такой схемой: центры активности (флоккулы, группы пятен) стимулируют образование в нижней короне областей повышенной плотности плазмы, служащих источником медленно меняющейся (S) компоненты, которая обнаруживается главным образом в сантиметровом диапазоне. В более высоких слоях короны, куда проникают сильные магнитные поля пятен, генерируются в метровом диапазоне шумовые бури с постепенным началом и всплески I типа. Во время вспышек вблизи активных групп пятен возникают шумовые бури с резким началом и усиливаются уже существующие источники шумовых бурь.

Во время вспышки, по-видимому, ускоряются потоки заряженных частиц, при перемещении которых в менее плотные слои короны со скоростью $\sim 10^6$ км/сек генерируются в метровом диапазоне быстро дрейфующие по частоте всплески III типа. Выбросы III типа сопровождаются рентгеновскими и

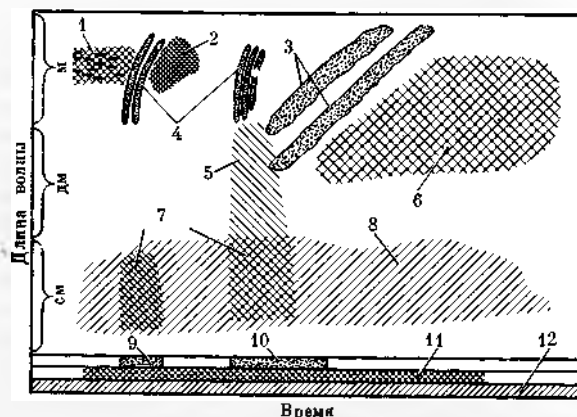


Рис. 6. Идеализированный динамический спектр спорадического радиоизлучения из центра активности

- 1 — шумовая буря I типа;
- 2 — радиоизлучение V типа;
- 3 — всплеск II типа;
- 4 — всплеск III типа;
- 5 — дециметровый континуум;
- 6 — радиоизлучение IV типа;
- 7 — микроволновый всплеск;
- 8 — медленно меняющаяся компонента;
- 9 — малая вспышка;
- 10 — крупная вспышка;
- 11 — группа пятен;
- 12 — факельное поле

микроволновыми всплесками в сантиметровом диапазоне.

Крупная вспышка сопровождается интенсивным микроволновым всплеском, спектр которого распространяется в дециметровый диапазон, и одновременно в метровом диапазоне возникает всплеск III типа. После этого появляются медленно дрейфующие по частоте всплески II типа на метровых волнах, создаваемые, вероятно, ударными волнами, распространяющимися после вспышечного взрыва из области вспышки в корону со скоростью $\sim 10^6$ км/сек. Вслед за этим или одновременно из области движущегося в короне сгустка исходит интенсивный континуум IV типа. От величины поля в сгустке и его скорости зависит появление обоих типов излучения либо одного из них.

На рис. 6 показан идеализированный динамический спектр спорадического радиоизлучения.

По радиоизлучению Солнца имеются многочисленные монографии и обзорные работы, например [15, 21, 67, 69, 127].

Корпускулярное излучение Солнца

Корпускулярное излучение Солнца можно разделить на постоянное, непрерывное испускание корпускул — солнечный ветер и спорадические выбросы интенсивных потоков плазмы и заряженных частиц — корпускулярные потоки и солнечные космические лучи. Это деление в значительной степени условно, оно отражает в основном временную зависимость этих излучений, подчеркивая тот факт, что солнечный ветер существует постоянно, его скорость и плотность никогда не опускаются ниже некоторых минимальных значений, равных на орбите Земли 250 км/сек и 0,5 частиц/см³ соответственно. Спорадически наблюдаемые усиленные потоки солнечной плазмы, т. е. усиленные потоки солнечного ветра, принято выделять в отдельное понятие — солнечные корпускулярные потоки. Это понятие было введено в науку еще до открытия солнечного ветра для объяснения различных геофизических явлений, сопровождающих некоторые явления на Солнце. Солнечные корпускулярные потоки могут иметь скорости до 1600 км/сек при плотности частиц до 100 см⁻³.

Эти интенсивные потоки после их возникновения движутся через спокойные, медленные участки солнечного ветра, нарушая стационарную структуру межпланетного пространства, что приводит к возникновению различного вида возмущений, описанных ниже. Солнечный ветер и солнечные корпускулярные потоки — важнейшие компоненты солнечной корпускулярной радиации, определяющие условия в межпланетном пространстве. Подробное описание солнечного ветра и солнечных корпускулярных потоков будет проведено в разделе, посвященном описанию характеристик межпланетного пространства.

Здесь отметим только, что за счет солнечной корпускулярной радиации Солнце теряет в среднем около миллиона тонн в секунду, что составляет 10^{-22} массы Солнца в секунду. Эти цифры предполагают сферически-симметричный солнечный ветер. Основанием для такого предположения служат экспериментальные факты, полученные Бирманом [45, 46] при наблюдении кометных хвостов I типа.

В настоящее время, впрочем, имеются и другие данные, свидетельствующие об отсутствии сферически-симметричного солнечного ветра.

Другой вид корпускулярного излучения Солнца — солнечные космические лучи —

представляет собой заряженные частицы значительных энергий (от 30—50 кэв/нуклон до нескольких Гэв/нуклон). Результаты исследований последних лет приводят к выводу, что каждая яркая хромосферная вспышка на Солнце с большой вероятностью генерирует солнечные космические лучи.

Солнечные космические лучи являются хорошим инструментом для исследования межпланетного пространства, они позволяют как бы просвечивать солнечную систему и выявлять различные ее особенности. Мощные потоки солнечных космических лучей, возникающие при обширных и ярких (тип 3В, 4В) солнечных вспышках, представляют серьезную радиационную опасность при полетах в межпланетном пространстве.

Подробное описание солнечных космических лучей будет проведено также в разделе «Межпланетная среда».

МЕЖПЛАНЕТНАЯ СРЕДА

При полетах в межпланетном пространстве необходимо учитывать свойства межпланетной среды и межпланетной плазмы (солнечного ветра, магнитного поля, галактических и солнечных космических лучей, а также микрометеорной материи). Составной частью межпланетной среды является также электромагнитное излучение Солнца, звезд и Галактики.

Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле

Общие представления о существовании солнечных корпускулярных потоков (солнечного ветра) родились на основании многочисленных геомагнитных наблюдений, изучения отклонений газовых хвостов комет от радиальных направлений от Солнца [45, 46] и вариаций галактических космических лучей. Наблюдения комет в разных участках неба позволили установить, что корпускулярные потоки заполняют все межпланетное пространство. Теоретическое обоснование необходимости существования потоков солнечной плазмы получено в работах Паркера [113, 115], в которых показано, что солнечная корона находится в состоянии, обеспечивающем постоянное присутствие в межпланетном пространстве потоков солнечной плазмы, движущихся от Солнца со сверхзвуковыми скоростями. Основная причина расширения короны — достаточно высокая ее температура ($\sim 10^6$ °K).

Первые прямые наблюдения солнечного ветра были выполнены на советских лунных станциях «Луна-2», «Луна-3» и межпланетной станции «Венера-1» [9, 81]: поток солнечного ветра составлял $\sim 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$. Этот результат был подтвержден в работе [50], где также было показано, что солнечный ветер приходит с направления от Солнца со скоростью $\sim 300 \text{ км/сек}$. В дальнейшем параметры солнечного ветра исследовались во многих экспериментах, и к настоящему времени по этому разделу имеется обширная литература [131].

В процессе сверхзвукового расширения корональная плазма вытягивает силовые линии солнечного магнитного поля. Электропроводность плазмы очень высока, и магнитное поле, «вмороженное» в плазму, выносится потоком солнечного ветра, формируя межпланетное магнитное поле.

По современным представлениям динамическое состояние солнечного ветра можно условно разделить на спокойное и возмущенное.

Спокойный солнечный ветер. Этот термин относится к усредненным динамическим и кинетическим характеристикам стационарного течения солнечной плазмы в отсутствие какого-либо влияния отдельных активных процессов на Солнце. Временная картина плотности, скорости и температуры солнечного ветра, а также магнитного поля для разных периодов солнечной активности изучена достаточно подробно. В табл. 5 приведены средние макроскопические параметры солнечной плазмы в спокойных условиях и при сильных возмущениях на расстояниях 1 а.е. от Солнца (H_r — радиальная компонента, H_ϕ — азимутальная).

Таблица 5. Средние параметры солнечной плазмы

Параметры солнечного ветра и магнитного поля	В спокойных условиях на 1 а.е.	При сильных возмущениях на 1 а.е.	Зависимость от расстояния от Солнца
Скорость солнечного ветра, км/сек	320—400	до 1600	Слабая
Плотность солнечного ветра, см^{-3}	8—10	до 100	$\sim r^{-2}$
Средняя температура ионов, °K	10^4	до $5 \cdot 10^4$	Слабая
Средняя температура электронов, °K	10^3	до $5 \cdot 10^3$	»
Напряженность магнитного поля, гаммы	5	до 50	$H_r \sim r^{-2}$ $H_\phi \sim r^{-1}$

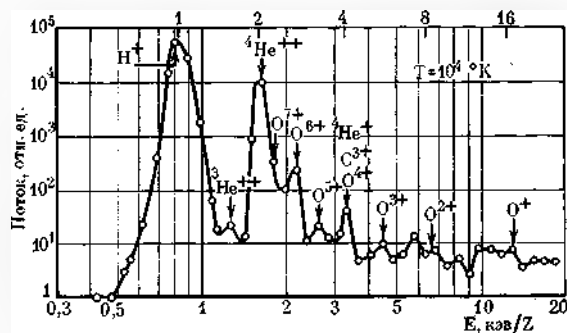


Рис. 7. Зарядовый состав солнечного ветра, полученный 8 октября 1965 г. на спутнике «Вела-2А»

Стрелками показано положение пиков ионов данного вида. Ионы кислорода, гелия и углерода с одинаковым отношением массы к заряду не разделяются

Важной характеристикой солнечного ветра является его химический состав. Химический состав солнечной короны, определенный по спектроскопическим измерениям, включает в себя протоны (90%), ядра гелия (~9%) и более тяжелые ионы (O^{16} , N^{14} , Fe^{56} и др.) в количестве $< 1\%$.

Наблюдения химического состава межпланетной плазмы носят предварительный характер. Измерения зарядового состава с помощью методики электростатического анализа и селекции скоростей показывают, что протоны и ядра гелия регистрируются с хорошим разрешением (см. рис. 7, заимствованный из [39]).

Среднее отношение гелия к водороду для периода 1962—1967 гг. составляло $\sim 4,5\%$, колеблясь от случая к случаю от 1,5 до 5%. Ионы кислорода, азота и углерода, т. е. элементов с одинаковым отношением массы к заряду, этой методикой не разделяются. В случае очень спокойного невозмущенного состояния солнечного ветра с низкой температурой ($< 10^4 \text{ °K}$) удастся разрешить отдельные пики He^3 и однократно или двукратно ионизованных атомов азота, кислорода и углерода. После сильных возмущений типа ударных волн от хромосферных вспышек, содержание гелия в межпланетной среде часто сильно увеличивается, достигая иногда 20%.

Межпланетные магнитные поля. За последние годы были проведены многочисленные измерения межпланетных полей, приведшие к установлению средней невозмущенной картины магнитного поля в межпланетном пространстве, спорадически нарушаемой во время различных проявлений солнечной активности [55, 56, 105, 106, 109].

В процессе сверхзвукового расширения корональная плазма в силу высокой электропроводности вытягивает силовые линии солнечного магнитного поля в межпланетную среду. На орбите Земли плотность энергии межпланетного поля много меньше ($\sim 1\%$) плотности кинетической энергии солнечного ветра. Геометрия невозмущенного межпланетного магнитного поля напоминает спирали Архимеда.

Методы радиомерцаний и радиопросвечивания показывают, что и на расстоянии $15-20 R_{\odot}$ магнитное поле имеет плотность энергии, много меньшую плотности кинетической энергии плазмы, а его направление почти радиально, т. е. уже на этих расстояниях межпланетное поле определяется динамикой течения солнечной плазмы.

Радиальная и азимутальная компоненты магнитного поля H_r и H_{φ} определяются из условия сохранения магнитного потока с учетом вращения Солнца:

$$H_r = H_{r_0} (r_0/r)^2,$$

$$H_{\varphi} = H_{r_0} \frac{r_0 \Omega}{u_r} \left(\frac{r_0}{r} \right) \sin \theta,$$

где r_0 — минимальное расстояние, начиная с которого скорость плазмы становится сверхзвуковой; u_r — сверхзвуковая радиальная скорость ветра; Ω — угловая скорость вращения Солнца; θ — угол между силовой линией и радиальным направлением.

Угол между силовой линией и радиальным направлением на орбите Земли $\theta = \arctg(r\Omega/u_r)$. Для $r=1$ а.е. и $u_r=400$ км/сек $\theta=47^\circ$ ($\Omega=2,9 \cdot 10^{-6}$ рад/сек). На расстояниях, меньших 1 а.е., поле преимущественно радиальное, на орбите Юпитера — в основном тангенциальное.

Секторная структура. В периоды малой солнечной активности межпланетное поле имеет хорошо выраженную секторную структуру (рис. 8), образованную протяженными областями, в которых межпланетное поле регулярно и направлено либо только от Солнца, либо к Солнцу. Эти секторы, появление которых связано с большими активными локальными магнитными областями в фотосфере, где имеются протяженные области направленного поля, вращаются со скоростью, определяемой скоростью вращения Солнца вокруг своей оси. Секторы имеют различные размеры, составляющие в плоскости эклиптики в среднем около 100° , что соответствует прохождению одного сектора около Земли за 6—7 дней. Как показали измерения последую-

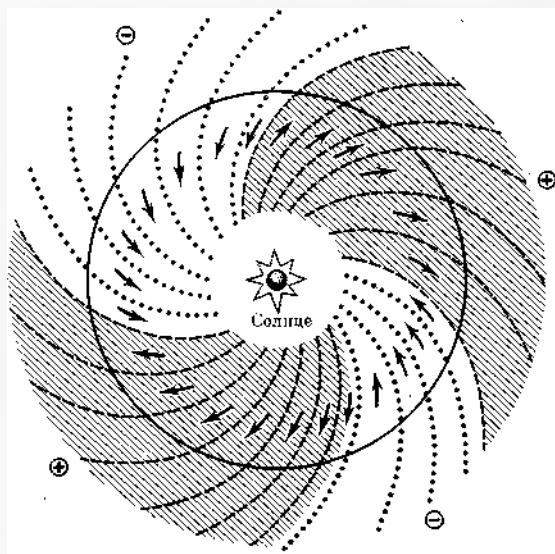


Рис. 8. Схематическое изображение секторной структуры межпланетного магнитного поля в периоды малой солнечной активности

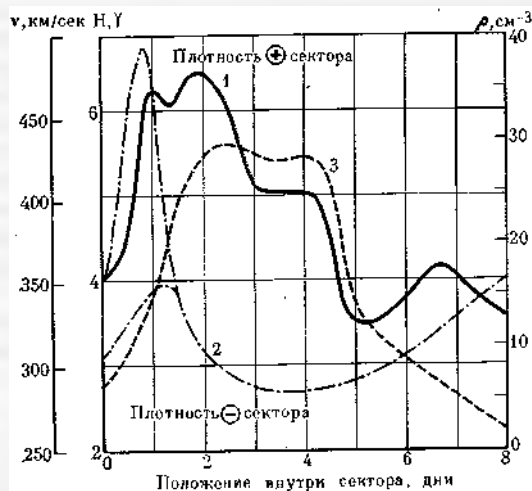


Рис. 9. Средние значения напряженности магнитного поля (1), плотности (2) и скорости солнечного ветра, полученные методом наложения эпох (3)

щих лет, секторная структура определяется количеством областей на поверхности Солнца, в каждой из которых магнитное поле имеет один знак. Число секторов может изменяться. Секторная структура представляет только крупномасштабную картину межпланетного поля. Вариации скорости солнечного ветра стремятся размыть четкую границу сектора.

По данным ИМП-1 (декабрь 1963 — февраль 1964 г.) в пределах сектора обнаруживается определенная структура (рис. 9) [105]. Плотность плазмы максимальна вблизи лидирующей (западной) границы и имеет антикорреляцию со скоростью, так что в среднем поток солнечной плазмы сохраняется. Магнитное поле достигает максимума в течение второго дня, а на границах все же не обращается в нуль. Так как наблюдения относятся к орбите Земли, то измеренные параметры могут существенно отличаться от соответствующих параметров вблизи Солнца. Исходя из картины силовых линий в короне на рис. 10 построена модель возникновения секторной границы [123]. На самой границе биполярной области магнитное поле препятствует ускорению плазмы. При удалении от границы поле не может удерживать плазму. Так как размеры биполярных областей составляют малую долю общей площади солнечного диска, вероятно, что магнитные поля могут образовывать лишь разноскоростные струи в общем квазирадiallyном течении солнечного ветра. Возвращаясь к распределению параметров потока внутри сектора, заметим, что максимум плотности вблизи секторной границы может быть создан в процессе, когда быстрая струя (~ 500 км/сек) нагоняет медленную (~ 300 км/сек).

На больших расстояниях (> 5 а.е.) секторные образования и взаимодействия разноскоростных струй формируют, по-видимому, крупномасштабные магнитные неоднородности размерами от 1 а.е. и выше. Информацию о динамике таких флуктуаций поля получают при анализе долгопериодических вариаций (таких, как 11-летние) галактических космических лучей в области энергии $E_p > 10^9$ эв. Измерения спектральной плотности флуктуаций магнитного поля на расстояниях ≤ 2 а.е. обнаруживают очень низкочастотную ветвь спектра ($f \sim 10^{-6}$ сек $^{-1}$), что может означать наличие крупномасштабных вариаций поля ($L \geq 1$ а.е.).

Возмущения в солнечном ветре. В этом случае наблюдается нестационарное поведение межпланетной плазмы: по сверхзвуковому потоку от Солнца распространяются разные типы магнитогидродинамических возмущений: гидромагнитные волны, несферические быстрые струйные течения, быстрые потоки плазмы от хромосферных вспышек и т. д. Бурные проявления солнечной активности (хромосферные вспышки, действия отдельных активных областей, струйные течения в короне) в этих случаях определяющие.

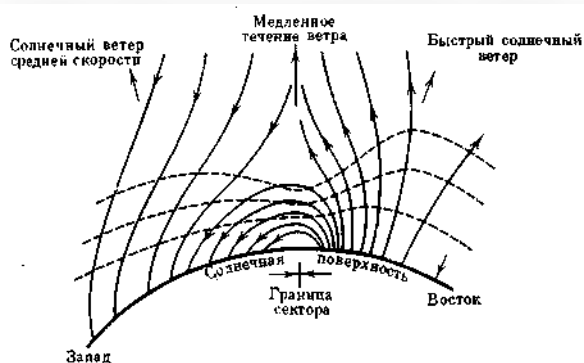


Рис. 10. Возможная картина условий возникновения секторной структуры межпланетного поля в солнечной короне

Штриховые линии — изотермические поверхности, сплошные — силовые линии коронального магнитного поля

Такие понятия, как корпускулярный поток, безусловно, относятся к возмущенному солнечному ветру. Термин «корпускулярный поток» возник до открытия солнечного ветра и в настоящее время означает усиленный поток плазмы, который движется в солнечном ветре либо после вспышек, либо как рекуррентное явление.

Участки усиленного солнечного ветра, или корпускулярные потоки, выделяются или несколько большей скоростью, или плотностью плазмы и усиленным магнитным полем. Увеличение скорости и плотности плазмы приводит к усилению воздействия солнечного ветра на магнитосферу Земли, в то время как усиленное магнитное поле несколько уменьшает, модулирует поток галактических космических лучей в областях пространства, захваченных корпускулярными потоками от Солнца.

Наиболее ярким проявлением нестационарных возмущений в солнечном ветре являются ударные волны, рассмотренные ниже более подробно.

Ударные волны в межпланетном пространстве. Стационарное состояние сверхзвукового течения солнечного ветра нарушается во время сильных возмущений корональной плазмы, обусловленных хромосферными вспышками на Солнце.

Резкое расширение вспышечной плазмы приводит к образованию ударных волн в короне и межпланетной среде, движущихся со скоростями ~ 1000 км/сек, о чем свидетельствует радиоизлучение II типа.

В настоящее время существование ударных волн на расстояниях от Солнца 0,7—1,5 а.е.

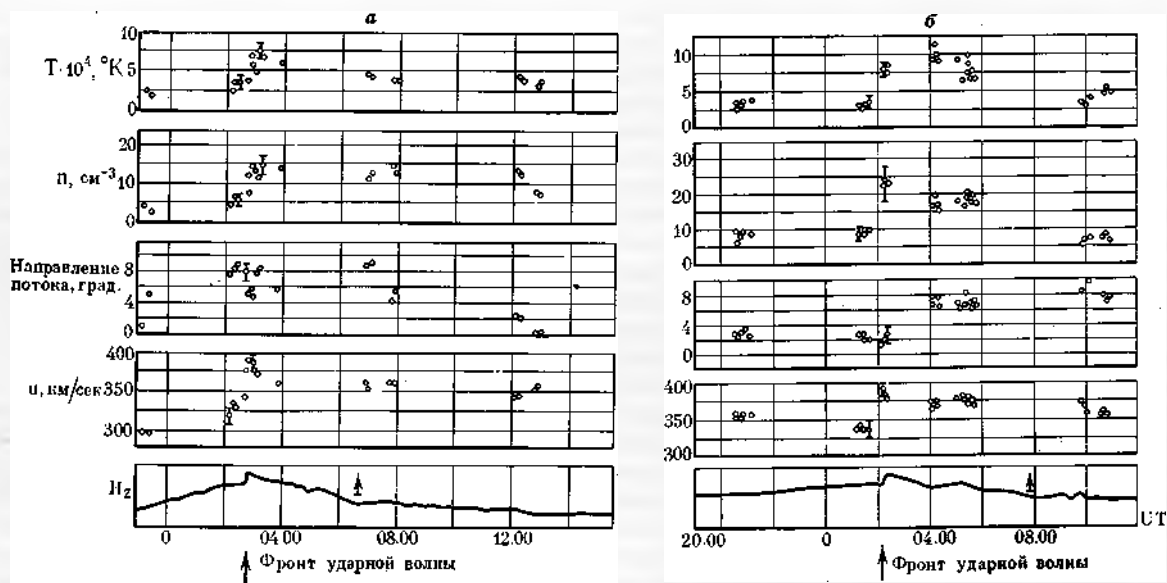


Рис. 11. Изменения температуры, плотности, направления и скорости протонов солнечного ветра а — 4—5 октября 1965 г., измерения ИСЗ «Вела-3В»; б — 19—20 января 1966 г., измерения ИСЗ «Вела-3А». Нижний график показывает скачкообразное изменение горизонтальной составляющей H_z земного магнитного поля, свидетельствующее о внезапном начале магнитной бури. Направление 0° соответствует радиальному потоку от Солнца. Указаны величины типичных ошибок измерений

твёрдо установлено. Ударные волны характеризуются скачкообразным изменением макроскопических и кинетических параметров плазмы, появлением энергичных частиц и глубокой модуляцией галактических космических лучей, получившей название форбуш-эффекта.

Ударная волна характерна тем, что происходит движение вещества через разрыв (фронт волны), давление разрывно при выполнении законов сохранения массы, импульса и энергии. Плотность, скорость и температура за фронтом волны выше, чем перед фронтом в невозмущенной плазме. Анализ параметров плазмы и результатов комплексных измерений низкоэнергичных солнечных протонов, зондирующих межпланетное магнитное поле, за период последнего 11-летнего цикла показал, что вблизи 1 а.е. межпланетные ударные волны характеризуются значениями относительных скоростей $U_{уд.волны} / U_{ветра}$ от 50 до 200—300 км/сек и удвоением на волне плотности и температуры плазмы, а также напряженности магнитного поля (рис. 11) [87]. В литературе обсуждаются

две физические концепции ударных волн. Концепция, исходящая из возможности однозначного отождествления космических явлений (изменения характеристик плазмы, поля и возрастания интенсивности космических лучей солнечного происхождения) с событиями на Солнце (вспышки), предполагает, что вспышка генерирует сильную ударную волну (скорости 1000—3000 км/сек в короне), которая по мере распространения испытывает значительное замедление, так что на орбите Земли измеряются волны слабой или умеренной интенсивности (с числом Маха $\sim 2-3$). Область пространства, охваченная ударной волной, служит ловушкой солнечных протонов с энергией ≤ 30 Мэв, которые регистрируются одновременно с приходом ударной волны. Обработка экспериментальных наблюдений в этих предположениях показывает, что скорость ударной волны падает очень быстро ($\sim r^{-3}$), что означает существование сильного диссипативного механизма. При этом предполагается, что ударные волны сферически симметричны и распространяются радиально от Солнца.

Другая концепция [88] предполагает, что ударные волны в межпланетном пространстве в большинстве случаев имеют умеренную интенсивность, не испытывают значительного замедления при распространении от Солнца до орбиты Земли и не подчиняются однозначному отождествлению с событиями на Солнце. Другими словами, ударные волны, наблюдаемые вблизи 1 а.е., могут генерироваться либо на Солнце (быть может, от не-

скольких слабых вспышек), либо в межпланетном пространстве на расстояниях 20—100 R_{\odot} как результат воздействия потоков плазмы, выбрасываемых из короны. Эта концепция отчасти основана на экспериментальных оценках энергии вспышек по оптическим наблюдениям и измерениям радио- и рентгеновского излучений, которые определяют полную энергию вспышки баллов 2В—4В в интервале $\sim 2 \cdot 10^{31}$ — $5 \cdot 10^{32}$ эрг, а отчасти на результатах газодинамических исследований различных режимов течений нестационарных потоков газа в среде, плотность которой падает как r^{-2} .

Необходимо отметить, что многие исследователи находят, что солнечные вспышки являются только указателями активных районов на Солнце. Некоторые из этих активных центров бывают ответственны за геомагнитную активность. Геомагнитные возмущения не всегда следует связывать с ударной волной, распространяющейся по солнечному ветру; часто они обусловлены воздействием контактной поверхности секторной границы межпланетного магнитного поля.

Уровень современных экспериментальных и теоретических представлений о плазменных явлениях в межпланетной среде не позволяет отказать предпочтение ни одной из названных концепций. Результаты физических интерпретаций не выходят пока за рамки рабочих гипотез, однако в ряде случаев позволяют сделать ряд важных качественных заключений и количественных оценок. Условия распространения бесстолкновительных ударных волн в межпланетной среде определяются в значительной степени динамикой корональной плазмы при вспышке и состоянии плазмы солнечного ветра до вспышки. Характер течения вспышечной плазмы, согласно оптическим методам наблюдения, измерениям рентгеновского и радиоизлучения Солнца, может быть весьма разнообразным, что определяет сложность процессов генерации ударных волн в солнечном ветре. Комплексное изучение возмущений в межпланетной среде после мощных вспышек ($\sim 3В$) позволяет в ряде случаев обрисовать динамику течения плазмы на орбите Земли.

Событие 15 февраля 1967 г. связывается со вспышкой балла 4В с координатами 20° N, 10° W, которая произошла 13 февраля. Два спутника Земли — «Вела-3А» и «Эксплорер-33» — 15 февраля одновременно зарегистрировали первый скачок плазменных параметров и величин полей, который был интерпретирован, как приход фронта ударной

волны (рис. 12). Геометрическое положение спутников и одновременность регистрации ударного скачка показывают, что направление распространения фронта волны (нормаль к фронту) составляет угол $\sim 60^\circ$ с плоскостью эклиптики. Измерения межпланетного поля и регистрация внезапного начала геомагнитного возмущения (SC) наземными геомагнитными станциями позволяют оценить среднее направление нормали фронта ударной волны, которое также дает значение угла 50—70°. Этот факт вынуждает предположить, что течение плазмы после вспышки было далеко от сферического. Измерения скорости, плотности и магнитного поля в течение 15 и 16 февраля (рис. 12) показывают, что ударная волна подталкивалась расширяющейся корональной плазмой. «Толкатель», или, как в газодинамике принято называть, «поршень», был зарегистрирован через ~ 9 час. после прохождения фронта и был насыщен гелием. Плазменные анализаторы «Велы-3А» обнаружили

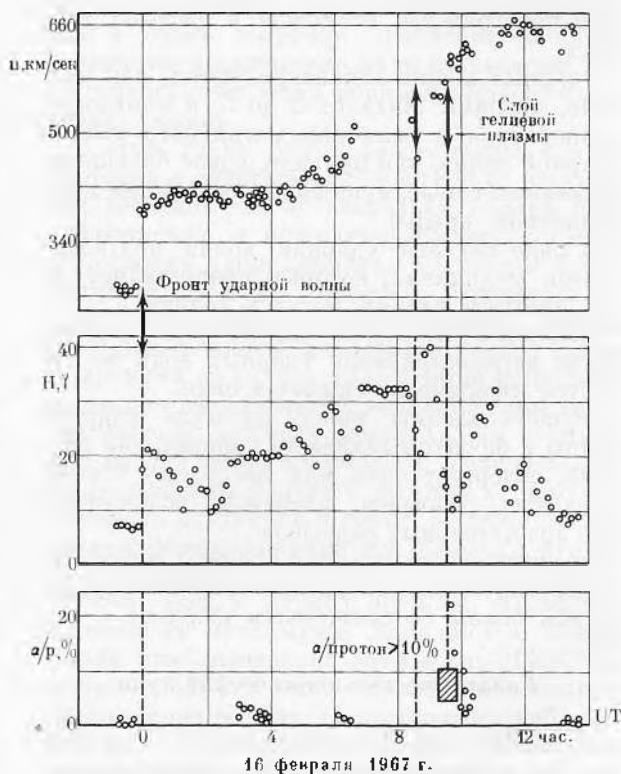


Рис. 12. Возмущения в межпланетной среде после хромосферной вспышки [37]

v — скорость солнечного ветра;
 H — напряженность межпланетного магнитного поля;
 α/p — содержание гелия в солнечном ветре по отношению к водороду

пятикратное увеличение содержания α -частиц [87].

Измерения структуры межпланетного поля на «Эксплорере-33» показали, что между фронтом волны и фронтом гелиевого слоя обнаружен тангенциальный разрыв. Эти важные экспериментальные факты отмечаются и другими исследователями, которые находят, что ударная волна часто сопровождается несколькими тангенциальными разрывами и изменением в относительном содержании гелия к водороду в 3—5 раз. Увеличение в 3—5 раз содержания гелия в межпланетной плазме наблюдалось неоднократно, однако последовательной теоретической интерпретации подобных увеличений в настоящее время не существует.

На основе анализа параметров плазмы и потоков солнечных протонов за период 1965—1970 гг. можно следующим образом суммировать наши сведения об ударных волнах в межпланетной среде:

однозначность отождествления вспышек на Солнце с ударными волнами в межпланетном пространстве возможна в частных случаях;

ударные волны характеризуются, как правило, числами Маха от 2 до 5, а плотность, температура и величина магнитного поля в ударной волне, как правило, вдвое больше по сравнению с невозмущенным состоянием межпланетной среды;

в ряде случаев ударная волна подталкивается «поршнем», который представляет собой плотную плазму, богатую гелием;

наблюдаются случаи плазменных течений, когда распространение ударных волн не является сферически-симметричным;

область плазмы между фронтом ударной волны и фронтом гелиевого поршня, как правило, содержит один или несколько тангенциальных разрывов, возможно возникновение вращательных разрывов;

несферические ударные фронты часто интерпретируются как распространение сферической волны со смещенным центром.

Галактические космические лучи

Галактические космические лучи — наиболее энергичная составляющая корпускулярных потоков в межпланетном пространстве — представляют собой ускоренные до высоких энергий ядра химических элементов, в основном водорода. Они превосходят по своей проникающей способности все другие виды излучений (кроме нейтрино). Средняя энергия

первичных частиц, наблюдаемых около Земли, $\sim 10^{10}$ эв, энергия отдельных частиц может достигать 10^{20} эв и выше. Энергетический спектр галактических протонов при энергиях больше 10^6 Мэв может быть представлен в виде

$$\frac{dN}{dE} = 2,14 \cdot 10^9 E^{-2,7} [\text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1} \cdot \text{Мэв}^{-1}],$$

где E выражено в Мэв.

Для меньших энергий поток частиц зависит от солнечной активности: в максимуме и минимуме солнечной активности полный поток галактических космических частиц с энергией $E > 30$ Мэв/нуклон составляет ~ 2000 и $6000 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$ соответственно.

Химический состав галактических космических лучей в области высоких энергий известен достаточно хорошо (табл. 6).

Таблица 6. Химический состав космических лучей

Группы ядер	Обозначение	Заряд	Среднее число нуклонов в ядре	Поток частиц, $\text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$	Доля в общем потоке, %
Протоны	P	1	1	1500	94
Ядра гелия	α	2	4	90	5,5
Легкие	L	3—5	10	2	0,6
Средние	M	6—9	14	5,6	
Тяжелые	H	10—19	30	1,9	
Сверхтяжелые	VH	20—28	48	0,7	

Поток ядер, приведенный в табл. 6, относится к частицам с энергией $E > 2,5 \cdot 10^9$ Мэв/нуклон.

Химический состав первичных космических лучей несколько отличается от состава элементов земной коры, метеоритов, а также состава атмосферы Солнца и некоторых звезд, известного из спектроскопического анализа. Космические лучи содержат меньше водорода и гелия и характеризуются значительным преобладанием более тяжелых элементов, что особенно заметно в области легких ядер (группа Li, Be, B), где различие достигает нескольких порядков. Этот факт безусловно отражает природу источников космических лучей, механизм их ускорения и состояние межзвездного пространства, которое космические лучи проходят на пути к Земле. Он, в частности, служит серьезным аргументом в

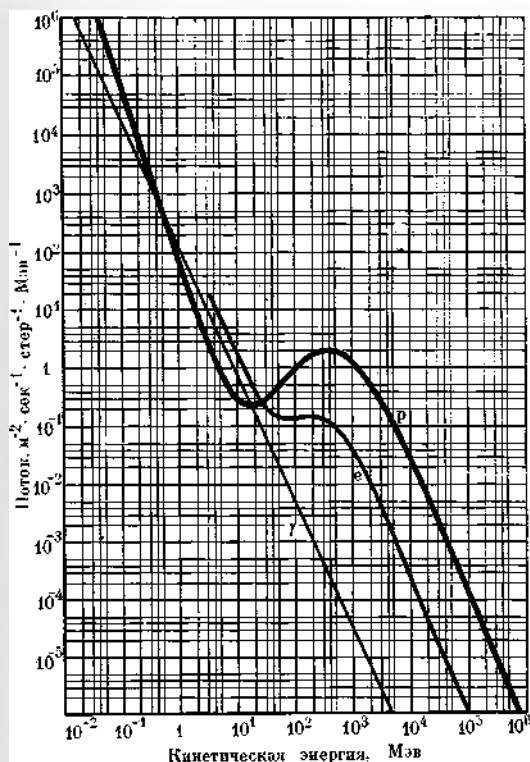


Рис. 13. Идеализированный спектр галактических протонов, электронов и γ -лучей

пользу теории происхождения космических лучей за счет преимущественного ускорения тяжелых ядер с последующей их фрагментацией при столкновении с ядрами межзвездной материи. Кроме ядер химических элементов, в составе галактических космических лучей присутствуют электроны и γ -кванты. На рис. 13 приведены энергетические спектры различных частиц, наблюдаемых в межпланетном пространстве на расстоянии 1 а.е. от Солнца.

По мере увеличения расстояния от Солнца поток галактических космических лучей может только возрастать. Это обусловлено тем, что магнитные поля в солнечной системе, выносимые от Солнца солнечным ветром, препятствуют проникновению космических лучей во внутренние области солнечной системы. Этим же механизмом, получившим название модуляционного, обусловлено и различие в потоках частиц в разные фазы цикла солнечной активности. Возрастание потока космических лучей не может продолжаться бесконечно долго. На некотором расстоянии от Солнца плотность солнечного ветра или напряженность межпланетного магнитного поля

не будет превышать соответствующих параметров межзвездного пространства, и на этих расстояниях модуляция галактических космических лучей прекратится. По различным оценкам область модуляции галактических космических лучей составляет $\sim 10-30$ а.е.

Как видно из рис. 13, у дифференциальных энергетических спектров заряженных частиц наблюдается минимум в области энергий 30—50 Мэв. В настоящее время принято считать, что частицы с энергиями, меньшими 30—50 Мэв, имеют солнечное происхождение, т. е. относятся к солнечным космическим лучам.

Экспериментальные и теоретические аспекты галактических космических лучей отражены во многих работах, часть которых приведена в списке литературы [6, 14, 102, 125, 126, 143].

Солнечные космические лучи

Определения. Классификация. Солнце является источником корпускулярного излучения в очень широком диапазоне энергий. Солнечные космические лучи составляют высокоэнергетичную часть корпускулярного излучения Солнца.

В этой главе будут рассмотрены потоки протонов и электронов с энергией от нескольких десятков кэв до нескольких сотен Мэв, наблюдаемые в межпланетном пространстве и по своему происхождению связанные с различными формами солнечной активности.

Изучение частиц высоких энергий, генерированных Солнцем, началось в 1942 г. С этого времени до начала 1957 г. было исследовано только пять событий, когда частицы высоких энергий достигли Земли. С 1957 г. ситуация начала резко изменяться: эксперименты, проводимые на больших высотах с помощью баллонов, спутников и ракет, а также наблюдения с помощью риометров показали, что потоки солнечных протонов, имеющих энергию 10—300 Мэв, в период времени, близкий к солнечному максимуму, появляются вблизи Земли приблизительно раз в месяц [142]. Начиная с 1964 г. стали проводиться практически непрерывные (мониторные) наблюдения вне магнитосферы Земли при помощи спутников Земли и космических аппаратов. К этому времени существенно понизился порог регистрации протонов (до нескольких сотен кэв), а, кроме того, на космических кораблях начали ставить детекторы электронов низких и средних энергий. Эксперименты, проведенные начиная с 1967 г., пока-

зали, что электроны с энергией от 10 кэв до нескольких Мэв и протоны с энергией от десятков кэв до нескольких сотен Мэв генерируются Солнцем во время вспышек [138].

Несколько условно наблюдаемые в межпланетном пространстве на расстояниях 1 а.е. потоки заряженных частиц можно разделить на следующие группы в соответствии с их связью с различными формами солнечной активности.

1. Возрастания протонов с энергией до нескольких сотен Мэв и энергичных электронов с энергией до десятка Мэв, следующие непосредственно за крупными (класса 1В и выше) солнечными вспышками. Для этих возрастных характерен быстрый подъем интенсивности частиц и прибытие частиц от Солнца в точку измерения в соответствии с их скоростями, т. е. более энергичные частицы появляются раньше, чем частицы меньших энергий. В максимуме крупных вспышек интенсивность потоков протонов с энергиями $E_p > 1$ Мэв достигает значений $\sim 10^5$ частиц/см²·сек. Спад этих потоков в большинстве случаев характеризуется экспоненциальной формой с постоянной времени τ порядка 10—30 час.

2. Возрастания малоэнергичных электронов с энергией от 10 до нескольких сотен кэв, наблюдаемые, как правило, после небольших вспышек. Эти возрастания несколько отличны от возрастных первой группы и поэтому выделяются отдельно.

3. Долгоживущие потоки протонов и электронов малых и средних энергий, образующиеся, по-видимому, после крупных вспышек и вращающиеся вместе с Солнцем. Эти потоки при наблюдении их на космическом аппарате имеют относительно плавное нарастание и плавный спад; длительность регистрации этих потоков (характеризующая их угловую ширину в плоскости эклиптики) составляет 6—30 час. Некоторые из этих потоков, особенно в период минимума солнечной активности, могут существовать в течение нескольких солнечных оборотов, и тогда они называются рекуррентными.

4. Потоки протонов и электронов, наблюдаемые около Земли одновременно с ударными волнами от крупных солнечных вспышек. Происхождение этих частиц установлено пока недостаточно определено. Возможно, что эти частицы перемещаются вместе с ударной волной от Солнца в некоторой ловушке, или ускоряются в самой ударной волне по мере ее перемещения в межпланетном пространстве, или, при длительном существовании, пе-

реносятся ударной волной с трубками силовых линий к месту наблюдения. Так как в некоторых работах предполагалось, что эти частицы ускоряются за фронтом ударной волны (вызывающей магнитную бурю на Земле), электроны и протоны этих потоков в более ранних работах часто называли «энергичными штормовыми частицами».

5. Некоторый минимальный фоновый поток протонов с энергией $E_p < 20$ Мэв и, возможно, электронов с энергией $E_e < 3$ Мэв, не связанный непосредственно со вспышками и медленно меняющийся с изменением общего уровня солнечной активности.

Общие свойства солнечных космических лучей, возникающих при крупных солнечных вспышках. Состав, потоки, зависимость генерации частиц от балла вспышки. Сильные вспышки характеризуются тем, что занимают большую площадь на поверхности Солнца и наблюдаются в линии H_α довольно продолжительное время (~ 2 час.); такие вспышки сопровождаются интенсивными рентгеновскими, сложными микроволновыми всплесками, а после них часто наблюдаются радиовсплески II и IV типов.

Во время солнечной вспышки происходит импульсный выброс энергичных частиц из Солнца, который на расстоянии 1 а.е. наблюдается как временное изменение потока, характеризующееся быстрым возрастанием до

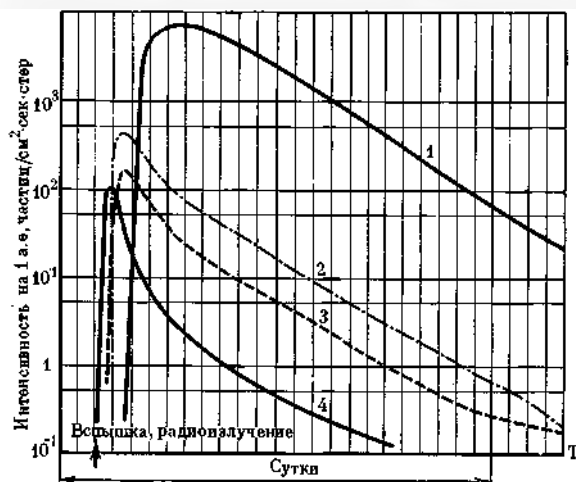


Рис. 14. Типичное возрастание потока солнечных космических лучей, наблюдаемое сразу за крупной хромосферной вспышкой

1 — протоны, 1—10 Мэв;
2 — протоны, 10—30 Мэв;
3 — протоны, 30—60 Мэв;
4 — электроны, 10—100 Мэв

максимального значения и медленным экспоненциальным спадом. На рис. 14 приведена типичная картина развития событий во времени для этих случаев.

Максимальные потоки частиц, например протонов с энергией выше 1 Мэв, зарегистрированные в межпланетном пространстве после больших солнечных вспышек, достигают $10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$. Однако такие потоки наблюдаются довольно редко, только после самых крупных вспышек. Обычно потоки протонов составляют $10^2 - 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$. Регистрируемое число событий растет по мере уменьшения их интенсивности.

В 1965—1966 гг. впервые в межпланетном пространстве были измерены электроны от вспышек с энергиями от нескольких десят-

ков до нескольких сотен кэв. Потоки электронов с энергиями $40 \text{ кэв} \leq E \leq 300 \text{ кэв}$, регистрируемые в смешанных электронно-протонных событиях, ведут себя иначе, чем протоны и релятивистские электроны. В связи с этим свойства потоков низкоэнергичных

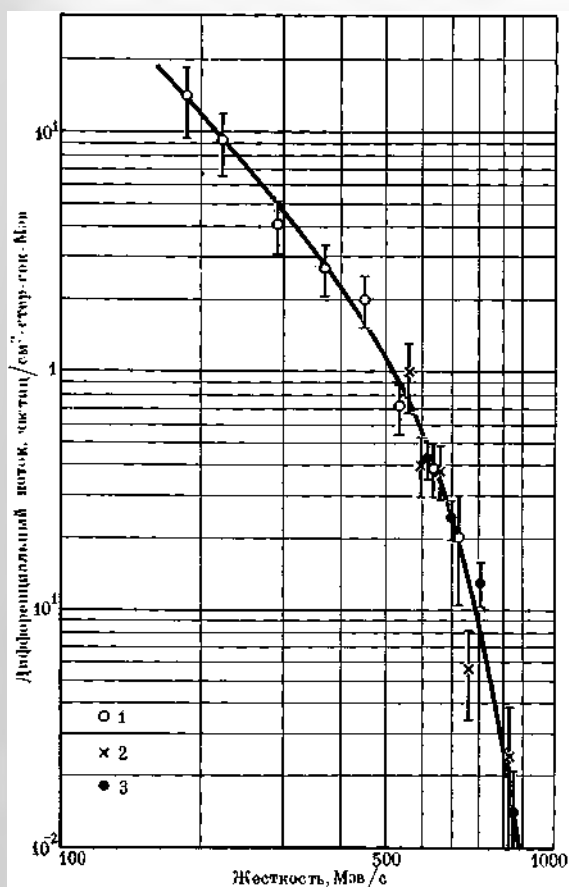


Рис. 15. Спектр по жесткости солнечных протонов, ядер гелия и ядер с зарядом $6 \leq Z \leq 9$, измеренный во время вспышки 12 ноября 1960 г. в 18 час. 40 мин. UT

1 — протоны;
× — ядра гелия × 5;
● — средние ядра × 350

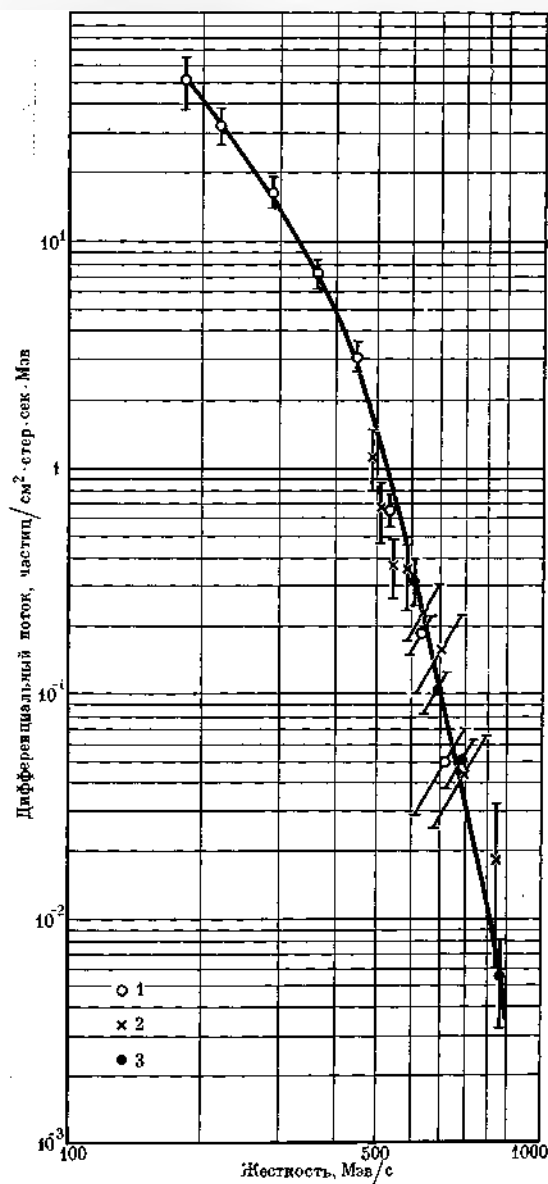


Рис. 16. Спектр по жесткости солнечных протонов, ядер гелия и ядер с зарядом $6 \leq Z \leq 9$, измеренный 13 ноября 1960 г. в 16 час. 03 мин. после вспышки 12 ноября 1960 г.

1 — протоны;
× — ядра гелия × 1.5;
● — средние ядра × 105

электронов подробно будут рассматриваться отдельно. В этом разделе обсуждаются свойства потоков протонов и электронов с энергией $E > 1$ Мэв.

Несмотря на серьезный интерес к солнечным космическим лучам, подробное изучение химического состава проводилось с помощью фотопластинок, запускаемых на ракетах, только для четырех вспышек. Наиболее подробно изучена вспышка 12 ноября 1960 г., в течение которой было запущено несколько исследовательских ракет и в разное время получены спектры жесткости протонов, ядер гелия и ядер с зарядом $6 \leq Z \leq 9$. Полученные спектры приведены на рис. 15 и 16 [47].

В пределах точности все три группы ядер имеют одинаковые зависимости от жесткости. Соотношение потоков ядер гелия и ядер группы М ($6 \leq Z \leq 9$) сохраняется в течение времени измерения постоянным, тогда как относительный поток протонов изменяется. Этот факт следует из сравнения шкал рис. 15 и 16. Во вспышке 18 июля 1961 г. получен верхний предел отношения потоков групп ядер L ($3 \leq Z \leq 5$) и М, равный 0,07. Соотношение между потоком ядер гелия и потоком ядер группы М сохраняется тем же, что и во вспышке 12 ноября 1960 г. Среднее отношение этих потоков по всем измерениям равно 62 ± 7 . На рис. 17 дан зарядовый спектр солнечных космических лучей [48].

Соотношение потоков ядер кислорода и углерода отличается от этого соотношения в первичных космических лучах и находится в хорошем согласии с составом фотосферы Солнца.

Зависимость наблюдаемых возрастных потоков частиц от гелиодолготы вспышки. Вблизи Земли наиболее часто регистрируются возрастания интенсивности солнечных космических лучей от вспышек, происшедших вблизи долгот 60° W. Эти долготы служат основанием силовых линий межпланетного магнитного поля, проходящих вблизи Земли при средней скорости солнечного ветра $u \sim 400$ км/сек.

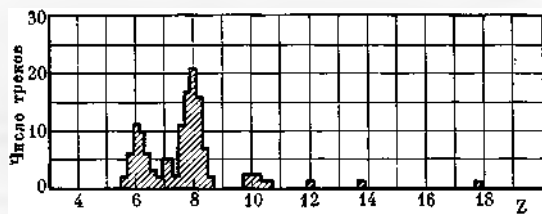


Рис. 17. Спектр зарядов солнечных космических лучей для вспышки 12 ноября 1960 г.

Однако это не означает, что частицы, генерированные во вспышках, находящихся за пределами этих долгот, не регистрируются около Земли.

Возрастания, вызванные как восточными, так и крайне западными вспышками, а также вспышками, лежащими на высоких широтах $> 15-20^\circ$, также наблюдаются вблизи Земли. Фронт нарастания в таких событиях обычно более пологий ($t \sim 5-10$ час.), чем у возрастаний от вспышек на малых широтах Солнца и на долготах $50-60^\circ$ W.

Статистика солнечных вспышек при разных уровнях солнечной активности и временное поведение потоков. Появление солнечных частиц в межпланетном пространстве находится в прямой зависимости от активности Солнца.

В годы, близкие к минимуму солнечной активности, вспышки большого балла очень редки, и потому редки случаи генерации космических лучей. Космические аппараты, летавшие в период 1964—1965 гг., часто в течение месяцев не регистрировали ни одного события.

На рис. 18 [92] приведена статистика протонных ($E_p > 15$ Мэв) возрастаний, измеренных в начале 20-го цикла солнечной активности на спутниках серии ИМП. Видно, что число их резко возрастает в 1966—1967 гг. Электроны больших энергий также гораздо чаще появляются в межпланетном пространстве в годы, близкие к максимуму солнечной активности. Обычно при наблюдениях с околоземных орбит время достижения максимума составляет от нескольких десятков минут до нескольких часов после начала вспышки. Это означает, что среднее расстояние, проходимое большинством частиц, увеличено по сравнению с 1 а.е. Этот эффект особенно заметен, если вспышка произошла у основания силовых линий межпланетного магнитного поля, не связанных с Землей, например на далеких западных и восточных долготах, а также далеко на южных или северных широтах.

На рис. 19 показана зависимость наблюдаемых потоков частиц в различных энергетических интервалах от пройденного этими частицами пути для нескольких вспышек. Путь определяется как произведение скорости частиц на время, прошедшее от момента инжекции до момента регистрации. Из этих рисунков видно, что точки для протонов различных энергий и релятивистских электронов в пределах ошибок измерений также ложатся на одну и ту же кривую. Это совпадение говорит

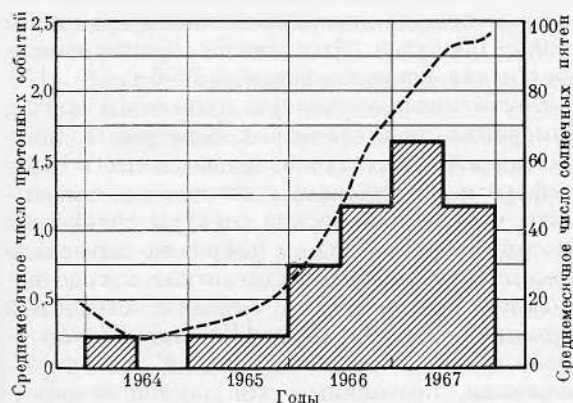


Рис. 18. Зависимость среднего месячного числа зарегистрированных на спутниках ИМП протонных возмущений ($E_p > 15$ Мэв) от среднего месячного числа солнечных пятен (штриховая кривая)

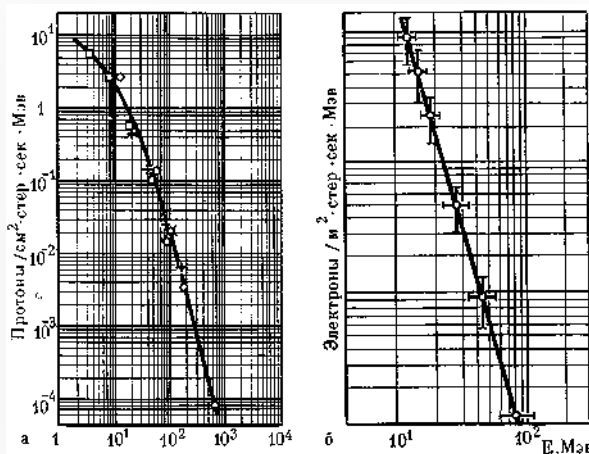
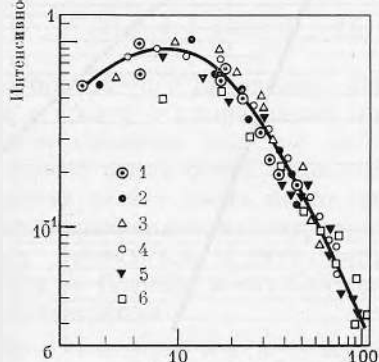
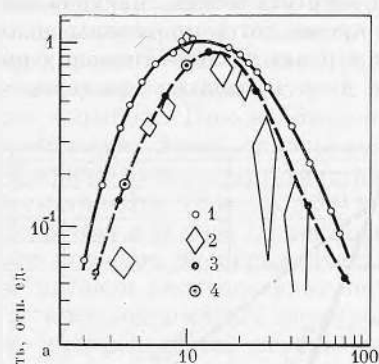


Рис. 20. Энергетические спектры солнечных космических лучей для вспышки 25 февраля 1969 г.

а — $23 \pm 50\%$, $N(E)dE \sim E^{-2.7}dE$;
б — $N(E)dE \sim E^{-1.5}dE$



Эквивалентное расстояние, а.е.

Рис. 19. Зависимость интенсивности потока частиц (нормированного в максимуме) от пути, пройденного частицами разных энергий

а — для протонов и электронов во вспышке 7 июля 1966 г. [97]:

- 1 — для электронов с $E \geq 45$ кэв, $\beta \approx 0.4$,
- 2 — для электронов с $E = 3 \div 12$ Мэв, $\beta \approx 0.99$,
- 3 — для протонов с $E = 19 \div 45$ Мэв, $\beta = 0.20 \div 0.30$,
- 4 — для протонов с $E = 16 \div 38$ Мэв, $\beta = 0.18 \div 0.28$;

б — для протонов во вспышке 25 февраля 1969 г.:

- 1 — 30 Мэв, 3 — 67 Мэв, 5 — 160 Мэв,
- 2 — 45 Мэв, 4 — 98 Мэв, 6 — 282 Мэв;

в — для протонов во вспышке 28 сентября 1961 г.:

- 1 — 2.2 Мэв, 3 — 14.5 Мэв, 5 — 175 Мэв,
- 2 — 3.8 Мэв, 6 — 87 Мэв, 9 — 230 Мэв,
- 3 — 5.7 Мэв, 7 — 135 Мэв, 10 — 295 Мэв
- 4 — 7.9 Мэв,

о том, что протоны и релятивистские электроны проходят один и тот же путь от момента ускорения до момента регистрации. Средняя величина этого пути, определяемая по максимуму возрастания, близка к 8–10 а.е.

На рис. 19 нанесена также кривая для низкоэнергичных электронов. Эти электроны приходят в точку наблюдения раньше, чем протоны и релятивистские электроны. Более быстрый приход в точку наблюдения низкоэнергичных электронов характерен для таких смешанных электронно-протонных событий.

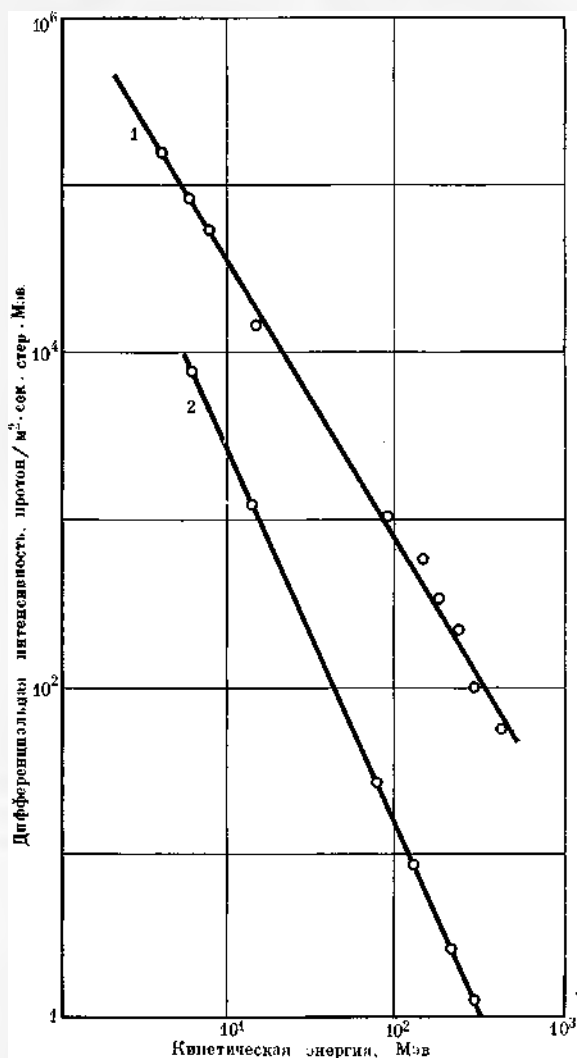


Рис. 21. Дифференциальные энергетические спектры протонов, экстраполированные к моменту вспышки.
1 — 28 сентября 1961 г. ($\gamma=1,7$);
2 — 23 октября 1962 г. ($\gamma=2,3$)

Интенсивность потоков протонов и электронов в импульсных событиях уменьшается со временем по экспоненциальному закону с $\tau \sim 0,5 \div 1,5$ суток. Этот закон хорошо выполняется для времени, равного 5–6 т.

Энергетические спектры солнечных частиц. Измерения энергетических спектров солнечных космических лучей, проведенные в стратосфере и на удаленных спутниках, показывают, что энергетические спектры солнечных протонов могут быть в широком интервале энергий (от нескольких десятков кэв до нескольких сотен Мэв) описаны степенной функцией вида $N(\geq E) = AE^{-\gamma}$, где $N(\geq E)$ — число частиц с энергией выше E , а A и γ — величины, постоянные для данной конкретной вспышки. Для разных вспышек величины A изменяются в пределах нескольких порядков, а показатель степени γ имеет интервал изменения от ~ 1 до 5. Наиболее часто величина γ имеет значение 3–4. Подробные измерения энергетических спектров пока единичны и, кроме того, проведены различной методикой в разных энергетических интервалах. Ниже дано несколько примеров энерге-

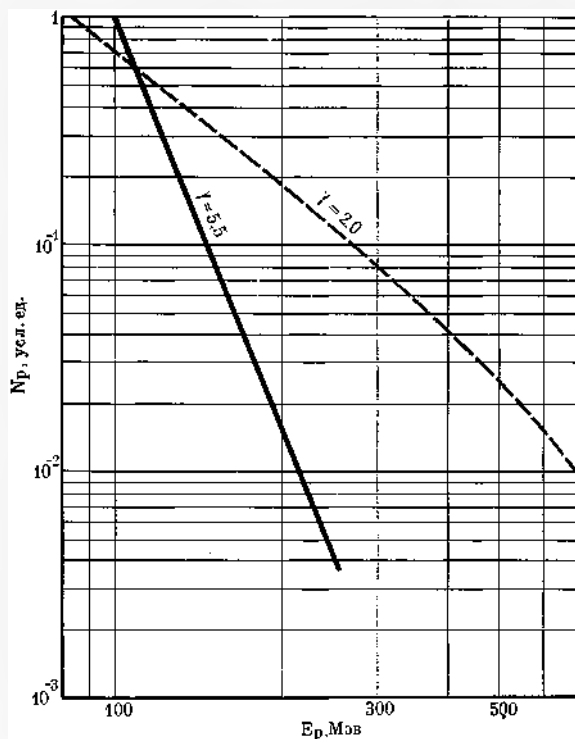


Рис. 22. Усредненные интегральные спектры солнечных протонов для энергий выше 100 Мэв в магнитно-спокойные периоды (штриховая линия) и в периоды магнитных бурь (сплошная)

тических спектров для различных возрастных солнечных космических лучей. На рис. 20, а приведен дифференциальный спектр протонов для вспышки 25 февраля 1969 г. [41]. Это событие изучено наиболее тщательно и в очень широком энергетическом интервале. Приведенный спектр был получен через 14 час. после начала событий. Показатель спектра в очень большом интервале энергий $\gamma=2,7$.

На рис. 20, б [61] показан спектр электронов для этой же вспышки, который также подчиняется закону $E^{-\gamma}$, где $\gamma \sim 3 \div 4$. Показатель интегрального спектра релятивистских электронов для большинства событий $\gamma \sim 4$.

На рис. 21 [53] приведены энергетические спектры солнечных протонов для вспышек 28 сентября 1961 г. и 29 октября 1962 г., экстраполированные по времени к моменту вспышки, т. е. энергетические спектры, сформированные в процессе ускорения.

По-видимому, спектры как протонов, так и энергичных электронов, измеренные спустя некоторое время ($\sim 10-20$ час.) после вспышки, имеют одинаковый вид с $\gamma \sim 3$ независимо от балла вспышки. При наблюдении солнечных космических лучей одновременно с приходом ударной волны энергетические спектры сильно смягчаются (рис. 22 [29]).

Анизотропия потоков. В настоящее время накоплен большой экспериментальный материал об угловом распределении потоков протонов и низкоэнергичных электронов. Если угловое распределение частиц выразить в виде

$$F(\theta) = a + b \sin(\theta + \varphi),$$

то величина $A=a/b$ определяет анизотропию потока, а угол φ — направление анизотропии. При более сложном угловом распределении поток может иметь более одного максимума, в частности может иметь место так называемая двунаправленная анизотропия. Если измерения проводятся в двух направлениях, например «к Солнцу» и «от Солнца», то величина анизотропии

$$A = (n_+ - n_-)/(n_+ + n_-),$$

где n_+ — поток от Солнца, n_- — поток к Солнцу.

Одновременные измерения потока частиц и направления межпланетного магнитного поля показали, что существует сильная корреляция между направлением максимума углового распределения и направлением магнитного поля в точке наблюдения (рис. 23) [95]. Одновременные измерения анизотропии

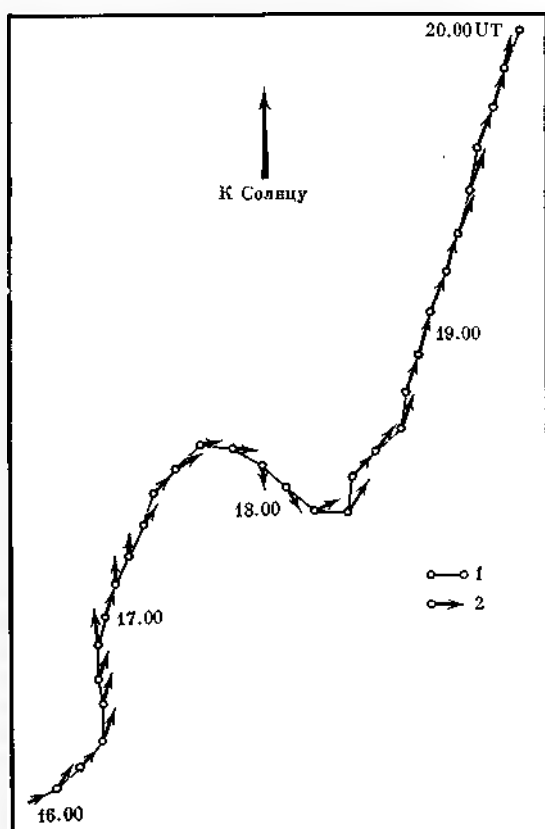


Рис. 23. Направление межпланетного магнитного поля в плоскости эклиптики (азимут) и анизотропия космических лучей в период 16—20 час. UT 30 декабря 1965 г. по данным «Пионера-6».

1 — азимут линий поля;
2 — направление анизотропии

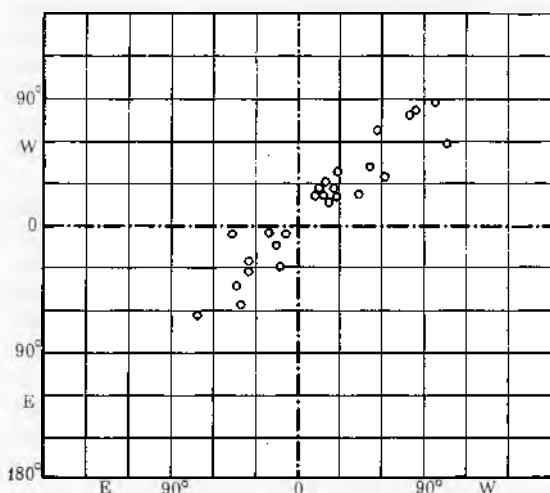


Рис. 24. Корреляция между направлением потока протонов и электронов в смешанных электронно-протонных событиях

потоков протонов и низкоэнергичных электронов в смешанных протонно-электронных событиях показали, что направления максимального прихода протонов и электронов совпадают.

На рис. 24 приведен пример такой корреляции между потоками электронов и протонов. [112].

Амплитуда анизотропии для протонов низких энергий и для низкоэнергичных электронов в смешанных протонно-электронных событиях достигает 70–80%. Для событий, связанных с восточными и крайними западными вспышками, имеющими более медленный фронт нарастания ($\tau \sim 10$ час.), величина анизотропии несколько меньше $A \sim 30 \div 50\%$. После достижения максимума интенсивности амплитуда анизотропии уменьшается по величине, хотя максимум потока остается направленным вдоль поля.

На рис. 25 [98] представлен временной ход интенсивности протонов с $E = 7,5 \div 45$ Мэв для вспышки 18 ноября 1968 г., которая произошла вблизи западного лимба Солнца (18 N, 84 W) в 10 час. 30 мин. UT и сопровождалась радиовсплесками II и IV типов, а на рис. 26 [112] изображена векторная диаграмма для изменения анизотропии протонов 0,7–7,6 Мэв во времени после вспышки. Векторная диаграмма построена следующим образом. Каждый вектор представляет собой среднюю за определенный промежуток времени анизотропию. Длина вектора соответствует амплитуде анизотропии, а направление — направлению максимального потока частиц в плоскости эклиптики. В начальный период $T < 2$ суток на фазе возрастания и фазе спада анизотропия достигает 50% (вспышка западная), а направление анизотропии близко к среднему направлению межпланетного магнитного поля. Величина анизотропии связана с энергией частиц так, что A больше для частиц, имеющих меньшую скорость.

На поздней стадии события для времени $1 \div 2 < T < 4$ суток, когда потоки частиц невелики, также существует небольшая анизотропия протонов, величина которой прямо пропорциональна скорости солнечного ветра и обратно пропорциональна скорости частицы v .

Эта анизотропия, как будет показано ниже, вызвана выносом частиц из окосолнечного пространства солнечным ветром и называется равновесной.

На рис. 26 указана область такой равновесной анизотропии, направленной радиально от Солнца.

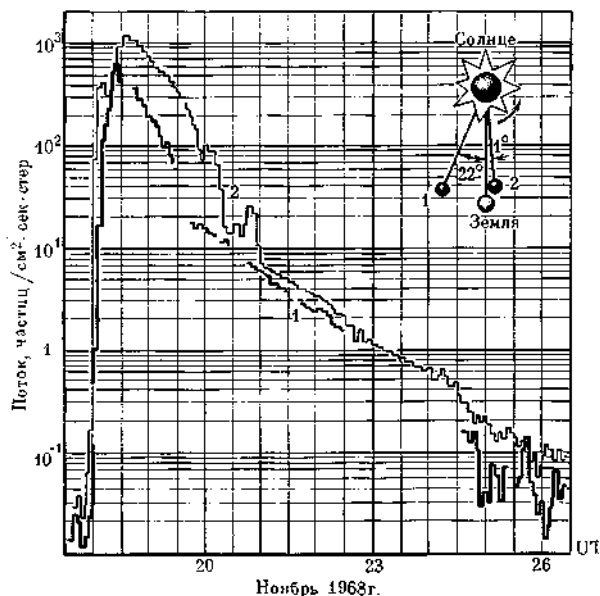


Рис. 25. Временное поведение потока протонов с энергией $E_p = 7,5 \div 45$ Мэв
1 — «Пионер-8»; 2 — «Пионер-9»

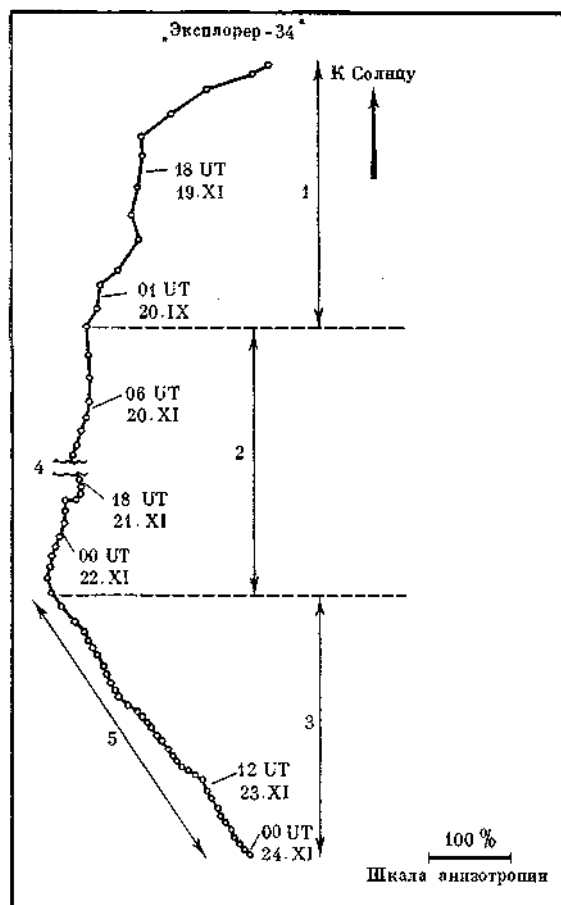


Рис. 26.

В последней фазе, фазе распада потока солнечных протонов, для $T > 4$ дней анизотропия становится восточной и составляет угол 45° от направления Солнце — космический аппарат. Величина этой анизотропии $A \sim 5 \div 10\%$. Равновесная анизотропия в этот поздний период спада потока также обратно пропорциональна скорости частицы.

Возрастания потоков электронов малых энергий. Электроны с энергией 10—100 кэВ являются наиболее общим и часто встречающимся типом частиц, испускаемых Солнцем во время вспышек малых и средних баллов. В течение 20-го солнечного цикла, начиная с 1964 г. до середины 1970 г., вблизи Земли на космических аппаратах было зарегистрировано около 230 таких событий.

Свойства электронов, испускаемых малыми солнечными вспышками, следующие.

1. Потоки электронов практически всегда можно связать с оптической вспышкой. Эти вспышки могут иметь малую площадь, но должны быть довольно ярки в линии H_α .

2. Интенсивность потоков электронов, наблюдаемых около Земли, после отдельных вспышек может достигать величины $\sim 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$ для энергий $E_e > 40$ кэВ. В большинстве случаев в максимум события регистрировались потоки от 10 до $1000 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$ [91]. Как правило, электроны не сопровождаются заметными потоками протонов.

Энергетические спектры солнечных электронов в межпланетном пространстве в большинстве случаев можно представить в степенном виде:

$$N(E)dE = K \cdot E^{-\gamma} dE,$$

при этом $\gamma \sim 3$ в интервале энергий от 20 до 45 кэВ, а выше 100—200 кэВ спектр очень круто падает ($\gamma \geq 5$). Это означает, что фактически частиц с энергией, большей 200—300 кэВ, в таких потоках нет.

3. Время запаздывания прихода электронов к Земле по отношению к всплеску рентгеновских лучей обычно лежит в пределах от 15 до 60 мин. Время нарастания до максиму-

ма гораздо меньше времени нарастания потока протонов после больших вспышек (обычно оно занимает 5—50 мин.). Спад интенсивности идет двояко: в одних случаях наблюдается экспоненциальное уменьшение интенсивности от максимума с $\tau \sim 12$ час. [91], в других сначала идет быстрый спад с τ порядка времени нарастания, а затем после уменьшения интенсивности до 10% от максимальной более медленный.

4. При движении области по солнечному диску электроны из этой области достигают Земли только тогда, когда область находится в определенном интервале гелиодолгот. Статистическое рассмотрение электронных возрастаний приводит к выводу, что большинство регистрируемых у Земли электронов приходят от вспышек, расположенных на $60^\circ \pm 30^\circ$ западной солнечной долготы (рис. 27) [91].

Эти выводы приводят к концепции «конусов распространения», которые имеют ширину $30-90^\circ$ и внутри которых в межпланетной среде распространяются электроны малых энергий (рис. 28) [91]. Если это так и электроны испускаются только в «конус распространения», то мы можем регистрировать у Земли лишь часть всех электронных событий, генерированных на Солнце.

5. В последнее время была измерена анизотропия потоков электронов. Было найдено, что начальная анизотропия велика и направлена вдоль межпланетного магнитного поля, а затем падает гораздо ниже, чем анизотропия протонных событий, достигая равновесного значения $\sim 2,5\%$. Это обстоятельство указывает на то, что неравновесная анизотропия существует долгое время во время фазы распада электронного потока. Однако вопрос об анизотропии еще очень далек от разрешения и требует постановки большого числа экспериментов.

Локализованные в пространстве солнечные частицы. Потоки частиц высоких энергий практически всегда связаны с определенной вспышкой на Солнце. Частицы же малых энергий (протоны с энергией 0,3—20 МэВ и электроны с энергией 20—100 кэВ) появляются в межпланетном пространстве не только сразу после вспышки. Очень часто регистрируются возрастания потоков частиц, которые либо нельзя сопоставить с видимой вспышкой, либо интервал времени между оптической вспышкой и возрастанием потока частиц малых энергий много больше времени прямого пролета частиц. При измерениях на космических аппаратах таких запаздывающих

Рис. 26. Векторная диаграмма изменения направления анизотропии со временем для вспышки 18 ноября 1968 г. ($E_p = 0,7 \div 7,6$ МэВ)

- 1 — неравновесная анизотропия;
- 2 — равновесная анизотропия — радиальная фаза II;
- 3 — равновесная анизотропия — восточная фаза II;
- 4 — пересечение спутником магнитосферы;
- 5 — 45° Е (перпендикуляр к направлению магнитного поля)

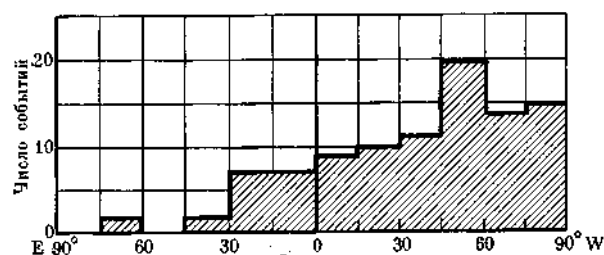


Рис. 27. Зависимость регистрации электронных возрастов от гелиографической долготы вспышки

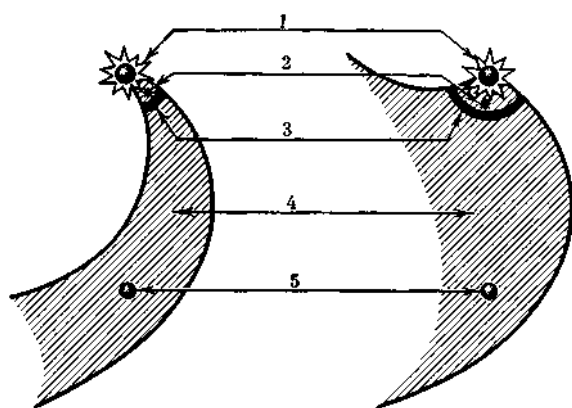


Рис. 28. К концепции «конуса распространения» электронов в межпланетном пространстве

- 1 — Солнце;
- 2 — вспышка;
- 3 — область хранения электронов;
- 4 — конус распространения;
- 5 — Земля

потоков было показано, что временной ход интенсивности почти одинаков для протонов с энергией $E_p \sim 0,5$ и $E_p \sim 10-20$ Мэв. Это значит, что при регистрации такого рода возрастов космический аппарат пересекает локализованный в пространстве поток частиц, движущийся вместе с солнечным ветром. Магнитное поле этой области модулирует интенсивность галактических космических лучей, вызывая форбуш-понижение, а поток плазмы, сталкиваясь с магнитосферой Земли, может вызывать геомагнитное возмущение.

В большинстве случаев такими локализованными областями являются выделенные в пространстве трубки силовых линий, вращающиеся вместе с Солнцем. «Вращающиеся» потоки часто оказываются настолько долгоживущими, что наблюдаются при нескольких оборотах Солнца как рекуррентные события, повторяясь с периодом 27 дней. Долгоживущие потоки протонов с энергией несколько

Мэв обычно связываются с активными областями на Солнце. Можно предполагать, что первоначальными источниками долгоживущих потоков служат солнечные вспышки, обеспечивающие длительное истечение плазмы после вспышки из той же активной области. В дальнейшем поток остается как бы привязанным к этой активной области.

Магнитное поле, вмороженное в плазму солнечного ветра, по-видимому, полностью определяет движение частиц в таких потоках. Иными словами, частицы движутся внутри выделенного конуса силовых линий межпланетного поля, выносимых от Солнца наружу солнечным ветром. Поэтому при измерении одного и того же потока в двух точках межпланетного пространства наблюдается сдвиг времени регистрации возрастания ΔT , связанный со скоростью солнечного ветра u и расстоянием между точками наблюдения следующим образом:

$$\Delta T = \frac{\Delta R + \Delta \varphi R}{u} \operatorname{ctg} \theta = \frac{\Delta R}{u} + \frac{\Delta \varphi}{\Omega},$$

где $\Delta \varphi$ — угловое расстояние между космическими аппаратами, ΔR — радиальное расстояние между космическими аппаратами, u — скорость солнечного ветра, $\Omega = 13,3$ град/сутки — угловая скорость вращения Солнца, R — расстояние от Солнца, θ — угол наклона силовых линий магнитного поля в плоскости эклиптики к радиусу в данной точке.

Этот сдвиг во времени регистрации, определенный двумя разнесенными по долготе космическими аппаратами, позволяет в случае одновременного присутствия в разных точках пространства космических аппаратов отделить однозначно возрастания частиц во вращающихся потоках от всех других видов возрастаний.

На рис. 29 [4] приведен пример регистрации такого возрастания на космических аппаратах «Зонд-3» и «Венера-2». Справа изображено взаимное расположение космических аппаратов во время регистрации локализованного потока.

Ниже приводится краткая сводка свойств таких потоков, характерных для большинства зарегистрированных возрастаний.

1. Интенсивность частиц в долгоживущих потоках обычно мала: $10-100 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$, хотя иногда для протонов с энергией $E_p \sim 0,5$ Мэв и электронов с энергией $E_e \gtrsim 40$ кэв интенсивность может достигать значений $10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$.

2. Энергия частиц, населяющих эти потоки, обычно невелика: $E_e \sim 40-300$ кэв, $E_p \sim$

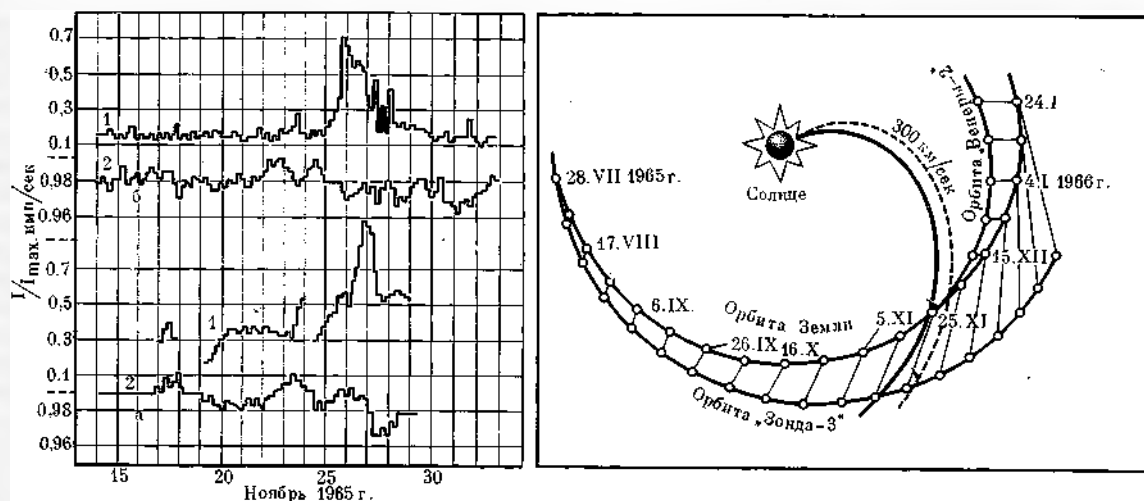


Рис. 29. Регистрация долгоживущего потока космических аппаратов «Зонд-3» (а) и «Венера-2» (б)
1 — $E_p < 5$ Мэв;
2 — $E_p > 30$ Мэв

~ 0.5 —20 Мэв. В нескольких случаях во вращающихся потоках были зарегистрированы электроны больших энергий (рис. 30).

3. Энергетические спектры электронов и протонов, зарегистрированные в долгоживущих потоках, обычно мягче, чем у частиц, наблюдаемых во вспышечных всплесках.

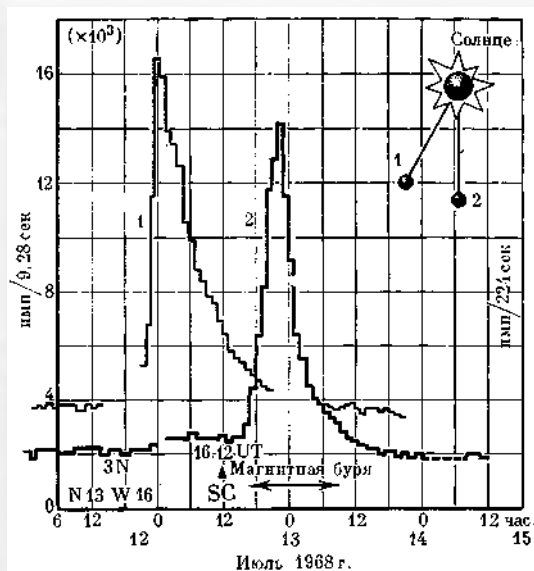


Рис. 30. Пример регистрации долгоживущего потока релятивистских электронов
1 — $E_e > 13.5$ Мэв, «Пионер-8» (шкала справа);
2 — $E_e > 2$ Мэв, «Эксплорер-34» (шкала слева)

4. Долгоживущие потоки иногда состоят только из протонов или только из электронов, а иногда имеют обе эти компоненты.

5. При регистрации потоков протонов и электронов часто наблюдают появление сначала максимума электронов, а затем максимума протонов [35].

6. Вращающиеся потоки иногда имеют широкое гало, которое занимает 70 — 90° по долготе; гало состоит из более жестких частиц относительно небольшой интенсивности. В центре потока, где частицы обладают более низкой энергией, сосредоточена большая часть частиц. Длительность регистрации центральной части потока обычно составляет 6 — 12 час., откуда следует, что угловая ширина такого центрального потока 3 — 6° .

7. Анизотропия долгоживущих потоков обычно невелика и составляет 10 — 20% , иногда достигает значений 30 — 40% . Однако надежных измерений в этой области пока мало.

8. Иногда одновременно с вращающимся потоком регистрируется ударная волна, ограничивающая поток со стороны межпланетной среды (эта волна называется стоячей ударной волной), и наблюдается магнитная буря.

Солнечные космические лучи и ударные волны. Часто наблюдаются случаи, когда в межпланетном пространстве регистрируются возрастания интенсивности космических лучей, совпадающие по времени с прохождением ударной волны, генерированной в крупных вспышках. По отношению к первоначальной вспышке эти частицы, так же как и частицы долгоживущих потоков, являются запаздывающими. Возможно, что оба эти вида возрастаний представляют собой одно и то же явление. Регистрация таких частиц всегда

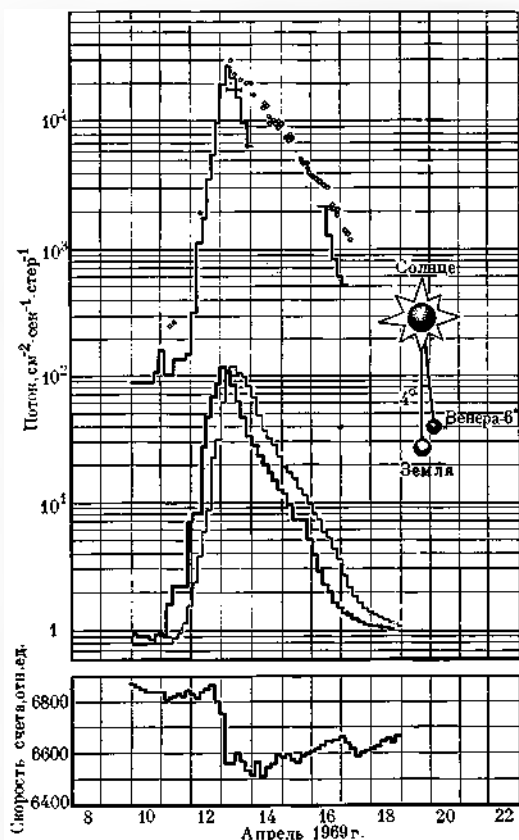


Рис. 31. Возрастание потоков частиц, связанное с ударной волной, для протонов с энергией $1 \leq E_p \leq 5$ Мэв и $E_p > 30$ Мэв по данным космических аппаратов «Венера-6» (жирная линия), «Молния-1» (кружки) и «Эксплорер-34» (тонкая линия) 10–15 апреля 1968 г.

Нижняя кривая — показания нейтронного монитора в Алерте

сопровождается форбуш-понижением в интенсивности галактических космических лучей и геомагнитной бурей на Земле, вызванной взаимодействием ударной волны с магнитосферой Земли. На рис. 31 приведен пример такого возрастания [140].

Средняя скорость распространения ударных волн от вспышек на расстояниях 1 а.е. равна ~ 600 км/сек, поэтому обычно наблюдаемое время запаздывания появления таких частиц у Земли по отношению к вспышке, генерировавшей ударную волну, лежит в пределах 50–60 час. Иногда в случае лимбовых вспышек вблизи нулевого меридиана возможен эффект наложения двух явлений: вращающегося потока частиц и частиц, связанных с движением ударной волны. В некоторых случаях наблюдаются сильные

волны со средней скоростью распространения ~ 2500 км/сек, тогда энергичные частицы регистрируются приблизительно через сутки после вспышки. Критерий отбора таких событий — сопровождение их ударной волной, распространяющейся от солнечной вспышки в межпланетном пространстве. Следует отметить, что само выделение ударной волны из всех других видов возмущений межпланетной среды — довольно трудная задача и может быть однозначно решена только при одновременном измерении параметров плазмы и магнитного поля на спутнике. Ниже приводится сводка основных известных свойств таких потоков частиц, сопровождающих ударные волны.

1. Длительность возрастания невелика — 6–24 час. Обычно возрастание начинается прежде, чем регистрируется приход ударной волны. В момент прохождения фронта ударной волны регистрируется дополнительный узкий всплеск длительностью 10–20 мин.

2. Потоки могут быть как чисто протонными с энергиями $0,5 \leq E_p \leq 100$ Мэв, так и содержащими электроны с $E_e \sim 40$ –300 кэв.

3. Отмечается одновременный приход частиц различных энергий в точку наблюдения, а также одинаковые скорости нарастания потоков частиц различных энергий.

4. Энергетические спектры таких частиц обычно гораздо мягче, чем спектры диффузионной компоненты, на фоне которой они регистрируются.

5. Анизотропия таких потоков еще недостаточно изучена. Величина анизотропии может быть довольно большой, но направление максимального прихода частиц быстро меняется во времени, по-видимому, синхронно с быстрыми флуктуациями магнитного поля за фронтом ударной волны.

6. Появление частиц всегда сопровождается форбуш-понижением интенсивности галактических космических лучей и геомагнитной бурей с внезапным началом.

Солнечные космические лучи в «спокойные» периоды. В спокойное время, при отсутствии солнечных вспышек, также существует некоторый минимальный фоновый поток протонов. Измерение малых потоков и спектра таких частиц с энергией < 30 Мэв на фоне значительно большего потока галактических космических лучей — довольно трудная задача, поэтому полученные до настоящего времени данные не отличаются большой точностью. Средний поток протонов с энергией $E_p > 1$ Мэв по разным измерениям $\sim 10^{-2}$ частиц/см²·сек·стер. Показатель дифференци-

ального спектра для области энергии 0,03—5 Мэв составляет $\gamma \sim 3$.

Генерация солнечных космических лучей во время вспышки. В настоящее время имеются некоторые основания полагать, что генерация солнечных электронов и протонов происходит в два этапа: как непосредственно в период взрывной фазы вспышек (I этап), так и вслед за взрывной фазой, когда ударная гидромагнитная волна, образовавшаяся при крупном вспышечном взрыве, взаимодействует с интенсивными магнитными полями солнечных пятен (II этап). Таким образом, вероятнее всего, что существуют два ускорительных механизма, причем они действуют последовательно, т. е. ускорение во взрывной фазе является инжектором частиц для второй фазы ускорения.

Указанием на возможность непосредственной генерации частиц во время фазы взрыва служит наблюдение радиовсплесков III типа. Скорость движения источника всплесков III типа составляет от 0,2 до 0,8 с, так что агент, возбуждающий эти плазменные колебания, может быть идентифицирован как электроны с энергией от 10 до нескольких сотен кэв. В [22] прослежено движение такого источника радиовсплесков III типа от Солнца до расстояний $200 R_{\odot}$ и найдено, что скорость движения сохранялась постоянной и равной $(0,4 \div 0,5) \cdot c$, а сам источник представлял собой довольно компактное образование с линейными размерами 10^6 км. Оценка количества электронов, вызывающих радиовсплеск III типа в короне, приводит к величине $N_e \sim 10^{35} - 10^{36}$, что близко к числу солнечных электронов N , наблюдаемых непосредственно в межпланетном пространстве после вспышки ($N \sim 3 \cdot 10^{32} - 10^{34}$ для $E_e \geq 22$ кэв). Это дает для эффективности выхода электронов из короны в межпланетное пространство оценку 0,1—1% [91].

Одновременно с радиовсплеском III типа, который генерируется в короне, наблюдаются микроволновые всплески в сантиметровом радиодиапазоне и рентгеновские всплески в диапазоне энергий до сотни кэв (рис. 32 и 33). Если считать, что радиовсплески III типа генерируются частицами, которые движутся наружу, то микроволновые всплески могут возникать в виде магнитно-тормозного излучения в хромосфере, возникающего при движении части потока ускоренных частиц в направлении, параллельном границе хромосферы, а рентгеновское излучение этой фазы обусловлено тормозным излучением электронов, движущихся в плотные слои атмосферы

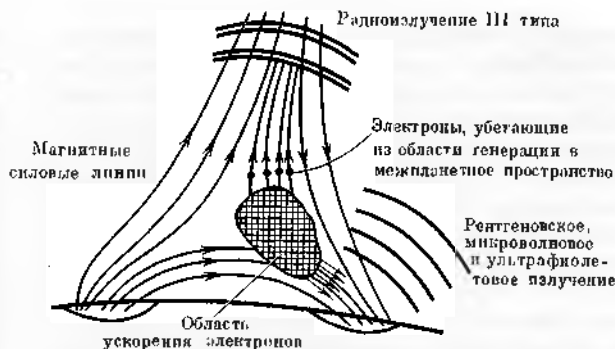


Рис. 32. К модели генерации электронов во вспышке (геометрическая картина)

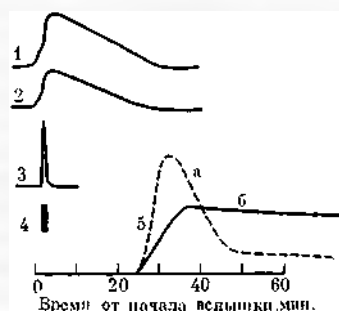


Рис. 33. К модели генерации электронов во вспышке (временная картина)

- 1 — $H\alpha$;
- 2 — рентгеновские лучи (10 кэв);
- 3 — жесткий рентген;
- 4 — радиовсплеск III типа;
- 5 — поток электронов с энергией 10—100 кэв на 1 а. е.;
- 6 — распространение без рассеяния;
- б — диффузионное распространение

Солнца. То, что все эти электроны принадлежат к одной области генерации, показывает хорошее подобие временной формы всплеска у различных видов электромагнитного излучения, хотя в зависимости от обстоятельств и конкретных условий ускорения соотношение между интенсивностями разных групп электромагнитного излучения может быть различным вплоть до того, что отдельные виды могут отсутствовать вообще.

Если ускорение частиц на I этапе осуществляется электрическими полями, возникающими при диссипации около нулевых точек противоположно направленных магнитных полей, то тогда, по всей видимости, происходит ускорение до одинаковых жесткостей. Если электроны при этом ускоряются до энергий ~ 300 кэв, то протоны — лишь до 200 эв, т. е. их энергия будет ниже кинетической

энергии солнечного ветра. Действительно, наблюдения в межпланетном пространстве показывают, что после вспышек малых баллов осуществляется только эта первая фаза ускорения, при которой практически ускоряются только электроны. Однако если существует какой-либо другой механизм ускорения, например ускоряющий частицы до одинаковой энергии, то мы должны наблюдать после вспышек малых баллов малознергичную (до нескольких сотен кэв) протонную компоненту. Недостаток экспериментальных данных не позволяет пока сделать в этом случае каких-либо надежных выводов.

Основная часть протонов ускоряется до энергий сотни Мэв, а электронная компонента — до энергий десятки Мэв, по-видимому, в следующей фазе вспышечного явления, когда образовавшаяся во взрыве ударная волна взаимодействует с сильными магнитными полями пятен. О существовании такой ударной волны мы узнаем по радиовсплескам II типа, возникающим спустя несколько минут после начала крупных солнечных вспышек (вероятно, существует некоторый энергетический порог образования ударной волны, поскольку после слабых вспышек она, как правило, не возникает).

И наконец, о том, что в результате указанного взаимодействия произошло ускорение частиц, мы узнаем по радиобурям IV типа, которые вызываются синхротронным излучением электронов, захваченных в короне. Эти бури разнообразны по форме; они длятся в ряде случаев много часов, и области, захваченные этими бурями, медленно дрейфуют в короне. Наблюдения показывают, что протонная компонента солнечных космических лучей достаточно хорошо коррелирует с появлением этих радиобурь IV типа. Имеется предположение, что аналогично таким областям IV типа в короне существуют области, занятые радиобурями I типа и широким континуумом радиопомех, сохраняющимся иногда в течение нескольких суток. Однако если в случае радиобурь IV типа эти районы заняты энергичными электронами и протонами, то в случае радиобурь I типа они состоят из захваченных электронов с энергией десятки кэв.

Таким образом, на некотором этапе вспышечного явления в короне около оснований силовых линий, выносимых солнечным ветром в межпланетное пространство, образуются обширные районы, населенные заряженными частицами и часто далеко отстоящие от места вспышки. В какой-то момент происхо-

дит освобождение частиц, и они попадают в межпланетное магнитное поле.

Некоторые представления о распространении солнечных космических лучей в межпланетном пространстве. Основным фактором, определяющим характер движения заряженных частиц, в межпланетном пространстве является межпланетное магнитное поле. Инжектированные Солнцем протоны распространяются в межпланетном спиральном магнитном поле, образованном солнечным ветром. На эту упорядоченную в среднем структуру межпланетного магнитного поля накладывается спектр неоднородностей, связанный с непостоянством параметров солнечного ветра.

В соответствии с такой структурой межпланетного магнитного поля движение заряженной частицы можно разделить на движение по спирали вдоль среднего регулярного поля и рассеяние на магнитных неоднородностях.

При движении в регулярном поле, меняющемся в зависимости от R , сохраняется магнитный момент частицы $M = E \cdot 1/B$ (первый адиабатический инвариант), что приводит к сохранению величины $\sin^2 \alpha / B$, где α — угол между направлением скорости частицы и силовой линией. Напряженность магнитного поля уменьшается как $B_r(R) \sim 1/R^2$, $B_\theta(R) \sim 1/R$. Поскольку на орбите Земли величина поля уменьшена в 10^4 раз по сравнению с напряженностью на поверхности Солнца, тоpitch-угол частицы α был бы очень малым $\alpha \leq 1^\circ$ (даже для частиц, вылетающих от Солнца под углом $\sim 90^\circ$), если бы частица не рассеивалась на неоднородностях магнитного поля.

При взаимодействии с неоднородностями поля частица рассеивается, т. е. изменяется ее pitch-угол и направление движения. Наиболее эффективно частица рассеивается на неоднородностях поля с размером l порядка ларморовского радиуса частицы $\rho = cp/z_e B$, где p — импульс частицы, B — средняя напряженность поля в неоднородности. При $l \ll \rho$ частица рассеивается на неоднородности на очень малый угол, а при $l \gg \rho$ частица, двигаясь вдоль силовой линии, либо огибает неоднородность, так что угол рассеивания оказывается также малым, либо отражается от нее зеркально.

Как уже говорилось, в большинстве случаев возрастаний солнечных частиц, зарегистрированных в последние 15—20 лет, отмечается постепенный рост интенсивности в течение нескольких часов с момента прибытия

первых частиц в точку регистрации до максимума с последующим более медленным спадом. Ответственные за эти возрастания солнечные вспышки длятся от $1/2$ до 3 час., а фаза вспышки, в которой наблюдается жесткое рентгеновское и радиоизлучение, длится гораздо меньше (рис. 33). Поэтому более длинные фронты временных профилей частиц интерпретируются как эффект от диффузии частиц.

Наиболее простой моделью, описывающей процесс распространения частиц при наличии сильного рассеяния, служит модель изотропной диффузии, предложенная в самом начале исследования солнечных космических лучей. Эта простейшая модель в случае неограниченной среды и постоянного коэффициента диффузии даст следующую временную зависимость потока частиц:

$$n(R, v, t) = \frac{N(v)}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{-\frac{R^2}{4Dt}},$$

где n — плотность частиц, R — гелиоцентрическое расстояние точки наблюдения, $D(R, v)$ — коэффициент диффузии, v — скорость частиц, $t_m = R^2/6D$ — момент времени, когда $n(R, v, t)$ имеет максимальное значение.

Модель изотропной диффузии предполагает, что частицы импульсно инжектируются в течение очень короткого времени вблизи максимума вспышки или максимума всплеска рентгеновских лучей, что они движутся в сферически-симметричном объеме, наталкиваясь на неоднородности, вследствие чего происходит их изотропное рассеяние. Плотность неоднородностей в пространстве должна быть такова, чтобы длина свободного пробега частицы Λ была много меньше расстояния L от источника до точки наблюдения.

Изучение временных зависимостей интенсивности солнечных космических лучей показало, что изотропная диффузия в некоторых случаях неплохо их описывает, в особенности если источник частиц расположен в восточной или центральной части Солнца. Некоторое улучшение согласия временной зависимости может достигаться при учете зависимости коэффициента диффузии D от гелиоцентрического расстояния R . Однако изотропная диффузия не объясняет наблюдающуюся на начальной стадии вспышки пространственную анизотропию потока солнечных протонов: максимум потока в процессе изотропной диффузии должен был наблюдаться в направлении от Солнца, в то время как в действительности максимальный поток направлен

под углом $\sim 50^\circ$ к линии Земля — Солнце и смещен к востоку. Изотропная диффузия не может также объяснить и тот факт, что западная половина Солнца более эффективна с точки зрения прихода солнечных космических лучей. Как показали измерения с космических аппаратов, потоки частиц в пространстве сильно зависят от гелиодолготы места солнечной вспышки. Это также не укладывается в рамки изотропной диффузии.

Кроме того, эксперимент часто дает для протонов с $E_p < 50$ Мэв длину свободного пробега, сравнимую с 1 а.е., что противоречит одному из условий применимости диффузионной теории.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что изотропная диффузия дает приемлемое описание поздней стадии возрастания (за исключением свойств анизотропии). Однако необходимо помнить, что большая часть частиц регистрируется в максимуме возрастания. Следовательно, изотропная диффузия может описать поведение не больше 10% частиц, испущенных Солнцем.

В связи с этим в последние годы развиваются различные модели анизотропной диффузии. Некоторые модели основаны на предположении, что диффузия частиц имеет место не только в межпланетном пространстве, но также и в солнечной короне, причем относительная роль корональной и межпланетной диффузии зависит от времени наблюдения, а при движении частиц вдоль силовых линий рассеяние преобладает над переносом их поперек силовых линий. Иными словами, эффективный коэффициент диффузии вдоль поля $D_{||}$ значительно больше D_{\perp} — коэффициента поперек силовых линий ($D_{||} \sim 100 D_{\perp}$).

На основании этих предположений была развита теория рассеяния частиц по pitch-углам для описания физической связи между рассеянием частиц и наблюдаемыми флуктуациями магнитного поля [89, 92]. В работах [77, 78] развита теория анизотропной диффузии в тех же предположениях с учетом выноса частиц солнечным ветром и рассмотрено временное поведение потоков и анизотропии солнечных космических лучей в неравновесной фазе явления, когда существенна диффузия. Из этих работ следует, что величина анизотропии $A \sim R/2vt$, где R — расстояние от источника до наблюдателя вдоль силовой линии, v — скорость частицы, t — время, прошедшее с момента инжекции частиц в солнечную систему. Следовательно, анизотропия электронов даже малых энергий ($E \geq 100$ кэв) должна уменьшаться гораздо быстрее, чем для

протонов с $E_p \geq 10$ Мэв, что находится в согласии с экспериментом [112].

В одной из моделей [54] предполагается, что на некотором гелиоцентрическом расстоянии R_1 (R_1 сравнимо с астрономической единицей) характер рассеяния солнечных частиц межпланетным магнитным полем меняется так, что частицы, достигшие такого расстояния, обратно в область диффузии не возвращаются. Это граничное условие для фазы спада интенсивности приводит к экспоненциальной зависимости потоков частиц от времени для моментов времени $t \gg t_D$, где t_D — среднее время диффузии частиц от источника до границы.

В рамках рассматриваемых моделей можно получить величину и направление равновесной анизотропии, наблюдающейся на поздней стадии возрастания солнечных космических лучей для $T > 2$ дней.

Через некоторое время после начала возрастания солнечных космических лучей, когда солнечные частицы распространяются на несколько астрономических единиц, существование длительной анизотропии может быть вызвано следующими причинами: конвективным переносом солнечных протонов вдоль силовых линий магнитного поля \mathbf{B} , дрейфом частиц за счет движения магнитного поля относительно частиц, причем скорость дрейфа направлена перпендикулярно силовой линии магнитного поля, и постоянной инжекцией частиц Солнцем. Дрейф частиц дает очень заметный эффект, особенно для частиц малых энергий. Радиальная равновесная анизотропия, существующая спустя 1—4 суток после вспышки, возникает из-за дрейфа частиц вследствие конвекции вдоль линий поля \mathbf{B} . В это время движение частиц полностью определяется солнечным ветром. Следовательно, имеется ток частиц, перпендикулярный силовой линии, за счет дрейфового движения, а также ток частиц вдоль силовых линий, вызванный тем, что частица сталкивается с магнитными неоднородностями, движущимися вдоль силовых линий поля со скоростью $u \cos \theta$.

Суммарная равновесная анизотропия не зависит от направления вектора межпланетного поля. Для наблюдателя, находящегося в покое, анизотропия космических лучей будет направлена по радиусу, и величина ее $A_{\text{равн}} = (2 + \gamma)u/v$, где u — скорость солнечного ветра, v — скорость частиц, γ — показатель дифференциального спектра частиц.

На поздней стадии распада возрастания солнечных космических лучей для моментов

времени, отстающих больше чем на 4 суток от вспышки, равновесная анизотропия наблюдается в направлении $\sim 45^\circ$ к востоку от линии Солнце — космический аппарат. Эта анизотропия полностью определяется дрейфовым движением солнечных космических лучей, а составляющая анизотропии, параллельная силовым линиям магнитного поля, исчезает или вследствие отсутствия увлечения солнечных космических лучей неоднородностями в магнитном поле, или из-за компенсации этой анизотропии обратным током частиц, накопившихся в течение первых фаз возрастания на периферии солнечной системы. В последнем случае должен наблюдаться значительный положительный (т. е. поток частиц возрастает при удалении от Солнца) радиальный градиент солнечных космических лучей. При полной компенсации конвективной анизотропии остается только дрейфовая, величина которой $A = (2 + \gamma)(u/v) \sin \theta$, где θ — угол между направлением силовых линий магнитного поля и направлением на Солнце.

Природа возрастания солнечных космических лучей, связанных с приходом в точку наблюдения ударных волн, вызванных вспышками на Солнце, до настоящего времени окончательно не решена. Существующие гипотезы происхождения этих энергичных частиц описывают не все стороны наблюдаемого явления. Наиболее естественная «ловушечная» гипотеза предполагает, что солнечные частицы были ускорены во вспышке на Солнце и затем стали перемещаться в межпланетном пространстве вместе с ударной волной от этой же вспышки в некоторой адiabатической или диффузионной ловушке. Другая гипотеза предполагает, что в самой ударной волне существуют условия, обеспечивающие ускорение частиц до наблюдаемых энергий. Отсюда следовало бы, что наблюдаемые вместе с ударной волной солнечные космические лучи являются совсем не солнечными, а межпланетными. Третья гипотеза говорит, что частицы были созданы на Солнце, длительное время хранились около него и подпитывали определенную группу силовых трубок, которые ударной волной были передвинуты в точку наблюдения. Подробно на природе этого явления останавливаться не следует ввиду недостаточности данных, говорящих в пользу какой-либо из перечисленных выше гипотез.

На основании наших современных знаний о частицах солнечного происхождения, о магнитном поле Солнца и межпланетном магнитном поле можно построить феноменологиче-

скую картину распространения солнечных космических лучей. Генерированные во вспышке частицы диффундируют в солнечной короне часто далеко от места вспышки. Ударная волна, распространяющаяся в хромосфере и короне Солнца, облегчает это растекание частиц. Затем вдоль нейтральных линий частицы инжектируются в межпланетное пространство в довольно широком интервале углов, часто достигающем величины 90° , и распространяются вдоль силовых линий поля, образуя «конус распространения» и мало рассеиваясь на пути 1 а.е. Заселенность частицами силовых линий, выходящих из области вспышки или из области, куда продиффундировал максимум концентрации ускоренных частиц, много больше, чем соседних. Затем, когда частицы достаточно далеко (до 2–3 а.е.) уходят от Солнца, они начинают интенсивно рассеиваться, что приводит к изотропизации потока в «конусе распространения» и к заполнению всего околосолнечного пространства частицами, т. е. к размыванию конуса. Если инжекция длится много часов, то в пучке силовых линий, выходящих из области вспышки, повышенная интенсивность частиц и большая анизотропия держатся также длительное время. Однако спектр таких частиц будет становиться мягче, чем в первое время после вспышки, поскольку более энергичные частицы раньше погибают на границах диффузионного объема.

Если генерированная во вспышке ударная волна распространяется в межпланетном пространстве, то она сильно возмущает его и меняет распределение частиц (или служит источником отражения частиц, возможно изменяя их энергию). Поэтому при прохождении ударной волны мимо космического аппарата мы регистрируем изменение характеристик потока частиц. После прохождения ударной волны происходит постепенное возвращение межпланетной среды к спокойному состоянию. Так как ударная волна распространяется от Солнца со скоростью 500–800 км/сек, то спустя 4–5 суток после вспышки основным процессом распространения частиц будет вынос их солнечным ветром из солнечной системы.

Потоки солнечных протонов высоких энергий. Наибольшую радиационную опасность для человека и различных материалов, расположенных внутри космических аппаратов, представляют солнечные протоны высоких энергий, свободно проникающие через оболочку современных космических аппаратов. Энергия таких протонов условно может быть

Таблица 7. Наиболее мощные вспышки космических лучей

Дата вспышки	Потоки протонов с энергией $E_p > 100$ Мэв на 1 см^2 за всю вспышку
23.II 1956 г.	$3,5 \cdot 10^8$
10.V 1959 г.	$8,5 \cdot 10^7$
10.VII	$3,7 \cdot 10^8$
14.VII	
16.VII	
12.XI 1960 г.	
15.XI	$4 \cdot 10^8$
20.XI	
2.VIII 1972 г.	
4.VIII	$2,4 \cdot 10^9 *$
7.VIII	

* Оценка для протонов $E > 60$ Мэв.

принята равной 100 Мэв. В этом подразделе будет дана сводка возрастных солнечных космических лучей, во время которых наблюдались протоны с энергиями $E > 100$ Мэв.

За последние два цикла солнечной активности наблюдалось более ста вспышек солнечных космических лучей, в которых присутствовали протоны с энергией $E_p > 100$ Мэв. Наиболее мощные из них, а также интегральный поток частиц за вспышку представлены в табл. 7. Потоки частиц для этих вспышек взяты из работ [84, 100]. Величины потоков, приведенные в табл. 7, получены из весьма неравноценных данных. Точность их определения может быть представлена в пределах фактора 2. На рис. 34 построена зависимость от времени суммарного за год потока солнечных космических лучей. На том же рисунке приведена зависимость от времени сглаженного числа солнечных пятен.

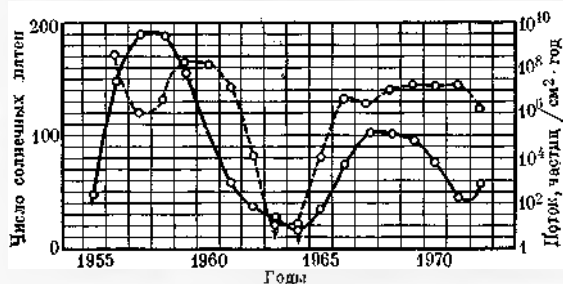


Рис. 34. Зависимость суммарного потока протонов от Солнца за год и числа солнечных пятен (сплошная) от времени (штриховая линия)

Метеорная материя

Метеорная материя в межпланетном пространстве — это множество тел, свободно движущихся в поле тяготения Солнца и, как правило, физически не связанных с планетами.

По своим размерам эти тела охватывают очень широкую область — от астероидов (десятки километров в поперечнике) до мельчайших пылевых частиц, размеры которых сравнимы с длиной волны солнечного света. Количество частиц в межпланетном пространстве быстро увеличивается с уменьшением их размеров.

Изучение малых тел солнечной системы представляет несомненный теоретический и практический интерес. Распределение малых тел на классы комет, астероидов, метеорных тел и космической пыли имеет, конечно, более глубокие физические основания, чем только различия в размерах тел, вызываемых ими явлениями или методами наблюдений, и отражает характерные черты их природы. Выяснение физического строения и химического состава малых тел солнечной системы, их происхождения и возраста, установление эволюционных связей комет и астероидов с метеорным веществом могут иметь большое значение для развития космогонии солнечной системы.

Изучение этих вопросов часто тесно переплетается с решением других задач физики космического пространства и ближайшего окружения Земли. Исследования взаимодействия метеорного вещества, в особенности комет с потоками излучений и корпускулярной радиации, являются эффективным средством получения информации о свойствах межпланетной среды, плазме солнечного ветра и магнитных полях в космическом пространстве. Всестороннее изучение метеоров дает важные сведения о строении верхней атмосферы и протекающих в ней физических процессах, о распространении радиоволн. Изучение воздействия метеорной бомбардировки поверхности Луны открывает возможности исследования, с одной стороны, истории Луны, а с другой — определения потока метеорного вещества и его эволюции в солнечной системе. Анализ свойств выпавших на Землю метеоритов позволяет судить об их природе, происхождении и возрасте, о воздействии на них космических лучей, а также о свойствах самих космических лучей.

Специальные задачи в изучении метеорных тел и космической пыли возникают в связи с

проблемой метеорной опасности для космических полетов. Потенциальная опасность, которую представляют собой твердые частицы для спутников, ракет и космических аппаратов, может быть в принципе двух видов. Столкновение с достаточно крупной частицей способно привести к серьезным разрушениям космического аппарата и при единичном случае.

С другой стороны, непрерывная бомбардировка мельчайшими частицами вызывает эрозию поверхностей и может приводить, например, к нарушению работы оптических приборов или к изменению оптических свойств поверхностей систем теплообмена и терморегулирования. Выяснение степени метеорной опасности необходимо для конструирования космических аппаратов и разработки в случае необходимости мер защиты.

Результаты исследований и накопленный опыт показывают, что метеорная опасность при полетах в районе орбиты Земли невелика, но экстраполяция имеющихся данных на значительный диапазон гелиоцентрических расстояний неправомерна и, несомненно, потребуются экспериментальные данные о метеорной обстановке в случае дальних межпланетных полетов за пределами орбиты Марса и Венеры.

Многообразная информация о наличии и свойствах метеорных тел солнечной системы поступает по нескольким основным каналам: при изучении метеоров, метеоритов, зодиакального света, оптических явлений в верхней атмосфере, стратосферной пыли, а также метеорной пыли, выпавшей на поверхность Земли. Основная часть сведений о метеорной компоненте межпланетной среды была получена при помощи наземных методов исследований.

На протяжении последних двух десятилетий в результате развития ракетной и космической техники стали возможны прямые исследования микрометеорных частиц в верхней атмосфере Земли и в космическом пространстве при помощи специальной аппаратуры, использующей различные принципы регистрации. Эти исследования, в отличие от наземных наблюдений, позволили получать информацию об индивидуальных частицах с массами вплоть до 10^{-14} г, об их пространственной плотности, физических свойствах и химическом составе.

Следует отметить, что в ряде случаев изученные явления, связанные с твердыми межпланетными частицами, находят практическое применение. Так, наблюдение за метеорными

следами используется для определения направления и скоростей ветров в верхней атмосфере, а понизация, создаваемая метеорами, — для нескольких видов метеорной радиосвязи.

По своему составу метеорные тела, обращающиеся вокруг Солнца на расстоянии порядка 1 а.е., бывают каменные и железные. Последние состоят в основном из железа, никеля и сернистого железа. Химический состав каменных метеоритов напоминает состав земных горных пород. Плотность каменных метеоритов ~ 3 г/см³, железных $\sim 7,8$ г/см³. Метеорные тела могут образовывать конгломераты, при этом их средняя плотность будет очень мала: $\sim 0,5$ г/см³.

Скорость метеорных частиц относительно Земли составляет от 12 до 72 км/сек.

Заметная доля этих тел объединена в рои, иногда растянутые вдоль своей орбиты, иногда концентрирующиеся на небольшом ее участке. Метеорные тела, которые не удается причислить к какому-либо метеорному потоку, называют метеорами фона или спорадическими (они могут принадлежать в том числе к слабым невыявленным метеорным потокам).

Исследования метеорного вещества с помощью космических аппаратов производились вдоль траекторий полета космических ракет к Венере, Марсу и за орбиту Марса — в пояс астероидов [94].

Ряд измерений микрометеорной материи, проведенных акустическими методами, давал вблизи Земли повышенный на несколько порядков (по сравнению с межпланетным) поток микрометеорных частиц с массами, меньшими 10^{-6} г. Эти результаты дали повод сформулировать гипотезу о существовании вокруг Земли пылевого пояса, или пылевой оболочки. В качестве источника этих частиц рассматривались два: межпланетные пылевые частицы, захваченные гравитационным полем Земли, и пылевые частицы, отрывающиеся от Луны.

Однако тщательные исследования указанных механизмов [63, 64, 70, 124] показали, что эти явления не могут обеспечить наблюдаемую концентрацию пылевых частиц. Тогда же были высказаны сомнения в экспериментальной надежности полученных результатов, и многие ученые в настоящее время придерживаются мнения, что потоки пылевых частиц в околоземном и межпланетном пространствах одинаковы. Однако выполненные в последние годы исследования с помощью датчиков различного типа показывают, что

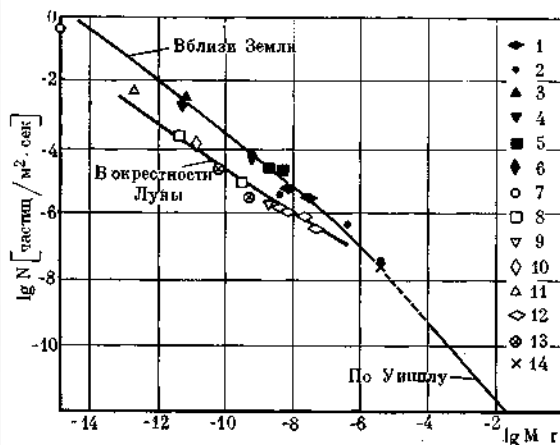


Рис. 35. Результаты измерений метеорных тел

Вблизи Земли:

- 1 — «Эксплорер-16»,
- 2 — «Пегас»,
- 3 — «Космос-470»,
- 4 — «Космос-502»,
- 5 — «Салют»,
- 6 — «Интеркосмос-6»,
- 7 — «Просперо»;

вблизи Луны:

- 8 — «Лунар Эксплорер»,
- 9 — «Лунар Орбитер»,
- 10 — «Пионер-8»,
- 11 — ОГО-3,
- 12 — «Сервейор-3»,
- 13 — «Луна-19»,
- 14 — радиолокация (СССР)

около Земли пространственная плотность частиц с массой 10^{-7} г повышена примерно на порядок величины по сравнению с плотностью их в окрестности Луны и в межпланетном пространстве (рис. 35). Наличие у Земли пылевого пояса такой концентрации не вызывает затруднений в объяснении. Тем не менее для окончательного суждения по этому вопросу необходимо продолжить накопление экспериментальных данных.

Как видно из рис. 35, параметр S , характеризующий степенной закон распространения метеорных тел по массе, для диапазона масс $m=10^{-12} \div 10^{-7}$ г вблизи Луны и в межпланетном пространстве составляет $\sim 0,6$ по сравнению с $S \sim 0,8$ у Земли, т. е. дефицит количества частиц с уменьшением их массы в окрестности Луны и в межпланетном пространстве имеет место в большей степени, чем у Земли.

Предварительные результаты измерений на космическом аппарате «Пионер-10» показали, что в поясе астероидов поток частиц резко увеличивается, причем основная масса частиц в этой области имеет размер 0,01—1 мм. Несмотря на то что количество попаданий частиц в космический аппарат «Пионер-10» оказалось больше, чем ожидалось до запуска, делится вывод, что опасность серьезного повреждения аппарата невелика [30].

Микрометеорное вещество у поверхности Луны. У Луны отсутствует атмосфера, поэтому метеорные тела сталкиваются с ее поверхностью с высокими скоростями. При ударе о поверхность происходит взрыв, причем масса частиц выброшенного лунного грунта во много раз превышает массу падающей частицы.

Модельные эксперименты, проведенные в США, показали, что большая часть частиц, выброшенных при взрыве, имеет массу $\sim 10^{-11}$ г. Около 99% этих частиц разлетаются по баллистическим траекториям со скоростью 1 км/сек, и лишь 1% их приобретает скорость больше 2,4 км/сек и покидает Луну.

Вторичные частицы и вторичные удары не должны сильно увеличивать опасность пробоя материалов на поверхности Луны в основном из-за их малых скоростей, однако эрозионное действие многократных ударов даже при низких скоростях ударяющихся частиц

может представлять проблему при эксплуатации отдельных элементов конструкции.

При попадании на Луну крупных метеоритов (события, достаточно редкие) во время взрыва с поверхности выбрасывается большое количество породы различной величины. Эксперименты на ИСЗ «Пегас», «Эксплорер-16» и «Эксплорер-23», выполненные с помощью датчиков «пробойного» типа, регистрирующих частоту пробоев оболочки в зависимости от ее толщины с учетом специфики разрушения оболочек при угловом падении частиц на преграду (вследствие принятой изотропной модели падающего пучка), весьма ценны для изучения вопроса о метеорной опасности. Эти данные представлены на рис. 36 вместе с расчетными данными Уиппла. В области толщин в доли миллиметра экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными.

Из этого рисунка видно, что при полетах средней продолжительности в районе Земли и Луны метеорной опасностью можно пренебречь. При длительных полетах (около года и более) в малопозученных областях солнечной системы метеорную опасность нельзя оставлять без внимания.

Особо интересна регистрация микрометеоров в метеорных потоках, представляющих собой своеобразное явление в солнечной системе. Общепринята точка зрения на существование генетической связи между метеорными потоками и кометами, процессы разрушения которых являются причиной образования потоков и источником постоянного их пополнения метеорными телами. Многие авторы [68, 90, 145] выдвигают и активно разрабатывают гипотезу, предполагающую, что все метеоры, в том числе и спорадические, имеют кометное происхождение и именно распад комет и рассеивание метеорных потоков поддерживают квазистационарное состояние зодиакального облака космической пыли. Метеорные потоки, как и спорадические метеоры, интенсивно изучаются путем визуальных, фотографических и радионаблюдений с Земли. Вполне понятен поэтому интерес к изучению принадлежащих метеорным потокам микрометеоритов, связанный с техническими возможностями проведения прямых наблюдений в космическом пространстве при помощи спутников и ракет.

Однако экстраполяция данных наземных оптических и радионаблюдений спорадических метеоров и метеорных потоков приводит к заключению, что вероятность регистрации в метеорных потоках малых частиц с массой 10^{-8} — 10^{-11} г мала [63, 64, 90]. Это происхо-

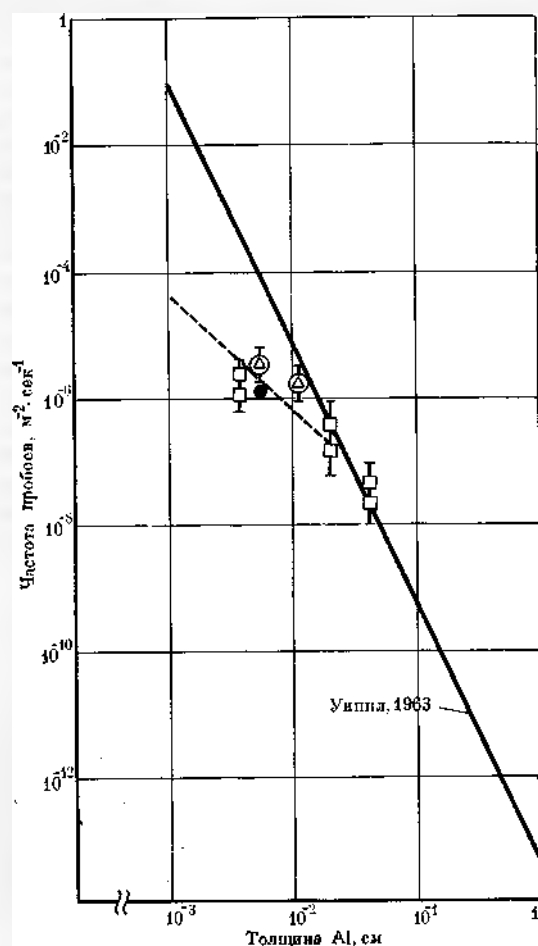


Рис. 36. Частоты пробоев преград в окрестности орбиты Земли

дит, прежде всего, потому, что распределения по массам спорадических метеоров и частиц метеорных потоков существенно различаются, и вклад метеорных потоков в общую скорость счета микрометеоров с массами менее 10^{-6} г должен быть незначителен. Весьма важно, что с уменьшением размеров частиц возрастает роль негравитационных сил, воздействующих на такие частицы и существенно ограничивающих их время жизни в солнечной системе. С этой точки зрения характерно уменьшение крутизны интегрального распределения спорадических микрометеоритов с массой 10^{-7} — 10^{-11} г до величины 0,6 по сравнению со средней величиной $S=1,2$ для метеоров, наблюдаемых в оптическом и радиодиапазоне. Воздействие таких сил на частицы потоков может приводить к селективному удалению с орбиты потока частиц малых размеров. В этом случае регистрация малых частиц в потоках еще более усложняется.

В заключение отметим, что на основании экспериментов по исследованию микрометеорной материи получается средняя плотность метеорного вещества в солнечной системе $\sim 2 \cdot 10^{-22}$ г/см³, а средняя скорость аккреции межпланетного вещества Землей 40 т/сутки.

МАГНИТОСФЕРА ЗЕМЛИ

Структура магнитосферы Земли

Физические условия вблизи Земли сильно отличаются от условий в межпланетном пространстве из-за наличия магнитного поля Земли. На рис. 37 приведена структура магнитосферы Земли, обтекаемой солнечным ветром. Верхний рисунок для весенне-осеннего периода (магнитная ось Земли перпендикулярна направлению на Солнце) заимствован из работы [107], нижний для июня (большой наклон магнитной оси к линии Земля — Солнце) — из работы [121]. На рисунках можно различать стационарное магнитное поле Земли, описанное в данном разделе, и области, подверженные возмущениям, относящиеся к разделу солнечно-земных связей.

Стационарное магнитное поле Земли. Магнитное поле Земли в первом приближении описывается полем диполя с магнитным моментом $M=8,07 \cdot 10^{25}$ гс·см³, расположенным в центре Земли. Ось такого диполя пересекает поверхность Земли в двух противоположных точках с координатами $78^\circ,3$ с.ш., $69^\circ,0$ в.д. и $78^\circ,3$ ю.ш., $111^\circ,0$ в.д. Во втором приближении магнитный диполь сдвинут от центра Земли на расстояние 436 км в направ-

лении к точке с координатами $15^\circ,6$ с.ш., $150^\circ,0$ в.д. Более строгую аппроксимацию геомагнитного поля можно получить, используя разложение по сферическим гармоникам.

Рассмотрим некоторые свойства поля диполя, которые нам понадобятся в дальнейшем.

Магнитная силовая линия дается уравнением

$$r = R_0 \cos^2 \Phi,$$

где R_0 — расстояние от центра диполя до силовой линии в экваториальной плоскости ($\Phi=0$), Φ — геомагнитная широта, r — расстояние от центра диполя. Для удобства в качестве единицы расстояния используют величину радиуса Земли $R_0=6,37 \cdot 10^8$ см. Тогда $L=R_0/R_0$, $R=r/R_0$ и уравнение силовой линии переписывается как

$$R = L \cos^2 \Phi.$$

Напряженность поля в плоскости экватора B_0 подсчитывается при помощи формулы

$$B_0 = 0,312/L^3 \text{ [гс]}.$$

Напряженность поля в любой точке силовой линии можно определить из выражения

$$\frac{B}{B_0} = \frac{\sqrt{4-3\cos^2\Phi}}{\cos^6\Phi} = \frac{\sqrt{4-3R/L}}{(R/L)^3}.$$

Угол γ между силовой линией и радиус-вектором определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \Phi.$$

«Наклонение» поля $I=\pi/2-\gamma$.

На больших расстояниях структура геомагнитного поля резко отличается от дипольной из-за взаимодействия магнитного поля Земли с солнечным ветром (рис. 37).

Движение частиц в геомагнитном поле. Движение частиц с $E < 1$ Мэв можно представить как суперпозицию трех независимых движений [34]: ларморовского вращения частицы в плоскости, перпендикулярной магнитному полю; колебания мгновенного центра вращения (ведущего центра) вдоль силовых линий; дрейфа ведущего центра вокруг Земли.

Ларморовское вращение совершается с периодом

$$\tau_1 \approx \frac{7 \cdot 10^{-7}}{B} (E_0 + E_k) \text{ [сек]},$$

где E_k — кинетическая энергия частицы в Мэв, E_0 — энергия покоя частицы в Мэв: для электрона $E_0=0,51$ Мэв, для протона $E_0=938$ Мэв.

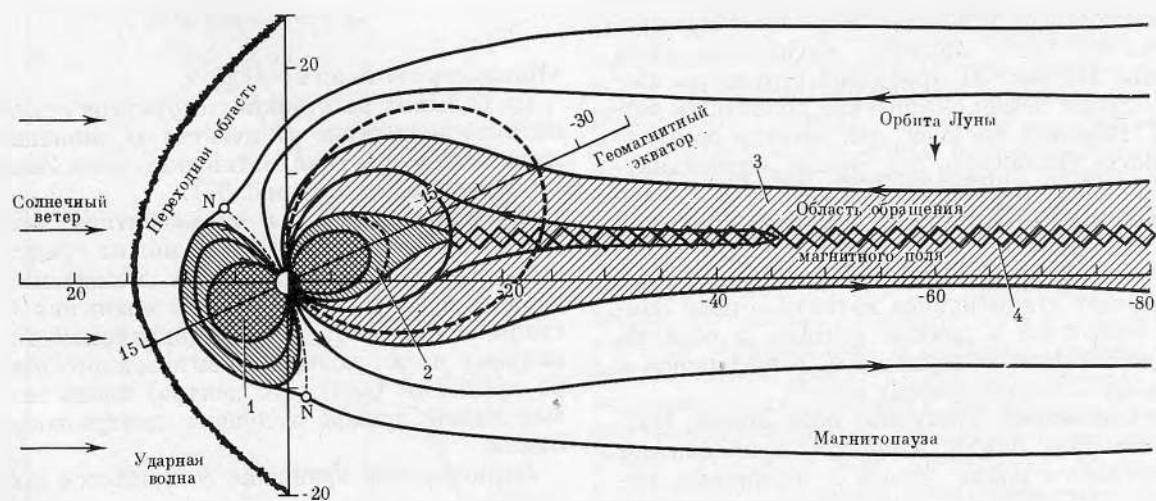
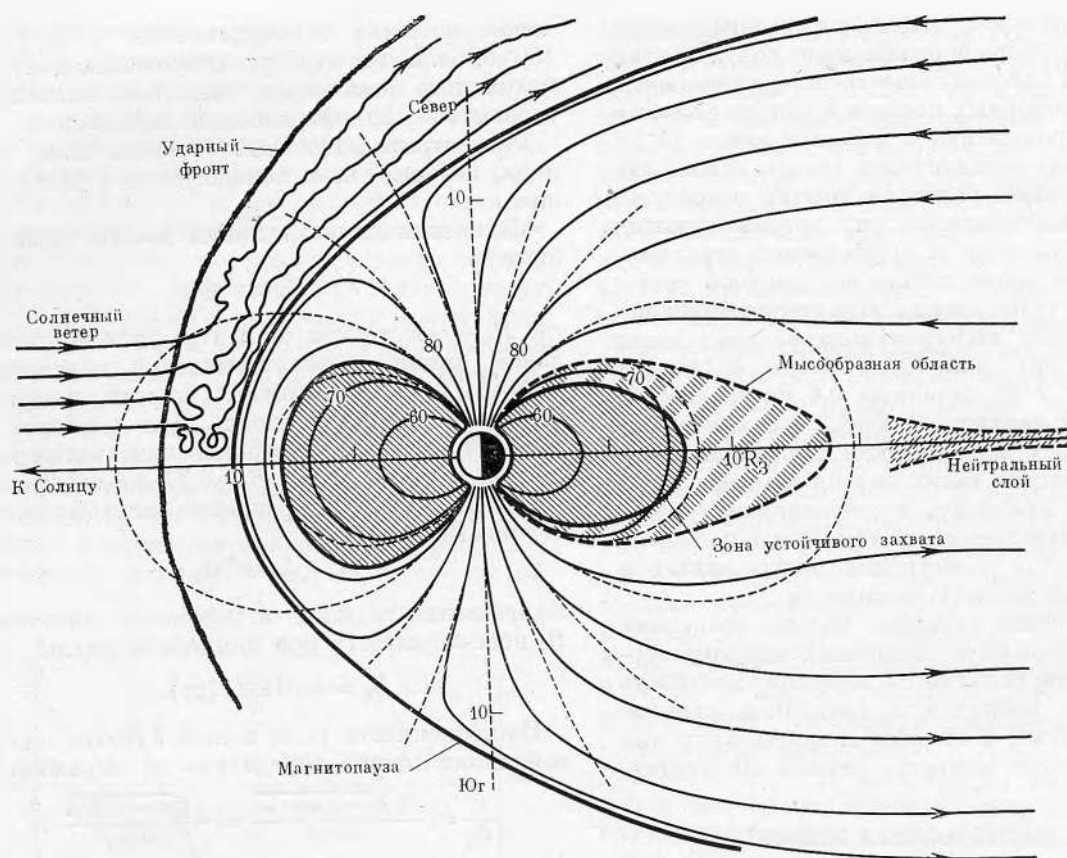


Рис. 37. Структура магнитосферы

- 1 — радиационные пояса;
- 2 — область квазизахвата;
- 3 — плазменный слой;
- 4 — нейтральный слой

Ларморовская частота $1/\tau$ электронов вблизи Земли ~ 1 МГц, протонов ~ 1 кГц, при удалении от Земли частота уменьшается как $1/R^3$. Ларморовский радиус вращения частицы можно определить из соотношения

$$\rho = \frac{33 \sin \alpha}{B} E_0 \sqrt{\varepsilon^2 + 2\varepsilon} \text{ [м]}$$

или

$$\rho c = 300 B \rho,$$

где α — угол между вектором скорости частицы и направлением силовой линии магнитного поля (питч-угол), $\varepsilon = E_{\parallel}/E_0$, ρ — импульс частицы в эв/с.

Ларморовский радиус электронов в геомагнитном поле не превосходит нескольких километров, в то время как для протонов его величина может достигать нескольких сотен километров.

В процессе движения частицы вдоль силовой линии выполняется соотношение

$$\sin^2 \alpha / B = \text{const.}$$

Отсюда можно определить напряженность в точке отражения:

$$B_{\text{отр}} = B_0 / \sin^2 \alpha_0.$$

Период колебания частицы между точками отражения дается формулой

$$\tau_2 = 8,5 \cdot 10^{-2} L \frac{1 + \varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2 + 2\varepsilon}} T(\alpha) \text{ [сек]},$$

где $T(\alpha) = 1,3 - 0,563 \sin \alpha_0$.

Дрейф вокруг Земли по долготе для частиц с разными знаками заряда происходит в противоположных направлениях (электроны движутся на восток, протоны — на запад).

Период дрейфа вокруг Земли τ_3 определяется следующим выражением:

$$\tau_3 = 88 \frac{1 + \varepsilon}{2 + \varepsilon} \frac{K}{LE_K} \text{ [мин]},$$

где $K = 1,25 - 0,25 \cos^2 \alpha_0$.

Для нерелятивистских частиц $\tau_3 = 44 / LE_K$ [мин].

Всем трем типам рассмотренных движений соответствуют некоторые величины, которые сохраняются приблизительно постоянными в течение всего времени движения частицы, если изменение магнитного поля за время, характерное для данного типа движения (τ_1 , τ_2 , τ_3), мало по сравнению с величиной магнитного поля:

$$B/(\partial B/\partial t) \gg \{\tau_1, \tau_2, \tau_3\}, \quad \rho \frac{\text{grad } B}{B} \ll 1.$$

Эти величины называются адиабатическими инвариантами движения в магнитном поле.

Первым адиабатическим инвариантом является магнитный момент частицы

$$\mu = P_{\perp}^2 / 2\gamma m B \quad (\mu = E_{K\perp} / B \text{ при } v \ll c),$$

где

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - (v/c)^2},$$

P_{\perp} и $E_{K\perp}$ — составляющие импульса и кинетической энергии частицы, перпендикулярные магнитному полю.

Второй, или продольный, инвариант (инвариант продольного действия) определяется как

$$j = \oint m v_{\parallel} dS = P \oint \sqrt{1 - B/B_{\text{отр}}} dS.$$

Используя эти два инварианта, а также то, что $E_K = \text{const}$ в постоянном магнитном поле, можно показать, что частицы, находящиеся на одной силовой линии, но обладающие разными питч-углами, при дрейфе вокруг Земли описывают практически одну и ту же оболочку, как и в дипольном поле. Поэтому захваченную радиацию можно характеризовать только функцией двух координат L и B [99]. Вычисление L , B -координат представляет собой довольно громоздкую задачу, решаемую на ЭВМ.

Иногда, если точки отражения захваченных частиц находятся на малых высотах над поверхностью Земли, для учета влияния атмосферы на захваченные частицы вводят параметр h_{min} , представляющий минимальную высоту от поверхности Земли, на которую частица опускается на данной дрейфовой оболочке L .

Третий инвариант Φ определяется как магнитный поток через поверхность, пересекающую оболочку дрейфа частицы вокруг Земли и ограниченную траекторией точки отражения частицы. Каждой L -оболочке соответствует своя величина инварианта Φ . В случае $B/(\partial B/\partial t) \sim \tau_3$ третий инвариант сохраняться не будет, но так как при этом $B/(\partial B/\partial t) \gg \tau_1$; τ_2 , то первые два инварианта μ и j сохраняются. Магнитное поле на данной L -оболочке будет меняться, при этом $E_K/B = \text{const}$ вследствие сохранения μ и частица может перейти на другую L -оболочку с соответствующим изменением E_K . Если $B/(\partial B/\partial t) \approx \tau_1$; τ_2 , то изменяется эквивалентный питч-угол частицы, возможно изменение E_K , при этом нарушается инвариантность μ или j . В конце концов частица высыпается в ионосферу.

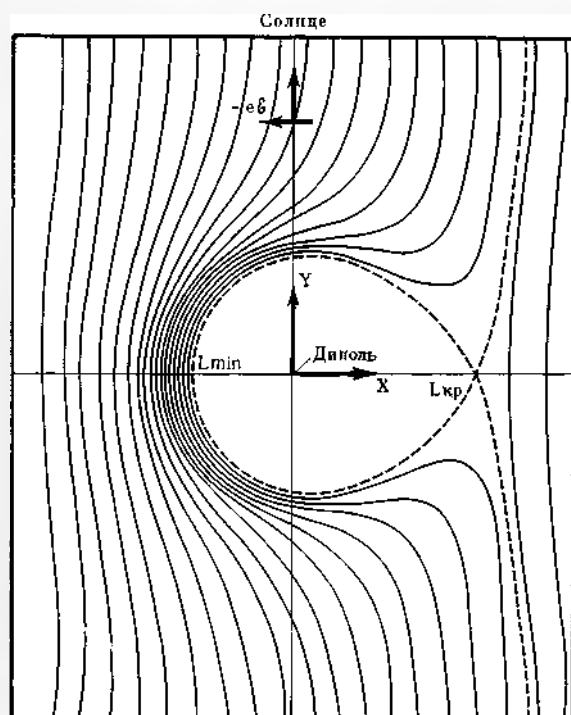


Рис. 38. Дрейф электронов в экваториальной плоскости поля магнитного диполя, на которое накладывается однородное магнитное поле, в присутствии однородного электрического поля, параллельного экваториальной плоскости

Сплошными линиями показаны типичные траектории центра вращения

Движение частиц в магнитном поле Земли рассматривается также в работах [25, 121, 137].

Движение частицы при наличии электрического поля. Для объяснения многих явлений в магнитосфере Земли необходимо допустить существование электрического поля, перпендикулярного магнитному в плоскости экватора. При этом на вращение ведущего центра вокруг Земли накладывается дрейф в направлении, перпендикулярном электрическому и магнитному полям со скоростью

$$v_E = 10^8 \mathcal{E} / B,$$

где \mathcal{E} — напряженность электрического поля, в/см.

Траекторию движения ведущего центра в плоскости экватора ($\alpha_0 = 90^\circ$) можно вычислить, исходя из законов сохранения энергии и магнитного момента:

$$E_k + V = \text{const}, \quad \mu = \text{const},$$

где V — электрический потенциал данной точки пространства.

Вид траекторий для однородного электрического поля, заимствованный из [34], показан на рис. 38. Видно, что траектории, проходящие на больших расстояниях от Земли, разомкнуты. Частицы, находящиеся на замкнутых орбитах, принадлежат радиационным поясам. Критическая траектория, разделяющая два типа (разомкнутые и замкнутые), дана штриховой линией.

Точку ветвления $L_{кр}$ на критической орбите можно найти, приняв равными скорости электрического дрейфа v_E и магнитного дрейфа вокруг Земли $v_m = 2\pi R_0 L / \tau_s$. Для нерелятивистских частиц получаем

$$L_{кр} = 4,75 \cdot 10^{-3} \frac{E_k}{\mathcal{E}}.$$

Из этой формулы можно определить, частицы каких энергий на данном расстоянии принадлежат радиационным поясам. С противоположной стороны частицы проходят на минимальном расстоянии от Земли $L_{min} = L_{кр} / 1,78$.

Теоретические модели магнитного поля Земли. L, B -координаты не пригодны для анализа захваченной радиации на $L > 6$, где сказывается влияние солнечного ветра на магнитосферу Земли. Воздействие ветра приводит к тому, что траектория движения захваченных частиц начинает зависеть от местного времени. Для изучения движения частиц приходится использовать более сложные модели геомагнитного поля.

Цель построения теоретических моделей магнитосферы — аналитическое или численное описание области, где источником магнитного поля является земной магнитный диполь. Такие модели необходимы для качественного описания различных процессов, протекающих в этом поле. К основным процессам относятся динамические процессы в радиационных поясах Земли, полярные сияния, магнитосферные возмущения, явления в высокоширотных сопряженных точках и распространение малоэнергичных космических лучей.

В настоящее время теоретически наиболее развиты две модели магнитосферы и построена одна эмпирическая модель.

Модель Вильямса — Миды [147]. Эта модель основана на учете токов на границе магнитосферы при помощи сферических гармоник, так же как и внутренних источников поля. Пластина с однородным током в плоскости геомагнитного экватора с ночной стороны Земли имитирует нейтральный слой хвоста магнитосферы. Для этой модели характерны четыре параметра: R_s — расстояние от центра Земли до подсолнечной точки гра-

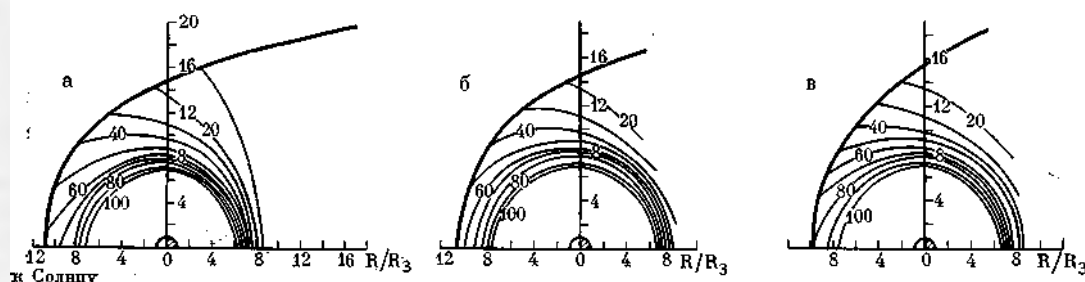


Рис. 39. Контуры равной напряженности геомагнитного поля в экваториальной плоскости

а — эмпирическая модель [71];
б — модель Вильямса — Мида [147];
в — двухдипольная модель [1]

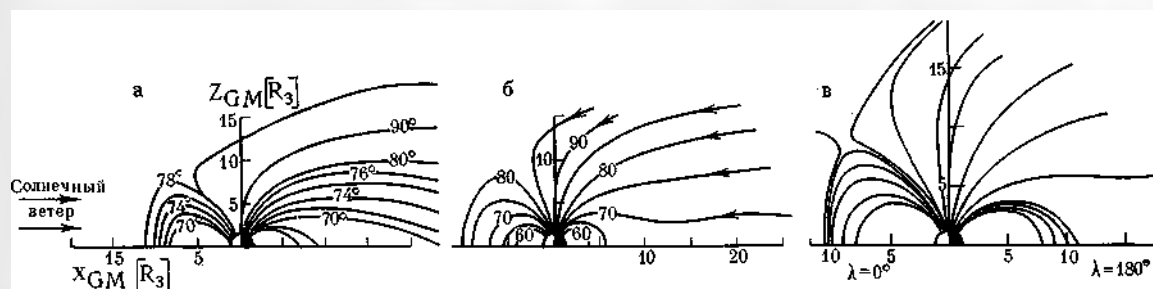


Рис. 40. Магнитное поле Земли, возмущенное солнечным ветром в меридиональном сечении день — ночь

а — эмпирическая модель [71];
б — модель Вильямса — Мида [147];
в — двухдипольная модель [1]

ницы магнитосферы, R_h и R_l — расстояния до ближайшего и дальнего от Земли краев пластины с током, B_r — поле пластины с током. Обычно $R_s = 10 R_0$, $R_h = 10 R_0$, $R_l = 200 R_0$, $B_l = 15 \gamma$.

Двухдипольная модель [1]. Модель основана на возможности имитации возмущающего действия солнечного ветра (при определенных предположениях) вспомогательным диполем. Поле нейтрального слоя имитируется полем пластины с током. Характерными для этой модели являются: α — расстояние от земного до возмущающего диполя; β — величина, показывающая, во сколько раз возмущающий диполь больше земного: $M_{в.д.} = \beta M_s$; R_h и R_l — расстояния до ближайшей к Земле и дальней границ пластин с током; B_r — поле пластины с током. Для обычных условий, когда $R_s = 10 R_0$, $\alpha = 33 \div 40 R_0$, $\beta = 12,7 \div 27$, то $R_h = 11 R_0$, $R_l = 51 R_0$, $B_r = 16 \gamma$.

Эмпирическая модель магнитосферы. В последнее время было получено такое количество данных о магнитном поле на расстояниях $> 5 R_0$, что оказалось возможным по-

строить эмпирическую модель магнитосферы [71].

Расчет различных теоретических моделей в основном производился с целью выяснить положение некоторых характерных точек магнитосферы и топологию движения заряженных частиц в магнитосфере. В реальном поле и в моделях в экваториальной плоскости магнитное поле больше с дневной стороны, чем с ночной (рис. 39). Но, как видно из рисунка, величина поля вблизи границы различна для всех моделей, несмотря на приблизительно одинаковое положение границы магнитосферы. Формы магнитных силовых линий вблизи границы магнитосферы для различных моделей также заметно отличаются.

На рис. 40 показано меридиональное сечение магнитосферы для всех трех моделей в направлении день — ночь. Хорошо видно качественное подобие всех моделей. Видно, что приближение бесконечно тонкой пластины с током слишком грубо для описания поля вблизи нейтрального слоя, а также заметно различное положение нейтральных точек на границе магнитосферы с дневной стороны Земли и их проекции по силовым линиям на Землю.

Рисунки показывают хорошее совпадение конфигураций силовых линий для различных моделей, хотя количественное расхождение имеет место.

Оболочки магнитного дрейфа. Рассмотрение движения захваченных заряженных частиц вокруг Земли приводит к заключению, что на $R \leq 5 R_0$ влиянием внешних источников поля (токи на границе и в хвосте магнитосферы) можно пренебречь и использовать описанные выше L, B -координаты. В этом случае частицы, находящиеся на одной силовой линии и имеющие разныеpitch-углы, дрейфуют вокруг Земли практически по одной и той же дрейфовой оболочке. На больших расстояниях от Земли наблюдаются расщепления дрейфовых оболочек.

На рис. 41 представлено распределение частиц различной энергии в магнитосфере Земли [120]. Хорошо различимы четыре области.

Область полярной шапки (область I). Силовые линии, выходящие с дневной стороны из Земли на широтах $>78^\circ$ и с ночной на широтах $>73^\circ$, уходят в межпланетное пространство или замыкаются далеко от Земли. Здесь имеется в основном плазма ионосферного происхождения с температурой $T \sim (3 \div 5) \cdot 10^4$ °K, которая вдоль магнитных силовых линий уходит на большие высоты и, по-видимому, может выбрасываться в межпланетное пространство.

Область плазменного слоя с ночной стороны и нейтральных точек с дневной стороны Земли (область II). С дневной стороны эта область находится на широтах $\Phi \sim 76 \div 80^\circ$, на которые вдоль магнитных силовых линий проектируется нейтральная точка (широты полярного овала с дневной стороны Земли). С ночной стороны вдоль магнитных силовых линий она проектируется на широты $\sim 68 \div 73^\circ$ (широты полярного овала с ночной стороны Земли). Источником плазмы этой области является солнечный ветер, проникаю-

щий в магнитосферу Земли. Средняя энергия частиц области II колеблется от нескольких сотен эв до нескольких кэв.

Область плазмосферы (область III). Эта область находится в центре магнитосферы Земли, простираясь от ионосферы до $4-5 R_0$, со стороны высоких широт плазмосфера ограничена $\sim 60-65^\circ$. Эта область характеризуется повышенной концентрацией электронов и ионов ионосферного происхождения. Вблизи ионосферы концентрация ионов $N_i \sim 10^5$ см $^{-3}$ и на расстоянии $4 R_0$ уменьшается до $\sim 10^3$ см $^{-3}$. Энергия частиц порядка нескольких электронвольт.

Область радиационных поясов Земли (область IV) — область магнитосферы, населенная частицами с энергией от нескольких десятков кэв до сотен Мэв. Характерной особенностью частиц этих энергий является быстрый магнитный дрейф их вокруг Земли за время, много меньшее периода вращения Земли вокруг своей оси.

Если область I связана с разомкнутыми силовыми линиями геомагнитного поля, то области II и III, по-видимому, формируются под действием слабого электрического поля величиной $(2 \div 4) \cdot 10^{-6}$ в/см в плоскости экватора, направленного с утра на вечер. Источником ионов области III находится внутри магнитосферы (ионосфера Земли), источник ионов области II — вне магнитосферы (солнечный ветер). Для частиц области IV можно пренебречь влиянием электрического поля на их дрейфовые траектории. Граница этой области находится на расстоянии, где под влиянием электрического поля частицы выносятся за пределы магнитосферы. С точки зрения динамики магнитосферы и воздействия на космические объекты наиболее важны характеристики частиц в областях II и IV.

Наиболее подробные измерения плазмы в хвосте магнитосферы были проведены на спутниках «Вела» и ОГО. Сведения о прямых измерениях плазмы вблизи нейтральной точки пока не публиковались, но имеются данные о частицах малых энергий, полученные вблизи Земли на силовых линиях, уходящих в область нейтральных точек. На основе этих измерений на рис. 41 представлено расположение области II в магнитосфере Земли.

С ночной стороны Земли нейтральный слой хвоста магнитосферы окружен плазменным слоем толщиной $\sim 4 R_0$ вблизи полуночного меридиана, ближе к утренней и вечерней сторонам толщина слоя увеличивается до $\sim 6 R_0$. Потoki электронов могут достигать

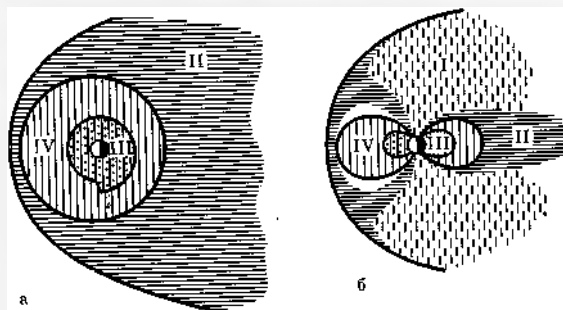


Рис. 41. Распределение заряженных частиц в магнитосфере Земли

а — экваториальное сечение;
б — меридиональное сечение

величины 10^9 электрон/см²·сек. Средняя энергия электронов колеблется от ~ 10 эв до ~ 5 кэв.

При магнитных возмущениях толщина плазменного слоя вначале уменьшается до $\sim 1 R_0$, а затем к окончанию геомагнитного возмущения (в это время развиваются магнитные возмущения на $\Phi \sim 75^\circ$) увеличивается до $\geq 6 R_0$. В это время появляются в плазменном слое электроны с энергией ~ 40 кэв и более.

На утреннюю, вечернюю и дневную стороны частицы плазменного слоя могут попасть, дрейфуя в скрещенных электрическом и магнитном полях. С дневной стороны частицы солнечного ветра могут проникать в магнитосферу Земли через нейтральные точки. Хотя вблизи нейтральных точек потоки частиц пока не измерялись, на высотах от нескольких сотен до нескольких тысяч километров и на широтах $\Phi \sim 75-83^\circ$ регистрировались потоки электронов с $E_e > 100$ эв, достигающие значений $N(E > 100 \text{ эв}) \sim 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$ при спектре $N(>E) \sim E^{-1}$. Так как потоки изотропны, то можно предположить, что они имеют ту же величину и в области нейтральных точек. Плотность энергии этих электронов соответствует плотности энергии магнитного поля величины 5γ .

В области II также временами наблюдаются потоки электронов с $E_e \geq 100$ кэв. Если электроны такой энергии, наблюдаемые с утренней и дневной сторон, могут быть ускорены в хвосте магнитосферы, происхождение электронов в плазменном слое неясно. Можно отметить, что наблюдение электронов таких энергий ближе к утренней стороне более вероятно, чем к вечерней.

Спектр электронов зоны полярных сияний с ночной стороны часто подобен спектру электронов плазменного слоя, что говорит о тождественности этих областей. Полярные сияния тесно связаны с ионосферными и геомагнитными возмущениями, вызываемыми различными проявлениями солнечной активности, и будут рассмотрены в разделе солнечно-земных связей.

Радиационные пояса Земли

Область радиационных поясов Земли показана на рис. 37 и 41 (область IV). Так как высокоэнергичные частицы могут регистрироваться вне этой области, что связано с различными физическими причинами, то картина расположения электронов с энергией в несколько десятков кэв отличается от расположения области поясов. На рис. 42 схематиче-

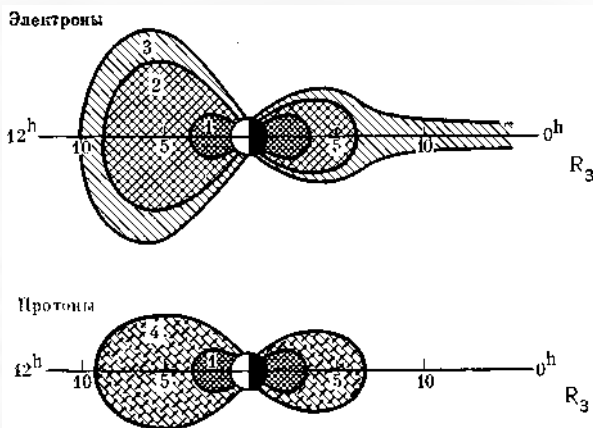


Рис. 42. Структура радиационных поясов

- 1 — внутренний радиационный пояс, $E_p > 30$ Мэв;
- 2 — внешний радиационный пояс, $E_e > 150$ кэв;
- 3 — зона неустойчивой радиации, $E_e > 40$ кэв;
- 4 — пояс протонов малых энергий, $E_p > 100$ кэв

чески представлены области регистрации высокоэнергичных частиц в магнитосфере Земли. Область распределения электронов с энергией > 40 кэв, отмеченная косой штриховкой, не принадлежит к радиационному поясу, так как дрейфовые орбиты в этой области для частиц разомкнуты. Поэтому частицы высоких энергий на больших расстояниях от Земли не являются частицами собственно радиационных поясов. Они выбрасываются из магнитосферы за время менее периода дрейфа вокруг Земли.

В литературе рассматривают две области радиационных поясов: внутренний и внешний [25, 85, 137]. Хотя такое разделение вначале было вызвано несовершенством детекторов, применявшихся для изучения радиационных поясов, впоследствии выяснилось, что для некоторых групп частиц это разделение имеет физический смысл. Подробнее об этом будет сказано ниже.

Протоны радиационных поясов Земли. На рис. 43 приводится распределение протонов различных энергий [146]. На $L \geq 6$ распределение частиц становится функцией местного времени. Из рис. 43 видно, что с увеличением энергии максимум интенсивности перемещается на меньшие L . Спектр протонов при этом становится более жестким. Меридиональное сечение пояса протонов с энергиями $E > 1,0$ и $E > 30$ Мэв представлено на рис. 44.

Важной характеристикой радиационных поясов является не только распределение в плоскости экватора, но также распреде-

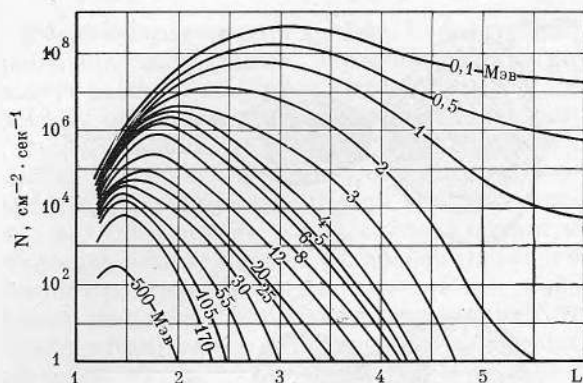


Рис. 43. Радиальные профили средней по времени глобальной интенсивности протонов с энергией выше заданной величины в плоскости геомагнитного экватора

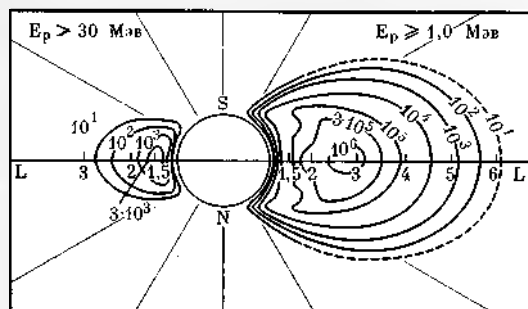


Рис. 44. Меридиональное сечение пояса протонов с энергией $E_p > 1,0$ и $E_p > 30$ МэВ

Указаны величины N в $\text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$

ление частиц вдоль силовой линии, которое обычно аппроксимируется функцией $N(B)_{L=\text{const}} \sim B^n$.

Анализ данных показывает, что для протонов малых энергий ($E_p < 30$ МэВ) такая аппроксимация хорошо удовлетворяет данным эксперимента, причем n увеличивается с уменьшением L . Для протонов высоких энергий зависимость интенсивности от B более сложная.

Протоны таких энергий сильнее концентрируются к плоскости экватора, кроме того, с ростом L высотный ход увеличивается. Примеры высотных ходов для протонов с $E > 1$, $E > 30$ и $E > 110$ МэВ приводятся на рис. 45 [5].

Анализ спектров показывает, что для протонов малых энергий энергетический спектр хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией

$$N(>E) \sim \exp(-E/E_0),$$

причем $E_0 \sim L^{-3}$ (на $L=6$ $E_0 \sim 60 \div 100$ кэВ). Протоны высоких энергий имеют степенной энергетический спектр $N(>E) \sim E^{-\alpha}$. В максимуме пояса ($L \sim 1,5$) $\alpha = 1$, на $L=2$ $\alpha \sim 2$.

Эти особенности протонов высоких и малых энергий объясняются тем, что происхождение их различно. Принято считать, что протоны высоких энергий появляются в результате распада нейтронов альbedo космических лучей, при взаимодействии с атмосферой Земли, источник протонов малых энергий — солнечный ветер. Протоны солнечного ветра захватываются магнитосферой Земли, диффундируют в глубь магнитосферы и заполняют ее сердцевину. Как промежуточную ступень между протонным поясом и солнечным ветром можно трактовать область протонов с $E_p < 50$ кэВ, обнаруженную на вечерней стороне Земли. На рис. 46 представлено распределение протонов радиационного пояса и протонов с $E_p < 50$ кэВ в зависимости от L [146]. Максимум интенсивности протонов с $E_p < 50$ кэВ наблюдается на $L=7 \div 8$. Во время магнитных бурь интенсивность протонов с $E_p < 50$ кэВ в максимуме возрастает на порядок и более и максимум перемещается на $L \sim 4$. Протоны с $E_p < 50$ кэВ вызывают в это время D_{st} -вариацию магнитного поля. Гибель протонов происходит вследствие ионизационных потерь в верхних слоях атмосферы.

α -частицы радиационных поясов Земли. Так как солнечный ветер наряду с протонами содержит и α -частицы, естественно было предположить, что в радиационных поясах Земли содержатся и α -частицы. Хотя их поток должен быть очень мал, так как ионизационные потери α -частиц больше, чем протонов, и концентрация α -частиц в солнечном ветре в 10 раз меньше концентрации протонов.

На рис. 47 приводится профиль пояса α -частиц по данным [76], а на рис. 48 и 49 — спектр и относительная интенсивность α -частиц. На этих же рисунках приводятся данные работы [146].

Электроны радиационных поясов Земли. Распределение электронов различных энергий в плоскости экватора в 1966 г. показано на рис. 50. Область, где регистрируются захваченные электроны, делится на внешний и внутренний радиационные пояса. Граница между этими поясами проходит приблизительно по $L=3$, где электроны с энергией в несколько сотен кэВ имеют время жизни, минимальное по сравнению с окружающими L -оболочками.

Источником электронов внутреннего радиационного пояса являются нейтроны альbedo

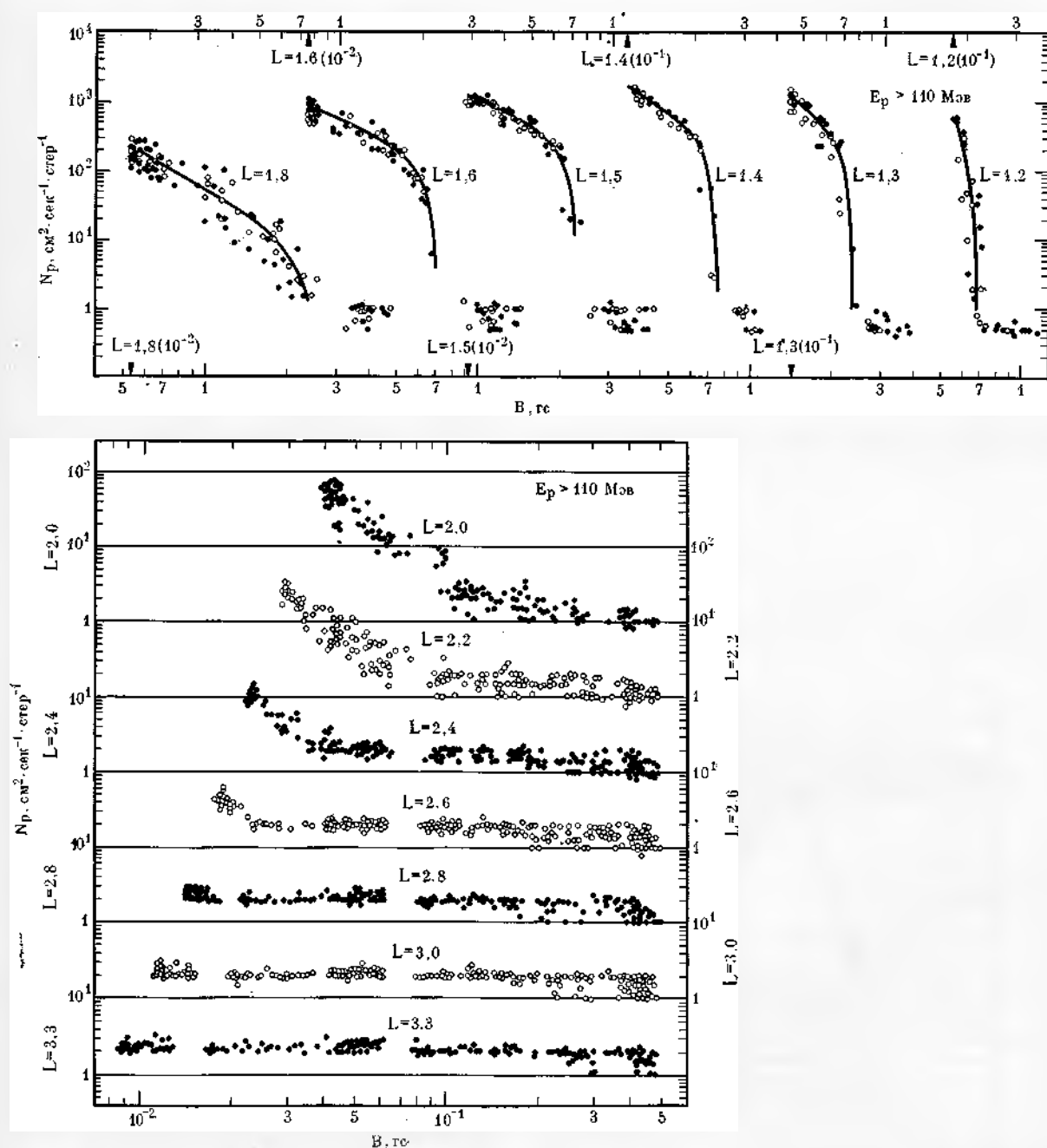


Рис. 45. Распределение по B протонов с $E \geq 110$ Мэв в различных L -оболочках (от $L = 1,2$ до $L = 3,3$) по данным спутников «Электрон»

Светлые кружки — февраль, темные — июль 1964 г.

космических лучей, взаимодействующих с атмосферой Земли. Кроме того, во время наиболее сильных магнитных бурь происходит инжекция частиц не только во внешний ра-

диационный пояс, но и во внутренний на $L \geq 2$. В дальнейшем в процессе диффузии эти электроны могут проникать и на меньшие L . Данные, относящиеся ко внутреннему поясу и представленные на рис. 50, могут характеризовать естественные электроны внутреннего радиационного пояса [149]. К 1966 г. практически полностью исчезли электроны с $E_e \leq 690$ кэв, инжектированные во время взрыва «Старфиш». Высотный ход электронов во

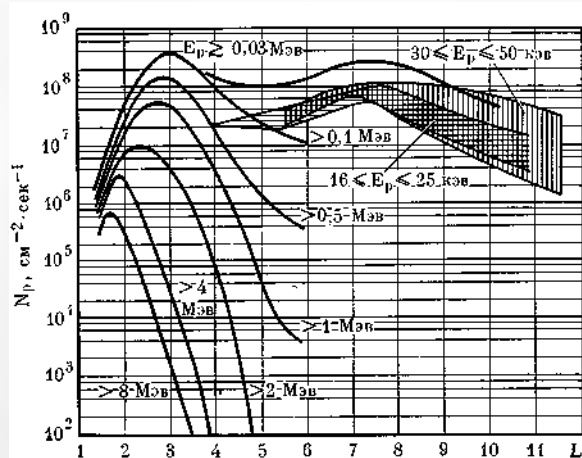


Рис. 46. Радиальные профили экваториального все-направленного потока протонов малых энергий

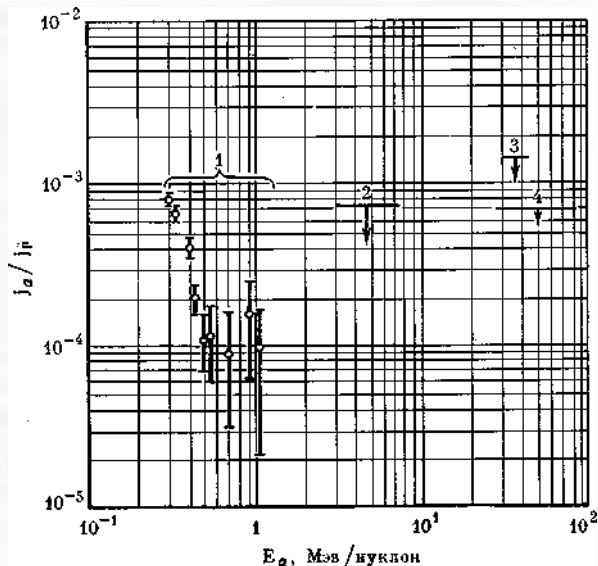


Рис. 48. Совокупность данных об энергетическом спектре α -частиц в радиационных поясах

- 1 — $L=3\pm 0.5$, $B\sim 0.2\pm 0.02$;
 2 — $L=1.72$, $B\sim 0.2$;
 3 — $L=1.3$, $B\sim 0.2$;
 4 — $L\sim 1.6\pm 3.3$, $B\sim 0.01-0.25$

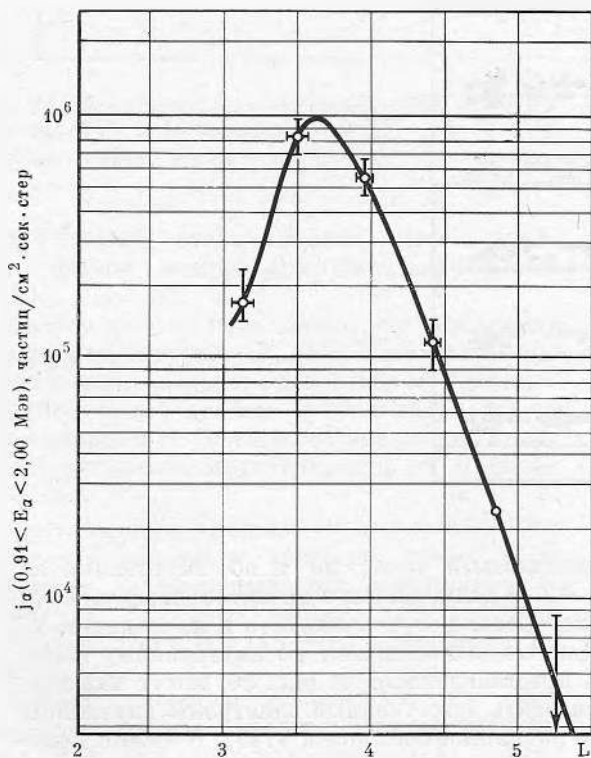


Рис. 47. Экваториальное сечение пояса α -частиц малых энергий (6 января 1972 г.)

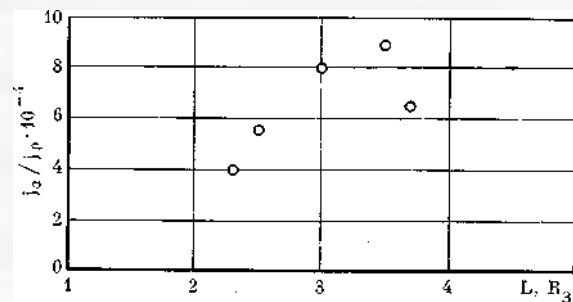


Рис. 49. Относительная интенсивность α -частиц с энергией выше 0,31 Мэв/нуклон в зависимости от L ; $0.18 \leq B \leq 0.22$

Рис. 50. Радиальные профили электронной интенсивности на $L \geq 1.25$

Рис. 51. Распределение электронов с энергией $E_e \geq 150$ кэв в магнитосфере Земли

Для получения потока (на 1 см²) числа у кривых нужно умножить на фактор ~ 100 . Заштрихована зона неустойчивой радиации. Сверху — разрез по линии день — ночь, внизу — утро — вечер

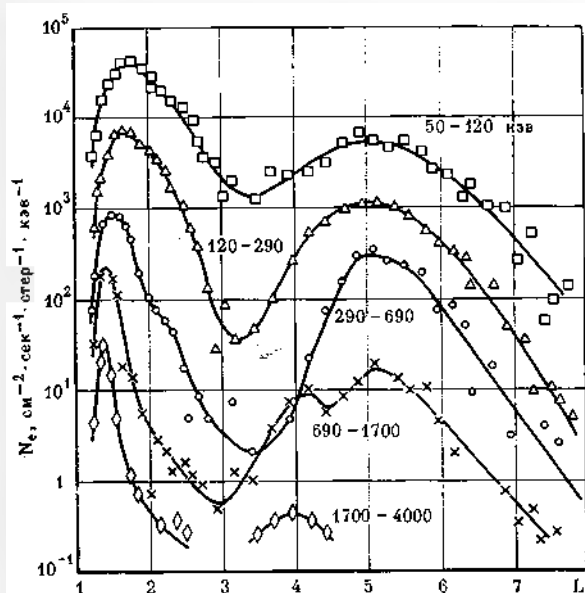


Рис. 50.

внутреннем поясе можно аппроксимировать выражением $N \sim B^{-1}$.

Распределение потоков электронов с энергией $E_e \geq 150$ кэВ в плоскости меридиана представлено на рис. 51 [139].

Источником электронов внешнего радиационного пояса являются электроны солнечного ветра. Максимум интенсивности электронов во внешнем радиационном поясе расположен на $L = 4 \div 5$.

Высотный ход электронов во внешнем поясе при перемещении от наружной границы к зазору делается более слабым. При изменении L от 6 до 4 средний высотный ход изменяется от $N \sim B^{-1}$ до $N \sim B^{-0.3}$. Если магнитно-спокойная обстановка сохраняется в течение 4—5 дней, то на $L \sim 4$ высотный ход исчезает и $N = \text{const}$ при изменении высоты от ~ 6000 км до экватора.

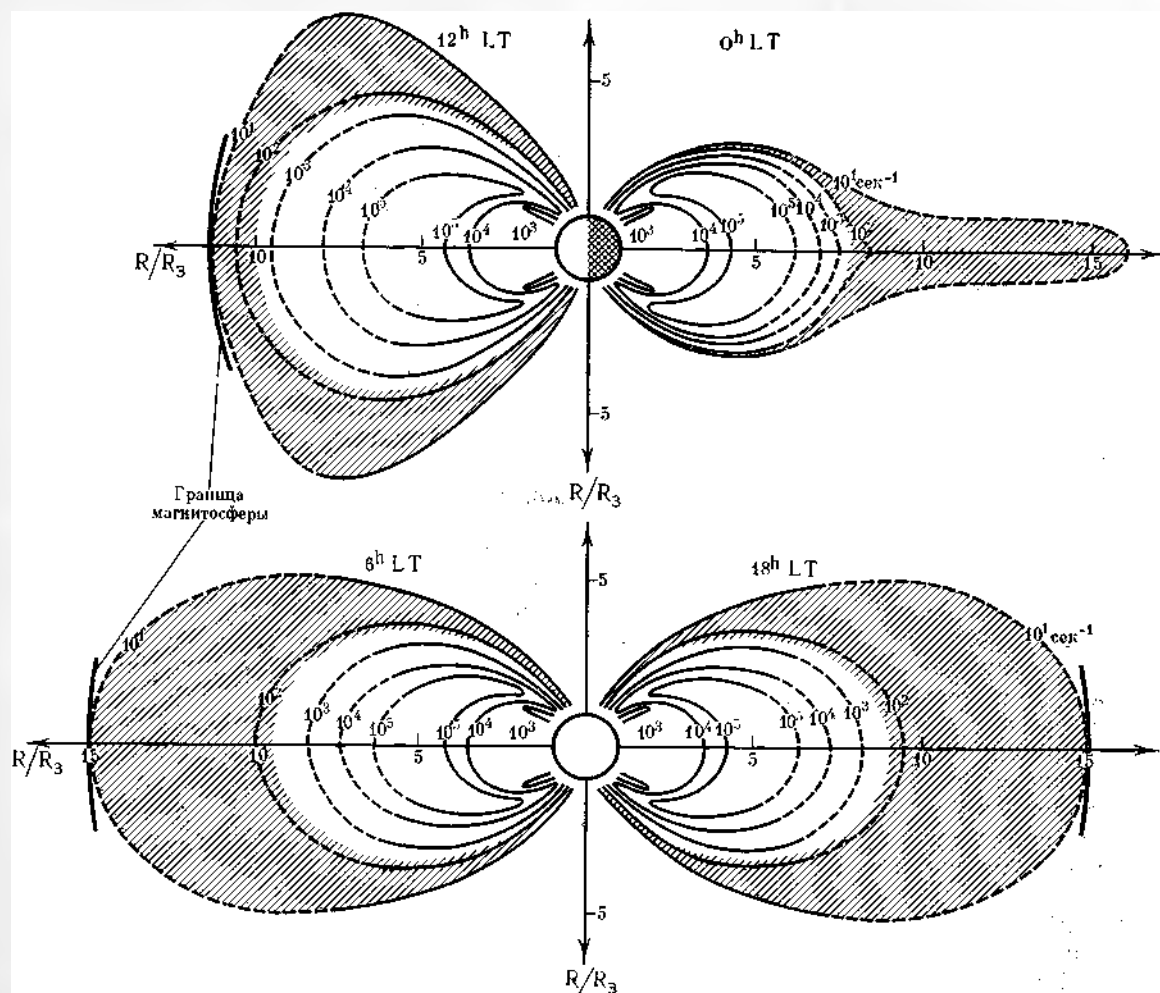


Рис. 51.

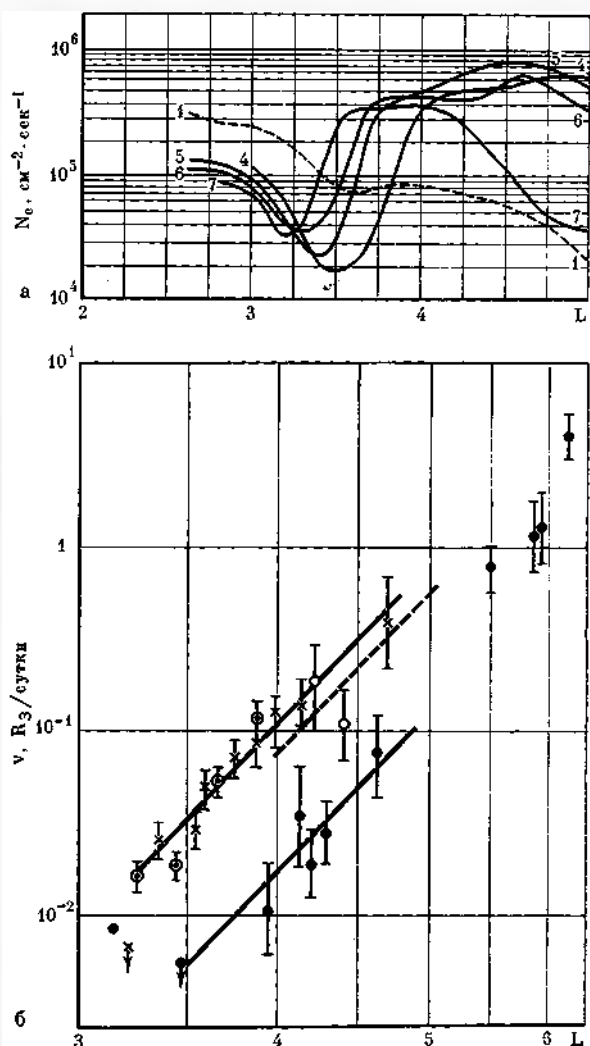


Рис. 52. Изменения профиля интенсивности электронов с $E_e > 1,6$ Мэв в результате радиальной диффузии (а) и зависимость скорости радиальной диффузии электронов с $E \sim 0,15 \div 5,0$ Мэв от L (б)

Источники частиц радиационных поясов. Мы уже упоминали, какие частицы ответственны за создание радиационных поясов Земли, теперь рассмотрим, при помощи каких механизмов происходит их пополнение. Механизмы пополнения поясов частицами можно разбить на две группы:

медленное непрерывное заполнение области радиационных поясов частицами;

быстрая «импульсная» инжекция частиц.

Медленное непрерывное заполнение области радиационных поясов частицами высоких энергий происходит:

а) при распаде нейтронов альbedo космических лучей, взаимодействующих с атмосферой Земли. Такой процесс служит источником частиц для пояса протонов с энергией $E > 30$ Мэв и для пояса электронов на $L \approx 2 \div 3$. Проведены многочисленные расчеты интенсивности протонов во внутреннем радиационном поясе, источником которых являются нейтроны альbedo [25, 85]. Реальный высотный ход интенсивности значительно отличается от рассчитанного. По-видимому, мы плохо знаем изменение потока нейтронов с высотой, или механизмы гибели протонов (обычно учитывают ионизационные потери);

б) в процессе диффузии частиц из наружных областей магнитосферы в ее сердцевину. Теория процесса хорошо разработана [25, 66, 114]. Предполагается, что диффузия частиц происходит во время внезапных импульсов геомагнитного поля, довольно часто регистрируемых магнитными обсерваториями. Диффузия частиц может также происходить во время магнитных суббурь. Этот процесс приводит к ускорению диффузии электронов на малых L ($L < 2$).

Изменение профиля пояса электронов с $E_e > 1,6$ Мэв в процессе диффузии показано на рис. 52 [73]. Передний фронт пояса в процессе диффузии перемещался со скоростью $v = 33 \cdot 10^{-7} L^2 R_E$ за сутки. Скорость перемещения максимума пояса приблизительно в четыре раза меньше. На этом же рисунке показана зависимость скорости диффузии электронов с энергиями от 0,15 до 5 Мэв от L [5].

В процессе диффузии формируются протонные пояса Земли с $E_p > 30$ Мэв и внешний электронный пояс. Максимум интенсивности частиц различных энергий образуется на том L , для которого время диффузии от границы пояса приблизительно равно времени жизни частиц.

Быстрое возрастание интенсивности частиц в поясе происходит во время магнитосферных суббурь, которые связывают с усилением крупномасштабного электрического поля в магнитосфере Земли.

Можно указать три модификации ускорительного механизма. Во-первых, инжекция частиц из хвоста магнитосферы под действием усиленного электрического поля; более высокоэнергичные частицы при этом появляются на более удаленных дрейфовых оболочках: электроны с $E_e \geq 40$ кэв на $L \geq 4$, а электроны с $E_e \geq 100$ кэв — на $L \geq 7,5$. Дрейфовые орбиты ускоренных частиц при действии усиленного электрического поля разомкнуты и лишь при его ослаблении становятся замкнутыми.

Во-вторых, перераспределение частиц пояса под действием относительно слабых, изменяющихся во времени электрических полей. При этом дрейфовые орбиты частиц остаются замкнутыми, но наблюдается быстрая диффузия частиц на L -оболочку, на которой период обращения частиц вокруг Земли τ_3 равен периоду действия электрического поля. Так как $\tau_3 \sim 1/E_r L$, то частицы больших энергий увеличивают свою интенсивность на меньших L по сравнению с частицами меньших энергий.

В-третьих, в начале любой магнитосферной суббури поле в хвосте магнитосферы увеличивается за счет перехода в хвост силовых линий из ее сердцевин. По окончании бури силовые линии возвращаются обратно. При этом поле в вершине силовой линии возрастает и соответственно увеличивается энергия частиц, находящихся на данной силовой линии ($E/B = \text{const}$). Иными словами, по окончании магнитосферной суббури в хвосте магнитосферы возникает ускоряющее индукционное электрическое поле.

Механизм возникновения квазистационарного электрического поля пока не ясен. Вероятно, происходит разделение зарядов на границе магнитосферы. Возможно возникновение зарядов в области протонного пояса, где формируется ток, ответственный за D_{SI} -вариацию магнитной бури.

Гибель частиц радиационных поясов Земли. Средняя картина интенсивности частиц в радиационных поясах, нарисованная выше, отражает состояние динамического равновесия между гибелью частиц и их пополнением. Механизмы гибели для частиц разных сортов различны. Для протонов и α -частиц основным механизмом гибели является уменьшение энергии частиц вследствие ионизационных потерь при взаимодействии с остаточной атмосферой на больших высотах. Лишь для протонов с $E_p \geq 100$ Мэв становится существенным нарушение первого адиабатического инварианта.

Для электронов кулоновское рассеяние более эффективно, чем ионизационные потери. Оно определяет время жизни электронов на $L < 1,5$. На больших L время жизни уменьшается, что говорит о том, что включается новый, более эффективный механизм, приводящий к выбыванию электронов из поясов. Таким механизмом является рассеяние электронов на низкочастотных волнах: свистящих атмосфериках, собственном циклотронном излучении и др.

Уменьшение интенсивности электронов на различных L -оболочках в магнитно-спокой-

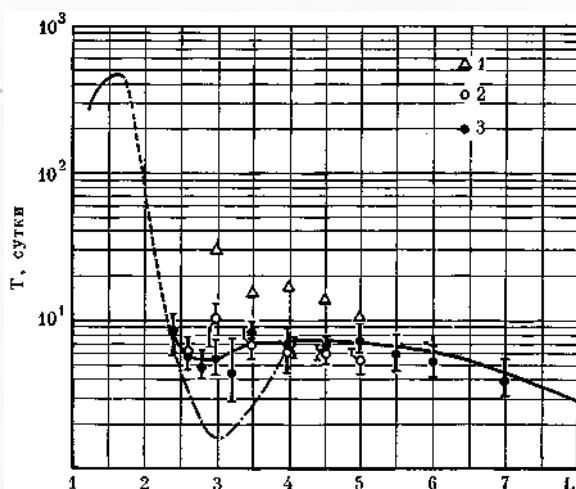


Рис. 53. Зависимость времени жизни электронов с $E_e > 300$ кэв и $E_e > 1,2$ Мэв от L

«Эксплорер-26»:

1 — $>1,2$ Мэв;

2 — >300 кэв;

1963-38C:

3 — >300 кэв.

Штрих-пунктирная линия — возможное уменьшение времени жизни, сплошная — время жизни электронов с $E_e > 300$ кэв, штриховая — данные отсутствуют

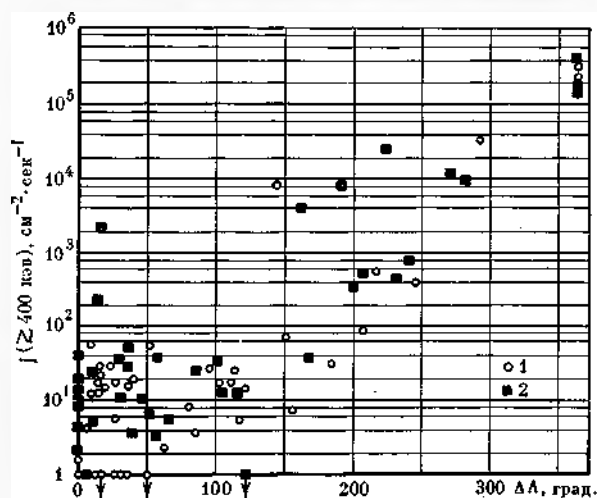


Рис. 54. Зависимость величины потока электронов с $E_e \geq 400$ кэв на $L = 2,0$ от долготы, отсчитываемой к востоку от Бразильской аномалии

1 — $T_m \sim 12$ ч;

2 — $T_m \sim 0$ ч.

ΔL — интервал долготы между точкой измерения и точкой $L_{\min} = 100$ км

Ионосферные возмущения и полярные сияния относятся к наиболее заметным явлениям, связанным с геомагнитными бурями.

Исследование поведения ионосферы имеет самое прямое отношение к выяснению механизма геомагнитных бурь, поскольку именно в ионосфере располагаются, по-видимому, основные токовые системы, ответственные за магнитные возмущения, а изучение полярных сияний обеспечивает уникальную информацию о выпадении частиц из магнитосферы.

Геомагнитная активность довольно сложным образом зависит от целого ряда параметров межпланетной среды, магнитосферы и ионосферы и от происходящих в них физических процессов. Мерой ее обычно служит магнитный индекс, который обозначается K или A (в зависимости от использования квазилогарифмического или линейного масштаба) и характеризует максимальное изменение величины геомагнитного поля за трехчасовой интервал времени.

Наблюдаемые вариации геомагнитной активности носят как периодический (27-дневная и 11-летняя вариации), так и спорадический характер. 11-летняя вариация тесно связана с циклом солнечной активности и хорошо коррелирует с ним, а 27-дневная вариация, очевидно, указывает на связь наблюдаемых возмущений с определенными активными областями на Солнце. Возмущающим агентом могут быть как рекуррентные корпускулярные потоки из активных областей, так и жесткое электромагнитное излучение. Усиление геомагнитной активности наблюдается при пересечении Землей потоков высокоскоростной солнечной плазмы. В частности, некоторое усиление активности наблюдается при пересечении Землей границы сектора межпланетного магнитного поля, где скорость солнечной плазмы часто достигает значений $\sim 700-850$ км/сек. В период прохождения границы сектора на Земле регистрируется изменение интенсивности космических лучей, возрастает индекс магнитной активности A и изменяется интенсивность захваченных электронов внешнего пояса радиации. Взаимодействие солнечного ветра с магнитным полем Земли рассматривается в целом ряде обзоров. Можно указать, например, [2, 116].

Взаимодействие солнечного ветра с магнитным полем Земли. Солнечный ветер и облака солнечной плазмы, наталкиваясь при своем распространении от Солнца на магнитное поле Земли, деформируют его таким образом, что с солнечной стороны оно

оказывается несколько сжатым, а с антисолнечной (теневой) вытягивается в длинный геомагнитный хвост. При этом солнечная плазма частично отклоняется геомагнитным полем и, обтекая магнитосферу, уходит дальше в межпланетное пространство, а частично захватывается полем, образуя вокруг Земли пояса заряженных частиц, или зоны захваченной радиации.

По своим физическим характеристикам околоземное космическое пространство можно разделить на три области:

1) межпланетное пространство, где свойства межпланетной среды не нарушаются присутствием Земли и ее магнитным полем;

2) переходная область, обусловленная взаимодействием солнечного ветра с геомагнитным полем;

3) магнитосфера — область пространства, занятая геомагнитным полем. Магнитосферу можно, в свою очередь, разделить на две части: часть, которая охватывает главным образом зоны захваченной радиации, и оставшая часть, включающая в себя магнитный хвост Земли с магнитным нейтральным плазменным слоем.

Эти три области космического пространства разделены двумя характерными границами: бесстолкновительной головной ударной волной и магнитопаузой. Бесстолкновительная ударная волна отделяет невозмущенную межпланетную среду от переходной области, а магнитопауза (граница магнитосферы) — переходную область от магнитосферы (рис. 37).

Впервые существование границы геомагнитного поля и ее движение было обнаружено по данным спутника «Эксплорер-10», а первые измерения захваченных частиц, магнитного поля и плазмы на границе геомагнитного поля проведены в 1961 г. на спутнике «Эксплорер-12» [57, 75]. Выяснилось, что геомагнитное поле обжимается потоком солнечного ветра со стороны Солнца на расстоянии $R \sim 8,2 R_0$ по линии Солнце — Земля. Кроме ограничения регулярного геомагнитного поля, было обнаружено ограничение квазитермализованной плазмы. Этот факт был интерпретирован как фронт бесстолкновительной ударной волны. Дальнейшие исследования окончательно установили, что существует определенная область, служащая границей раздела между сильным регулярным геомагнитным полем внутри магнитосферы и быстро флуктуирующими слабыми магнитными полями межпланетного происхождения в переходной области (рис. 37). В переходной же

области содержится малоэнергичная солнечная плазма, термализованная при прохождении через область бесстолкновительной ударной волны. Как в ударной волне, так и в магнитосфере наблюдаются значительные флуктуации магнитного поля. Более поздние измерения границы магнитосферы дали несколько большее значение ее расстояния от Земли, чем первые измерения, и показали, что положение обеих границ может изменяться, причем смещения достигают 20% от номинальных значений граничных расстояний. Эти вариации положения граничных поверхностей являются следствием временных вариаций плотности и скорости солнечного ветра и связанных с ним межпланетных полей.

Сейчас несколько условно принимается, что граница магнитосферы с солнечной стороны имеет приблизительно сферическую форму с радиусом кривизны $R_c \sim 14 R_0$ и центром, смещенным на $3,5 R_0$ на ночную сторону вдоль линии Земля — Солнце. Ударная волна имеет приблизительно форму параболоида и пересекается с линией Земля — Солнце на расстоянии $14 R_0$. Ось симметрии границы магнитосферы в плоскости эклиптики повернута относительно направления Солнце — Земля на небольшой угол (5°), что, по-видимому, является следствием эффекта абберации из-за орбитального движения Земли вокруг Солнца.

Головная ударная волна регистрируется по резкому изменению физических свойств плазменной среды (появлению в переходной области малоэнергичной плазмы). Наблюдения на спутниках типа «Вела» [65] показали, что поток электронов, регистрировавшийся на спутниках, в области предполагаемой ударной головной волны испытывал внезапные и резкие изменения. Согласно этим наблюдениям общий характер изменения протонного и электронного потоков согласуется с представлением о том, что в результате взаимодействия плазмы солнечного ветра с ударной волной возникает турбулентность, в процессе которой протоны солнечного ветра теряют часть своей энергии, а энергия электронов солнечного ветра увеличивается, направление движения частиц становится более хаотичным. Глобальный поток электронов с $E_e > 350$ эв при переходе от межпланетного пространства к переходной области увеличивается от значения, не превышающего $\sim 10^7$, до $\sim 5 \cdot 10^8$ см $^{-2}$ ·сек $^{-1}$. Температура протонов при этом растет от $\sim 10^5$ (типичное значение для межпланетного пространства) до $\sim 10^6$ °K. Температура электронов позади фронта удар-

ной волны составляет обычно около 10^6 °K, хотя часто наблюдаются и большие значения (до $\sim 5 \cdot 10^6$ °K). В переходной области примерно между 10 и $15 R_0$ регистрировались почти изотропные, но меняющиеся потоки протонов и электронов с интенсивностями до 10^9 см $^{-2}$ ·сек $^{-1}$, отмечалось также заметное повышение ионной температуры и резкое уменьшение интенсивностей протонов и электронов около магнитопаузы ($R_m \sim 10,5 R_0$). Измерения показывают, что концентрация протонов в переходной области в 8—10 раз выше, чем в солнечном ветре. Магнитопауза легко обнаруживается не только по изменению магнитного поля, но и по резкому уменьшению потока протонов с $E_p < 10$ кэв и появлению электронов с $E_e > 40$ кэв внутри магнитосферы. Иногда обе границы (головная ударная волна и магнитопауза) имеют довольно диффузный характер, что затрудняет их отождествление.

На ночной стороне Земли силовые линии геомагнитного поля вытянуты далеко в направлении от Солнца и образуют длинный шлейф, простирающийся на расстояние $> 80 R_0$, т. е. за орбиту Луны [10, 12, 13]. Есть указание на то, что хвост существует вплоть до $\sim 1000 R_0$ [108]. Диаметр хвоста на расстоянии $30 R_0$ равен $\sim 40 R_0$, а на иоцентрическом расстоянии $\sim 80 R_0$ составляет $\sim 50 R_0$. Предполагается, что геомагнитный хвост образуется в результате вытягивания солнечным ветром силовых линий геомагнитного поля, исходящих из полярных областей. Он представляет собой слегка сплюснутый с боков цилиндр с Θ -образным сечением, состоящий из двух отдельных магнитных силовых трубок. В южной трубке магнитные силовые линии, исходящие из южной полярной области, направлены в сторону от Земли, а в северной трубке магнитные силовые линии, связанные с северной полярной областью, к Земле. Эти трубки разделены магнитно-нейтральным слоем с очень малой напряженностью поля, который почти совпадает со слоем горячей плазмы, уравнивающей магнитное давление снизу и сверху от нейтрального слоя.

Нейтральный слой, согласно наблюдениям [43, 133], представляется весьма тонким: толщина его не превышает радиуса Земли (были зарегистрированы изменения в пределах 500—5000 км). При пересечении спутником нейтрального слоя наблюдается обращение знака поля. Это подразумевает существование слоя плазмы и эквивалентного электрического тока, связанного с градиентом поля. По

данным измерений на ИМП-1, нейтральный слой часто находится в движении, а силовые линии имеют небольшую компоненту, связывающую силовые линии на противоположных сторонах нейтрального слоя. В период магнитных бурь магнитный хвост испытывает сильные деформации и изменения [43].

Напряженность магнитного поля в хвосте (H_x) убывает с увеличением геоцентрического расстояния r_{SE} по закону $H_x \sim (r_{SE})^{-\gamma}$, где $\gamma = 0,5 \pm 0,2$. На расстоянии $r_{SE} = 10-15 R_0$ $H_x = 20-30 \gamma$, на $r_{SE} = 40 R_0$ $H_x \sim 10-18 \gamma$, на $r_{SE} = 80 R_0$ $H_x \sim 6-12 \gamma$.

Величина перпендикулярной нейтральному слою составляющей поля равна $H_z \sim 1-4 \gamma$ [133]. По измерениям на спутнике «Эксплорер-33» [109] напряженность поля геомагнитного шлейфа за орбитой Луны составляет 10–18 γ , а направление поля почти параллельно линии Земля — Солнце. Форма геомагнитного хвоста во многом зависит от потока плазмы у его поверхности и так же, как и механизм образования хвоста, остается до настоящего времени предметом спора.

Геомагнитные возмущения. Нестационарность потоков солнечной плазмы приводит к колебаниям положения внешней границы магнитосферы, которые фиксируются на Земле в виде пульсаций геомагнитного поля. Результаты сравнения вариаций параметров потока солнечного ветра по наблюдениям на АМС «Венера-2», «Венера-4» и «Венера-6» с пульсациями геомагнитного поля [83] показывают, что основным параметром солнечного ветра, определяющим характер пульсаций геомагнитного поля, регистрируемых на Земле, является концентрация протонной компоненты солнечного ветра.

Более сильные возмущения геомагнитного поля, носящие название геомагнитных возмущений, вызываемых высокоэнергичными потоками солнечной плазмы от солнечных вспышек и рекуррентными потоками солнечной плазмы. Возмущения могут быть как периодическими (плавными и регулярными), так и спорадическими. Наиболее интенсивные из этих возмущений получили название геомагнитных бурь. Напряженность геомагнитного поля, равная на поверхности Земли вблизи экватора $\sim 0,3$ гс (или 30 000 γ), во время наиболее сильных геомагнитных бурь может испытывать вариации, величина которых достигает 1–2%.

Геомагнитная буря обычно проходит три фазы развития: начальную фазу, изменение поля во время которой может носить как плавный, так и внезапный резкий характер;

главную фазу, характеризующуюся заметным уменьшением горизонтальной составляющей поля в средних и низких широтах, и фазу постепенного восстановления, развивающуюся примерно через сутки после начала бури и продолжающуюся несколько дней (рис. 56).

Корреляция временной вариации поля бури D_{st} с положением магнитопаузы на дневной стороне показывает, что в начальную фазу магнитной бури магнитосфера сжимается, по-видимому, из-за увеличения потока солнечной плазмы, а в период фазы восстановления она испытывает общее расширение. Для геомагнитных бурь с четко выраженной главной фазой характерно сильное удаление головной ударной волны и большая толщина переходной области. Заметна тенденция повышения интенсивности бури с увеличением переходной области. Возможно, что образование более обширной переходной области способствует генерации и передаче магнито-гидродинамических волн внутрь магнитосферы, а это приводит к увеличению вязкого взаимодействия и последующего уноса магнитных силовых линий в хвост Земли, вследствие чего интенсивность бури увеличивается.

Между положением на солнечном диске вспышки, ответственной за бурю, и характером протекания этой бури существует связь. Бури, обусловленные центральными вспышками, как правило, имеют большое внезапное начало SC и хорошо развитую главную фазу. Лимбовые вспышки, напротив, приводят к бурям с малым SC и более длительной начальной фазой; развитие главной фазы во время таких бурь не всегда очевидно. Исходя из этого, можно предположить, что поток энергии, ответственный за геомагнитные бури, концентрируется в довольно узком конусе, ось которого направлена по радиусу от области вспышки. Вместе с тем появление вспышек,

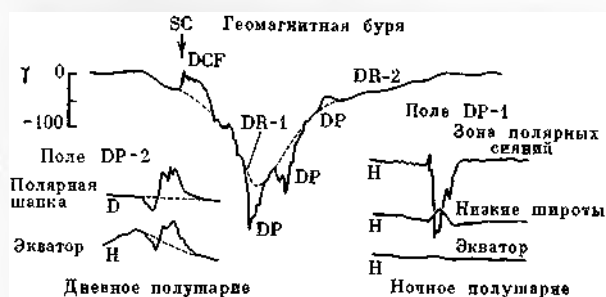


Рис. 56. Характер изменения магнитного поля во время геомагнитной бури

ответственных за бури с внезапным началом, в любом месте солнечного диска подсказывает, что фронт потока плазмы распространяется почти полусферически, образуя расширяющуюся оболочку. Изложенные представления могут быть объединены в единой картине распространения в межпланетном пространстве ударной волны, генерируемой, как это было предположено в работе [80], при выбросах плазмы из области солнечной вспышки.

Морфология геомагнитных возмущений. По морфологии геомагнитных возмущений существует подробный и достаточно исчерпывающий обзор Обаяши [110]. Приводимое ниже рассмотрение в значительной степени опирается на этот обзор.

Для описания довольно сложного характера поведения геомагнитной бури Чепмен предложил разделить формально поле возмущения D на две части — осесимметричную D_{st} и асимметричную DS : $D = D_{st} + DS$.

Поле D_{st} соответствует вариации по времени бури. Для типичной геомагнитной бури эта часть возмущения начинается с резкого изменения поля в момент внезапного начала SC и последующей начальной положительной фазы DCF (рис. 56). Главная фаза бури характеризуется заметным уменьшением величины горизонтальной составляющей поля D_{st} в средних и низких широтах. Поле DS представляет возмущение, зависящее от местного времени; среднее от DS принято называть возмущенной солнечно-суточной вариацией DS . Поле DS преобладает, как правило, в высоких широтах, будучи наиболее активным в период главной фазы бури [60].

В полярных авроральных областях и особенно вдоль пояса полярных сияний (или, как его еще называют, аврорального пояса) магнитные возмущения особенно интенсивны. Эти возмущения, носящие название полярных суббурь или геомагнитных бухт, обычно длятся не более нескольких часов и могут достигать иногда нескольких сотен гамм. Они могут появляться не только при общепланетарных геомагнитных бурях, но и при довольно спокойных в магнитном отношении условиях. Наиболее существенная особенность этих возмущений — возникновение вдоль ночной части пояса полярных сияний сильных струйных токов в ионосфере, называемых авроральной электроструей. Такие возмущения обозначаются как поле $DP-1$.

Наряду с авроральной электроструей $DP-1$ существует еще одна ионосферная токовая система, ответственная за поле $DP-2$. Эта си-

стема состоит из двух токовых вихрей с противоположным направлением тока, расположенных в полярной области с центрами примерно вдоль утренне-вечернего меридиана. Поле возмущения $DP-2$ возникает и существует по всей Земле (от полюса до экватора), т. е. имеет более широкое пространственное распределение, чем поле $DP-1$. Частота появления токовых систем $DP-2$, даже за исключением случаев SC и SI (внезапных импульсов, после которых магнитные бури не развиваются), сравнима с частотой появления полярных магнитных суббурь $DP-1$.

Верхняя атмосфера Земли. Ионосфера

Коротковолновое излучение Солнца несет с собой достаточно энергии, чтобы вызвать заметную фотоионизацию земной атмосферы на больших высотах. Поэтому солнечная радиация создает в верхней атмосфере частично ионизованную область, называемую ионосферой; ионосфера простирается от ~50 км до границы магнитосферы. Обычно ее делят на несколько частей: область D (от 50 до 90 км), область E (от 90 до 120—140 км), область F (от 120—140 до 600—1500 км) и протоносферу (от 1200—5000 км до границы магнитосферы). Область F подразделяется на слои F_1 и F_2 , область E иногда делится на слои E_1 и E_2 . Разделение на области определяется как процессами их образования, так и составом ионов в них. Области D , E и F состоят главным образом из молекулярных ионов O_2^+ и NO^+ , область F_2 — из O^+ и протоносфера — из H^+ .

Атмосферные условия в разных областях ионосферы сильно различаются. Например, температура изменяется от ~200 до 1000—2000° K, концентрация нейтральных частиц n — в миллион раз: от 10^{15} см⁻³ в области D до 10^9 см⁻³ в области F . Электронная концентрация n_e не зависит от фазы солнечного цикла и времени суток. Наибольшая концентрация ионов и электронов достигается в самом верхнем слое, в области F_2 на высоте ~300 км. На высотах ~410 км степень ионизации n_e/n днем составляет величины 10^{-7} , а на высотах ~300 км — уже 10^{-3} . При переходе ото дня к ночи электронная концентрация в области F_2 уменьшается всего в 3—10 раз, тогда как в областях E и D она падает на 1,5 и 2,5 порядка величины. Временные и географические вариации дневного слоя E весьма регулярны. Максимальная ионная концентрация в слое E почти целиком зависит от уровня активности и зенитного расстояния Солнца.

Слой E почти не имеет резких возмущений, свойственных областям D и F .

Ионизация солнечным излучением доминирует во всей ионосфере, расположенной выше ~ 80 км, причем основная часть коротковолнового солнечного излучения поглощается на высотах 100—200 км. Выше 85 км в минимуме и выше 70 км в максимуме солнечной активности основным источником ионизации является рентгеновское излучение с $\lambda \leq 10 \text{ \AA}$. Излучение в L_α также существенно для $70 \leq h \leq 90$ км. Ниже 65—70 км на средних широтах даже днем преобладает действие космических лучей, поток которых от минимума к максимуму солнечной активности увеличивается примерно в три раза. В области 65—80 км днем и ≥ 80 км ночью преобладает ионизация корпускулярными потоками частиц, высыпавшихся в нижнюю часть атмосферы. Во время магнитных возмущений наблюдается усиление потока высыпавшихся частиц и соответственно усиление ионизации этими потоками (даже на высотах 100—110 км в дневное время).

Полный поток ионизирующего излучения Солнца изменяется в пределах 2,5—8 эрг/см²·сек. Космические лучи затрачивают на ионизацию земной атмосферы на средних широтах $3 \cdot 10^{-3}$ эрг/см²·сек, из них более 90% идет на ионизацию атмосферы ниже 40 км. Высыпавшиеся частицы при высокой активности Солнца расходуют на ионизацию днем до ~ 1 эрг/см²·сек, а ночью 10^{-2} эрг/см²·сек.

Наиболее значительные изменения параметров верхней атмосферы Земли связаны с изменениями потока коротковолнового излучения Солнца. Зависимость параметров ионосферы от солнечного коротковолнового излучения проявляется в виде периодических (27-дневных и 11-летних) изменений и спорадических возмущений, обусловленных резким увеличением потока рентгеновского и ультрафиолетового излучений во время активных явлений на Солнце. Наблюдается изменение параметров ионосферы и в течение суток ото дня к ночи. Температура сильнее всего изменяется в области высот 100—200 км. Выше ~ 250 —300 км находится область изотермии. Суточный максимум температуры $T_{\text{экв}}$ в этой области наблюдается в 14—16 час., а минимум — в 4—5 час. местного времени. Это свидетельствует об инерционных свойствах температуры атмосферы. При переходе ото дня к ночи $T_{\text{экв}}$ уменьшается на 20—40% при низкой активности и в 1,5—2 раза при высокой активности Солнца (от 1000 до 800° и от 1800 до 1100° K соответственно). На

меньших, чем 200—250 км, высотах картина изменения температуры носит гораздо более сложный характер. С усилением солнечной активности значительно возрастает плотность атмосферы. Общая плотность атмосферы на высотах 200 и 300 км при переходе от минимума к максимуму активности увеличивается соответственно в 2 и 3—4 раза. Температура атмосферы хорошо коррелирует также с планетарным геомагнитным индексом A_p . Увеличению геомагнитного индекса во время геомагнитных бурь соответствует повышение давления (т. е. плотности и температуры) в верхней атмосфере. Это повышение регистрируется обычно через 5—7 час. после начала магнитной бури. Исследованию верхней атмосферы Земли и ионосферы посвящено много работ, например [19, 26, 27].

Ионосферные возмущения. Возмущения в ионосфере можно отнести к процессам двух основных типов: усиление ионизации в нижней ионосфере (области D и E) и сложные аэрозимические и динамические процессы, относящиеся к области F (рис. 57) [110]. Получило всеобщее признание положение, согласно которому аномальная ионизация в нижней ионосфере обусловлена либо всплесками солнечного излучения, либо высыпанием энергичных частиц. Общая схема возмущения в области E , включая полярные сияния, представлена на рис. 58 из [110]. Во время солнечных вспышек ионизация атмосферы, особенно ниже 100 км, резко возрастает. В слое D после интенсивных солнечных вспышек она увеличивается в 10^2 — 10^4 раз в зависимости от высоты в атмосфере и интенсивности вспышки. Это усиление ионизации, называемое внезапным ионосферным возмущением (SID), обусловлено главным образом резким повышением интенсивности солнечного рентгеновского излучения в области 0—20 Å. Увеличение электронной плотности на различных высотах определяется как усилением потока излучения в области 0—20 Å, так и изменением спектрального распределения этого излучения. Продолжительность SID от нескольких минут до нескольких часов. Внезапные ионосферные возмущения охватывают в основном нижнюю часть ионосферы в области D , хотя иногда наблюдается увеличение n_e также и в областях E и F . Внезапное увеличение ионизации в области регистрируется по внезапным фазовым аномалиям в отраженном радиосигнале (SPD) и внезапному усилению атмосфериков и атмосферных свистов (SEA и SES) на высотах ниже 70 км, а также по замиранию коротких радиоволн

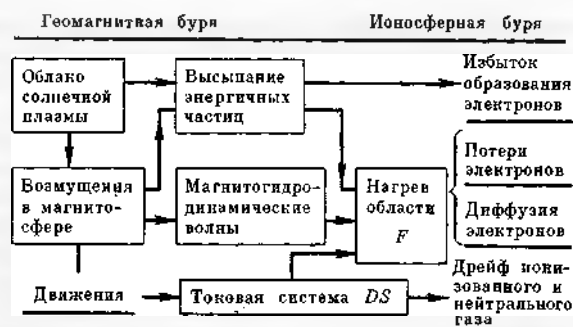


Рис. 57. Возможная схема механизма ионосферных бурь в области F



Рис. 58. Источники и механизм развития основных возмущений в области F

(SWF) и внезапному поглощению космического радиоизлучения (SCNA) на высотах между 60 и 100 км.

Сильное увеличение ультрафиолетового и рентгеновского излучений Солнца во время вспышки приводит уже через несколько минут к усилению системы электрических токов в ионосфере, ответственных за суточные вариации магнитного поля, и отмечается на магнитограммах внезапными небольшими выбросами — «кроше». Кроше наблюдаются на освещенной Солнцем стороне Земли и наиболее отчетливо выражены около субсолнечной точки. Почти все кроше регистрировались во время усиления излучения рентгена. Начало

радиовсплесков в сантиметровом диапазоне и начало кроше в большинстве случаев совпадают.

Возмущения в области F , связанные с геомагнитными бурями, исследуются в течение многих лет. Анализ данных мировой сети станций зондирования ионосферы позволил выявить многие важные особенности вариаций электронной концентрации в ионосфере. Однако теории, предлагавшиеся для объяснения механизма возмущений в области F , носят очень спорный характер и удовлетворительное объяснение основных особенностей бурь по существу пока отсутствует. Причинами такого положения могут быть сложность процессов образования области F и плохое понимание электродинамики верхней атмосферы. Тем не менее можно отметить, что в решении проблемы важную роль должны сыграть два фактора: изменение температуры ионосферы во время магнитных возмущений и дрейфовые электродинамические движения электронов под воздействием возникающих в ионосфере электрических полей.

За последние годы стало очевидным, что температура в F -области во время геомагнитных бурь увеличивается. По наблюдениям за торможением спутников отмечено, что в области высот от 200 до 700 км имеет место общий нагрев ионосферы и что увеличение температуры хорошо коррелирует с ростом геомагнитной активности. Увеличение температуры в области F приводит к существенным изменениям равновесного состояния электронов из-за электродинамического дрейфового движения электронов, являющегося следствием взаимодействия геомагнитного и электрического полей, связанных с протекающими в ионосфере токами.

Полярные сияния и авроральные явления

Одно из проявлений солнечно-земных связей — полярные сияния. Это единственное видимое проявление взаимодействия заряженных частиц с верхней атмосферой и ионосферой. Явление это очень разнообразно как по форме областей свечения, так и по их яркости, цвету, подвижности и продолжительности (см. рис. 59, заимствованный из [58]). Полярным сияниям посвящена обширная литература, например [16—19, 27, 28, 33, 40, 58, 59]. Все сияния по их структуре разбивают на два класса: лучистые и однородные. Первый класс включает формы, состоящие из отдельных лучей, совпадающих по направлению с геомагнитными силовыми линиями, второй

класс — формы, представляющие собой однородное диффузное свечение. Сияния с лучевой структурой обычно очень подвижны, однородные формы — спокойные.

Полярные сияния тесно связаны с ионосферными и геомагнитными возмущениями. Их исследования позволяют получать косвенные сведения о различных параметрах магнитосферы и заряженных частиц в ней. Продолжительность существования отдельных форм сияний меняется от нескольких секунд (лучистые формы) до нескольких часов (однородные формы).

Толщина (ширина) дуг заключена в интервале 1,5—23 км со средним значением 10 км; с ростом геомагнитной возмущенности толщина дуг растет. Толщина лучей составляет всего несколько сотен метров. Вертикальная протяженность у однородных дуг составляет ~30 км, у лучистых дуг ≥ 40 км, отдельных лучей ~100 км (иногда до нескольких сотен километров). Когда говорят о высоте полярного сияния, то обычно имеют в виду нижнюю границу свечения (рис. 60) [28]. На небе одновременно может находиться несколько дуг полярных сияний. Минимальное наблюдавшееся между ними расстояние ~10 км, максимальное ~200 км, наиболее вероятное 30—40 км.

Неоднократно наблюдались дуги, охватывающие по долготе 180° , т. е. простирающиеся на ~7 тыс. км. Эта величина, по-видимому, не может считаться предельной, так как вопрос о протяженности отдельных форм в интервале долгот $>180^\circ$ никем не исследовался. С ростом геомагнитного возмущения длина дуг уменьшается и нарушается их правильная форма.

Полярные сияния становятся видимыми невооруженным глазом, когда их яркость начинает превышать свечение ночного неба. Наиболее яркие сияния в 1000 раз превосходят по яркости свечение ночного неба. Международная четырехбалльная шкала яркости (табл. 8) основана на абсолютной интенсивности [33] эмиссии 5577 Å. За единицу измерений яркости принят релей, интенсивность свечения в один релей соответствует эмиссии 10^6 квантов, испускаемых в 1 сек в столбе атмосферы сечением 1 см^2 .

На рис. 61, взятом из [17], приведены обобщенные спектры высыпавшихся электронов по данным ракет и спутников отдельно для высоких и средних широт. В обоих случаях электроны с $E=1\div 10$ кэВ несут основную энергию потока, однако на авроральных широтах их интенсивность значительно выше.

Диффузная светящаяся поверхность



Однородная дуга



Полоса



Лучистая дуга



Луч



Пятно



Драпери



Корона

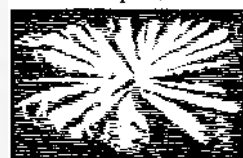


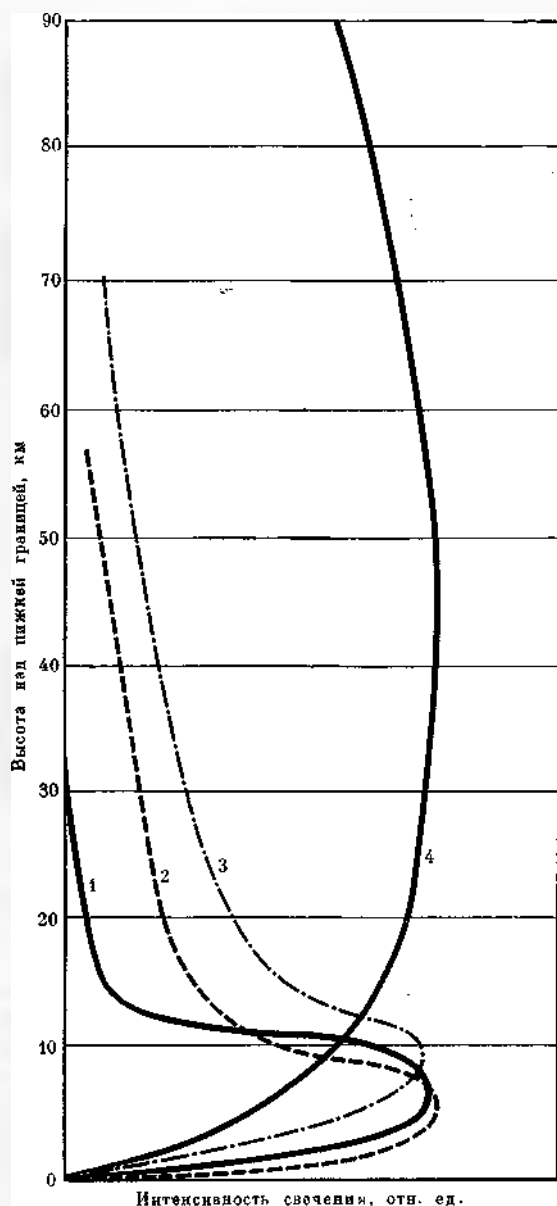
Рис. 59. Основные формы полярных сияний

Именно эти электроны наиболее эффективны в образовании полярных сияний и в ионизации на высотах слоя E.

Область пространства, в которой полярные сияния могут наблюдаться в данный фиксированный момент времени, представляет собой неправильное кольцо, асимметричное относительно геомагнитного полюса: на ночной стороне Земли кольцо проходит над широтами $\Phi \sim 67\div 68^\circ$, на дневной — над $\Phi \sim 75\div 77^\circ$ (рис. 62, а). Радиус кольца $18\text{--}19^\circ$ широты.

Таблица 8. Четырехбалльная шкала яркости

Яркость, баллы	I	II	III	IV
Интенсивность линии 5577 Å, КР	1	10	100	1000
Световой поток, эрг/см ² ·сек	0,01	0,1	1	10
Поток энергии частиц, эрг/см ² ·сек	3—5	30—50	300—500	3000—5000



Вероятность появления сияний в различное местное время вдоль всего кольца почти постоянна и в максимуме равна $\sim 0,8$ (незначительно уменьшается к дневному меридиану) [28].

Область широт, лежащую внутри кольца сияний, называют полярной шапкой. Вероятность появления сияний в полярной шапке не превышает 0,2. Обычно это слабое диффузное свечение или слабые, короткие и короткоживущие однородные дуги. Возникают и развиваются они обособленно от сияний полярного овала.

На рис. 62, б приведено типичное распределение форм сияний в полярном овале и полярной шапке в период умеренной суббури. В спокойное время сияния совсем не исчезают, но от всей этой картины может остаться одна тоненькая дуга на ночном участке овала и обычно группы разрозненных лучей — на дневном. Высота сияний меняется вдоль овала: наиболее вероятные значения высот равны 100, 125 и 150 км на ночном, вечернем и дневном участках соответственно. Относительно высоты утреннего участка точных данных пока нет; есть основания полагать, что она даже меньше, чем ночью.

На рис. 62, а изображено пространственное положение полярного овала. Рисунок дан для зимнего полушария, географическая ось совмещена с геомагнитной. Вероятность появления такого светящегося кольца равна $\sim 0,8$. Яркость сияний на дневном участке овала всегда меньше, это, по-видимому, обусловлено их большей высотой — свечение здесь возникает в менее плотных слоях атмосферы.

Все сказанное относится к электронным сияниям. Относительно протонных сияний сведений гораздо меньше. Можно лишь сказать, что они также располагаются в асимметричном кольце, но оно несколько смещено относительно кольца электронных сияний: в вечерние часы протонные сияния располагаются на более низких широтах, в утрен-

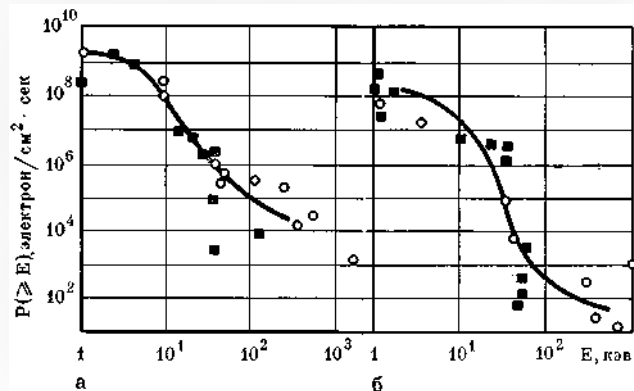


Рис. 60. Вертикальный разрез интенсивности свечения различных форм полярных сияний

- 1 — однородные дуги;
- 2 — лучистые дуги;
- 3 — лучистые полосы;
- 4 — лучи

Рис. 61. Обобщенный спектр высыпавшихся электронов

- а — на широтах экваториальной зоны;
- б — на средних широтах;
- кружки — данные спутников,
- квадраты — ракет

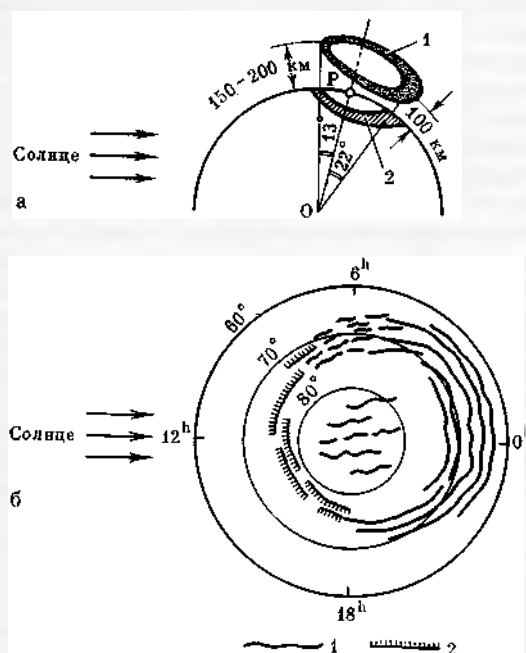


Рис. 62. Вид на Землю с вечерней стороны (а: 1 — кольцо сияний, 2 — проекция кольца на земную поверхность) и распределение форм сияний вдоль мгновенной зоны (б: 1 — однородные дуги, 2 — лучистые дуги)

ние — на более высоких. В районе полуночных часов происходит как бы перекрещивание этих двух колец.

Акасофу и его сотрудникам [32] удалось показать, что наиболее активные и яркие проявления полярных сияний возникают в полуночном секторе аврорального пояса. Система этих проявлений в целом подвержена повторяющимся крупномасштабным расширениям и сокращениям, которые могут выходить за пределы поля зрения одиночной станции. Такие случаи крупномасштабной авроральной активности, возникающие в ходе развития единого явления, были названы авроральными суббурами.

С авроральными суббурами тесно связаны магнитные возмущения. Акасофу и Чепмен [31] показали, что интенсивные авроральные суббури часто появляются на стадии развития главной фазы бури, а не во время спокойной начальной фазы. В период больших главных фаз геомагнитных бурь наблюдается значительное смещение авроральных дуг к экватору.

Помимо обычных полярных сияний, открыты не обнаружимые визуально полярные сияния двух других типов — субавроральные

красные дуги и свечение в области полярных шапок. Устойчивые красные дуги (6300 Å), не обнаружимые визуально, появляются в зоне средних широт в периоды геомагнитных бурь. Дуги располагаются в области F ионосферы, имеют протяженность по широте порядка 500 км и образуют магнитно-сопряженные полосы, по крайней мере для ночной половины Земли. Интенсивность дуг с ростом геомагнитной активности увеличивается.

Наблюдения эмиссии кислородной линии 6300 Å в верхней атмосфере Земли (>200 км) во время геомагнитных возмущений показали, что эмиссия в линии 6300 Å тесно связана с солнечной активностью. В частности, наблюдается тесная связь интенсивности линии 6300 Å и потока солнечного радиоизлучения $I_{10.7}$ на длине волны 10,7 см. Для достаточно больших геомагнитных возмущений ($D_{st} > 100 \gamma$) логарифм интенсивности эмиссии линии линейно связан с индексами D_{st} и $I_{10.7}$.

Свечение в области полярных шапок наблюдается в тесной связи с поглощением в полярных шапках (РСА). Эта форма полярного сияния обычно представляет собой интенсивное свечение, охватывающее всю полярную шапку; интенсивность свечения меняется в соответствии с изменениями потока солнечных космических лучей. Полярные сияния этого типа возникают на высотах 60—100 км, для их спектра характерно излучение в полосах молекулярного азота, блендируемое слабым водородным излучением с широким доплеровским профилем линии. Эти особенности показывают, что свечение в области полярных шапок обусловлено в первую очередь протонами солнечных космических лучей с энергиями 1—10 Мэв.

Поглощение в полярных шапках. Одним из первых следствий вторжения потока высокоэнергичных частиц от солнечных вспышек в земную атмосферу является РСА или, как его еще называют, блекаут полярных шапок [134]. Это поглощение обусловлено аномально большой ионизацией ионосферы в области полярных шапок потоком вторгшихся высокоэнергичных частиц с энергией 1—30 Мэв. Поглощение в полярной шапке начинается приблизительно через 1 час после вспышки и может продолжаться несколько дней. Главным ионизирующим агентом, ответственным за РСА во время вспышки балла 2В 13 мая 1967 г., в дневные часы были протоны с энергиями 10—20 Мэв, а в ночные — протоны с энергиями 5—10 Мэв. Поток протонов имел энергетический спектр $N(E) = kE^{-\gamma}$, где $\gamma = 2,2 \div 3,5$, $k = 2,7 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^6$, и достиг макси-

мальной величины у Земли на всех энергиях через 40 час. после вспышки. Кроме поглощения в полярных шапках, наблюдается еще авроральное поглощение (авроральный блекаут), причиной которого являются авроральные частицы (частицы, высыпавшиеся в авроральной области в период сильных геомагнитных возмущений).

Распределение РСА имеет форму круга с центром в геомагнитном полюсе, а распределение аврорального поглощения несколько иную форму, зависящую от конкретных условий геомагнитной активности. Во время сильной геомагнитной бури распределение аномальной ионизации имеет форму спирали, располагающейся вдоль пояса полярных сияний, причем наибольшая интенсивность ионизации относится к утреннему и полуденному секторам. Вместе с тем во время изолированного бухтообразного возмущения (полярная суббури) наибольшее усиление ионизации относится к полуденному сектору пояса полярных сияний. Авроральные блекауты, как правило, ассоциируются с видимыми проявлениями полярных сияний и локализованным высыпанием электронов и протонов с энергиями порядка нескольких кэв. Часто вместе с авроральными блекаутами появляется интенсивный спорадический слой E ионосферы, известный как авроральный слой E_s . Известно также, что во время внезапного начала бури возникает кратковременное внезапное усиление ионизации, обусловленное тормозным рентгеновским излучением от энергичных электронов, вторгающихся в более плотные слои атмосферы вдоль пояса полярных сияний [52].

Высыпание частиц в верхней атмосфере

Основная часть авроральных явлений обусловлена высыпанием энергичных частиц, которые удобно называть авроральными, т. е. ответственными за полярные сияния и связанные с ними явления. Со времени открытия радиационных поясов были предприняты широкие исследования связей между авроральными и захваченными энергичными частицами. В этом отношении значительный интерес представляет зона высыпания частиц.

В обзоре спутниковых результатов, относящихся к высыпанию частиц [111], сделан вывод о существовании двух зон высыпания. Зона I занимает область геомагнитных широт между 60 и 70°. В этой зоне высыпаются электроны с энергиями в основном более 10 кэв, причем довольно широкий максимум

высыпания приходится на утренне-полуденный сектор. Зона II в ночном секторе перекрывается с первой, а вблизи полудня смещается к полюсу на широты 75—80°. Электроны, вторгающиеся в эту зону, обладают меньшей энергией, чем в зоне I.

Высыпание частиц в зоне I имеет диффузный и стационарный характер и охватывает широкие области; высыпание в зоне II носит дискретный и импульсный характер, обычно локализовано в пространстве и подвержено быстрым и сильным флуктуациям. Все эти сведения, полученные как при прямых измерениях потоков частиц, так и косвенными методами (по высотам возникновения в ионосфере различных явлений), подсказывают, что явления в зоне I обусловлены потоками относительно жестких электронов, а в зоне II — потоками мягких электронов.

Линия пересечения внешней границы пояса захваченной радиации с ионосферой грубо совпадает с овалом полярных сияний и областью раздела между зонами I и II. Сопоставление положения внешней границы радиационного пояса с границей по модели геомагнитного поля в магнитосфере [148] показывает, что зона II соответствует вхождению силовых линий либо относящихся непосредственно к границе раздела семейств замкнутых и разомкнутых силовых линий, либо проходящих очень близко к ней. Иначе говоря, эта зона непосредственно связана с нейтральным в магнитном отношении слоем в геомагнитном хвосте Земли. Во время геомагнитных бурь местоположение зон высыпания в общем смещается к экватору. Изменения в зоне II особенно заметны во время авроральных суббурь и сопровождаются повторяющимися расширениями с последующими сокращениями ширины самого пояса.

Предполагается, что за видимые авроральные суббури ответственны авроральные частицы, представляющие собой интенсивные всплески потоков электронов с энергиями в основном меньше 10 кэв. Эти потоки соответствуют, возможно, «островкам» электронов, открытым в геомагнитном хвосте.

Помимо малоэнергичных авроральных частиц с энергиями менее 10 кэв, происходит высыпание и высокоэнергичных частиц с энергиями 10—100 кэв; это высыпание связано обычно с активными полярными сияниями вдоль пояса широт 60—70°. Некоторая доля этих частиц может быть высокоэнергичными частицами солнечной плазмы, однако основная часть является результатом ускорения в магнитосфере довольно близко к Земле.

Возможной причиной ускорения могут быть флуктуирующие электростатические поля вдоль силовых линий геомагнитного поля.

В меньших масштабах высыпание частиц происходит (постоянно и спорадически) и в умеренных широтах. Потоки электронов с энергией 1—10 кэВ на высотах 200—500 км днем достигают $\sim 0,3$ эрг/см²·сек, что составляет заметную (до 10%) долю от потока энергии коротковолнового излучения Солнца. На высотах ниже 150—200 км поток высыпавшихся электронов начинает ослабляться. Полная энергия потока электронов с $E \geq 1-3$ кэВ, измеренная во время советского эксперимента «Солнце — атмосфера» 18—23 апреля 1969 г., на высотах ≥ 125 км изменялась от 0,07 до 0,01 эрг/см²·сек-стер [17]. Впрочем, ряд ученых считают эти данные завышенными на один-два порядка. На высотах около 100 км зарегистрированный поток излучения был в 3—4 раза меньше, чем на высотах ~ 125 км. Энергетический спектр можно было аппроксимировать экспонентой $N \sim \exp(-E/E_0)$, $E_0 = 10-12$ кэВ. Поток электронов с $E > 40$ кэВ в области высот ~ 85 км испытывал значительные вариации в пределах 1—1,5 порядка величины, а также вариации энергетического спектра, особенно в области энергий 40—60 кэВ.

Быстрое (< 3 час.) уменьшение интенсивности электронов и протонов во внешнем радиационном поясе также обусловлено сбросом частиц во время магнитосферных суббурь. Гибель частиц при этом происходит во время магнитного возмущения типа $DP-1$ в области, где создается ток, ответственный за D_{st} -вариацию, во время начала формирования тока. На это указывает то, что необходимым условием быстрой гибели частиц является хорошее развитие вечернего ионосферного электроджета и наиболее сильное понижение поля на низких широтах в вечернем секторе Земли (18—24 часа местного времени). Во время магнитных бурь, когда усиливается D_{st} -вариация, быстрое понижение интенсивности захватывает более близкие к Земле L -оболочки.

В результате наблюдений было обнаружено, что полярные магнитные и авроральные суббури связаны с внезапным уменьшением поля геомагнитного хвоста. Это позволило предложить гипотезу, согласно которой авроральные явления вызываются частицами, ускоренными в нейтральном слое геомагнитного хвоста. Уменьшение поля геомагнитного хвоста можно представить в виде воссоединения (смыкания) силовых линий хвоста через

нейтральный слой. Происходящий при этом переход магнитной энергии хвоста в кинетическую энергию частиц может обеспечить нагрев частиц до энергий 1 кэВ и ускорение до 1—10 кэВ. Количественная теория аннигиляции магнитного поля хвоста применительно к деталям эффектов авроральных бурь пока отсутствует. Спорадичность авроральных бурь и спокойствие условий в периоды между последовательными явлениями, по-видимому, свидетельствуют об относительной кратковременности процесса аннигиляции поля в хвосте. Процесс этот может быть вызван развивающейся в плазме хвоста макронеустойчивостью, переход к которой определяется изменением параметров солнечного ветра.

Другая возможность может быть реализована при изменении направления внешнего магнитного поля, приводящем к нарушению равновесного состояния системы [132]. Наблюдения интенсивности потоков малоэнергичных электронов с $E_e > 100$ эВ на АМС «Луна-1», «Луна-2» [11], «Марс-1» [82] и спутнике «Эксплорер-12» на расстояниях, больших $8 R_0$, показывают, что положение потоков электронов большой интенсивности совпадает с началом сильной деформации поля хвоста в направлении от Солнца, измеренной на спутниках ИМП-1 и «Эксплорер-14». Наблюдаемый поток энергии электронов порядка десятков эрг/см²·сек (плотность энергии порядка 10^{-8} эрг/см³, если E_e порядка нескольких кэВ) представляется достаточным для поддержания нейтрального слоя, если напряженность поля в соседних областях составляет около 30 γ. Высокие интенсивности потоков электронов таких энергий могут служить еще одним указанием на то, что область хвоста является, по крайней мере частично, резервуаром или областью ускорения частиц полярных сияний.

Источники и передача энергии в магнитосфере

Основным источником энергии, ответственным за крупномасштабные возмущения в магнитосфере, является поток солнечной плазмы. Известно, что воздействие потока солнечной плазмы на магнитосферу может быть представлено нормальной и поперечной компонентами. Первая приводит к общему сжатию или возврату к исходному состоянию магнитосферной полости в потоке солнечной плазмы и, следовательно, является источником поля. Вторая влияет на общую форму

магнитосферы в основном лишь в том отношении, что приводит к формированию хвоста магнитосферы.

Диссипативные эффекты в магнитопаузе приводят к поперечным напряжениям в плазме магнитосферы, что обуславливает формирование геомагнитного хвоста с нейтральным слоем и системы конвекции плазмы в магнитосфере [38]. Имеются основания считать, что поля DP и связанные с ними возмущения возникают в основном в результате процессов в геомагнитном хвосте. Теории, объясняющие депрессию поля в период главной фазы бурь (поле DP), все еще носят спорный характер. По существу, механизм, посредством которого энергия солнечной плазмы передается кольцевому току, расположенному глубоко внутри магнитосферы, остается неизвестным.

Полная энергия средней геомагнитной бури оценивается 10^{22} — 10^{23} эрг [74]. Диссипация энергии происходит в трех формах: а) образование полярных сияний $\sim 10^{18}$ эрг/сек; б) нагрев ионосферы $\sim 10^{18}$ эрг/сек; в) разрушение магнитосферы (кольцевые токи) $\sim 10^{18}$ — 10^{19} эрг/сек.

Энергия кольцевых токов в конечном счете диссипирует в ходе фазы восстановления, которая может длиться несколько дней, однако введение энергии должно осуществляться за несколько часов. Таким образом, любая теория магнитных бурь и полярных сияний должна быть способной объяснить перенос через магнитопаузу по меньшей мере 10^{18} — 10^{19} эрг/сек. С другой стороны, так как поток энергии солнечной плазмы составляет, как полагают, 1 — 10 эрг/см²·сек, полный приток энергии по всей поверхности магнитосферы ($R \sim 20R_0$) оценивается 10^{22} эрг/сек. Поэтому от солнечной плазмы к плазме магнитосферы должно передаваться примерно 10^{-3} — 10^{-4} всего притока энергии.

Передача энергии внутрь магнитосферы может быть осуществлена за счет: 1) деформации магнитосферы, обуславливаемой давлением среды (что приводит к генерации магнитогидродинамических волн и нагреву тепловой магнитосферной плазмы); 2) прямой инжекции энергии; 3) механизма пересоединения магнитных силовых линий межпланетного и геомагнитного полей с последующим образованием магнитного хвоста Земли, ответственного, как полагают, за многие магнитные возмущения; 4) механизма вязкого взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой. Большой вклад в геомагнитную активность могут дать флуктуации магнитосферного кольцевого тока и токов ионосферы, неустой-

чивость магнитопаузы и неустойчивости и ускорительные процессы внутри самой магнитосферы и т. д. [42, 38]. Нужно отметить, что в настоящее время экспериментальные данные и теоретический анализ пока еще не позволяют определенно отдать предпочтение той или иной теории или механизму передачи энергии межпланетной среды внутрь магнитосферы.

Радиационные условия около других планет солнечной системы

Радиационные условия около планет солнечной системы определяются в значительной степени наличием или отсутствием какого-либо собственно-магнитного поля планеты. Это же поле, если оно существует, обуславливает характер взаимодействия солнечного ветра с данной планетой.

Характеристики планет солнечной системы и Луны вместе с некоторыми характеристиками солнечного ветра около этих тел приведены в табл. 9.

При заполнении таблицы предполагалось, что радиус гелиосферы 40 а.е., а конвективная скорость солнечного ветра равна 400 км/сек.

В тех случаях, когда неизвестны магнитное поле или свойства ионосферы планеты, в качестве размеров магнитопаузы приведен диаметр планеты. Для Венеры и Марса эффективный диаметр магнитопаузы определяется по измерениям ударной волны и является верхним пределом измеряемой величины. Для Юпитера эта величина получена из радиоастрономических наблюдений.

Луна. Наблюдениями установлено, что около Луны отсутствуют радиационные пояса, а попытка определить постоянное магнитное поле привела к значениям магнитного момента Луны, равного 10^{-6} от магнитного момента Земли. Это означает, что радиационные условия на поверхности Луны полностью определяются радиацией в межпланетной среде с учетом геометрической экранировки телом Луны. Ударная волна около Луны отсутствует, а обтекание солнечного ветра достаточно хорошо описывается гидродинамическими уравнениями. Луна не оказывает существенного влияния на характеристики солнечного ветра [144].

Можно ожидать, что аналогичный характер взаимодействия солнечного ветра с планетой имеет место в случае Урана, Плутона и Нептуна.

Венера. Около Венеры также отсутствуют радиационные пояса, что свидетельствует о малой величине собственного магнитного поля

Таблица 9. Характеристики планет солнечной системы и Луны, а также характеристики солнечного ветра

Характеристика	Небесное тело									
	Меркурий	Венера	Земля	Луна	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
Радиус, тыс. км	2,42	6,08	6,38	1,74	3,38	71,35	60,40	23,80	22,20	3,00
Расстояние от Солнца, а.е.	0,39	0,72	1,0	1,0	1,52	5,2	9,5	19,2	30,0	39,4
Дипольный момент, $M_{\text{планеты}}/M_{\text{З}}$?	$2 \cdot 10^{-3}$	1	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^5$?	?	?	?
Скорость солнечного ветра, км/сек	300	350	400	400	400	400	400	400	400	400
Плотность протонов, см $^{-3}$	34,0	9,5	5,0	5,0	2,1	0,19	0,055	0,018	0,006	0,003
Средняя температура протонов T , 10^4 °K	6,9	4,7	4,0	4,0	3,2	1,8	1,3	0,92	0,73	0,64
Магнитное поле, гамма	24,7	8,26	5,00	5,00	3,12	1,72	0,39	0,19	0,12	0,09
Угол архимедовой спирали, град	30	42	47	47	59	80	84	87	88	89
Диаметр магнитопаузы, тыс. км	4,84	30,4	268,0	1,74	18,0	34 000	120,8	47,6	44,4	6,0

планеты [8, 141]. Детальное рассмотрение данных по магнитному полю показывает, что поле вплоть до высоты ~ 200 км над поверхностью планеты является межпланетным магнитным полем и магнитный момент Венеры составляет $M_V \leq 10^{-4}$ от магнитного момента Земли. Однако около Венеры наблюдается ударная волна, что, очевидно, связано с существованием у этой планеты плотной ионосферы. Высокая проводимость ионосферной плазмы не дает возможности проникнуть межпланетному магнитному полю до поверхности планеты; таким образом, образуется препятствие, обуславливающее существование ударной волны в потоке солнечного ветра.

Марс. Радиационные пояса отсутствуют и у этой планеты. Оценка величины магнитного момента Марса приводит к значению $2 \cdot 10^{-4}$ от момента Земли. Около планеты наблюдается ударная волна в солнечном ветре, что, по видимому, так же, как и у Венеры, связано с наличием у Марса небольшой ионосферы [3].

Юпитер. Было обнаружено, что у этой планеты имеются сильные источники дециметрового и декаметрового радиоизлучений. Анализ показал, что дециметровое излучение поляризовано и по характеру напоминает синхротронное излучение релятивистских электронов. Числовые оценки привели к следующим значениям: если магнитное поле имеет величину ~ 1 гс, то для энергий электронов 2,5—25 Мэв их поток должен быть равен $\sim 5 \cdot 10^7$ электрон/см 2 ·сек, при поле 0,1 гс и энергии 10—100 Мэв поток электронов дол-

жен быть равен $\sim 5 \cdot 10^8$ электрон/см 2 ·сек [103]. Анализ декаметрового излучения приводит к оценке магнитного момента Юпитера, в 10^4 раз превосходящего магнитный момент Земли. Таким образом, около этой планеты, вероятно, существуют самые сильные в солнечной системе радиационные пояса и магнитосфера. Характер динамики радиационных поясов, видимо, имеет ту же природу, что и у Земли, однако может быть усложнен взаимодействием планет со своими спутниками. Магнитосфера Юпитера, очевидно, напоминает магнитосферу Земли с расстоянием до магнитопаузы $\sim 4 \cdot 10^6$ км [122].

Космический зонд «Пионер-10»¹, приближившийся к планете в декабре 1973 г., обнаружил магнитосферу, простирающуюся до расстояний 96 R_J (угол подхода к планете составил с линией Юпитер — Солнце величину 35°) [62]. Стоячая ударная волна и переходная область регистрировались при этом с расстояний 109 R_J . Внутри магнитосферы наблюдается дискообразное распределение заряженных частиц в магнитном поле, похожем на поле в хвосте магнитосферы Земли. На расстояниях от 96 до 25 R_J поле имеет величину $\sim 5 \gamma$ и слабо меняется, несколько возрастая на участке от 50 до 25 R_J , где его напряженность достигает значений $\sim 20 \gamma$. При этом потоки электронов 0,4—1,0 Мэв имеют величины от 10^3 до 10^5 частиц/см 2 ·сек.

¹ Более подробно результаты исследований, проведенные на «Пионере-10», изложены в главе 5, раздел «Юпитер».

а потоки протонов с энергией от 5,6 до 21 Мэв составляют величину $1-10^2$ частиц/см²·сек. Частицы заключены в тонком слое около экватора.

С расстояний $\sim 20 R_J$ магнитное поле начинает существенно возрастать при приближении к планете и носит дипольный характер. Его напряженность увеличивается до значений $\sim 0,2$ гс на $2,8 \cdot R_J$. Внутри этой области, представляющей собой, по существу, радиационные пояса Юпитера, интенсивность потоков частиц быстро увеличивается: на расстояниях $\sim 5 R_J$ интенсивность потоков электронов с $E > 3$ Мэв достигает $5 \cdot 10^8$ см⁻²·сек⁻¹, а с энергией $E > 50$ Мэв равна 10^7 см⁻²·сек⁻¹, потоки протонов с $E > 50$ Мэв на этих расстоя-

ниях составляют $4 \cdot 10^6$ см⁻²·сек⁻¹. Пространственное распределение различных спектральных компонент частиц достаточно сложное и, по-видимому, связано с тем фактом, что эти частицы взаимодействуют со спутниками Юпитера — Ио, Европой и Ганимедом.

Авторы считают своим долгом отметить большой труд, внесенный Дж. Ван Алленом в предварительную подготовку данных настоящего обзора, а также сердечно благодарят С. Л. Мандельштама, Ю. И. Гальперина, К. И. Грингауза, О. Л. Вайсберга, К. Г. Иванова, Т. Н. Назарову, Е. В. Горчакову, С. Н. Кузнецова и Г. Б. Лопатину за помощь в составлении обзора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонова А. Е., Шабанский В. П. О структуре геомагнитного поля на больших расстояниях от Земли. Геомагнетизм и аэрномия, 1968, 8, 801.
2. Брюнелли Б. Е. Процессы в ближнем космическом пространстве и геомагнитные возмущения. Труды 5-й Всесоюзной ежегодной зимней школы по космофизике. Апатиты, 1968, 212.
3. Вайсберг О. Л., Богданов А. В. О структуре и вариациях в области взаимодействия солнечного ветра с планетой Марс. Препринт ИКИ АН СССР, 1974.
4. Вернов С. Н., Вакулов П. В., Горчаков Е. В., Курт В. Г., Лозачев Ю. И., Любимов Г. П., Тимофеев Г. А. О характере распространения быстрых частиц в межпланетном пространстве на разных стадиях возрастных потоков солнечных космических лучей. Труды Международного семинара по проблеме «Генерация космических лучей на Солнце». Ленинград, 1970. М., Изд-во МГУ, 1971, стр. 66.
5. Вернов С. Н., Вакулов П. В., Лозачев Ю. И. Радиационные пояса Земли. В сб. «Успехи Советского Союза в исследовании космического пространства». М., «Наука», 1968, стр. 106.
6. Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И. Происхождение космических лучей. М., Изд-во АН СССР, 1963.
7. Гневышев М. Н. Об 11-летнем цикле солнечной активности. УФН, 1966, 90, № 2, 291.
8. Грингауз К. И., Безруких В. В., Мусатов Л. С., Бреус Т. К. Плазменные измерения, проведенные вблизи Венеры на космическом аппарате «Венера-4». Космические исследования, 1968, 6, 411.
9. Грингауз К. И., Безруких В. В., Озеров В. Д., Рыбчинский Р. Е. Изучение межпланетного ионизированного газа, энергичных элементов и корпускулярного излучения Солнца при помощи трех электродных ловушек заряженных частиц на второй советской космической ракете. Докл. АН СССР, 1960, 131, 1301.
10. Грингауз К. И., Безруких В. В., Хохлов М. З., Мусатов Л. С., Ремизов А. П. Признаки пересечения Луной хвоста магнитосферы Земли по данным ловушек заряженных частиц на переносимом искусственном спутнике Луны. Докл. АН СССР, 1966, 170, 570.
11. Грингауз К. И., Курт В. Г., Мороз В. И., Шкловский И. С. Результаты наблюдений, полученные при помощи ловушек заряженных частиц на советских космических ракетах до $h = 100\,000$ км. Астрон. ж., 1960, 37, 716.
12. Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузов Л. Н., Жулин И. А. Возможная интерпретация результатов измерения на окололунном спутнике «Луна-10». Геомагнетизм и аэрномия, 1967, 7, № 3, 436.
13. Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузов Л. Н., Пушков Н. В. Измерения магнитного поля в окрестности Луны на искусственном спутнике «Луна-10». Докл. АН СССР, 1966, 170, 574.
14. Дорман Л. И. Вариации космических лучей и исследование космоса. М., Изд-во АН СССР, 1963.
15. Железняков В. В. Радиационное Солнца и планет. М., «Наука», 1964.
16. Иванов-Холодный Г. С., Казачевская Т. В., Кожин Г. А., Михневич В. В. Исследование атмосферы и ионосферы в период повышенной солнечной активности. Л., Гидрометеиздат, 1970.
17. Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М. Солнце и ионосфера. М., «Наука», 1969.
18. Исаев С. И. Морфология полярных сияний. Л., «Наука», 1968.
19. Красовский В. И. Штили и штормы в верхней атмосфере. М., «Наука», 1971.
20. Кузнецов С. Н., Теерской Б. А. Монотонное уменьшение интенсивности электронов в радиационных поясах Земли. Геомагнетизм и аэрномия, 1971, 11, № 1, 3.
21. Сб. «Радиационное Солнца». ЛГУ, 1969, № 1.
22. Слыш В. И. Наблюдения радиационного Солнца на длинных волнах с помощью ИСЛ «Луна-11» и «Луна-12». Космические исследования, 1967, 5, вып. 6, 897.
23. Солнечные данные, бюллетень. Л., «Наука».
24. Сыроватский С. И. О возникновении токовых слоев в плазме с вмороженными сильными магнитным полем. ЖЭТФ, 1971, 60, 1727.

25. Тверской Б. А. Динамика радиационных поясов Земли. М., «Наука», 1968.
26. Физика верхней атмосферы. Под ред. Г. С. Иванова-Холодного. Л., Гидрометеоиздат, 1971.
27. Физика верхней ионосферы. Под ред. Дж. Ретклифа. М., Физматгиз, 1963.
28. Хорошева О. В. Пространственно-временное распределение полярных сияний. В сб. «Полярные сияния», № 16. М., «Наука», 1967.
29. Чаракчян А. Н., Тулинов В. Ф., Чаракчян Т. Н. Энергетический спектр и зависимость от времени интенсивности протонов космических лучей от Солнца. ЖЭТФ, 1961, 41, № 3, 735.
30. Aerospace Daily, 1972, 58, N 8, 62.
31. Akasofu S. I. Magnetic Storms: The Simultaneous Development of the Main Phase (DR) and of Polar Magnetic Substorms (DP). J. Geophys. Res., 1963, 68, N 10, 3155.
32. Akasofu S. I. The Development of the Auroral Substorm. Planet. Space Sci., 1964, 12, 273.
33. Akasofu S. I. Polar and Magnetospheric Substorms. Holland, D. Reidel Publ. Comp., 1968. Русский перевод: Акасофу С. И. Полярные и магнитные суббури. М., «Мир», 1971.
34. Alfven H., Fälthammar G. G. Cosmical Electrodynamics. Oxford, Clarendon Press, 1963. Русский перевод: Альвен Г., Фальтхаммар К. Г. Космическая электродинамика. М., «Мир», 1967.
35. Anderson K. A. Electrons and Protons in Long-Lived Streams of Energetic Solar Particles. Solar Phys., 1969, 6, 111.
36. Arnoldy R. L., Kane S. R., Winkler J. R. Energetic Solar Flare X-Rays Observed by Satellite and Their Correlation with Solar Radio and Energetic Particle Emission. Astrophys. J., 1968, 151, N 2, pt 1, 711.
37. Athay R. G. Sources of Solar Ultraviolet Radiation. J. Geophys. Res., 1961, 66, N 2, 385. Русский перевод: Ультрафиолетовое излучение Солнца и межпланетная среда. М., ИЛ, 1962.
38. Axford W. I. Viscous Interaction between the Solar Wind and the Earth's Magnetosphere. Planet. Space Sci., 1964, 12, 45.
39. Bame S. I., Hundhausen A. I., Asbridge J. K., Strong I. B. Solar Wind. Ion Composition. Phys. Rev. Letters, 1968, 20, 393.
40. Barby D. Introduction to the Study of the Aurora and Airglow. In: Geophysics. The Earth's Environment. C. D. Witte, J. Hieblot, A. L. Lebeau (Eds.). N. Y., Gordon and Breach Sci. Publ., 1961. Русский перевод: Барбье Д. Введение в изучение полярных сияний и изучение атмосферы. В сб. «Геофизика. Околоземное космическое пространство». М., «Мир», 1964, стр. 182.
41. Barouch E., Engelmann J., Gros M., Koch L., Masse P. Interrelated Satellite. Observation Related to Solar Events. Holland, Dordrecht, D. Reidel Publ., p. 448.
42. Beard D. B. The Interaction of the Terrestrial Magnetic Field with the Solar Corpuscular Radiation. J. Geophys. Res., 1960, 65, 3559.
43. Behannon K. W. Mapping of the Earth's Bow Shock and Magnetic Tail by Explorer 32. J. Geophys. Res., 1968, 73, 907.
44. Bernstein W., Fredericks R. W., Scarf F. L. A Model for a Broad Disordered Transition between the Solar Wind and the Magnetosphere. J. Geophys. Res., 1964, 69, 1201.
45. Bierman L. Kometenschweife und Solar Corpuskularstrahlung. Z. Astrophys., 1951, 29, 274.
46. Bierman L. Über den Schweifes-Kometen Halley in Jahre, 1910. Z. Naturforsch., 1952, 7a, 127.
47. Biswas S., Fichel C. E., Guss D. E. Study of the Hydrogen, Helium and Heavy Nuclei in the Nov. 12 1960 Solar Cosmic Event. Phys. Rev., 1962, 128, 2756.
48. Biswas S., Fichel C. E., Guss D. E., Waddington C. I. Hydrogen, Helium and Heavy Nuclei from the Solar Event in Nov. 15 1960. J. Geophys. Res., 1962, 68, 3109.
49. Bonnet R. M. Stigmatic Spectra of the Sun between 1800 Å and 2800 Å. Space Res., 1968, 8, 458.
50. Bonetti A., Bridge H. S., Lasarus A. J., Rossi B., Scherb F. Explorer 10 Plasma Measurements. J. Geophys. Res., 1963, 68, 4017.
51. Brandt J., Hodge P. Solar System Astrophysics. N. Y., McGraw Hill Co., 1964. Русский перевод: Брандт Дж., Ходж П. Астрофизика солнечной системы. М., «Мир», 1967.
52. Brown R. R. Electron Precipitation in the Auroral Zone. Space Sci. Rev., 1966, 5, 311.
53. Bryant D. A., Cline J. J., Desai U. D., McDonald F. B. Studies of Solar Protons with Explorers XII and XIV. Astrophys. J., 1965, 141, 478.
54. Burlaga L. F. Anisotropic Diffusion of Solar Cosmic Rays. J. Geophys. Res., 1967, 72, 4449.
55. Burlaga L. F. Nature and Origin of Directional Discontinuities in the Solar Wind. J. Geophys. Res., 1971, 76, 4360.
56. Burlaga L. F., Ness N. F. Macro and Micro Structure of the Interplanetary Magnetic Fields. Canad. J. Phys., 1968, 46, 5962.
57. Cahill L. J., Amazeen P. G. The Boundary of the Geomagnetic Field. J. Geophys. Res., 1963, 68, N 7.
58. Chamberlain J. W. Physics of the Aurora and Airglow. N. Y., Acad. Press, 1961. Русский перевод: Чемберлен Дж. Физика полярных сияний и изучение атмосферы. М., ИЛ, 1963.
59. Chapman S. Solar Plasma, Geomagnetism and Aurora. In: Geophysics. The Earth's Environment. C. D. Witt, J. Hieblot, A. Lebeau (Eds.). N. Y., Gordon and Breach Sci. Publ., 1963. Русский перевод: Чепмен С. Геофизика. Околоземное космическое пространство. М., «Мир», 1964.
60. Chapman S., Ferraro V. C. A. A New Theory of Magnetic Storm. Terr. Magn. Atmos. Electr., 1931, 36, 77.
61. Cline J. L., McDonald F. B. Relativistic Electrons from Solar Flares. NASA, G.S.F.C. Publ., 1970.
62. Collected Reports on Pioneer 10. Science, 1974, 183.
63. Colombo C., Shapiro I. I., Lautman D. A. The Earth's Dust Belt: Fact or Fiction? 1. Lunar Ejecta. J. Geophys. Res., 1966, 71, 5705.
64. Colombo C., Shapiro I. I., Lautman D. A. The Earth's Dust Belt: Fact or Fiction? 3. Lunar Ejecta. J. Geophys. Res., 1966, 71, 5719.
65. Coon J. The Measurement of the Particles in the

- Solar Wind and in the Outer Magnetosphere by the Vela Satellites. Radiation Trapped in the Earth's Magnetic Field. B. M. McCormac (Ed.). Holland, D. Reidel Publ. Co., 1966. Русский перевод: Кун Дж. Х. Измерение частиц в солнечном ветре и далекой магнитосфере Земли со спутников «Вела». В сб. «Солнечно-земная физика», М., «Мир», 1968, стр. 353.
66. Davis L., Chang D. B. On the Effect of Geomagnetic Fluctuation on Trapped Particles. *J. Geophys. Res.*, 1962, 67, 2169.
 67. De Jager C. Structure and Dynamics of the Solar Atmosphere. *Handbuch Der Physik*, Bd. 52. Berlin, Springer-Verlag, 1959. Русский перевод: Де Ягер К. Строение и динамика атмосферы Солнца. М., ИЛ, 1962.
 68. Dohnanyi J. S. On the Origin and Distribution of Meteoroids. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 3468.
 69. Ellison M. A. The Sun and Its Influence. London, Routledge, 1955. Русский перевод: Эллисон М. А. Солнце и его влияние на Землю. Перевод с англ. под ред. И. С. Шкловского. М., Физматгиз, 1959.
 70. Erickson J. E. Mass Influx and Penetration Rate of Meteor Streams. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, 576.
 71. Fairfield D. H. Average Magnetic Field Configuration of the Outer Magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 1968, 73, 7329.
 72. Fisk J. A., Axford W. I. Anisotropies of Solar Cosmic Rays. *Solar Phys.*, 1969, 7, 486.
 73. Frank L. A. Inward Radial Diffusion of Electrons of Greater than 1.6 Million Electron Volts in the Outer Radiation Zone. *J. Geophys. Res.*, 1965, 70, 3533.
 74. Frank L. A. On the Extraterrestrial Ring Current during Geomagnetic Storms. *J. Geophys. Res.*, 1967, 72, 3753.
 75. Freeman J. W., Van Allen J. A., Cahill L. J. Explorer 12 Observations of the Magnetospheric Boundary and the Associated Solar Plasma on September 13 1961. *J. Geophys. Res.*, 1963, 68, 2121.
 76. Fritz T. A., Williams D. J. Initial Observations of Geomagnetically Trapped Alpha Particles at the Equator. Space Environment Lab., Boulder, Colorado, June 1972. Preprint.
 77. Froman M. A. The Equilibrium Anisotropy in the Flux of 10-Mev Solar Flare Particles and Their Convection in the Solar Wind. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 3147.
 78. Gleeson K. J., Axford W. I. The Compton-Getting Effect. *Astrophys. Space Sci.*, 1968, 2, N 4, 431.
 79. Gnevyshev M. N. On the 11-Year Cycle of Solar Activity. *Solar Phys.*, 1967, N 1, 107.
 80. Gold T. Plasma and Magnetic Fields in the Solar System. *J. Geophys. Res.*, 1969, 64, 1665.
 81. Gringauz K. I. Some Results of Experiments in Interplanetary Space by Means of Charged Particle Traps on Soviet Space Probes. *Space Res.*, 1961, 2, 539.
 82. Gringauz K. I., Bezrukh V. V., Musatov J. S. et al. Measurements Made in the Earth's Magnetosphere by Means of Charged Particle Traps Aboard the «Mars-1» Probe. *Space Res.*, 1964, 4, 621.
 83. Gringauz K. I., Troitskaya V. A., Solomatin E. K., Shchepetnov R. V. Variations of the Solar Wind Flux Observed with Venera 2, 4, 5 and 6, and Pulsations of the Geomagnetic Field Connected with Them. *Internat. Sympos. Solar-Terrestrial Phys. Program and Abstrs*, Leningrad, USSR, 11–20 May 1970.
 84. Haffner J. W. Space Radiation and Shielding.
 85. Hess W. N. Radiation Belt and Magnetosphere. Waltham, Mass. Blaisdell Publ. Co., 1968. Русский перевод: Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера. М., Атомиздат, 1972.
 86. Hinteregger H. E., Hall J. A. Solar Extreme Ultraviolet Emission in the Range 260–1300 Å Observed from OSO-III. *Solar Phys.*, 1969, 6, N 2, 175.
 87. Hirschberg J., Alcane A., Colburn D. S., Bame S., Hundhausen A. J. Observations of Solar Flare Reduced Interplanetary Shock and Helium Enriched Driven Gas. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 1.
 88. Hundhausen A. J. Composition and Dynamics of the Solar Wind Plasma. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1970, 8, 729.
 89. Jokipii J. R., Parker E. N. Stochastic Aspects of Magnetic Lines of Force with Application to Cosmic Ray Propagation. *Astrophys. J.*, 1969, 155, 777.
 90. Lautman D. A., Shapiro I. I., Colombo C. The Earth's Dust Belt: Fact or Fiction? Sunlight Pressure Air Drag Capture. *J. Geophys. Res.*, 1966, 71, 5763.
 91. Lin R. P. The Emission and Propagation of ~40 keV Solar Flare Electrons. *Solar Phys.*, 1970, 12, 266.
 92. Lin R. P., Kahler S. W., Roelof E. C. Solar Flare Injection and Propagation of Low Energy Protons and Electrons in the Event of 7–9 July 1966. *Solar Phys.*, 1968, 4, N 3, 338.
 93. Malitson H. H. The Solar Energy Spectrum. *Sky and Telescope*, 1965, 29, N 3, 162.
 94. Mazets E. P. Cosmic Dust and Meteor Showers. *Space Res.*, 1971, 11, 362.
 95. McCracken K. G., Ness N. F. The Collimation of Cosmic Rays by the Interplanetary Magnetic Field. *J. Geophys. Res.*, 1966, 71, 3315.
 96. McCracken K. G., Palmira R. A. R., Bukato R. P., Rao U. R., Allum F. R., Heath E. P. A Co-Rotating Solar Cosmic Ray Enhancement Observed by Pioneer 8 and Explorer 34 on July 13, 1968. Rept 11th Internat. Conf. Cosmic Rays, Budapest, Aug. 25–Sept. 4 1969.
 97. McCracken K. G., Rao U. R., Bukata R. P. Cosmic Ray Propagation Processes. *J. Geophys. Res.*, 1967, 72, 4293.
 98. McCracken K. G., Rao U. R., Bukata R. P., Heath E. P. The Decay Phase of Solar Flare Events. Preprint, 1971.
 99. McIlwain C. E. Coordinates for Mapping the Distribution of Magnetically Trapped Particles. *J. Geophys. Res.*, 1961, 66, 368.
 100. McKinnon J. A. August 1972 Solar Activity and Related Geophysical Effects. NO AAA Techn. Memorandum, ERL SEL-22. Boulder, Colorado, USA, 1972.
 101. Menzel D. H. Our Sun. Cambridge, Mass., Harvard Univ. Press, 1959. Русский перевод: Мензель Д. Наше Солнце. М., Физматгиз, 1963.

102. *Meyer P.* Cosmic Rays in Galaxy. Annual Rev. Astron. and Astrophys., 1969, 7.
103. *Michaux C. M.* Handbook of the Physical Properties of the Planet Jupiter. NASA. Washington, 1967.
104. *Mitra S. K.* The Upper Atmosphere. Calcutta, 1952. Русский перевод: *Митра С. К.* Верхняя ионосфера. М., ИЛ, 1955.
105. *Ness N. F.* Measurements of the Magnetic Fields in Interplanetary Space and the Magnetosphere. Proc. 9th Internat. Conf. Cosmic Rays. London, v. 1. Inst. Phys. and Phys. Soc. London, 1966, p. 14.
106. *Ness N. F.* Simultaneous Measurements of the Interplanetary Magnetic Field. J. Geophys. Res., 1966, 71, 3319.
107. *Ness N. F.* The Interaction between Solar Wind and Geomagnetic Field during Quiet Periods. Rept. Inter-Union Sympos. Solar-Terrestrial Phys., Belgrade, Aug. 1966. Русский перевод: *Несс Н. Ф.* Взаимодействие солнечного ветра с геомагнитным полем в спокойных условиях. В сб. «Солнечно-земная физика». Труды симпозиума, август-сентябрь 1966 г. Белград. М., «Мир», 1968, стр. 115.
108. *Ness N. F., Behannon K. W., Cantarano S. C., Seearce C. S.* Observations of the Earth's Magnetic Tail and Neutral Sheet at 510.000 Kilometers by Explorer 33. J. Geophys. Res., 1967, 72, 927.
109. *Ness N. F., Wilcox J. M.* Extension of the Photospheric Magnetic Field into Interplanetary Space. Astrophys. J., 1966, 143, 23.
110. *Obayashi T.* The Interaction between Solar Wind and Geomagnetic Field during Active Periods. Rept. Inter-Union Sympos. Solar-Terrestrial Phys., Belgrade, Aug. 1966. Русский перевод: *Обаяши Т.* Взаимодействие солнечного ветра с геомагнитным полем при возмущенных условиях. В сб. «Солнечно-земная физика». М., «Мир», 1968, стр. 172.
111. *O'Brien B. J.* Rocket and Satellite Observations of Energetic Particles during P. C. A. Events. Space. Res., 1967, 7(2), 806.
112. *Palmeira R. A. R., Allum F. R., McCracken K. G., Rao U. R.* Low Energy Solar Protons and Electrons Propagation in the Interplanetary Space. Proc. Internat. Seminar Solar Cosmic Ray Generation. Moscow, 1971, p. 76.
113. *Parker E. N.* Dynamics of the Interplanetary and Magnetic Fields. Astrophys. J., 1958, 128, 664.
114. *Parker E.* Geomagnetic Fluctuations and the Form of the Outer Zone of the Van Allen Radiation Belt. J. Geophys. Res., 1960, 65, 3117.
115. *Parker E. N.* Interplanetary Dynamical Processes. Intersci. Publ. N. Y., John Wiley and Sons, 1963.
116. *Parker S. N.* Solar Wind Interaction with the Geomagnetic Field. Revs Geophys., 1969, 7, 3.
117. *Pounds K. A.* Recent Solar X-Ray Studies in the United Kingdom. Ann. Astrophys., 1965, 28, N 1, 132.
118. Quarterly Bulletin on Solar Activity IAU. Zurich.
119. Report of IAU, August 1966.
120. *Roederer J. G.* Quantitative Models of the Magnetosphere. Revs. Geophys., 1969, 7, 77.
121. *Roederer J. G.* Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation. Berlin, Springer-Verlag, 1970. Русский перевод: *Редерер Х.* Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем. М., «Мир», 1972.
122. *Scarf E. L.* Characteristics of the Solar Wind Near the Orbit of Jupiter. Planet. Space Sci., 1969, 17, 595.
123. *Schatten K. H., Wilcox J. M., Ness N. F.* A Model of Interplanetary and Coronal Magnetic Fields. Solar Phys., 1969, 6, 442.
124. *Shapiro I. I., Lautman D. A., Colombo C.* The Earth's Dust Belt: Fact or Fiction? 1. Forces Perturbing Dust Particle Motion. J. Geophys. Res., 1966, 71, 5695.
125. *Chapiro M. M., Silberberg R.* Heavy Cosmic Ray Nuclei. Annual Rev. Nuclei Sci., 1970, 20.
126. *Simpson J. A.* Galactic Sources and the Propagation of Cosmic Rays. 12th Internat. Conf. Cosmic Rays, Australia. Hobart, Tasmania, 1971.
127. *Smith G.* Radio Astronomy. London, Penguin Books, 1960. Русский перевод: *Смит Г.* Радиоастрономия. Перевод с англ. под ред. В. В. Виткевича. М., ИЛ, 1962.
128. *Smith H., Smith E.* Solar Flares. N. Y., McMillan Co., 1963. Русский перевод: *Смит Г., Смит Э.* Солнечные вспышки. Перевод с англ. под ред. А. Б. Северного. М., «Мир», 1966.
129. Solar-Geophysical Data. U. S. Dept. Commerce, Boulder, Colorado.
130. Solar-Geophysical Data, ESSA, Res. Lab., Boulder, Colorado, 1966—1970.
131. Solar Wind. C. P. Sonett and J. M. Wilcox (Eds.). NASA, Washington, 1972.
132. *Sonneup B. U. O.* On the Stability of the Closed Magnetosphere. J. Geophys. Res., 1965, 70, 1051.
133. *Speiser T. W., Ness N. F.* The Neutral Sheet in Geomagnetic Tail, Its Motion, Equivalent Currents and Field Line Connection Through. It. J. Geophys. Res., 1967, 72, 131.
134. *Sweska Z.* PCA Events and Forbush Effects. Inter-Union Sympos. Solar-Terrestrial Phys., Belgrade, Aug. 1966. Русский перевод: Поглощение радиоволн в полярной шапке. Перевод с англ. под ред. Я. И. Фельдштейна. М., «Мир», 1965.
135. *Syrovatskii S. I.* The Formation of Polar and Equatorial Condensations of Plasma in the Proximity of a Changing Magnetic Dipole. Astrophys. Space Sci., 1969, 4, 246.
136. *Tousey P.* Spectroscopy of the Sun-UV. Space Astrophysics. W. Lillier (Ed.). N. Y., McGraw Hill Co., 1961. Русский перевод: *Тауси Р.* Спектроскопия Солнца в ультрафиолетовой области. В сб. «Космическая астрофизика». М., ИЛ, 1962.
137. *Van Allen J.* Dynamics, Composition and Origin of Corpuscular Radiation Trapped in the Earth's Magnetic Field. Preprint, Univ. Iowa, Aug. 1961. Русский перевод: *Ван Аллен Дж.* Динамика, состав и происхождение корпускулярного излучения, захваченного магнитным полем Земли. В сб. «Радионизлучение поля Земли». Под ред. В. П. Шабанского. М., ИЛ, 1962, стр. 13.
138. *Van Allen J. A., Krimigis S. M.* Impulsive Emission of 40 kev Ejections from the Sun. J. Geophys. Res., 1965, 70, 5737.
139. *Vernov S. N., Gorchakov E. V., Kuznetsov C. N.,*

- Logachev Yu. I., Sosnovets E. N., Stolpovsky V. G.* Particle Fluxes in the Outer Geomagnetic Field. *Rev. Geophys.*, 1969, 7, 257.
140. *Vernov S. N., Chudacov A. E., Vakulov P. V., Gorchakov E. V., Kontor N. N., Logachev Yu. I., Ljubimov G. P., Pereslegina N. V., Timofeev G. A.* Low Energy Solar and Galactic Cosmic Ray Propagation in Interplanetary Space. *Proc. 11th Internat. Conf. Cosmic Rays, Budapest, 1969. Acta fis. Acad. sci., hung. Suppl. to v. 29, v. 2, 1970*, 459.
141. *Vernov S. N., Chudacov A. E. et al.* A Study of Solar and Cosmic Radiation from the Venus 4 Space Probe. *Space Res.*, 1969, 9, 203.
142. *Webber W. R.* Review of Solar Cosmic Ray Events. Preprint, AAS, NASA. *Sympos. Phys. Solar Flares*, 1963, p. 117.
143. *Webber W. R.* The Spectrum and Charge Composition of the Primary Cosmic Radiation. *Handbuch der Physik. Bd. 46/2. Berlin, 1967*, S. 181.
144. *Whang Y. C., Ness N. F.* Observations and Interpretation of the Lunar Mach Cone. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 6002.
145. *Whipple F. J.* A Comet Model. II. Physical Relations for Comets and Meteors. *Astrophys. J.*, 1951, 113, 464.
146. *Williams D. J.* Sources Losses and Transport of Magnetospherically Trapped Particles. *COSPAR. Leningrad, May 1970*.
147. *Williams D. J., Mead G. D.* Nightside Magnetosphere Configuration as Obtained from Trapped Electrons at 1100 Kilometers. *J. Geophys. Res.*, 1965, 70, 3017.
148. *Williams D. J., Ness N. F.* Simultaneous Trapped Electrons and Magnetic Tail Field Observations. *J. Geophys. Res.*, 1966, 71, 5117.
149. *Winkler J. K.* The Origin of Energetic Electrons in the Earth's Environment. *Proc. Internat. Seminar Space Res. Leningrad, 1969*, p. 130.

Часть II

ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКИ
СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ
С ФИЗИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
ТОЧЕК ЗРЕНИЯ



Вид полной Луны с «Аполлона-11»

Фотография получена на борту космического корабля с расстояния 18 500 км при возвращении к Земле.

На корабле находились космонавты Нейл А. Армстронг, Майкл Коллинз и Эдвин Э. Олдридж (фото 69-H-1374, НАСА США)

ЛУНА И ЕЕ ПРИРОДА

ГАРОЛЬД С. ЮРИ

Химический факультет, Калифорнийский университет,
Сан-Диего, Калифорния, США

Луна и ее взаимосвязь с Землей и Солнцем изучаются человечеством с древнейших времен по настоящий период все более интенсивно и успешно. Плоды этих исследований до последних лет включительно представлены во многих монографиях и учебниках. В задаче настоящей работы не входит обзор предшествующих исследований, и в этом обсуждении мы будем отсылать читателя к ним, не вдаваясь в детали, и тогда, когда речь идет о самых последних данных. Лунная поверхность состоит преимущественно из множества кратеров, которые возникли в результате столкновений с гигантскими метеоритами. Это в особенности относится к невидимой стороне Луны и материковым областям на видимой ее стороне. Большие круглые моря: Море Дождей, Море Ясности, Море Кризисов, Море Нектара, Море Влажности и Восточное Море — образованы в результате столкновений с огромными метеоритами, а неглубокие, неправильной формы моря состоят из затопленных участков с изверженным веществом, покрывающим праматерики, подобные современным материковым областям. Эти мелкие моря имеют горные массивы, проступающие через темный сглаженный материал, и могут покрывать участки, являющиеся «ударными» морями, очертания которых стерлись в результате последующих событий. Если бы такие столкновения происходили на Земле (что представляется неизбежным), все земные скальные породы, существовавшие до момента столкновения, превратились бы в обломочные. Поскольку изверженные и осадочные породы сохраняются на земной поверхности уже в течение 3,5 эона, такие многочисленные столкновения должны были произойти в более ранний период времени. Лучистые кратеры (часто малых размеров) и ряд больших кратеров без лучей несомненно сформировались во все геологические эпохи времени. Большие моря имеют вид потоков лавы, или вулканического пепла, или водных озер. По-

следнее, конечно, неверно, о чем свидетельствует отсутствие воды в лунных породах, но выбор между другими возможностями остается открытым. Существуют также эндогенные взрывные кратеры, и некоторые ученые считают, что на Луне существуют кальдеры. Автор этой главы сомневается в присутствии на Луне больших кальдер. Физические константы Луны и ее орбиты хорошо известны. Часть из них приведена в таблице.

Физические константы Луны

Масса	7,35·10 ²⁵ г
Радиус	1737 км
Ускорение силы тяжести на поверхности	162 см/сек ²
Средний радиус орбиты	384 403 км
Эксцентриситет орбиты	0,05490
Скорость убегания	2,38 км/сек
Сидерический месяц	27 ^d ,32166

ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ

Гравитационное поле Луны очень детально исследовалось с помощью лунных орбитальных спутников [40, 45, 46]. Установлено, что указанное поле можно представить обычными рядами в сферических гармониках только при использовании большого числа членов. Майкл и сотрудники составили наиболее подробные таблицы для констант, содержащихся в уравнении

$$V(r, \Phi, \lambda) = \frac{Gm}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n P_n^m(\sin \Phi) \times \right. \\ \left. \times (C_{n,m} \cos m\lambda + S_{n,m} \sin m\lambda) \right],$$

где r, Φ, λ — полярные координаты.

Авторы указывают, что для математического описания гравитационного поля необходи-

мы члены вплоть до 13-го порядка, и даже в этом случае постоянные не убывают, что свидетельствует о том, что поле тяготения Луны далеко от того, какое мы ожидали получить, исследуя движение малого тела в поле гравитационных сил Земли, Луны и Солнца с учетом центробежных сил вращения. В последнем случае члены, следующие за $C_{2,0}$, должны бы быть равными нулю, что неверно. Из этого следует заключить, что распределение масс внутри Луны весьма неравномерно.

Значения констант

$$\alpha = (C - B)/A, \quad \beta = (C - A)/B, \\ \gamma = (B - A)/C,$$

где A , B и C — моменты инерции: A — относительно оси, направленной на Землю, B — относительно оси «восток — запад» и C — относительно полярной оси, были тщательно изучены Козиелом [33], который по лунным либрациям нашел их соответственно равными $3,984 \cdot 10^{-4}$, $6,294 \cdot 10^{-4}$ и $2,310 \cdot 10^{-4}$. Копал [31] получил для тех же констант очень близкие значения. Теоретические значения для пластичной Луны при воздействии приливных и центробежных сил оказываются равными $0,94 \cdot 10^{-5}$, $3,75 \cdot 10^{-5}$ и $2,81 \cdot 10^{-5}$. Это опять свидетельствует о том, что Луна является очень твердым телом и была таковым с давних времен. Оценки значений моментов инерции показывают, что они близки к $0,4 Ma^2$, где M и a — масса и радиус Луны. Это значение характерно для однородного по плотности шара. Конечно, поверхностные области Луны до определенной глубины состоят из вещества с малой плотностью и должны несколько снижать величины моментов инерции. Эти области низкой плотности располагаются преимущественно на обратной стороне (возможная толщина 30 км) и ответственны за неправильность формы Луны, моменты инерции и смещение центра масс на 2—3 км относительно центра фигуры [30].

Трехосевая эллипсоидальная неравновесная форма Луны уже давно является для ученых загадкой. Предложены различные объяснения этого явления.

1) Луна может представлять собой достаточно твердое тело, способное сохранить неравновесную форму, однако это не объясняет ее происхождения.

2) Более низкие температуры на полюсах должны были бы привести к большей плотности вещества и к меньшим величинам радиуса в этих областях [39], но это не объясняет различия между моментами инерции A и B .

3) Конвективные течения в Луне, поднимающиеся у полюсов и опускающиеся у экватора, должны были привести к уменьшению массы у полюсов и к увеличению массы на экваторе [59], но опять в этом случае моменты инерции A и B должны быть равными. Возможно, что осуществляется определенная комбинация второй и третьей гипотез сугубо специфического вида.

4) Луна аккумуляровалась из тел различной плотности, что и объясняет различия моментов инерции [85]. Если бы имели место конвективные процессы, тогда Луна в какой-то период своего формирования должна была быть почти полностью расплавлена, так как, согласно Чандрасекару [16], двухъячейная конвекция возможна лишь при небольшом ядре. Конвекция на Луне должна быть столь глубокой, чтобы на ней, в отличие от Земли, не образовались складчатые горы. Букер [12] отстаивает одноячейную конвекцию, которая привела бы к большей высоте невидимой стороны Луны, если восходящий поток был бы на видимом полушарии.

Мюллер и Сьегрен [47, 48, а также частное сообщение] показали, что в различных областях видимой стороны Луны существуют значительные скопления масс, называемые масконами, в большинстве случаев связанные с круглыми морями ударного происхождения и, вероятно, во всех случаях связанные с существованием определенных локализованных масс. Эти масконы были обнаружены и картированы на основе наблюдений искусственных спутников Луны и путем прямого измерения их скоростей движения. Мюллер и Сьегрен полагают, что наблюдения достоверны для долгот между 100 и -100° и для широт между -50 и 50° . Заметные положительные гравитационные аномалии в Морях Дождей, Ясности, Кризиса, Нектара и Влажности достоверны, так же как и положительная аномалия, отмеченная несколько северо-западнее центра лунного диска. Восточное море является примером аномалии, которая частично положительна и частично отрицательна. Другие положительные и отрицательные аномалии, вероятно, не выходят за пределы ошибок наблюдения. Отрицательная аномалия в Заливе Радуги авторами расценивается как реальное явление. Они также обнаружили отрицательные аномалии в цирках Птолемея и Аль-Батани величиной 87 миллигал по наблюдениям полета космического корабля «Аполлон-12» при его приближении к месту посадки. Букер [12] и другие оценили величину избытка массы, необходимого для получения

отмеченных аномалий, порядка 10^{21} г и избыточное давление под этой массой порядка 100 бар. Поскольку эти образования древние, гравитационные аномалии должны сохраняться на Луне в течение нескольких эонов, свидетельствуя о том, что Луна есть и была телом очень высокой твердости. Предлагались два пути объяснений этих явлений.

1) Предполагается, что вещество лунных недр за счет различных процессов поднялось на поверхность в выемки, образовавшиеся в результате взаимодействия с объектами, ответственными за формирование морей [14, 29, 50, 93].

2) Считается, что масконы состоят из остатков самих столкнувшихся инородных объектов вместе с основным веществом, заполняющих выемки, образовавшиеся вследствие ударного столкновения [31, 65, 83, 86].

Если основой образования масконов считать потоки лавы из недр Луны, то необходимо иметь в виду, что для создания таких отложений требуется избыточное давление порядка 50—100 бар. Источников такого давления на Луне не существует. Возможно, что вещество стекало в громадные выемки, образовавшиеся в результате грандиозных столкновений, из окружающих участков. Вероятно, волны Ван Дорна [88] в сильно размельченном поверхностном слое Луны могли бы вызвать такой процесс, но тогда требуются специальные допущения для объяснения избытка массы на единицу поверхности. Избыток массы можно объяснить, если лава вытекает из-под соседних областей в районы морей. Недавно Сьегрен пришел к выводу, что дополнительная масса Моря Ясности заключена в околоповерхностной плите, которая могла быть образована такими лавовыми потоками.

Согласно другому предположению, породы лунных недр переместились в виде твердого вещества в гигантские полости, образовавшиеся в момент, когда появились моря; породы отличались более высокой плотностью, чем большинство поверхностных пород. Если бы они перемещались до тех пор, пока не наступит изостатическое равновесие, гравитационных аномалий не существовало бы. Если изостатическое равновесие не достигалось, появились бы отрицательные аномалии. Если бы граница изостатического равновесия была бы перейдена в результате большого количества движения поднимающегося вещества или масса была бы увеличена потоком лавы или фрагментированных пород, возникла бы положительная аномалия. В этом случае следует предположить, что в чрезвычайно раздроб-

ленном веществе нижележащих пород развилось бы огромное напряжение. Такое объяснение возможно, но маловероятно.

Принято считать, что внешние части Луны выдерживают значительное напряжение и что нагрев внутри Луны приводит к возникновению расплавленной массы, которая выдавливается в бассейны морей [29]. Такое частичное расплавление на Земле ведет к образованию пород, которые менее плотны в затвердевшем состоянии (и еще менее в жидком состоянии), чем породы, из которых они образуются. На Земле потоки лавы образуют горные массивы, имеющие положительные гравитационные аномалии. На Луне заполняются низины морей. Возможно, титаножелезистый базальт высокой плотности мог бы явиться таким веществом. Однако многочисленные трещины и борозды на лунной поверхности не подтверждают гипотезы о том, что внешняя оболочка Луны способна вынести большое напряжение.

Такой механизм образования пород лунной поверхности предполагает чистый выброс пород, равный по объему произведению площади морей на глубину порядка 50 км, а это неизбежно должно привести к образованию слоя выброшенных пород в $\frac{1}{10}$ этой толщины над площадью, в 10 раз превышающей площади Моря Дождей и Моря Спокойствия. Автор данной главы, основываясь на имеющихся фотографиях лунной поверхности, сомневается в справедливости такой точки зрения.

Гипотеза о том, что масконы являются остатками инородных объектов, столкнувшихся с Луной, основана на ряде предположений, а именно, что соударение происходит со скоростью, лишь немного большей, чем скорость убегания для Луны, что характеристики соударения можно экстраполировать, основываясь на энергетических параметрах ядерных взрывов и на случай лунных морей, и что объем чистого «выброса» лунных пород равен объему соударяющегося с Луной объекта. Такое объяснение подразумевает своего рода «заполнение». Вследствие трудности сохранения масконов, если внутренняя часть Луны имеет температуру плавления пород, предполагается, что заполнение произошло во время соударения, в ходе процессов, описанных Ван Дорном [88]. Важно, что существует приблизительное соответствие между массами, необходимыми для образования масконов, и массами, необходимыми для образования морей. Большой избыток массы маскона Моря Дождей и масконов других морей и их продолжительное существование в течение эонов (ве-

роятно, $4,0 \cdot 10^9$ лет) свидетельствуют о том, что Луна является и была более твердым телом и с более низкими температурами, чем Земля, у которой изостатическое равновесие устанавливается в течение примерно 10^7 лет. Думается, что гипотеза о колоссальных потоках лавы и очень больших перемещениях вещества из внутренней зоны Луны не согласуется с сохранением этих массивных структур на протяжении нескольких эонов.

Интересно, что лазерный альтиметр космического корабля «Аполлон-15» показал, что для разных участков поверхности Луны наблюдаются большие различия по высоте. Области видимого полушария, вообще говоря, лежат ниже примерно на 2 км, а невидимое полушарие возвышается относительно сферы с центром в центре масс. К тому же более глубокие точки, выявленные к настоящему времени, располагаются в круглых морях, что, конечно, означает, что под поверхностью этих регионов должны залегать какие-то массы вещества с высокой плотностью. На невидимой стороне Луны имеется также очень глубокий кратер Ван-де-Граафа неправильных очертаний, и естественно возникает вопрос о существовании на этом участке маскона (см. [57]).

ПОВЕРХНОСТЬ

Лунная поверхность покрыта кратерами и обширными ровными пространствами. Кратеры имеют преимущественно ударное происхождение, но, безусловно, есть и вулканические. Ударные кратеры по величине варьируют от микроскопических до гигантских областей лунных морей диаметром в сотни километров. Области имеют различный возраст. Возраст старых, очень плотно покрытых кратерами районов составляет, вероятно, от 4,0 до 4,6 млрд. лет. Отдельные редкие кратеры покрывают области, которые формировались на протяжении всего геологического времени. Эти кратеры изучались многими исследователями с большой тщательностью. Однако они в основном представляют случайные события и мало что говорят об истории Луны. Птолемей и Аль-Батани имеют отрицательные гравитационные аномалии приблизительно 87 миллигал¹ и таким образом свидетельствуют, что эти старые кратеры возникли на твердой Луне на заре ее истории и что твердое состояние сохранилось до наших дней. К сожалению, трудно в точности сказать, ка-

кой температурный режим согласуется с этим фактом. Большие кратеры имеют центральные пики, свидетельствующие о том, что имел место «рикошет» вещества или что там находится осколок инородного тела, ударившегося об Луну. Вероятно, первое объяснение более правильно.

На Луне существуют и вулканоподобные кратеры. Таковы кратеры, окруженные темными областями, и ряд кратеров вдоль извилистых расселин. Борозда Дэви состоит из почти прямой цепочки кратеров, которые могут быть эндогенными или ударными, возникшими при столкновении с такими объектами, как голова кометы, которая раскололась на множество фрагментов под воздействием гравитационного поля Луны. Во многих случаях трудно сказать, принадлежат ли другие малые кратеры к этому классу. Решение указанной проблемы потребовало значительных усилий. Многие из этих кратеров имеют широкие устья, как если бы они возникли за счет истечения газов. (Пар — самый характерный вулканический газ на Земле! Каковы эти газы на очень сухой Луне? Вступала ли вода в реакцию с железом где-нибудь во внутренней зоне с выделением водорода, или это была окись углерода, или что-нибудь еще?) В некоторых местах наблюдаются локальные структуры лавовых потоков, особенно в Море Дождей и в Море Ясности. Кроме того, признаки вулканизма имеют, по-видимому, холмы Мария, расположенные в западной экваториальной области.

Большие моря представляют собой обширные эруптивные потоки, которые принято считать лавой, но которые могут быть вулканическим пеплом или пирогенной породой. Потоки лавы, выходящие на поверхность Земли, обычно вспенены, и потоки, выходящие на лунную поверхность, где по крайней мере в настоящее время существует глубокий вакуум, должны быть такими же, даже если в расплавленных массах содержится меньше летучих. То, что наблюдается теперь, представляет собой грунты, состоящие из мелко раздробленных кристаллических и стекловидных частиц, в которые погружены фрагменты кристаллических пород. Эти фрагменты иногда имеют полости с гладкими стенками, которые должны образовываться при кристаллизации расплавленной массы, содержащей макроскопические пузырьки газа. Они выглядят так, как если бы затвердели на некоторой глубине под изолирующим поверхностным слоем. В образовании почвы играли роль столкновения микрометеоритов с грунтом и

¹ Согласно личному сообщению Мюллера и Сьегрена (1970).

камнями, хотя, вероятно, она отчасти имеет и пирогенное происхождение [52].

Большие мелкие моря — Океан Бурь, Море Спокойствия, Море Изобилия и Море Облаков — не имеют заметных, совпадающих с ними гравитационных аномалий. Таким образом, потоки находятся в состоянии изостатического равновесия, указывая, что вещество потоков, вероятно, исходит из-под поверхности, где оно залегало, или что изостатическое равновесие установилось для больших областей поверхности, но не для масконов, лежащих на некоторой глубине под поверхностью. Этот слой темных пород должен быть очень толстым, порядка нескольких километров, ибо горы ударного происхождения, находившиеся первоначально в этих участках, большей частью покрыты упомянутыми потоками. Указанные горные образования могли быть частично разрушены в результате мощных ударных процессов, которые привели к появлению крупных морей, но в мелких морях должны быть также глубокие «карманы» и мелкие участки. В течение многих лет была распространена гипотеза о том, что указанные темные моря образованы лавовыми потоками из недр Луны; эта гипотеза остается популярной и сегодня. Однако данные сейсмических измерений отличаются от данных, зарегистрированных на Земле, столь значительно, что для объяснения этих расхождений необходимо постулировать заметно выраженные различия в структурах поверхности. Лучшее объяснение, которое было предложено ко времени написания этой работы, состоит в том, что лунная поверхность сложена чрезвычайно фрагментированным веществом и состоит из грунта с рассеянными в нем камнями (см. обсуждение ниже).

Оценки толщины реголита существенно различны. Шумейкер и др. [63] указывают на небольшие значения этой величины, в диапазоне от 3 до 6 м глубины в кратере, неподалеку от места посадки лунного отсека космического корабля «Аполлон-11». Копал [32], основываясь на глубинах борозд, настаивает на толщине в несколько сотен метров, а Зеегер [62] на основе изучения структур кратера Дэви считает, что толщина слоя в этой точке равна 1 км. Голд и Соутер [24] высказывают предположение, что глубина слоя фрагментированного вещества имеет значение, равное 6—9 км. Эти оценки относятся к поверхностному слою морей. Интенсивные ударные процессы на поверхности материков должны были также привести к образованию сильно фрагментированного вещества, и, ко-

нечно же, поверхность материков подвергалась такой же бомбардировке микро- и макрометеоритными объектами (как и поверхность морей) с момента их образования.

Большие крупные моря образовались в результате столкновений с массивными телами. Ван Дорн [88] применил волновую теорию для исследования таких ударных столкновений и, в частности, в случае Моря Восточного отметил хорошее согласие расчетных и фактических радиусов волноподобных структур, окружающих это и другие моря, при условии существования жидкого слоя толщиной 50 км. Однако нельзя предположить одновременно существование жидкого слоя глубиной 50 км и в то же время твердой коры, поддерживающей существующие горные массивы. Возможно, сильно фрагментированный слой твердого вещества мог бы вести себя, как несовершенная жидкость, образуя под действием процессов высокой энергии волны, которые застыли, как только плотность энергии упала до более низких значений.

Каула и др. [30] показали, что обратная сторона Луны выше, чем видимая, примерно на 3—4 км и что центр фигуры смещен к долготе 25° Е на 2—3 км. Это, вероятно, указывает на толщину коры около 30 км на обратной стороне и что кора состоит из минералов, богатых CaO , Al_2O_3 и SiO_2 , и содержит немного FeO .

Физические данные о лунной поверхности свидетельствуют в пользу того, что на поверхности морей и материков имеется сильно фрагментированный слой силикатов, что тело Луны вплоть до значительных глубин является весьма твердым и было таким большую часть времени ее существования.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Сейсмические приборы устанавливались на поверхности Луны членами экипажей космических кораблей «Аполлон», и информация, полученная с их помощью, представляет большую ценность для понимания внутренней структуры Луны [36—38, 69]. Первым, самым неожиданным открытием было то, что скорость затухания сейсмических сигналов на Луне была намного меньше, чем скорость затухания на Земле. Лунный отсек космического корабля «Аполлон-12» упал на поверхность Луны со скоростью 1,68 км/сек. Энергия удара составляла $3,36 \cdot 10^{16}$ эрг. Удаление места падения от ближайшего сейсмометра 73 км. Был зарегистрирован сигнал, который достиг максимума приблизительно через 7 мин. после удара, а затем медленно затухал

в течение 54 мин. Когда на Луну сбросили ракетопосылитель космического корабля «Аполлон-13» (скорость в момент удара 2,58 км/сек, энергия удара $4,63 \cdot 10^{17}$ эрг, удаление от сейсмометра 135 км), было зарегистрировано аналогичное явление, которое длилось свыше 200 мин. Если бы скорость звука была равной 6 км/сек, звуковые волны прошли бы расстояние длиной в 21 600 км, или 6-кратную величину диаметра Луны в течение 1 часа. Были зарегистрированы обе волны — *P* и *S* (и волна сжатия, и волна сдвига). Подобные явления зарегистрированы и в самых последних полетах.

Такие результаты существенно отличаются от данных наблюдений на Земле, где сигналы угасли бы в течение нескольких минут. Другие, более слабые сигналы почти аналогичного вида наблюдались, вероятно, в результате падения на поверхность Луны метеоритных тел. Кроме того, были приняты другие группы сигналов, в которых очень точно повторялась картина регистрации, свидетельствующая о том, что члены группы сигналов исходят из одного и того же источника и идут к сейсмометрам одинаковыми путями. Волны и энергия долгопериодических колебаний сосредоточены в очень небольшом объеме, вероятно в поверхностном слое, главным образом в непосредственной близости от источника. Такого медленного ослабления сигналов не наблюдается на Земле, и, следовательно, должны существовать значительные различия в физических характеристиках двух планет. Наиболее очевидным из них является более фрагментированный характер лунной поверхности. Вероятно, как Океан Бурь, так и Море Спокойствия должны иметь сильно фрагментированный слой, подобный тому, который имеется на участках материков, залегающих под темным грунтом и каменистым слоем морей. Лэтэм и др. [36—38] обсуждали его строение, а Голд и Соутер [24] провели расчеты, используя модель пылевого слоя толщиной в несколько километров со скоростями звука, линейно возрастающими с глубиной, и с отражениями от наружного слоя поверхности морей. Эти две модели сходны, если вспомнить, что камни, меньшие, чем длина волны, мало влияют на распространение и отражение звуковых волн. Вероятно, пласты твердых силикатов вели бы себя не так.

Ряд сигналов воспроизводится с высокой точностью, и их нельзя приписать метеоритам, следовательно, они имеют эндогенную природу. Они чаще регистрируются в перигее и, по-видимому, «включаются» приливным

эффектом. Должны возникнуть отражения от различных масс и поверхностей. Следовательно, должны существовать и обширные неоднородности структуры. Эти «лунотрясения» означают, что механическая или потенциальная энергия из ряда источников рассеивается в виде вибрационной энергии и тепла. Можно представить себе несколько источников такой энергии.

1) Масконы погружаются в глубже лежащие слои.

2) Неправильная форма Луны превращается в более правильную сферическую форму.

3) Эллипсоидальная лунная орбита становится все более круговой с уменьшением большой оси. Этот эффект мог бы наложиться на другие изменения орбиты вследствие иных причин.

4) Конвективные процессы в недрах Луны или потоки лавы вызывают «землеподобные» лунотрясения.

5) По мере того как Луна удаляется от Земли вследствие приливных эффектов, она, оставаясь обращенной к Земле одним полушарием, уменьшает скорость вращения, и это, вероятно, служит причиной лунотрясений, а энергия вращения является источником сейсмической энергии.

6) Небольшое сжатие и расширение возникают вследствие изменений температуры на Луне.

7) Каменные осыпи. Однако представляется вероятным, что этот процесс за миллиарды лет успел завершиться.

«Лунотрясения», по-видимому, возникают на глубине порядка 800 км, и отражения, происходящие на подобных глубинах, свидетельствуют о том, что на этих глубинах существует определенная слоистая структура. Однако достоверных доказательств существования металлического ядра пока нет. Возможно, существует базальтовый 20-километровый слой реголита; до глубины 60 км — слой, имеющий скорость волн сжатия, равную скорости звука в анортозите, и глубже, на неопределенной глубине, — материал, обладающий скоростью звука, характерной для дунита. Таким образом, слоистая структура, вероятно, состоит из 20-километрового слоя фрагментированного базальта, 40-километрового слоя анортозита и затем слоя дунита неизвестной глубины с источником «лунотрясений» и слабым отражением примерно на глубине 800 км; какие-либо данные о наличии металлического ядра отсутствуют. Последние данные показывают, что имеется центральная область, не проводящая *S*-волны

и, вероятно, состоящая из частично расплавленных силикатов. Это центральное «ядро» имеет радиус около 700 км [35].

Луна намного более спокойна, чем Земля с ее неисчерпаемыми источниками энергии, наиболее важный из которых — конвекция в мантии, вызванная радиоактивным нагревом. Именно она создает гигантские горные цепи, положительные и отрицательные гравитационные аномалии, порождает громадные вулканы и потоки лавы, перемещает континенты. Если конвекция существует или существовала на Луне, ее последствия должны быть очень малы по сравнению с тем, что наблюдается на Земле.

Объяснение сейсмических явлений как следствия фрагментированного слоя на поверхности в корне противоречит представлению о слое затвердевшей лавы под поверхностью. Напротив, в лунном грунте есть камни, которые образовались в результате плавления, а сложные и тщательно изучаемые закономерности «луноотрясения» указывают на существование под поверхностью Луны сложных структур.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Самые последние измерения радиуса Луны позволили установить среднюю плотность ее грунта, равную величине $3,36 \text{ г/см}^3$, а резко фрагментированный характер поверхностного слоя свидетельствует о том, что при оценке плотности вещества для всей Луны надо учитывать влияние пустот. Кроме того, плотность недр может снижаться вследствие высоких температур в большей степени, нежели повышаться за счет высоких давлений. Это вновь указывает на то, что в лабораторных условиях плотности минералов могут оказаться выше. Возможно, величина $3,4 \text{ г/см}^3$ — приемлемая оценка для среднего значения этого параметра [86, 91]. Средние значения плотности хондритов типа *L* и *H* в условиях низких давлений имеют величину в диапазоне $3,57$ и $3,76 \text{ г/см}^3$ [84] или $3,68$ и $3,85 \text{ г/см}^3$, если присутствуют тяжелые минералы. Плотность земного грунта при низких температурах и давлениях может быть около 4 г/см^3 . Следовательно, Луна содержит либо меньше железа, либо большие количества воды и углеродных соединений, чем земные породы. Низкие содержания воды и углеродных соединений в веществе поверхности противоречат второй гипотезе. Силикаты, как показывает анализ метеоритов с содержанием железа не более 10 весовых процентов, могли бы

дать нужную плотность. Углистые хондриты III типа тоже имеют такую плотность. Концентрация калия в этих метеоритах ниже, чем в других хондритах, и составляет около 360 частей на миллион вместо 850 частей на миллион. Это более низкое относительное содержание калия, и сравнимые концентрации урана и тория позволили бы первоначально холодной Луне оставаться ниже точки плавления силикатов в течение геологической эпохи².

Венке [89] в очень полном обзоре химии Луны пришел к выводу, что поверхностное вещество Луны можно рассматривать как смесь двух компонент: одной — конденсированной при высокой температуре и другой — имеющей средний метеоритный состав. Отношение *K* и *U* составляет около 2000, тогда как в хондритовых метеоритах оно достигает 60 или 80 тыс. Это связано со значительно повышенной концентрацией *U* и других элементов, конденсирующихся при высокой температуре. Интересно, что это отношение для земных пород равно примерно 10 000, что свидетельствует о повышенной доле высокотемпературного конденсата в Земле.

Первые данные по химическому составу лунных пород, полученные Туркевичем и др. [71—74] на основе наблюдений с помощью космических аппаратов «Сервейор-5» — «Сервейор-7», свидетельствуют о том, что поверхность морей содержит базальт с высоким содержанием титана и что материк имеет высокие концентрации алюминия и кальция и низкие концентрации железа. Эти результаты были полностью подтверждены впоследствии при более детальном исследовании состава образцов лунных пород, доставленных на Землю экипажами космических кораблей «Аполлон». На лунной поверхности есть несколько различных видов пород. Морские области, по-видимому, состоят преимущественно из камней типа базальта и мелко раздробленного вещества. Материковые области — из пород, характеризующихся высокими концентрациями кальциевого полевого шпата, — веществ типа анортозита. Далее, участок вблизи кратера Фра Мауро, где «приземлился» экипаж космического корабля «Аполлон-14», состоит из того, что мы называем KREEP, т. е. вещества, отличающегося высоким содержанием калия, редкоземельных

² В последней статье Тоузер [70] обсуждает конвекцию в планетах и отмечает, что Луна может охлаждаться гораздо сильнее, чем можно было бы ожидать, учитывая только теплопроводность.

элементов и фосфора. Метеориты типа анортозитов или типа KREEP никогда не наблюдались, ни одна другая лунная порода также не встречается среди метеоритов. Обнаружены и другие типы горных пород, которые, очевидно, встречаются редко.

Существуют некоторые заметные различия химического состава у лунных, земных и метеоритных веществ.

Очень любопытное различие по химическому составу относится к европию. Этот элемент двухвалентен в сильно восстановительных средах и трехвалентен в менее восстановительных условиях. В породах лунной поверхности европий обнаруживает ясно выраженную тенденцию следовать двухвалентному строению и ослабленную тенденцию поведения, подобно другим трехвалентным редкоземельным элементам. Это показывает, что породы лунной поверхности образовались в сильно восстановительных условиях. Обнаруживаются лишь небольшие металлические включения железа — никеля, и до сих пор неясно, имеют ли они лунное происхождение, или это фрагменты метеоритов. Сульфид железа содержится лишь в малых количествах. Больше всего удивляет тот факт, что концентрация титана намного выше в некоторых лунных базальтах, чем в земных.

Интересны физические свойства этих силикатных пород. Базальтовые грунты состоят из весьма мелких кристаллических и стекловидных осколков. Брекчий, по-видимому, представляют собой спекшийся грунт. Имеются породы, которые кристаллизовались из жидкого расплава, они иногда содержат гладкие пузырьки, указывающие на то, что в них в процессе затвердевания присутствовали газовые пузырьки. «Образец для творения» 15 415 целиком состоит из остеклованных шариков кальциевого полевого шпата. Лунные породы часто содержат круглые силикатные включения, которые по физическим свойствам напоминают хондры метеоритов, но имеют другой химический состав. Однако идентифицированных осколков метеоритов обнаружено не было, что указывает на то, что метеориты, которые сталкиваются с Луной, разбиваются на чрезвычайно мелкие фрагменты. К тому же и лунные породы отличаются по химическому составу от метеоритных.

Поскольку Луна не имеет атмосферы, можно наблюдать радиацию высокой энергии, излученную радиоактивными элементами на большой высоте над лунной поверхностью. Такие наблюдения были запланированы Арнольдом еще при составлении программы по-

летов на Луну и недавно успешно реализованы членами экипажей космических кораблей «Аполлон-15» — «Аполлон-17» [9]. Эти исследования свидетельствуют о том, что морские области имеют более высокие концентрации калия, урана и тория, чем материковые, а также, что над значительными участками поверхности морей регистрируются различные концентрации указанных элементов. Кроме того, отношение концентраций калий/уран всегда ниже, чем в земных породах. Эти данные подтверждаются анализом доставленных на Землю лунных пород и показывают, что для больших участков поверхности Луны характерны химические различия. Адлер и др. [6], изучая рентгеновскую флуоресценцию лунных пород при освещении солнечными рентгеновскими лучами, показали, что материковые участки, вообще говоря, содержат больше элементов, характерных для анортозитовых пород. К сожалению, более детальных и обширных исследований такого рода с охватом всей поверхности Луны еще не проводилось.

Представляется вероятным, что начиная с самой ранней стадии существования Луны имело место непрерывное плавление в ограниченном масштабе; похоже, что это подтверждается по мере расширения изучения лунных образцов. Небольшие лавовые потоки, обнаруженные в различных местах, могут быть более позднего происхождения. Если они выходят из глубинных недр Луны, то могут дать информацию о химическом составе глубоких недр, что будет очень ценно. Была высказана мысль, что экипаж космического корабля «Аполлон-16», совершивший посадку вблизи кратера Декарта, найдет более свежие вулканические породы, но этот участок оказался покрытым древними анортозитовыми породами. Экипаж космического корабля «Аполлон-17» должен совершить посадку в темном заливе в Море Ясности, вблизи кратера Литтров, где есть весьма отчетливые признаки лавового потока. Если этот поток вышел из небольшой глубины, тогда возникает вопрос: как мог сохраниться в Море Ясности большой маскон, поскольку недр Луны в этом случае должны были иметь высокую температуру, начиная от местного источника указанной темной породы и до больших глубин? Отсюда следует, что вулканический поток, если таковой есть, вышел из глубоких недр и что Луна имеет очень твердую наружную оболочку. Доставленные с этого участка образцы породы позволят получить информацию о составе недр Луны.

УГЛЕРОДИСТЫЕ ВЕЩЕСТВА

Доказательств в пользу существования живых или ископаемых биологических форм на Луне не обнаружено. Общие концентрации углерода во всех изученных образцах лунных пород составляют от 30 до 230 частей на миллион, причем концентрации углерода в грунте выше, чем в кристаллических горных породах. Концентрация азота несколько ниже таковых для углерода.

Химический анализ подтвердил наличие углеводородов, соединений углерода, водорода, кислорода и азота, но в общем в столь малых концентрациях, что трудно быть уверенным в том, что они являются субстанциями эндогенного характера, а не следствием земных загрязнений. Газохроматограф и масс-спектрометр настолько чувствительны, что с их помощью могут быть обнаружены некоторые загрязняющие примеси в диапазоне концентрации до 10^{-9} . Все исследователи находили различные углеводородные соединения, содержащие до шести или более атомов углерода, и более распространенные и простые соединения углерода с кислородом, водородом и азотом. Наиболее интересные с точки зрения существования биологических форм материи соединения были идентифицированы немногими исследователями. Надь и др. [49] в дополнение к мочевины и аммиаку обнаружили глицин, аланин и этаноламин. Фокс и др. [21] нашли глицин и аланин в негидролизированных водных вытяжках и, кроме того, обнаружили наличие глютаминовой кислоты, аспартовой кислоты, серина и треонина в вытяжках после гидролиза. Концентрации указанных веществ были порядка 50 частей на 10^9 . Ходжсон и др. [28] идентифицировали порфирины, однако его наличие они связали с загрязнением лунных пород сопловыми газами ракетного двигателя. Имея в виду весьма малые количества обнаруживаемых веществ, следует доказать содержание этих соединений и в других образцах лунного грунта и с особой тщательностью отбирать пробы на анализ, не допуская их загрязнения. Вполне вероятно, что многие соединения образовались при добавлении к исследуемым образцам лунных пород химических растворов, ибо в лунных породах содержатся активированные атомы углерода и других элементов, попавших на поверхность Луны с солнечным ветром. Абэлл и др. [5], в частности, доказали образование дейтериевого метана CD_4 при использовании вместо обычной воды H_2O дейтериевой воды D_2O . Вода в образцах лун-

ного грунта содержится в столь малых концентрациях, что чрезвычайно трудно различить эндогенную воду и земные загрязнения.

ВОЗРАСТ

При исследовании возраста лунных пород используют два способа определения. Предполагая, что лунные породы произошли из веществ метеоритного типа, определяют время, когда породы лунной поверхности оказались отделенными от вещества метеоритного происхождения. Это время известно под названием «модельный возраст». При расчетах $Rb^{87} - Sr^{87}$ возраста или возраста «уран — свинец» и «торий — свинец» предполагается, что отношения концентраций рубидия к стронцию или урана и тория к свинцу не изменялись с момента разделения. При втором методе определения возраста пород определяется время, когда исследуемый образец последний раз находился в расплавленном состоянии или когда изотопы элементов в последний раз равномерно распределились между минералами изучаемого образца породы. Это «изохронный возраст»³. $Rb^{87} - Sr^{87}$ модельный возраст для большинства исследованных образцов лунного грунта около 4,6 эона ($4,6 \cdot 10^9$ лет); это — время, необходимое для образования Sr^{87} в большинстве образцов из первичного стронция за 4,6 эона, по данным исследования базальтовых ахондритовых метеоритов (BABI, [53]). Изохронные возрасты пород меняются от 3,3 до 4,1 эона. Это означает, что общий состав пород по отношению к рубидию и стронцию сложился в данном виде 4,6 эона назад и не изменился в процессе повторных нагревов, имевших место в более

³ Если изотоп с концентрацией x в результате распада превращается в другой изотоп с современной концентрацией y и концентрации t лет назад были соответственно равны x_0 и y_0 (все относительно концентрации стабильного изотопа, равной r), то

$$\frac{y}{r} - \frac{y_0}{r} = \frac{x}{r} (e^{\lambda t} - 1),$$

где t — возраст и λ — постоянная распада, является фундаментальным уравнением задачи по определению возраста пород. Если измерены величины y/r и x/r , а y_0/r предполагается известным на основе материалов исследования метеоритов, то можно определить возраст вещества t . Это модельный возраст. Если y_0/r неизвестно, но в образце различные кристаллы имеют разные значения y/r и x/r , эти значения можно нанести на график, наклон прямой линии задается выражением $(e^{\lambda t} - 1)$ и точка пересечения с осью y/r есть y_0/r . Возраст может быть вычислен по наклону прямой линии, это будет «изохронный возраст».

поздние изохронные моменты. Потоки пепла в указанные поздние периоды не привели к разделу жидкого расплава и твердых остатков, что, вероятно, было обусловлено слабым гравитационным полем Луны, в котором карманы частично расплавленных масс не разделились на слои, состоящие из жидкой и твердой фаз, или же было вызвано полным расплавлением базальтовых карманов, так что фракционирования не произошло. $K^{40}-Ar^{40}$ возраст в целом согласуется с $Rb^{87}-Sr^{87}$ изохронным возрастом, поскольку аргон диссипировал в самой последней фазе нагрева. Уран-свинцовые и торий-свинцовые возрасты пород дают более сложную картину и не согласуются с $Rb^{87}-Sr^{87}$ возрастaми, по-видимому, из-за потерь свинца в окружающее пространство, вероятно, вследствие улетучивания. Интересно отметить, что изохронный возраст большого числа исследованных образцов грунта и многих кристаллических образцов имеет значения в диапазоне 4,3—4,6 зона [54].

Поскольку образцы грунта и камни имеют различный состав, вулканические потоки, извергнувшиеся из изолированных карманов, не должны были смешиваться друг с другом в период от 4,6 зона назад до образования потоков, т. е. 3,3—4,0 зона назад. Возникали ли излияния до 4,0 зона или после 3,3 зона, неизвестно. Противоположная гипотеза состоит в том, что базальтовые компоненты образовались в результате обычных потоков земного типа, в которых базальтовый расплав отделился от твердой фракции, оставшейся в глубине, и что уран — свинец, торий — свинец, рубидий и стронций в различных количествах добавились позднее из некоего первородного вещества, образовавшегося 4,6 зона назад. В таком случае нужно допустить, что эти первоначальные базальтовые породы с низким содержанием указанных элементов образовались в результате процессов плавления, в ходе которых в случае земных пород, как правило, образуются базальты, содержащие упомянутые элементы. Однако это совершенно невероятно, и более достоверно, видимо, то объяснение, что причиной расхождений явилось плавление ограниченных систем при наличии слабого гравитационного поля⁴.

Представляют интерес два показателя возраста: определяемый по отношению $K^{40}-Ar^{40}$ (метод разработан Тернером [75—78]) и определяемый по отношению $Rb^{87}-Sr^{87}$ (метод

разработан Шефером [61] и др.). Образец «для творения» 15415 и апортзитовые породы, доставленные экипажем космического корабля «Аполлон-16», имеют возраст порядка 4,1 зона. Была высказана мысль, что возраст некоторых апортзитовых пород должен составлять 4,6 зона на том основании, что наиболее ранний период плавления был именно в то время и что апортзитовые породы тогда и появились. Что сместило часы цикла $K^{40}-Ar^{40}$? Горячее солнце, столкновения в поясе астероидов, или то и другое одновременно, или что-то еще неизвестное?

ИСТОРИЯ ЛУНЫ

В настоящее время известно, что материковые области Луны состоят из пород апортзитового типа и что эти породы и титаножелезистый базальт приобрели свой состав в результате процессов плавления $4,6 \pm 0,1$ зона тому назад. Позднее произошло плавление, приведшее к образованию пород Моря Спокойствия и Океана Бурь. В результате каких-то процессов в этот период сформировались масконы и благодаря твердости пород сохранились по настоящее время. Максимальные подповерхностные температуры, обеспечивающие сохранность масконов, не известны, но подповерхностные температуры Земли, по-видимому, слишком высоки. Точное сравнение затрудняется большим гравитационным полем Земли и более высоким давлением в ее внешних слоях. Если бы не существовало доказательств плавления, можно было бы принять, что Луна на протяжении всей истории была холодной. Если бы можно было игнорировать масконы, это привело бы к признанию гипотезы высокотемпературного режима, конечно, игнорируя или найдя другое объяснение моментам инерции. В случае учета всех обстоятельств становится неизбежным признание необходимости сложной истории Луны. Во всяком случае, магнитные камни загадочны.

Если Луна первоначально была полностью расплавлена, то она должна была затвердеть и подвергнуться дифференциации 4,5—4,7 зона тому назад. Апортзитовый слой затвердел и всплыл на поверхность, пироксен-оливиновый слой погрузился в недра, а слой титаножелезистого базальта оказался между ними или перемешался с другими слоями, чтобы выделиться затем при последующем плавлении отдельных объемов. Внешние части должны были охладиться в такой степени, чтобы обеспечить сохранение отрицательных гравитационных аномалий в кратерах Птолемея и

⁴ Это краткое резюме результатов, полученных в ряде лабораторий, возглавляемых Вассербургом, Тацумото, Силвером и Компстоном [7, 17, 18, 54, 58, 64, 66, 67, 90].

Аль-Батани и, вероятно, в таких кратерах по всей поверхности. Это произошло, когда концентрации радиоактивных элементов находились на максимальном уровне. Было проведено немало исследований по тепловому режиму Луны на протяжении ее геологической истории. Такие исследования показывают, как трудно охладить расплавленное тело Луны в течение эона, даже при отсутствии радиоактивных элементов. Возможно, как подчеркивает Тоузер [70], конвекция играла наибольшую роль. В случае Земли охлаждения не произошло на протяжении 4,6 эона и положительные гравитационные аномалии поддерживаются только гигантскими конвективными ячейками. На всем протяжении появления потоков лавы недр Луны должны были сохранять высокую температуру, и только во внешней оболочке было возможно существование твердых скальных пород, как это имеет место в случае Земли. Представляется невероятным, если не вообще невозможным, объяснить наблюдения подобным образом. Даже не обращаясь к масконам, такая гипотетическая история Луны должна была дать более многочисленные лавовые потоки, чем это фактически наблюдается, и в особенности такая гипотеза высокотемпературного режима должна предполагать гораздо более обширное расплавление лунной поверхности. Отсутствие областей морского типа свидетельствует о том, что процессы плавления имели лишь небольшое распространение.

Если величины моментов инерции, установленные с помощью искусственных спутников Луны и астрономических наблюдений, правильны, то протяженный слой ахейских пород с низкой плотностью вещества, небольшое железное ядро и плотные кремниевые породы в недрах Луны немыслимы без существования вблизи поверхности некоторого слоя вещества высокой плотности. И кажется невероятным, чтобы такой слой породы с высокой плотностью вещества образовался и сохранился в случае, если бы Луна была целиком расплавленным телом на ранней стадии своего существования. Но, возможно, данные о моментах инерции неверны!

Высказано предположение, что первоначальное плавление 4,5—4,7 эона тому назад ограничилось внешним слоем в изначальном холодной Луне и что масконы поддерживались за счет холодных недр, а отрицательные гравитационные аномалии кратеров Птолемея и Аль-Батани и других кратеров — внешним слоем, который довольно быстро остывал. В этой модели предполагается, что источника-

ми нагрева послужили следующие факторы.

1) Поверхностный нагрев в большой газовой сфере или в процессе аккумуляции в такой сфере [10].

2) Поверхностный нагрев за счет приливных эффектов при захвате Луны.

3) Перемещение магнитных полей по лунной поверхности и возбуждение электрических токов в силикатах, уже нагретых некоторыми ранее действующими механизмами.

4) Нагрев в процессе аккумуляции, при котором быстрая аккумуляция твердых тел произошла в последних стадиях. При охлаждении происходило разделение на несколько слоев, причем титаножелезистый базальт затвердевал в последнюю очередь где-то под поверхностью. По-видимому, вариант 4) привел бы к созданию очень динамичных условий, мало подходящих для разделения пород на различные слои, выявленные при химическом исследовании. Базальт расплавился позже и был вытеснен вверх из более глубоких слоев. Радиоактивный нагрев, возможно, имел место в результате очень низкой теплопроводности слоя пыли на поверхности и ее высоких теплоизолирующих характеристик. «Мелкие» моря, состоящие из потоков непла на весьма нерегулярной поверхности, должны иметь несколько глубоко лежащих слоев, а также поверхностные слои. Глубокие слои должны были заметно нагреваться в течение периодов от сотни миллионов до миллиарда лет, даже если они первоначально имели низкие температуры (около 0° C), что, впрочем, совсем не обязательно. Эти представления разделяет и автор настоящей работы [87, 95].

Прежде считали, что первые кратеры, моря и масконы образовались в результате столкновений на ранних стадиях геологической истории Луны, но, если мы предположим, что катастрофическое столкновение произошло в астероидном поясе около 4 эонов тому назад, приведя к образованию множества крупных и мелких осколков, которые падали на Землю, Луну и другие планеты в течение нескольких сотен миллионов лет, можно построить другую историю лунной поверхности. На Земле не сохранилось следов таких столкновений, если они происходили до момента формирования самых древних скальных пород Земли. Мы должны принять, что масконы возникли в результате некоторого «рикошета» лунных пород и что гравитационные аномалии сохранялись, несмотря на обширные и энергичные смещения скальных пород, поскольку столкновения такого рода должны были происходить с большими скоростями.

Следовательно, чтобы объяснить гравитационные аномалии, массы сталкивающихся с такой высокой скоростью объектов должны быть чрезмерно малыми. При этом допущении можно без затруднений иметь поверхность Луны достаточно холодной, чтобы обеспечить наличие гравитационных аномалий типа Птолемея и Аль-Батани, но проблема существования масконов остается нерешенной, если мы принимаем, что титаножелезистые базальтовые породы вылились на поверхность из подповерхностного расплава, что представляется приемлемой гипотезой при таком понимании ранней истории Луны.

Частичное переплавление лунных недр 3,1—3,0 зона тому назад, как это принимают некоторые исследователи, привело бы почти несомненно к отделению рубидия и стронция друг от друга, и, следовательно, модельный возраст титаножелезистых базальтов почти наверняка не мог бы быть около 4,6 зона. Это весомый аргумент против образования указанных пород в результате частичного расплавления лунных недр.

Таким образом, можно заключить, что Луна образовалась при сравнительно низких температурах, была нагрета внешними источниками тепла, в достаточной степени и на достаточную глубину охладилась, чтобы позволить большим кратерам (150 км в диаметре) сохранить отрицательные гравитационные аномалии, и оказалась благодаря твердым недрам способной поддерживать концентрации масс. Дифференциация анортозита, титаножелезистого базальта и других фракций произошла в процессе охлаждения. Грунт образовался преимущественно из потока пепла и в ограниченных количествах переплавлялся за счет радиоактивного нагрева вследствие низкой теплопроводности поверхностных слоев грунта. Эта предполагаемая история сложна и, вероятнее всего, будет пересмотрена по мере накопления данных.

Как говорилось выше, сейсмологи [69] получили данные, подтверждающие существование анортозитового слоя, простирающегося на глубину порядка 60 км под поверхностью, и внутренней зоны ниже этого слоя, состоящей из пород типа дунита, богатых пироксеном и оливином. По сравнению с землетрясениями лунотрясения весьма умеренны, и некоторые из них возникают повторно в точках, расположенных на глубине порядка 700—800 км. При этом происходят отражения в структурах, располагающихся примерно на той же глубине. Они не могут быть обусловлены существованием металлического ядра,

но могут создаваться границами раздела структур какого-то другого типа. Это свидетельствует в пользу гипотезы об очень глубоком или полном плавлении на заре лунной истории. Однако свидетельство не является окончательным. Наблюдения проводились на ограниченных участках лунной поверхности и в областях, относительно близко расположенных к зонам больших масконов и ударных морей.

МАГНИТНЫЕ КАМНИ ЛУНЫ

Дипольного поля на Луне не обнаружено, однако в местах посадки кораблей «Аполлон», имеющих возраст от 4 до 3,1 зона, располагаются намагниченные камни. Следовательно, до этого или более позднего времени на Луне должны были присутствовать магнитные поля, а камни в этих магнитных полях должны были охлаждаться до температур ниже точки Кюри. Имеются также довольно большие намагниченные области. Происхождение магнитных полей, ответственных за образование намагниченных камней, остается загадкой для всех исследователей этого явления. Этот вопрос имеет важное значение для проблемы происхождения Луны.

После того как были отброшены магнитное поле Земли и возможное поле Солнца, мы обратились к возможному лунному дипольному полю, которое должно было исчезнуть не раньше, чем 3,1 зона назад. Одно предложение, внесенное, в частности, Ранкорном [59], предусматривало существование железного ядра, меньшего, чем у Земли, которое поэтому должно было вращаться очень быстро, чтобы создать требуемое поле. Это представляется невероятным, так как сейсмические наблюдения не обнаружили ядра, хотя они могут быть и не вполне убедительными. Если такое вращающееся железное ядро присутствовало на раннем периоде, более чем 3,1 зона тому назад, то это указывает, что оно остыло и, следовательно, в настоящее время поле могло бы отсутствовать. В другом случае предполагается, что внутренние части Луны аккумуляровались при низких температурах и способны к намагничиванию частицы, а именно железо, аккумуляровались в первичном магнитном поле Солнца, которое привело к образованию постоянного магнитного дипольного поля, сохранившегося, пока радиоактивный разогрев не привел к повышению температуры выше точки Кюри. Однако в этом случае поверхностные области должны были расплавлены, чтобы создать

высокодифференцированные районы с вытеканием лавы на поверхность.

Популярная точка зрения состоит в следующем. Луна аккумулировалась сначала из твердых тел при низких температурах вследствие малых гравитационной энергии и скорости аккумуляции, а позднее при высоких гравитационной энергии и скорости аккумуляции. Так возникли твердая внутренняя часть и расплавленная поверхность. Оценено, что аккумуляция должна была происходить в течение около 2000 лет и меньше, чтобы образовалась расплавленная поверхность, несмотря на радиационные потери. Следовательно, такая бомбардировка должна была закончиться довольно резко. Трудно определить место в солнечной туманности, где бы это могло случиться. Альтернативой являются газовые сферы Юри (1972 г.). В этом случае твердые тела осаждаются во внутренней части сферы, когда она холодная, но, когда происходит сжатие сферы, температура внутри возрастает и, таким образом, внутренняя часть образуется холодной, а поверхность аккумулируется при более высоких температурах [10]. Луна охладилась после того, как горячее Солнце отдалило газовую сферу, и, каков бы ни был способ аккумуляции Луны, магнитное поле, вынесенное холодными внутренними областями, намагнитило охлажденные поверхностные камни и исчезло, когда вследствие радиоактивного нагрева температура холодных внутренних частей превысила точку Кюри. Как указано выше, это наиболее интересная проблема, поразившая многих людей, изучавших Луну (см. обзор Сонетта и Ранкорна [64a] и [60]).

ТЕОРИИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЛУНЫ

Для обсуждения теорий происхождения Луны необходимо рассмотреть теорию происхождения планет и их спутников, по существу — происхождение солнечной системы. Юпитер и система его внутренних спутников сходны по орбитальным характеристикам с Солнцем и планетами, ось вращения Юпитера приблизительно перпендикулярна плоскости эклиптики. Если бы другие планеты и их спутники воспроизводили такую же структуру, то больших разногласий во взглядах на происхождение не существовало бы. Можно было бы предположить, что планеты и их спутники аккумулировались из скоплений малых объектов газопылевого характера. Однако Земля, Венера, Марс и большие планеты, кроме Юпитера, имеют оси вращения,

которые не перпендикулярны плоскости эклиптики, что требует столкновений очень массивных тел при образовании планет. Уже одно это указывает на наличие массивных тел на заре истории солнечной системы.

Если все планеты земной группы имели бы большие спутники, подобно Земле, можно было бы предположить, что эти планеты и их спутники образовались как двойные планеты, т. е. аккумулировались из твердых и жидких силикатов в непосредственной близости друг от друга. В этом случае вопрос о происхождении спутников не подлежал бы спорам и обсуждению, как это имело место в течение многих десятилетий. Именно уникальность Луны, как единственного очень большого спутника, ставит перед учеными интересную и противоречивую проблему ее происхождения. Ведь если образование двойных планет является правилом, отсутствие большой Луны у Венеры и таких же спутников у Меркурия и Марса становится новой загадкой. Советские ученые, в частности О. Ю. Шмидт [4], В. С. Сафронов [3] и Б. Ю. Левин [1], поддерживают теорию, предполагающую аккумуляцию множества малых спутников, окружавших Землю во время ее образования за время около 100 млн. лет.

Камерон [13] и Рингвуд [56] защищают точку зрения, согласно которой Земля и Луна аккумулировались за короткий отрезок времени от 10^3 до 10^4 лет при очень высоких температурах и в виде двойного тела. Луна аккумулировалась из летучего высокотемпературного вещества, образовавшего кольцо вокруг Земли. Масса Земли плюс соответствующая ей доля солнечных газов должны были составлять массу, примерно равную массе Юпитера, первоначально распределенную в диске, окружавшем Солнце. Необходимо, чтобы в какой-то момент 0,3% твердого вещества, предназначенного для образования твердых тел, отделилось от массы газа, составляющего 99,7%, и скопилось в ограниченном объеме. Можно предположить, что это могло случиться только при условии, что вещество имело достаточно низкую температуру, чтобы сконденсироваться в жидкость или твердое тело. Возможно, если твердые частицы оседали к средней плоскости облака, это могло бы произойти. Описанная модель перекликается и в какой-то мере идентична теории протопланет Койпера [34], слабым местом которой было объяснение потери массы газа, равной массе Юпитера. Юри [79] указывал, что это невозможно, и до настоящего времени не предложено удовлетвори-

тельного объяснения потери газов. Возможно (но это не доказано), что магнитные поля вращающегося магнитного диполя Солнца могли бы обеспечить выброс газа.

Рингвуд⁵ [56], основываясь на том, что потеря летучих столь характерна для вещества лунной поверхности, указывает, что Луна должна была выделяться из высокотемпературных газов. Это — очень сильный аргумент, особенно в случае, если количество этих элементов уменьшено во всем теле Луны, что пока является ничем не подтвержденным предположением. Обилие наиболее распространенных в лунных породах элементов имеет столь близкое сходство с теоретически ожидаемым при фракционировании расплавленных силикатов, что как будто бы можно отказаться от гипотезы о большой роли улетучивания. Более того, необходим механизм, обеспечивающий наклон земной оси и определенного изменения лунной орбиты, поскольку Голдрайх [25] указывает, что современная орбита Луны не могла первоначально находиться в плоскости земной орбиты. Оба указанных явления требуют присутствия других достаточно больших тел, которые, сталкиваясь с Землей и Луной, вызвали упомянутые изменения. Если бы это было на самом деле, то подобные объекты, сталкивающиеся с другими планетами, привели бы к аналогичным эффектам. Тот факт, что Венера не имеет спутника и вращается в обратном направлении, является, вероятно, самым убедительным свидетельством против приведенной теории происхождения Земли и Луны. Маркус [43] и В. С. Сафронов [2] подчеркивали, что подобные столкновения были необходимы, а Юри [80, 81] дал объяснение образованию таких объектов. Недавно было высказано предположение, что большие допланетные тела существовали и сталкивались в процессе образования Земли в условиях высокой температуры, и в соответствии с моделью Рингвуда Луна «улетучилась» с Земли. Элементы, улетучивающиеся при температуре 1500° К и ниже, с лунной поверхности исчезли, однако нет оснований считать, что происходит значительная дифференциация между кремнием, с одной стороны, и алюминием, магнием, кальцием — с другой, даже если имеют место большие различия в летучести. Автор этой работы сомневается в правильности гипотезы Рингвуда о газовой, кремниевой, алюминиевой и т. д. атмосфере, породившей Луну. Возможно, если бы уда-

лось достать породы из более глубоких слоев и они показали бы низкое содержание летучих, это могло бы послужить указанием, что вещество Луны в сильно фрагментированном виде было нагрето до температуры 1000—1500° С и что летучие были унесены остаточными газами. Те, кто склонен думать, что титаножелезистые базальты являются, в сущности, потоками лавы из недр, воспринимают это утверждение как уже доказанное. Автору этой работы хотелось бы исследовать образцы пород, принадлежащих так называемым местным лавовым потокам, которые могли быть вынесены из глубинных слоев, прежде чем согласиться с этой точкой зрения.

Сэром Джорджем Дарвином была высказана гипотеза о том, что Луна отделилась от Земли, и эта идея в течение нашего столетия многократно обсуждалась как ее сторонниками, так и ее противниками. Уайз [92] и О'Кифи [51] недавно дали обзор этой дискуссии. Плотность пород Луны близка к плотности пород мантии Земли, и этот загадочный вопрос легко решается данной гипотезой. Много усилий затрачено на то, чтобы доказать возможность подобного разделения. В последние годы эта гипотеза отчасти, а возможно и полностью, поколеблена исследованиями химического состава пород лунной поверхности. Лунные базальты имеют определенно более высокие концентрации железа и титана и определенно более низкие концентрации летучих элементов по сравнению с земными. Конечно, нельзя полностью исключить, что в сложном процессе высокотемпературного разделения могли возникнуть такие различия, но это представляется невероятным. Возраст лунных пород отодвигает время разделения на 4,5 зона. Важно одно обстоятельство, очевидное из старых данных. Если Земля и Венера образовались в результате сходных процессов на сравнимых расстояниях от Солнца, то почему система «Земля—Луна» имеет очень большой положительный момент количества движения относительно орбитального момента, а Венера — малое и отрицательное значение для той же величины? Почему Венера не стала планетой с большим осевым моментом вращения и не превратилась в двойную планету? Эти вопросы можно было ставить много лет тому назад. В настоящее время гипотеза об отделении Луны от Земли представляется маловероятной.

Гипотеза захвата особенно популярна с того времени, как Герстенкорн [22, 23] исследовал эту проблему. Она обсуждалась Мак-Дональдом [41], Альвенем [8] и др.

⁵ Недавно Рингвуд отошел от этих взглядов.

Указанная гипотеза имеет очевидное преимущество в том, что подчеркивает случайный характер происхождения Луны, и в этом случае отпадает нужда объяснять отсутствие спутников у других планет земной группы. Однако необходимо допустить, что когда-то в начале развития солнечной системы существовало много лун, если мы хотим избежать множества невероятных предположений. Вероятность захвата Луны на какую-либо орбиту вокруг Земли меньше, чем вероятность захвата при столкновении ее с Землей. Детально эти вопросы обсуждались в работе Юри и Мак-Дональда [86]. Герстенкорн [23] пришел к выводу о том, что захват произошел на орбиту с обратным движением, которая затем повернулась, пройдя над поясами Земли, и движение стало прямым. Предполагалось, что минимальная орбита находилась вблизи предела Роша на расстоянии в 2,9 земного радиуса для тела с плотностью Луны. В процессе захвата большое количество энергии должно было рассеяться в виде тепла, а именно порядка 10^{11} эрг на грамм лунного вещества. Часть этой энергии должна была рассеяться в Луне, вероятно, в поверхностных слоях и могла бы послужить причиной образования ее расплавленного поверхностного слоя, как говорилось выше. Такой процесс плавления оказался бы более интенсивным в полусфере Луны, обращенной к Земле, и мог привести к появлению на поверхности этой полусферы более обширных участков морей. Если бы такой нагрев охватил все тело Луны, существование масконов стало бы весьма сомнительным. Юри и Мак-Дональд [86] склонны считать, что столкновения с другими телами, движущимися вокруг Земли, способствовали захвату и что начальные орбиты могли быть намного больше, исключая таким образом трудности, связанные с нагревом. Кроме того, при таком предположении плотность углового момента первоначального аккумуляирования Земли ложится на эмпирическую кривую Мак-Дональда [41], который показал, что логарифм плотности углового момента планет, графически представленный как функции логарифма массы, имеет вид прямой линии с наклоном около 0,82.

Указанная гипотетическая модель происхождения Луны постулирует, что Луна аккумуляировалась где-то в другом месте. Если принять гипотезу захвата, проблемы способа аккумуляции и общего химического состава остаются открытыми. До настоящего времени была предложена только модель газовой сфе-

ры [80, 82], но возможны и другие модели, хотя их правдоподобный расчет затруднителен. В этом случае полагают, что в плоском диске туманности возникли двумерные гравитационные неустойчивости согласно формуле, предложенной Джинсом и уточненной Чандрасекаром [15]. В применении к этой задаче формулы следует считать приближенными вследствие того, что присутствие твердых частиц приводит к росту неустойчивости.

Температуры, необходимые для образования в туманности тел размера Луны, очень низкие, а масса облака должна составлять значительную долю массы Солнца. Как предполагает Альвен в своей гипотезе с привлечением магнитного поля, масса такого порядка должна была быть потеряна протосолнцем, чтобы уменьшить его угловой момент, а Хербиг [27] считает, что у звезд типа Т Тельца должны быть пылевые облака с массой, приблизительно равной солнечной.

Аккумуляция лунных масс в центре таких газовых образований в результате воздействия гравитации с энергией аккумуляции, поглощаемой большой массой газа, могла происходить при низких температурах, если радиусы были большими. Если в последующем шло сжатие газовой массы, поверхностные слои центрального лунного объекта могли нагреться до высоких температур, восстановленное жидкое железо вынесло бы сидерофильные, а жидкий сульфид железа — халькофильные элементы (см. [10]). С медленным распадом газовых сфер шло бы медленное охлаждение центральной массы, а при полном исчезновении газов — более быстрое охлаждение до низких температур. Трудной проблемой остается химический состав. В случае малого относительного содержания железа в Солнце, как это считалось в течение многих лет, Луна состоит из первичного нелетучего солнечного вещества, однако с пересмотром относительных концентраций элементов в солнечном веществе плотность первичного нелетучего солнечного вещества становится близкой к 4 г/см^3 и не соответствует плотности Луны. Если к гипотезе захвата относиться серьезно, эту проблему надо решить. Углистые хондриты — весьма распространенный тип метеоритов, если судить по наблюдениям падений, а среди них тип III (группа Vigarano) имеет соответствующую плотность и низкое содержание калия, так что можно создать твердую Луну, если центральное тело имело такой или близкий к такому химический состав. Эти метеориты содержат воду и большое количество углерода.

Низкое содержание воды и углерода в поверхностных образцах резко противоречит этому предположению, но не исключает его⁶.

Маркус [42, 43], В. С. Сафронов [2] и Хартман [26] рассматривали другие пути аккумуляции больших тел из твердых тел меньшей величины в отсутствие газа, который безусловно необходим, если более летучие элементы удалены из недр Луны. В этом случае последовательность событий должна была привести к утрате летучих при температуре порядка 1500°K и они должны были исчезнуть из области, в которой аккумуляровались Луна и Земля до того, как началась аккумуляция. Если летучие содержатся в недрах Луны, это указывает на формирование Луны в газовой сфере, и Земля должна была образоваться из обломков таких объектов.

Недавно Камерон [14] предположил, что Луна конденсировалась из газовой солнечной туманности внутри орбиты Меркурия, где конденсировались наименее летучие составляющие, а именно CaO и Al₂O₃. Они образовали Луну, которая была отброшена Меркурием на орбиту, пересекающую орбиты Венеры и Земли, и затем захвачена Землей. Таким образом, Луна образовалась в области солнечной туманности, где железо оставалось в значительной мере в газообразном виде. Так он объясняет низкую плотность Луны и, возможно, химический состав. Оба эти механических события кажутся невероятными,

хотя и не могут быть полностью отвергнуты. Если Луна была захвачена, она должна была образоваться независимо от Земли как отдельная первозданная планета и в этом случае была бы, вероятно, старше, чем Земля. Известные в настоящее время возрастные показатели свидетельствуют о том, что Луна как самостоятельное тело существовала примерно в эпоху образования метеоритов. Возможность установления тем же способом возраста Земли утрачена.

Как указывалось выше, Юпитер и его спутники напоминают «маленькую» солнечную систему, и складывается впечатление об образовании этих спутников в непосредственном соседстве с планетой. Тот факт, что в солнечной системе имеется семь спутников, равных по своей величине спутнику Земли Луне, и что средняя масса других спутников и астероидов приблизительно составляет четверть массы земной Луны, указывает на то, что объекты лунных размеров в солнечной системе пользуются предпочтением. Наклоны осей вращения планет дают основание думать, что рядом находились большие объекты, которые столкнулись с формирующимися планетами на последних стадиях их аккумуляции. Возможно, что наша Луна не такое уж уникальное тело, как часто принято думать!

*

Работа выполнена по договору-заказу NASA NGR 05-009-150-2. Автор хотел бы поблагодарить Арнольда, Марти, Манк, Джильбрейт и Лэтэм за их критические замечания в процессе подготовки рукописи, а также советских составителей Л. Н. Бондаренко, И. В. Гаврилова, Б. Ю. Левина, Г. А. Лейкина, Т. В. Тихонову и В. С. Троицкого.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Б. Ю. Происхождение Земли. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1972, 7, 5—21.
2. Сафронов В. С. Размеры наибольших тел, падавших на планеты. Астрон. ж., 1965, 42, 1270—1278.
3. Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М., «Наука», 1969.
4. Шмидт О. Ю. Четыре лекции о теории происхождения Земли. Изд. 3, дополн. М., Изд-во АН СССР, 1952.
5. Abell P. I., Cadogan P. H., Eglinton G., Maxwell J. R., Pillinger C. T. Survey of lunar carbon compounds. I. The presence of indigenous gases and hydrolyzable carbon compounds in Apollo 11 and Apollo 12 samples. Proc. 2nd Lunar Sci. Conf., v. 2, 1971, p. 1843.
6. Adler I., Trombka J., Gerard J., Lowman P.,

- Schmadebeck R., Blodget H., Eller E., Yin L., Lamothé R., Gorenstein P., Bjorkholm P. Apollo 15 geochemical X-ray fluorescence experiment: preliminary report. Science, 1972, 175, 436—440.
7. Albee A. L., Burnett D. S., Chodos A. A., Eugster O. M., Huneke J. C., Papanastassiou D. A., Podossek F. A., Russ G., Price II, Sanz H. G., Tera F., Wasserburg G. J. Ages, irradiation history, and chemical composition of lunar rocks from the Sea of Tranquillity. Science, 1970, 167 (3918), 463.
8. Alphen H. Early history of the Moon and the Earth. Icarus, 1963, 1 (4), 357—363.
9. Arnold J. R., Trombka J. I., Peterson L. E., Reedy R. C., Metzger A. E. Lunar orbital gamma-ray measurements from Apollo 15 and Apollo 16. Space Res., 1973, 13, 927—933.

10. *Bainbridge J.* Gas imperfections and physical conditions in gaseous spheres of lunar mass. *Astrophys. J.*, 1962, 136 (1), 202—210.
11. *Baldwin R. B.* Lunar mascons: another interpretation. *Science*, 1968, 162 (3860), 1407.
12. *Booker J. R.* Thermal state of the Moon. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1970, 51 (11), 774.
13. *Cameron A. G. W.* The pre-Hayashi phase of stellar evolution. In: *Low Luminosity Stars*, S. S. Kumar (Ed.). N. Y., Gordon and Breach Sci. Publ., 1969, p. 423—481.
14. *Cameron A. G. W.* Properties of the solar nebula in the origin of the Moon. *Moon*, 1973, 7, 377.
15. *Chandrasekhar S.* The gravitational instability of an infinite homogeneous medium when a Coriolis acceleration is acting. *Vistas in Astronomy*, 1955, 1, 344—347.
16. *Chandrasekhar S.* Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. London and N. Y., Oxford Univ. Press, 1961.
17. *Compston W., Berry H., Vernon M. J., Chappell B. W., Kaye M. J.* Rubidium—Strontium chronology and chemistry of lunar material from the Ocean of Storms. *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf.*, v. 2, 1971, p. 1471.
18. *Compston W., Chappell B. W., Arntens P. A., Vernon M. J.* The chemistry and age of Apollo 11 lunar material. *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, v. 2, 1970, p. 1007.
19. *Crozaz G.* Evidence for extinct Pu^{244} : implications of extinct Pu^{244} in lunar material. In: *Lunar Science-III, Abstrs 3rd Lunar Sci. Conf.*, G. Watkins (Ed.), LSI Contrib., 1972, N 88, p. 165.
20. *Crozaz G., Drozd R., Graf H., Hohenberg C. M., Monnin M., Ragan D., Ralston C., Seitz M., Shirck J., Walker R. M., Zimmerman J.* Evidence for extinct Pu^{244} : implications for age of the Preimbrum crust. In: *Lunar Science-III, Abstrs 3rd Lunar Sci. Conf.*, C. Watkins (Ed.), LSI Contrib., 1972, N 88, p. 164.
21. *Fox S. W., Harada K., Hare P. E., Hinsch G., Mueller G.* Bioorganic compounds and glassy micro-particles in lunar fires and other materials. *Science*, 1970, 167 (3918), 767—770.
22. *Gerstenkorn H.* Über Gezeitenreibung beim zweikörper Problem. *Z. Astrophys.*, 1955, 36, 245.
23. *Gerstenkorn H.* The model of the so-called 'weak' tidal friction and limits of its applicability. In: *Mantles of the Earth and Terrestrial Planets*, S. K. Runcorn (Ed.), N. Y., Wiley (Intersci.), 1967, p. 229—234.
24. *Gold T., Soter S.* Apollo 12 seismic signal: indication of a deep layer of powder. *Science*, 1970, 169 (3950), 1071.
25. *Goldreich P.* History of the lunar orbit. *Rev. Geophys.*, 1966, 4 (4), 411—439.
26. *Hartmann W. K.* Growth of planetesimals in nebulae surrounding young stars. *Mem. [8^e]. Soc. Roy. Sci. Liege*, ser. 5, 1970, 19, 215—227.
27. *Herbig G. H.* Pre-main sequence stellar evolution: introductory remarks. In: *Mem [8^e]. Soc. Roy. Sci. Liege*, ser. 5, t. 19, 1970, p. 13—26.
28. *Hodgson G. W., Peterson E., Kvenvolden K. A., Bunnberg E., Halpern B., Ponnamperna C.* Search for porphyrins in lunar dust. *Science*, 1970, 167 (3918), 763—765.
29. *Kaula W. M.* Moon: gravitational field. In: *McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology*, 1969, N. Y., McGraw-Hill Co., 1969, p. 222.
30. *Kaula W. M., Schubert G., Lingenfelter R. E., Sjogren W. L., Wollenhaupt W. R.* Lunar topography from Apollo 15 and 16 laser altimetry. *Proc. 4th Lunar Sci. Conf.*, N. Y. Pergamon Press, 1973, p. 2811—2819.
31. *Kopal Z.* The Moon, D. Reidel Publ. Co., 1969, p. 88.
32. *Kopal Z.* On the depth of the lunar regolith. *The Moon*, 1970, 1, 451.
33. *Koziel K.* Differences in the Moon's moments of inertia. *Proc. Roy. Soc. A*, 1967, 296 (1446), 248.
34. *Kuiper G. P.* On the origin of the lunar surface features. *Proc. Nat. Acad. Sci., USA*, 1954, 40 (12), 1096.
35. *Latham G., Dorman J., Duennebier F., Ewing M., Lammlein D., Nakamura Y.* Moonquakes, meteoroids, and the state of the lunar interior. *Proc. 4th Lunar Sci. Conf.*, N. Y. Pergamon Press, 1973, p. 2515—2527.
36. *Latham G. V., Ewing M., Press F., Sutton G., Dorman J., Nakamura Y., Toksöz N., Wiggins R., Derr J., Duennebier F.* Passive seismic experiment. *Science*, 1970, 167 (3918), 455—457.
37. *Latham G. V., Ewing M., Press F., Sutton G., Dorman J., Nakamura Y., Toksöz N., Wiggins R., Derr J., Duennebier F.* Apollo 11 passive seismic experiment. *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, v. 3, 1970, p. 2309.
38. *Latham G. V., Ewing M., Press F., Sutton G., Dorman J., Nakamura Y., Toksöz N., Wiggins R., and Kovach R.* Passive seismic experiment. *Apollo 12. Preliminary Sci. Rept.*, p. 39, Preprints, 1970.
39. *Levin B. J.* Thermal effects on the figure of the Moon. *Proc. Roy. Soc. A*, 1967, 296 (1446), 266.
40. *Lorell J., Sjogren W.* Selenodesy experiment. In: *Space Program Summary*, v. III. Pasadena, Cal., Jet Propulsion Lab., 1968, p. 47—50.
41. *MacDonald G. J. F.* Origin of the moon; dynamical considerations. In: *The Earth-Moon System*, B. S. Marsden and A. G. W. Cameron (Eds.). N. Y., Plenum Press, 1966, p. 170.
42. *Marcus A. H.* Positive stable laws and the mass distribution of planetesimals. *Icarus*, 1965, 4 (3), 267.
43. *Marcus A. H.* Formation of the planets by accretion of planetesimals: some statistical problems. *Icarus*, 1967, 7 (3), 283—296.
44. *Marti K., Lugmair G. W., Urey H. C.* Solar wind gases, cosmic ray spallation products and the irradiation history of Apollo 11 samples. In: *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, v. 2, 1970, p. 1357.
45. *Michael W. H., Jr., Blakeshear W. T.* Recent results on the mass, gravitational field and moments of inertia of the Moon. *The Moon*, 1972, 3, 388.
46. *Michael W. H., Jr., Blakeshear W. T., Gapcynski J. P.* Results on the mass and gravitational field of the Moon as determined from dynamics of lunar satellites. In: *Dynamics of Satellites*, Bruno Morondo (Ed.). Springer-Verlag, 1970, p. 42—56; 12th Plenary Meet. COSPAR, Prague, 1969.
47. *Muller P. M., Sjogren W. L.* Mascons: lunar mass concentrations. *Science*, 1968, 161 (3842), 680.
48. *Muller P. M., Sjogren W. L.* Lunar gravimetrics. In: *Space Res. X*, T. M. Donahue (Ed.). North Holland Publ. Co., 1970, p. 975—983.
49. *Nagy B., Drew C. M., Hamilton P. B., Modzeleski V. E., Murphy M. E., Scott W. M., Urey H. C., Young M.* Organic compounds in lunar samples: pyrolysis products, hydrocarbons, amino acids. *Science*, 1970, 167 (3918), 770—773.
50. *O'Keefe J. A.* Isostasy on the Moon. *Science*, 1968, 162 (3860), 1405.
51. *O'Keefe J. A.* Origin of the Moon. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74 (10), 2758.
52. *O'Keefe J. A., Cameron W. S.* Evidence from the

- Moon's surface features for the production of lunar granites. *Icarus*, 1962, 1 (3), 281.
53. Papanastassiou D. A., Wasserburg G. J. Initial strontium isotopic abundances and the resolution of small time differences in the formation of planetary objects. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 1969, 5, 361—376.
 54. Papanastassiou D. A., Wasserburg G. J. Rb—Sr age of a Luna XVI basalt and the model age of lunar soils. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 1972, 13, 368.
 55. Reynolds J. H. Determination of the age of the elements. *Phys. Rev. Letters*, 1960, 4, 8.
 56. Ringwood A. E., Essene E. Petrogenesis of Apollo 11 basalts: internal constitution and origin of the Moon. In: *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, v. 1. Pergamon Press, 1970, p. 769.
 57. Roberson F. I., Kaula W. M. Apollo 15 laser altimeter. In: *Apollo 15 Preliminary Sci. Rept*, 1972, p. 25—48.
 58. Rosholt J. N., Tatsumoto M. Isotopic composition of thorium and uranium in Apollo 12 samples. In: *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf.*, v. 2, 1971, p. 1577.
 59. Runcorn S. K. Convection in the Moon and the existence of a lunar core. In: *Proc. Roy. Soc. A*, 1967, 296 (1446), 270—284.
 60. Runcorn S. K., Urey H. C. A new theory of lunar magnetism. *Science*, 1973, 180, 636.
 61. Schaeffer O. A., Husain L., Sutter J., Funkhouser J., Kirsten T., Kaneoka I. The ages of lunar material from Fra Mauro and the Hadley Rille-Apennine front area. In: *Abstrs 3rd Lunar Sci. Conf.* C. Watkins (Ed.), 1972, p. 677.
 62. Seeger C. R. A geological criterion applied to Lunar Orbiter V photographs. *Mod. Geol.*, 1970, 1 (3), 203.
 63. Shoemaker E. M., Hait M. H., Swann G. A., Schlichter D. L., Dahlem D. H., Schaber G. G., Sutton R. L. Lunar regolith at Tranquillity Base. *Science*, 1970, 167 (3918), 452—455.
 64. Silver L. T. Uranium-thorium-lead isotopes in some Tranquillity Base samples and their implications for lunar history. In: *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, v. 2, 1970, p. 1533.
 - 64a. Sonett C. P., Runcorn S. K. Electromagnetic evidence concerning the lunar interior and its evolution. *The Moon*, 1973, 8 (9), 308—334.
 65. Stipe J. G. Iron meteorites as mascons. *Science*, 1968, 162 (3860), 1402.
 66. Tatsumoto M., Knight R. J., Doe B. R. U-Th-Pb systematics of Apollo 12 lunar samples. In: *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf.*, v. 2, 1971, p. 1521.
 67. Tatsumoto M., Rosholt J. N. Age of the Moon: an isotopic study of uranium-thorium-lead systematics of lunar samples. *Science*, 1970, 167, 461.
 68. Tera F., Wasserburg G. J. Oxygen isotope composition of the Luna 16 soil. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 1972, 13, 455.
 69. Toksöz M. N., Press F., Anderson K., Dainty A., Latham G., Ewing M., Dorman J., Lammlin D., Sutton G., Duennel F., Nakamura Y. Lunar crust: structure and composition. *Science*, 1972, 176 (4083), 1012—1016.
 70. Tozer D. C. The moon's thermal state and an interpretation of the lunar electrical conductivity distribution. *The Moon*, 1972, 5, 90—105.
 71. Turkevich A. L., Franzgrote E. J., Patterson J. H. Chemical analysis of the Moon at the Surveyor V landing site. *Science*, 1967, 158 (3801), 635.
 72. Turkevich A. L., Patterson J. H., Franzgrote E. J. VI landing site: preliminary results. *Science*, 1968, 160 (3832), 1108.
 73. Turkevich A. L., Franzgrote E. J., Patterson J. H. Chemical Analysis of the Moon at the Surveyor VII landing site: preliminary results. *Science*, 1968, 162 (3849), 117.
 74. Turkevich A. L., Franzgrote E. J., Patterson J. H. Chemical composition of the lunar surface in Mare Tranquillitatis. *Science*, 1969, 165 (3890), 277—279.
 75. Turner G. Argon-40/Argon-39 dating of lunar rock samples. *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, v. 2, 1970, p. 1665.
 76. Turner G. Ar⁴⁰—Ar³⁹ age from the lunar maria. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 1971, 11, 169.
 77. Turner G. Ar⁴⁰—Ar³⁹ age and cosmic ray irradiation history of the Apollo 15 anorthosite 15415. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 1972, 14, 169—175.
 78. Turner G., Huneke J. C., Podosek F. A., Wasserburg G. J. Ar⁴⁰—Ar³⁹ ages and cosmic ray exposure age of Apollo 14 samples. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 1971, 12, 49.
 79. Urey H. C. Some criticisms of «On the origin of the lunar surface features» by G. P. Kuiper. In: *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 1955, 41 (7) 423.
 80. Urey H. C. The early history of the solar system as indicated by the meteorites. In: *Hugo Mueller Lecture*, *Proc. Chem. Soc.*, London, 1958, p. 87.
 81. Urey H. C. Chemical evidence relative to the origin of the solar system. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1966, 131 (3), 199—223.
 82. Urey H. C. Origin of the Moon. III. In: *Mantles of the Earth and the Terrestrial Planets*, S. K. Runcorn (Ed.). N. Y., Wiley and Sons, 1967, p. 251.
 83. Urey H. C. Mascons and the history of the Moon. *Science*, 1968, 162 (3860), 1408.
 84. Urey H. C., Craig H. The composition of the stone meteorites and the origin of the meteorites. *Geochim. et cosmochim. acta*, 1953, 4 (1/2), 36.
 85. Urey H. C., Elsas W. M., Rochester M. G. Note on the internal structure of the Moon. *Astrophys. J.*, 1959, 129 (3), 842.
 86. Urey H. C., MacDonald G. J. F. Origin and history of the Moon. In: *Physics and Astronomy of the Moon*, Z. Kopal (Ed.), 2nd ed., ch. 6. N. Y., Academic Press, 1971, p. 213—289.
 87. Urey H. C., Marti K., Hawkins J. W., Liu M. K. Model history of the lunar surface. *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf.*, v. 2, 1971, 987—998.
 88. Van Dorn W. G. Lunar maria: structure and evolution. *Science*, 1969, 165 (3894), 693.
 89. Wänke H. Chemistry of the Moon. *Topics Curr. Chem.*, 1974, 44, 115—154.
 90. Wasserburg G. J., Turner G., Tera F., Podosek F. A., Papanastassiou D. A., Huneke J. C. Comparison of Rb—Sr, K—Ar and U—Th—Pb ages: lunar chronology and evolution. In: *Abstrs 3rd Lunar Sci. Conf.*, C. Watkins (Ed.). LSI Contrib., 1972, N 88, p. 788.
 91. Wetherill G. W. Lunar interior: constraint on basaltic composition. *Science*, 1968, 160, 1256.
 92. Wise D. U. Origin of the Moon by rotational fission during formation of the Earth's core. *J. Geophys. Res.*, 1963, 68 (5), 1547—1554.
 93. Wise D. U., Yates M. T. Mascons as structured relief on a lunar «Moho». *J. Geophys. Res.*, 1970, 75 (2), 261—268.
 94. Wood J. A. Petrology of the lunar soil and geophysical implications. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75 (33), 6497—6513.
 95. Wood J. A. Thermal history and early magnetism in the Moon. *Icarus*, 1972, 16 (2), 229—240.

Глава 4

ПЛАНЕТЫ ТИПА ЗЕМЛИ (МЕРКУРИЙ, ВЕНЕРА, МАРС) ¹

В. Д. ДАВЫДОВ

Институт космических исследований АН СССР,
Москва, СССР

М. Я. МАРОВ

Институт прикладной математики АН СССР,
Москва, СССР

Последние годы отмечены громадным прогрессом в изучении планет солнечной системы. Особенно крупные успехи достигнуты в исследованиях ближайших к Земле планет — Венеры и Марса. Полеты космических аппаратов наряду с совершенствованием техники наземных наблюдений и открывшимися возможностями их более надежной интерпретации обеспечили получение принципиально новых результатов, в ряде случаев революционизировавших существовавшие концепции о природе этих планет.

Землю, Венеру, Марс и наиболее близкую к Солнцу планету Меркурий по установившейся терминологии обычно называют планетами земной группы. Наиболее характерным критерием для такого объединения являются довольно близкие средние значения плотности этих планет (см. табл. 1). Это дает основание полагать, что в состав планет земной группы, как и в состав Земли, входят главным образом достаточно тяжелые элементы, характеризующиеся большой распространенностью в космосе: Si, Fe, Ca, Al, Mg и их окислы. Атмосферы этих планет содержат газы, состоящие преимущественно из наиболее распространенных элементов H, C, O, N и их соединений, и имеют окислительный характер, в отличие от атмосфер планет группы Юпитера. Принято считать, что атмосфера является частью фракции летучих, выделившихся при дегазации из недр в процессе дифференциации вещества планеты на оболочки.

Для планет земной группы, находящихся в пределах 1,5 а. е. от Солнца, характерно не слишком большое различие их геометрических размеров и интересное распределение массы. Особенно близки по массе Земля и Венера, а Марс и Меркурий менее массивны,

чем Земля, приблизительно в 10 и 20 раз соответственно. Из этих планет только Земля обладает крупным спутником (который по своим размерам сравним с Меркурием), так что с точки зрения планетной динамики скорее следует говорить о системе Земля — Луна; спутники же Марса Фобос и Деймос чрезвычайно малы по сравнению с самой планетой.

Надо отметить, что изучение системы планета — спутник имеет принципиальное значение для понимания проблемы длительной эволюции небесного тела, особенно когда речь идет о взаимодействии, связанном с обменом энергией.

В этом обзоре внимание сосредоточено на трех планетах — Меркурии, Венере, Марсе. Конечно, для полноты изложения следовало, хотя бы кратко, коснуться природы Земли как наиболее изученного члена семейства планет земной группы, несмотря на то что до последнего времени методы изучения Земли и соседних планет принципиально отличались друг от друга. По существу, лишь запуск первого искусственного спутника послужил началом современной эпохи исследований, которые позволили взглянуть на Землю как на планету и получить такие важнейшие характеристики, как структура радиационного, гравитационного и магнитного полей, особенности взаимодействия с окружающим пространством и т. п. Сопоставление полученных данных с аналогичными характеристиками других планет обеспечило возможности комплексного анализа и обобщений. В свою очередь, геологические и геофизические методы изучения Земли, успехи в исследованиях ее внутреннего строения стали необходимой основой для понимания сложной природы других небесных тел. Такое наметившееся объединение традиционных наук о Земле с планетоведением, бывшим до недавнего времени целиком в сфере наблюдательной астрономии, привело к быстрому ро-

¹ По данным на 1 января 1974 г.

сту новой области науки — физики планет, развитие которой обещает в конечном итоге решение принципиальных вопросов, связанных с зарождением и эволюцией всей планетной системы.

К сожалению, ограниченность объема, отведенного для этого раздела, не позволила включить в него Землю. Авторы сочли более целесообразным подробнее изложить современные представления о других планетах земной группы, тем более что обилие новейшей информации об их природе сделало эту задачу достаточно сложной. Естественно, что предлагаемый вниманию читателя обзор не претендует на абсолютную полноту и в определенном смысле отражает субъективные точки зрения и интересы авторов. Краткость изложения в ряде случаев в какой-то мере компенсируется ссылками на основные первоисточники, к которым отсылается интересующийся подробностями читатель.

Авторы считают своим долгом отметить большой труд, внесенный Рн (США) и В. М. Вахниним (СССР) в предварительную подготовку данных для составления настоящего обзора, а также выразить благодарность всем коллегам, в тесном сотрудничестве с которыми они проводят свою работу.

МЕРКУРИЙ

Меркурий — ближайшая к Солнцу из девяти больших планет; на нашем небе никогда не удаляется от дневного светила больше, чем на 28° , поэтому наблюдать Меркурий с Земли особенно трудно. Время от времени планету можно различить невооруженным глазом как едва заметную светлую точку среди чарующих красок вечерней или утренней зари. В телескоп Меркурий имеет вид серпика или неполного круга, изменения формы которого по мере орбитального движения планеты наглядно показывают, что мы наблюдаем шар, освещенный с одной стороны Солнцем. В период минимальной удаленности от Земли (средний минимум 92 млн. км, минимум миниморум около 80 млн. км) Меркурий на небе земного наблюдателя бывает расположен, к сожалению, возле самого Солнца и обращен к нам своим темным (ночным) полушарием. Такие неудобства наблюдений Меркурия с наземных обсерваторий усугубляют и без того значительные трудности, связанные с малостью угловых размеров объекта, со слабостью приходящего от него энергетического потока и с помехами в земной атмосфере.

Тем не менее исследователям удастся отбрасывать у природы бесценные крупицы новых знаний путем совершенствования сложнейшей аппаратуры и методики наблюдения и ценой напряженной, а подчас даже самоотверженной, работы. До 1974 г. вся информация о Меркурии (а она достаточно обширна) была получена по наземным наблюдениям.

О Меркурии написаны превосходные обзоры (см., например [43, 57, 145, 180]). Однако за последние годы некоторые сведения были уточнены. В настоящем обзоре сделана попытка изложить сведения о физике этой планеты с использованием по возможности новейших данных.

Диаметр, масса и величины, производные от них

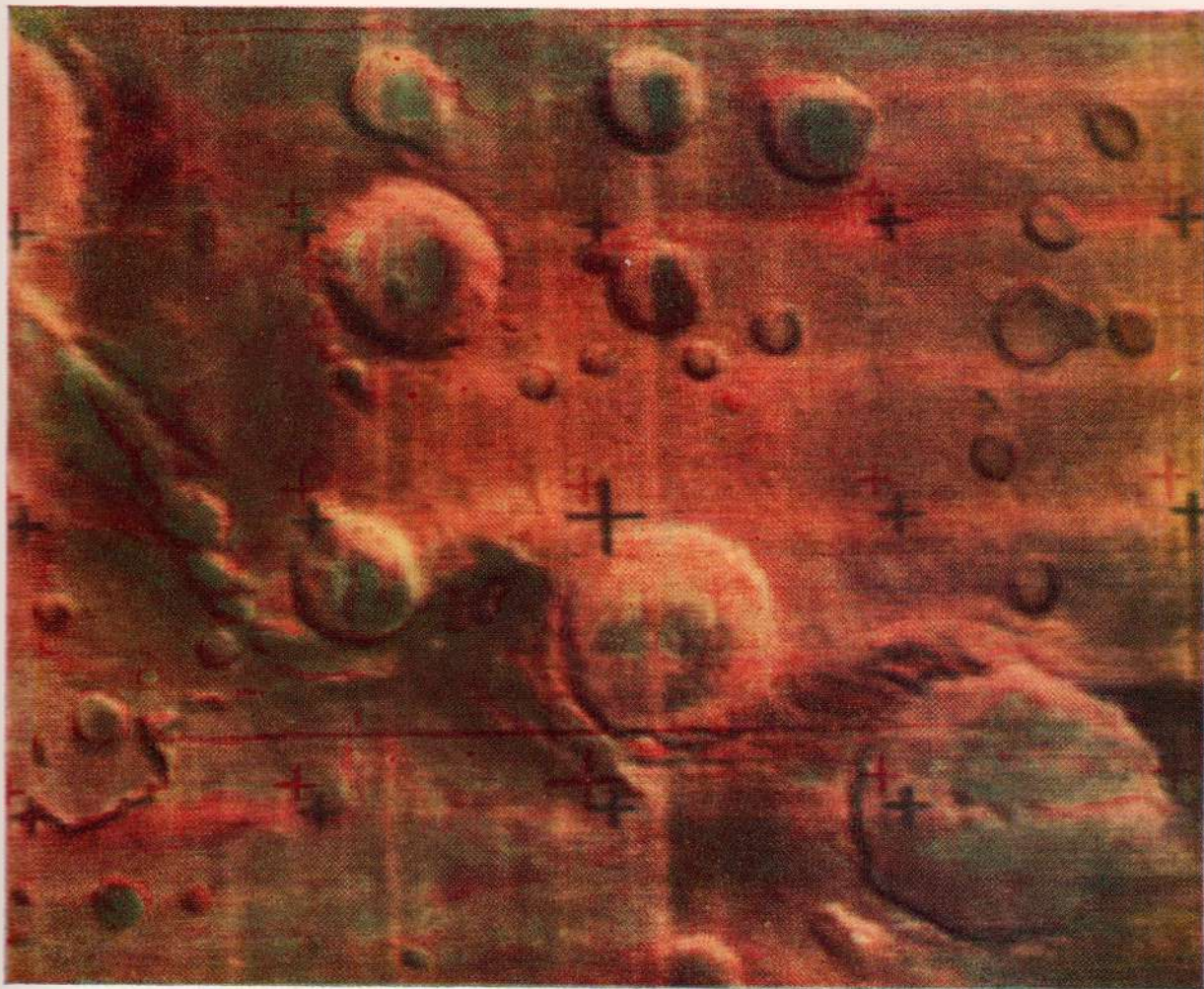
Точные знания размеров и массы планеты совершенно необходимы для нахождения ряда параметров, характеризующих физические условия на поверхности и важных для космонавтики.

Линейные диаметры всех планет, полученные из угловых диаметров, измерявшихся с Земли, являются величинами, зависящими от численного значения астрономической единицы длины². В связи с возможными уточнениями последней исторически сложилась традиция выражать диаметры планет не в линейной мере, а в угловых секундах на расстоянии 1 а. е.

Результаты измерений экваториального диаметра Меркурия заключены в пределах от $6''.2$ до $6''.9$, т. е. согласуются между собой с точностью далеко не астрономической. Обзоры основных результатов можно найти в [43, 94, 240]. Новые измерения дают $6''.73 \pm 0''.03$, что соответствует величине 4882 ± 30 км [36], тогда как применение метода Герцшпрунга показало $D \geq 6''.79$, т. е. $D \geq 4920$ км [207].

Лучший метод нахождения массы любой планеты основан на использовании периодов обращения ее спутников. Поскольку у Меркурия таковых нет, для вычисления его массы используют трудно наблюдаемые

² Астрономическая единица, равная большой полуоси эллипса орбиты Земли, составляет $149,598 \cdot 10^6$ км; по наиболее точным новейшим измерениям [58] равна расстоянию, которое преодолевается светом за промежуток времени $449^s,004\,780 \pm 0^s,000\,001$, тогда как скорость света в вакууме (также являющаяся фундаментальной постоянной) $c = 299\,772,4562 \pm 0,0011$ км · сек⁻¹ [242].



Снимок поверхности Марса, полученный с космического аппарата «Марс-5»

Фотография составлена из трех снимков в синем, зеленом и красном цвете (воспроизведение истинного цвета поверхности Марса затруднено, так как зависит от степени контрастирования в каждом цвете при обработке снимков и их репродуцировании, а также от условий освещения при фотографировании)

эффекты гравитационного взаимодействия с другими небесными телами.

Данные различных авторов [116, 144, 200], полученные с тремя или четырьмя значащими цифрами, согласуются между собой с точностью только до единиц второго десятичного знака. Этой точностью мы ограничимся в данном обзоре.

Отношение масса Солнца/масса планеты близко к $6,0 \cdot 10^6$.

По данным о значениях массы и диаметра средняя плотность оценивается в пределах от 5,30 до 5,46 [206].

Из оценок массы и диаметра планеты легко находятся ускорение силы тяжести и параболическая (вторая космическая) скорость на уровне поверхности; первая величина составляет около 38% от значения для Земли, а вторая — приблизительно 4,3 км/сек.

Первые опыты исследования Меркурия автоматическими приборами из космоса были осуществлены с борта космического аппарата «Маринер-10» (США) 29 марта и 21 сентября 1974 г. На Землю переданы изображения поверхности планеты. Из радиозатменных измерений выведена величина радиуса Меркурия, составляющая на широте 2°N 2440 ± 2 км, а на широте 68°N — 2438 ± 2 км. Анализ трассовых данных позволил уточнить массу Меркурия, которая составляет в единицах отношения массы Солнца к массе планеты $6\,023\,600 \pm 600$. Новое значение средней плотности планеты $5,44 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ [123a].

Высокую среднюю плотность Меркурия (по сравнению с плотностью вещества в земных недрах на уровне соответствующего давления) объясняют обилием тяжелых элементов. В составе Меркурия, по-видимому, преобладает железо [24, 70, 205]. Вывод о высоком содержании железа и, следовательно, об ограниченном содержании силикатов приводит к допущению о значительно более низком содержании радиоактивных веществ в Меркурии, чем в веществе хондритовых метеоритов. Между тем известно, что распад радиоактивных элементов, содержащихся именно в силикатах, является одной из причин разогревания планетных недр. Значит, термическая история и современное состояние недр Меркурия в значительной мере зависят от среднего химического состава. Кроме того, следует учитывать дополнительные факторы, которых мы не знаем. К ним относятся скорость конгломерации планеты из вещества протопланетного облака, обилие и состав радиоактивных элементов в этом веществе,

лучистая энергия, получаемая извне на ранних этапах эволюции. Проведенные С. В. Маевой расчеты [35] термической истории Меркурия показали, что на всех этапах эволюции температура в недрах планеты никогда не достигала значения, необходимого для расплавления силикатного вещества или железа. Расслоение вещества по удельному весу (гравитационная дифференциация) в твердых недрах планеты происходит значительно медленнее, чем в случае расплавления. Тем не менее некоторые специалисты допускают, что Меркурий может иметь ядро.

Различные модели внутреннего строения Меркурия описываются в [152], где рассмотрены и модели с однородным распределением металлического железа и с его сегрегацией в ядро.

Поверхность. Фотометрические свойства и современные данные о рельефе

Поверхность Меркурия, освещенная солнечными лучами, кажется яркой, но измерения показали, что она довольно темная, точнее — темно-бурая. Визуальное альbedo Бонда³ для Меркурия равно 0,056 [123], а интегральное 0,09 [42]. Средняя яркость дневной поверхности резко возрастает с приближением угла фазы к нулевому значению. Кривые изменения яркости в зависимости от угла фазы для Меркурия и Луны практически совпадают [118, 123]. Спектральная отражательная способность увеличивается с возрастанием длины волны по крайней мере до 1,6 мкм [42]. Приведенные к нулевой фазе результаты измерений спектральной отражательной способности Меркурия в диапазоне от 0,32 до 1,05 мкм изображены на рис. 1, заимствованном из работы [160]. Кривая отражательной способности Меркурия сходна с таковой для гористых и морских участков поверхности Луны и отличается от кривых для дна лунных кратеров. Исходя из этих результатов, Мак-Корд и Адамс [160] пришли к заключению, что поверхность Меркурия покрыта, вероятно,

³ Альbedo Бонда (или сферическое альbedo) выражается дробью, в числителе которой — поток солнечного излучения, отраженный дневным полушарием планеты по всем направлениям, а в знаменателе — поток солнечного излучения, падающий на планету. К названию «альbedo» добавляют слово, указывающее либо на отсутствие ограничений спектрального диапазона (интегральное альbedo), либо на тип спектральной чувствительности используемого приемника излучения (например, визуальное альbedo).

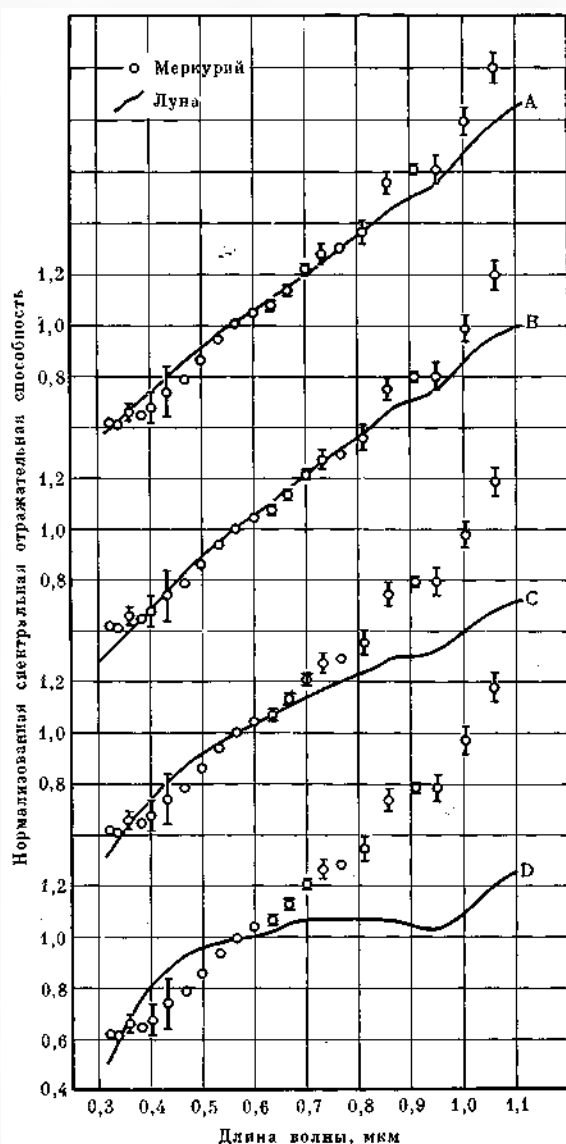


Рис. 1. Спектральная отражательная способность Меркурия и ее сравнение со спектром отражения различных территорий на Луне

A — нагорья;
B — «моря»;
C — светлые кратеры в горных областях;
D — светлый кратер
(из работы Мак-Корда и Адамса [160])

луноподобным твердым веществом, богатым темными вулканическими стеклами, например пироксеном. Причиной низкого альбедо может быть большое содержание в минералах железа и титана.

При исключительно благоприятных условиях, которые случаются довольно редко, на

поверхности Меркурия в телескоп можно заметить темные и светлые пятна.

Неоднократно предпринимались попытки составить карту Меркурия. Исторические карты мы здесь рассматривать не будем, поскольку их составители пользовались ошибочными данными о периоде осевого вращения планеты. Новые попытки составить карту Меркурия на основе современных представлений были предприняты Камишелем и Дольфюсом [72, 73] и Крукшенком и Чепменом [84]. Более современная, улучшенная карта деталей поверхности Меркурия с указанием координат избранных деталей была составлена в 1972 г. Мюрреем, Смитом и Дольфюсом [187] по материалам фотографических и визуальных наблюдений за 1942—1970 гг. в астрономических обсерваториях Пик-дю-Миди (Франция) и Нью-Мехико (США).

Эта карта изображена на рис. 2. Долготы даются в новой системе отсчета, рекомендованной на 14-й сессии Международного астрономического союза (Брайтон, 1970) [187]. По заключению составителей карты видимый контраст деталей на поверхности Меркурия несколько меньше, чем в случае контрастов море — материк на Луне. Возможно, что уменьшение контраста связано с размытием изображений темных деталей при наблюдениях Меркурия, так как угловое разрешение получается в 300 раз худшее, чем при наблюдениях Луны. Область между 350 и 90° географической⁴ долготы, занимающая более четверти поверхности планеты, практически лишена больших контрастных деталей.

Авторы работы [187] отмечают, что детали на поверхности Меркурия оставались неизменными на протяжении более чем 30-летнего периода наблюдений и появление атмосферной дымки в каких-либо областях планеты не обнаружено.

Исследования рельефа поверхности Меркурия выходят за пределы возможностей оптических методов современной наземной астрономии. В последнее десятилетие для изучения поверхности ближайших планет с успехом используют радиолокацию. Возможности радиолокации планет возрастают как в результате совершенствования аппаратуры, так и вследствие применения новой методики анализа данных. Однако Меркурий является очень трудным объектом исследо-

⁴ Название системы координат на поверхности Меркурия происходит от греческого наименования этой планеты — Гермес.

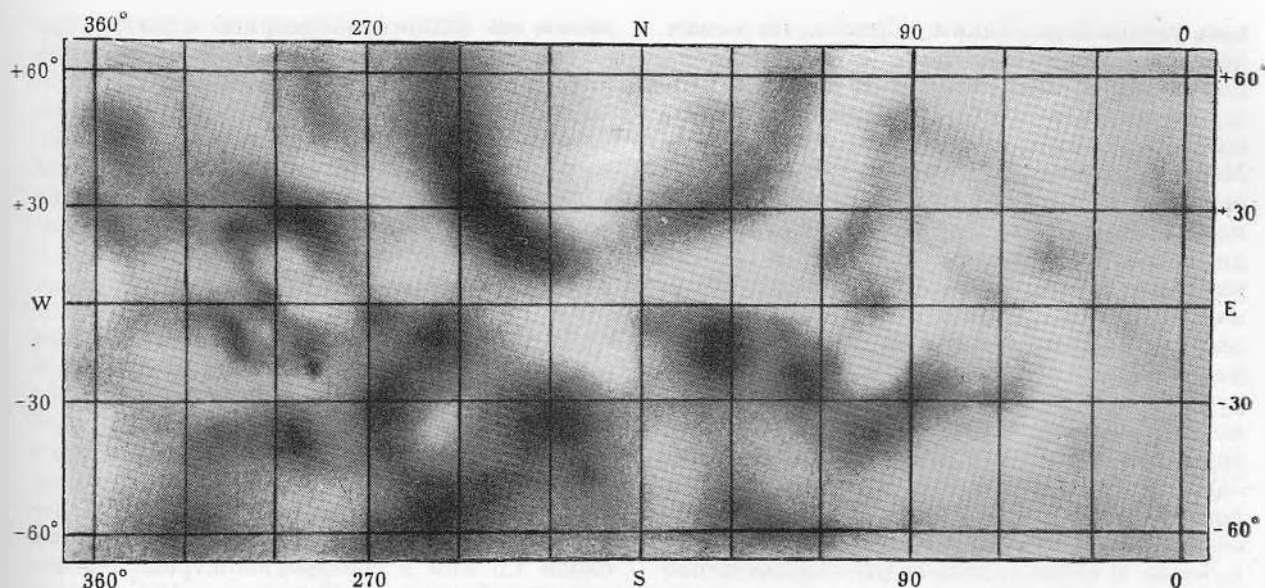


Рис. 2. Карта поверхности Меркурия (по [187])

ваний, поскольку принимаемый от него сигнал радиоэхо имеет мощность, приблизительно в 100 раз меньшую, чем от Венеры.

До 1970 г. группа исследователей Массачусетского технологического института безуспешно пыталась использовать двумерные радарные спектры (время задержки и частота) для оценки профиля поверхности Меркурия [233]. Слабость отраженного сигнала не позволила выделить заметные детали рельефа или найти отклонения поверхности Меркурия от поверхности сферы. Два более успешных эксперимента по радиолокации Меркурия были проведены в 1970—1971 гг. в Голдстоуне Лабораторией реактивных двигателей Калифорнийского технологического института на волне 12,5 см и в Хайстеке Массачусетским технологическим институтом на волне 3,8 см. Была достигнута чувствительность, достаточная для изучения характеристики рассеяния. И функция рассеяния и поляризация излучения на волне 12,5 см показали, что поверхность Меркурия в значительной мере занята мелкими неровностями [112]. По измерениям на волне 3,8 см [130] в нескольких наблюдавшихся участках экваториальной области планеты средняя величина уклонов найдена равной приблизительно 10° . Эта величина заметно изменяется с долготой. На Меркурии наблюдались топографические детали с вариациями радиуса планеты порядка 1—3 км.

Радиолокация позволила измерить «коэффициент отражения» планеты в микроволновом диапазоне; он оказался примерно таким же, как у Луны. Поперечник рассеяния⁵ Меркурия изменялся во время наблюдений в пределах от 4 до 8% от оптического поперечника.

Параметры осевого (суточного) вращения планеты

Неоднократно предпринимались попытки найти период осевого вращения планеты по наблюдениям пятен на поверхности. Но старые визуальные наблюдения приводили к ложному выводу о том, что Меркурий повернут к Солнцу всегда одним и тем же полушарием, т. е. к выводу о равенстве сидерического периода осевого вращения и сидерического⁶ периода обращения по орбите (87,97 суток). Такое ошибочное мнение сохранялось вплоть до открытия Петтенджила и Дайса [191], которые по данным радиолокационных исследований нашли, что сидерический период осевого вращения Меркурия равен 59 ± 3 суток. Впоследствии это значе-

⁵ Радарное поперечное сечение планеты находится из полной мощности отраженного радиоизлучения; определяется как геометрическое сечение идеально проводящей сферы, находящейся на таком же расстоянии, как исследуемая планета, и дающей такую же мощность радиоэхо; выражается обычно в процентах от геометрического сечения планеты.

⁶ Термин «сидерический» относится к движению объекта в системе координат, связанной с неподвижными звездами.

ние уточнялось. Таким образом, на самом деле Меркурий вращается, но столь медленно, что его осевое вращение трудно заметить в течение короткого промежутка времени, благоприятного для визуальных наблюдений. Многие авторы объясняют долгую жизнь ошибочной гипотезы синхронного вращения планеты «роковой» квазисоизмеримостью периода этого вращения с периодом наступления условий, наиболее благоприятных для наблюдения Меркурия (для одной астрономической обсерватории за пределами тропического пояса — только с таким уточнением утверждение будет справедливо). Необходимое стечение обстоятельств повторяется через три синодических периода, т. е. через 348 суток, а за это время Меркурий успевает повернуться приблизительно на целое число оборотов как по отношению к Солнцу, так и к Земле. В таком случае видимое размещение деталей на диске планеты и положение подсолнечной точки среди них воспроизводятся с мало заметными изменениями.

Впрочем, именно оптические наблюдения помогли уточнить период вращения Меркурия после его грубой, но надежной оценки радарным методом. Камишель и Дольфус [72] на основе обработки архивов обсерватории Пик-дю-Миди за 1942—1966 гг. нашли период равным $58,67 \pm 0,03$ суток. Смит и Риис [232] также использовали многолетние фотографические архивы и получили период вращения $58,663 \pm 0,021$ суток. Точность радарных наблюдений непрерывно улучшается и заметно приблизилась к точности оптических методов. Новые радарные наблюдения [112] дают период, равный 58,65 суток, с ошибкой не более 0,4%.

Мюррей, Смит и Дольфус [187] дополнили прежние архивы фотоснимков и зарисовок Меркурия новыми оптическими наблюдениями на обсерваториях Пик-дю-Миди и Нью-Мехико и получили период вращения равным $58,644 \pm 0,009$ суток. Направление оси вращения планеты найдено перпендикулярным плоскости орбиты с вероятным отклонением не более 3° .

Период осевого вращения Меркурия — величина не случайная: промежуток времени 58,6462 суток составляет в точности $2/3$ от орбитального периода Меркурия. Это интересный вариант резонанса в спиновых колебаниях, вызванных действием гравитации Солнца на планету, внутри которой размещение массы нельзя считать строго концентрическим. Вращение с периодом $2/3$ периода обращения должно быть устойчивым [78]:

малая ось эллипсоида инерции планеты при каждом возвращении Меркурия в точку перигелия бывает ориентирована вдоль направления к Солнцу. В работе [140] показано, что для возникновения спиново-орбитального резонанса $3/2$ требуется величина сжатия эллипсоида инерции в плоскости экватора $(B - A)/C \geq 10^{-5}$, т. е. весьма незначительная.

Проблема атмосферы Меркурия

Дольфус [92, 93] на основе измерений поляризации рассеянного планетой света в различных участках спектра нашел атмосферное давление у поверхности Меркурия близким к 1 мб. Мороз [42] получил оценку такого же порядка величины (содержание CO_2 , равное $0,3 \div 7,0 \text{ г/см}^2$) по избытку поглощения над теллурическим в полосе CO_2 около 1,6 мкм в спектре Меркурия. Однако попытка Биндера и Крукшенка [68] повторить измерения Мороза дала отрицательный результат. Что касается особенностей поляризации Меркурия, то О'Лири и Ри [188] объясняют их одними только свойствами поверхности, без привлечения атмосферных эффектов.

В работе Белтона и др. [66] по измерениям в полосе 1,05 мкм был найден верхний предел содержания CO_2 на Меркурии, равный 5 м·атм (парциальное давление у поверхности менее чем 0,35 мб), а Бергстрал и др. [67] по наблюдениям полосы около 1,20 мкм оценили, что верхний предел не превосходит 0,58 м·атм (парциальное давление приблизительно 0,04 мб). Эти данные ставят под сомнение наличие CO_2 на Меркурии.

Чтобы молекулы газа не диссипировали с Меркурия, они должны быть, во-первых, достаточно тяжелыми, а во-вторых, устойчивыми к диссоциации под действием солнечного излучения. Этим критериям удовлетворяет достаточно распространенный в солнечной системе Ar^{40} . Наблюдения не исключают аргоновую атмосферу с давлением у поверхности Меркурия в пределах 1 мб, но ее существование — только гипотеза.

Сходство фотометрических свойств поверхности Меркурия и Луны может служить аргументом (правда, не очень убедительным) в пользу предположения, что поверхность Меркурия подвергалась воздействию солнечного ветра. Исходя из этого, Саган [211] и О'Лири и Ри [188] оценили верхний предел атмосферного давления у поверхности планеты равным приблизительно 10^{-5} мб, Бел-

тон, Хантен и Мак-Элрой [66] на основе вычислений темпа диссипации получили верхний предел близким к 10^{-6} мб. Бенкс и др. [59], обсудив различные возможные модели атмосферы Меркурия, допускают существование там экзосферной модели, состоящей из He^4 , Ne^{20} и Ar^{40} с верхним пределом суммарного обилия $2 \cdot 10^{14}$ частиц в столбе с единичным сечением. Структура такой модели определяется солнечным ветром.

Ультрафиолетовый эксперимент на «Маринере-10» подтвердил, что Меркурий окружен тонкой атмосферой с полным давлением у поверхности не более $2 \cdot 10^{-9}$ мбар [69а]. Установлены верхние пределы обилия различных газов. Наиболее обильными компонентами могут быть Ne, Ar, Xe. Среди других газов обнаружен, в частности, He, парциальное давление которого у поверхности составляет $2 \cdot 10^{-12}$ мбар.

Условия инсоляции и температура на поверхности

Определяемая совместным действием вращения и обращения длительность одних солнечных суток на Меркурии равна в точности трем звездным меркурианским суткам или двум меркурианским годам и составляет около 176 наших дней, т. е. средних солнечных суток всемирного времени. Солнце на небе Меркурия движется с востока на запад неравномерно и заметно меняет видимые размеры вследствие эксцентриситета орбиты и периодических изменений гелиоцентрической угловой скорости планеты. Дважды за одни солнечные сутки (а именно — в каждом перигелии) видимые размеры Солнца увеличиваются, и оно приостанавливается, затем его движение приблизительно на сотню часов сменяется на попятное, после чего Солнце вновь приостанавливается и берет курс на запад.

Количество солнечной энергии, получаемой в единицу времени единичной площадью, перпендикулярной солнечным лучам (так называемая *солнечная постоянная*, равная $2,00 \pm 0,04$ кал/см²·мин на верхней границе земной атмосферы), на Меркурии в перигелии приблизительно вдвое больше, чем в афелии и в 10 раз больше, чем на Земле, т. е. достигает 14 квт/м². При этом на различных гермографических долготах экватора суточный цикл освещения неодинаков. Около долгот 0 и 180° Солнце в верхней кульминации имеет максимальные угловые размеры и движется в небе очень медленно, тогда как около долгот 90 и 270° оно в полдень имеет

наименьшие угловые размеры и пересекает небосклон сравнительно быстро, замедляя движение только у горизонта.

Дневное нагревание поверхности уменьшается с ростом широты места вплоть до полюсов вращения. Интересно заметить, что на самых полюсах могут быть условия непрерывного или почти непрерывного освещения: Солнце движется вдоль математического горизонта с периодичностью 176 суток, при этом центр Солнца погружается под горизонт каждые 38 суток на величину, равную наклону экватора планеты к орбите (наклон меньше, а может быть, значительно меньше 3°); верхний край Солнца если и скрывается, то ненадолго, так как глубина погружения центра под линию математического горизонта приблизительно равна радиусу Солнца, видимого с Меркурия.

С большой длительностью дня и ночи на Меркурии связано резкое различие температуры полуденных и полудночных участков поверхности, а близость планеты к Солнцу и низкое альбедо приводят к сильному нагреванию поверхности в течение дня.

Температура Меркурия найдена по измерениям собственного теплового излучения планеты в той части инфракрасного диапазона, где вклад отраженного солнечного излучения пренебрежимо мал. На среднем расстоянии от Солнца *яркостная температура*⁷ поверхности в подсолнечной точке Меркурия соответствует планковскому излучению абсолютно черного тела при температуре $T_b = 613^\circ \text{K}$ [193]. *Цветовая температура*⁸ (по отношению интенсивности при λ 2,2 и 3,4 мкм) в перигелии $T_c = 670 \pm 20^\circ \text{K}$ [43].

С наиболее значительными техническими трудностями связана инфракрасная термометрия *темной стороны* Меркурия, так как требует, помимо высокого углового разрешения аппаратуры и кроме идеальных атмосферных условий, также надежной защиты аппаратуры от излучения серпа дневного полушария планеты и особенно высокой чувствительности детектора. Тем не менее такие измерения удалось выполнить. Мардок и Ней [183] в диапазоне 3,75—12,0 мкм нап-

⁷ *Яркостная температура* — это температура абсолютно черного тела тех же размеров и той же светимости, что и наблюдаемое тело, в ограниченном спектральном диапазоне.

⁸ *Цветовая* (или спектрофотометрическая) температура — это параметр T в известной формуле Планка, причем величина параметра подбирается так, чтобы наилучшим образом аппроксимировать наблюдаемое распределение энергии излучения тела в каком-либо интервале длин волн.

ли температуру поверхности на ночной стороне $111 \pm 3^\circ \text{K}$. Таким образом, амплитуда суточных колебаний температуры на Меркурии превышает 500°K .

Инфракрасным радиометром на «Маринере-10» было измерено тепловое излучение планеты в полосе спектра около 45 мкм при минимальных размерах наблюдаемого элемента поверхности 40 км . В околоэкваториальном скане наиболее низкая яркостная температура зарегистрирована около местной полуночи и составляет 100°K . Закон понижения температуры после захода Солнца такой же, как в случае однородного пористого материала с тепловой инерцией $0,0017 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1/2} \cdot ^\circ \text{K}^{-1}$ с флуктуациями этой величины до $0,003$ в отдельных районах [76a].

Современные наблюдения теплового излучения Меркурия не ограничиваются инфракрасным диапазоном. Ведутся радиоастрономические измерения в микроволновом диапазоне, которые позволяют определить тепловой режим подповерхностного слоя планеты на различных глубинах и найти физические свойства наружного покрова планеты.

Чем больше длина волны принимаемого излучения, тем большая глубина ответственна за его происхождение. Глубина проникновения электромагнитных колебаний (т. е. толщина радионизлучающего слоя) $l_s = 1/\kappa$, где $\kappa(\lambda)$ — коэффициент поглощения электромагнитной волны, λ — длина волны. Не менее важно для нас другое выражение той же величины: $l_s = \delta l_T$, где δ — коэффициент, зависящий от свойств вещества, l_T — глубина проникновения температурной волны, определяемая уменьшением амплитуды колебаний температуры в e раз по сравнению со значением на поверхности. На глубине, в $3-4$ раза превышающей l_T , колебания температуры практически отсутствуют. Этим определяется толщина слоя породы, прогреваемого Солнцем в течение дня. Теория вопроса детально изложена в работе [29].

Температура, измеренная в микроволновом диапазоне, зависит от соотношения между толщиной прогреваемого Солнцем слоя породы и толщиной радионизлучающего слоя.

Обзоры результатов радиометрических наблюдений Меркурия на волнах от $0,19$ до $11,3 \text{ см}$ содержатся в [111, 113, 180]. Численные значения теплофизических параметров Меркурия приведены в конце этого раздела.

Теплофизическое поведение наружного покрова планеты говорит о его чрезвычайно

низкой теплопроводности. Амплитуда суточных колебаний температуры на некоторой глубине, как и следовало ожидать, получается существенно меньше, чем по измерениям в инфракрасном диапазоне. Данные микроволновых радиоастрономических наблюдений показывают, что усредненная по всему видимому диску Меркурия яркостная температура изменяется и с углом фазы i , и с долготой L центра диска, а также зависит от отношения глубин проникновения электрической и тепловой волн. Наиболее полные результаты наблюдений, обработанные по методу наименьших квадратов, представляются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \lambda = 0,33 \text{ см}, \quad T_1(^{\circ}\text{K}) &= 296 + 127 \cos(i + 16^\circ) + \\ &\quad \pm 7 \quad \pm 9 \quad \pm 4^\circ \\ &+ 16 \cos(2L + 16^\circ), \quad \delta/\lambda = 1,0 \text{ см}^{-1} [101], \\ &\quad \pm 9 \quad \pm 28^\circ \\ \lambda = 3,75 \text{ см}, \quad T_2(^{\circ}\text{K}) &= 380 + 55 \cos(i + 32^\circ) + \\ &\quad \pm 4 \pm 3 \quad \pm 4^\circ \\ &+ 11 \cos(2L - 8^\circ), \quad \delta/\lambda = 1,3 \text{ см}^{-1} [141], \\ &\quad \pm 3 \quad \pm 11^\circ \end{aligned}$$

где λ — длина волны электромагнитного излучения, i — угол Солнце — планета — Земля, L — гермографическая долгота в системе долгот, описанной в [84]. Положение нулевого меридиана в этой системе отличается от его положения в принятой в 1970 г. системе Международного астрономического союза.

Значительные различия между выражениями температуры на миллиметровых и сантиметровых волнах нельзя объяснить одним только отличием эффективной глубины излучающего слоя. Касаясь применения к Меркурию теории радионизлучения, разработанной для Луны, Гэри [106] указал на необходимость учета в данном случае температурной зависимости теплофизических параметров.

Моррисон [179, 180] выполнил расчеты усредненных яркостных температур Меркурия в различных диапазонах теплового излучения в функции фазового угла и положения на орбите и с учетом зависимости теплопроводности от температуры.

Вопрос о сходстве некоторых свойств наружного слоя Меркурия и Луны

Сопоставление результатов только что упомянутых расчетов с результатами наземных наблюдений позволило Моррисону выбрать наиболее вероятные значения парамет-

ров, характеризующих тепловые и электрические свойства внешнего слоя Меркурия:

плотность $\rho = 1,5 \pm 0,4 \text{ г/см}^3$;

тепловая инерция $\gamma = (\kappa \rho c)^{1/2} = (15 \pm 6) \cdot 10^{-6} \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}^{1/2} \cdot \text{град}$, что заметно отличается от значения, полученного по данным «Маринера-10»;

параметр $\delta/\lambda = 0,9 \pm 0,3 \text{ см}^{-1}$, где δ — отношение глубин проникновения тепловой и электрической волн, λ — длина волны;

коэффициент теплопроводности $k = (4 \pm 2) \cdot 10^2 \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$;

глубина проникновения тепловой волны $l_T = 11 \pm 6 \text{ см}$;

диэлектрическая постоянная $\epsilon = 2,9 \pm 0,5$;

тангенс угла потерь $\text{tg } \Delta = (0,9 \pm 0,4) \cdot 10^{-2}$.

Сходство характеристик Меркурия и Луны позволяет допустить отсутствие резких различий в структуре их наружного слоя. Однако в вопросе о сходстве минерального состава их поверхности следует проявлять осторожность. До тех пор, пока мы не имеем экспериментальных данных о составе поверхности Меркурия, наши представления об этом сильно зависят от решения другой проблемы: подвергалась ли планета внутреннему расплавлению и гравитационной дифференциации? Луна, как известно, содержит в наружных слоях продукты расплавления недр. Высокая средняя плотность Меркурия приводит к построению моделей его внутреннего строения, которые, по-видимому, не могли подвергнуться расплавлению (см. стр. 43). Возможно, что внешнее сходство поверхности Меркурия с Луной в значительной мере обусловлено сходством процессов переработки минералов в реголит внешними факторами.

Таковы основные современные представления о природе Меркурия. Дальнейший рост уровня наших знаний в этой области науки возможен, видимо, только путем проведения новых исследований.

ВЕНЕРА

Венера — ближайшая к Земле внутренняя планета и самое яркое небесное светило после Солнца и Луны — на протяжении многих веков привлекала пристальное внимание астрономов. Вплоть до середины 50-х годов не исключалась возможность существования на ней развитых форм жизни. И хотя сейчас с этими привлекательными концепциями пришлось расстаться, интерес к планете не уменьшился, а скорее даже возрос, поскольку

по своим природным условиям Венера оказалась совершенно уникальной планетой, полной загадок и неожиданностей.

В изучении Венеры, пожалуй, в наибольшей мере проявились те огромные возможности, которыми обладают автоматические космические аппараты. В течение нескольких лет планомерная программа исследований Венеры проводилась в Советском Союзе.

Полеты автоматических станций «Венера-4» — «Венера-8», осуществивших широкий комплекс исследований нижней атмосферы и поверхности планеты, по существу открыли нам мир Венеры. Значительный вклад в изучение атмосферы выше видимой границы облаков и окружающего пространства внесли измерения с пролетных траекторий американских космических аппаратов «Маринер-5» и «Маринер-10». Совершенствование методов наземных астрономических наблюдений, прежде всего радиоастрономии и радиолокации, позволило выяснить ряд новых физических особенностей этой планеты. Результаты комплексных исследований последнего десятилетия, имеющие фундаментальное научное значение, и положены в основу современных представлений о Венере [171].

Основные астрономические характеристики

Движение Венеры происходит по почти круговой орбите, заключенной внутри земной, на расстоянии от Солнца около 108,1 млн. км, что составляет 0,723 а. е. Скорость орбитального движения приблизительно на 5 км/сек превышает среднюю орбитальную скорость Земли и равна 34,99 км/сек. Время обращения планеты вокруг Солнца (сидерический период) составляет 224,7 земных суток. Синодический период (промежуток времени между двумя последовательными одноименными соединениями или двумя одинаковыми фазами Венеры), равняется в среднем 584 суткам. Фазы Венеры подобны фазам Луны. Планета находится на минимальном удалении от Земли (около 40 млн. км) в нижнем соединении — в положении между Землей и Солнцем (при угле фазы $\alpha = 180^\circ$), при котором обращена к нам своей неосвещенной стороной. Вблизи верхнего соединения, когда планета находится за Солнцем ($\alpha = 0$), наблюдается ее почти полностью освещенный диск. Промежуточные положения $0 < \alpha < 180^\circ$ соответствуют промежуточным фазам частичной освещенности Венеры для земного наблюдателя, от узенького серпа до почти полного диска. Видимый

угловой поперечник планеты между верхним и нижним соединениями изменяется почти в 6,5 раза, от $9'',9$ до $64'',0$.

Наибольшего блеска (около — 4,3 звездной величины) Венера достигает при максимальном угловом расстоянии от Солнца, достигающем в наиболее благоприятных случаях до 48° , в положении так называемых стояний. Угловой поперечник диска в эти моменты составляет примерно $40''$. Планета становится видна в вечерних сумерках после прохождения верхнего соединения, после чего ее угловое расстояние от Солнца сначала увеличивается, а затем уменьшается; одновременно увеличивается видимый диаметр диска и уменьшается его освещенная часть. Восход Венеры на востоке в утренних сумерках сопровождает прохождение нижнего соединения, после чего видимый диаметр диска начинает уменьшаться, а его освещенная часть увеличиваться. Разница в заходах и восходах Венеры и Солнца может достигать почти 4 час. Благодаря такой специфике видимости Венеру издавна стали называть утренней или вечерней «звездой».

Наблюдения Венеры в нижних соединениях свидетельствуют о том, что плоскость ее орбиты наклонена к плоскости эклиптики под углом $i=3^\circ 23' 39''$. В связи с этим диск планеты в периоды соединений обычно не проецируется на диск Солнца. Прохождение Венеры по диску Солнца имеет место лишь в тех случаях, когда в момент нижнего соединения обе планеты находятся на линии пересечения их орбит. Такие события, схематически показанные на рис. 3, случаются сравнительно редко, периодически повторяясь через 8 и 100 с лишним лет (см. [5]). Наблюдение прохождения Венеры по диску Солнца 6 июля 1761 г. позволило русскому ученому М. В. Ломоносову [33] сделать фунда-

ментальное открытие о наличии атмосферы у планеты.

По своим размерам, массе, средней плотности Венера наиболее близка к Земле из всех планет солнечной системы. Ее радиус составляет 0,948 от земного ($R_v=6050 \pm \pm 0,5$ км [74]). Отношение массы планеты к массе Земли около 0,81, а средняя плотность $5,24$ г/см³ по сравнению с $5,52$ г/см³ для Земли. По измерениям орбиты космического аппарата «Маринер-5» масса Венеры в 408522 ± 3 раз меньше массы Солнца. Основные параметры, характеризующие элементы орбиты Венеры, ее геометрию, массу и связанные с ними величины, приведены в табл. 1 и 2 в конце главы (см. стр. 189), где для сравнения указаны также соответствующие параметры для Земли [53].

Длительное время предметом оживленных дискуссий был вопрос об элементах собственного вращения Венеры и эклиптических координатах ее полюса, т. е. наклоне оси вращения к плоскости окосолнечной орбиты. Многочисленные визуальные и фотографические, а позднее спектральные наблюдения в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра были связаны с попытками проследить видимое движение характерных деталей (отдельных пятен, полос) на диске планеты. Однако наблюдаемые особенности, относящиеся к постоянно закрывающему планету облачному слою, как правило, неустойчивы, и на выводы о периодичности их повторяемости в сильной степени влияет субъективность наблюдателя. Назывались значения от нескольких суток до нескольких месяцев, при этом большинство наблюдателей сходились на предположении о прямом вращении Венеры.

Значительный прогресс в изучении характера собственного вращения Венеры был достигнут только в результате радиолокационных исследований, начатых в 1958 г. Прайсом и др. [199]. Первые успешные радиолокационные измерения Венеры были проведены около нижнего соединения в 1961 г. в СССР группой сотрудников Института радиотехники и электроники АН СССР под руководством В. А. Котельникова [27, 28], в США в Ливингстонской лаборатории Массачусетского технологического института Петтенджиллом и др. [190] и в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института [170, 243] и в Англии на радиоастрономической обсерватории Джодрелл Банк [239]. Более полные и точные данные были получены в измерениях

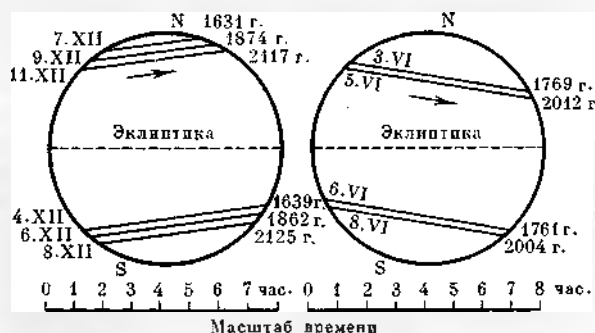


Рис. 3. Моменты прохождения Венеры по диску Солнца

около нижнего соединения Венеры в 1964 г. Результаты измерений В. А. Котельникова и др. [26] дали значение периода вращения 230 ± 25 суток, направление вращения обратное. По измерениям Ионосферной лаборатории Аресибо Корнельского университета [99] период вращения Венеры $T = 244,3 \pm 2$ суток, направление вращения обратное. Наиболее точные данные об элементах вращения планеты получены на основе определения периодичности появления деталей повышенного отражения в течение нескольких нижних соединений. По данным обсерватории Аресибо [136], период вращения равен $243,0 \pm 0,1$ земных суток, направление вращения обратное, координаты северного полюса оси вращения $\alpha = 272,7 \pm 0,7$, $\delta = 65,3 \pm 1,0$. По наблюдениям Карпентера [75] в Лаборатории реактивного движения период вращения Венеры в обратном направлении составляет $242,98 \pm 0,04$ суток, а координаты полюса $\alpha = 274,1 \pm 3$, $\delta = 71,4 \pm 1$ (для эпохи 1950,0).

Приведенные результаты показывают, что период вращения Венеры очень близок к периоду резонансного вращения планеты относительно Земли, который равен 243,16 земных суток. При этом в каждом нижнем соединении Венера обращена к Земле одной стороной. Такое резонансное относительно Земли вращение, по-видимому, обусловлено гравитационным воздействием Земли на несимметричную фигуру планеты. Подробное изложение методики и более полную сводку результатов радиолокационных измерений можно найти в работах [30, 48].

Таким образом, Венера вращается очень медленно по часовой стрелке при наблюдении с северного полюса мира, в отличие от других планет солнечной системы. Комбинация годового движения и собственного обратного вращения планеты приводит к тому, что за один венерианский год проходит двое суток продолжительностью 116,8 земных. Это означает, что в течение венерианского года восход и заход Солнца на планете происходят дважды. Для наблюдателя, оказавшегося на Венере, было бы крайне непривычным видеть восход Солнца на западе и заход на востоке и в экваториальных и средних широтах дважды в год находиться в условиях, похожих на «полярную ночь» и «полярный день» продолжительностью около двух земных месяцев. Измерения координат вектора вращения (прямое восхождение α и склонение δ) позволили сделать вывод, что ось собственного вращения Венеры почти перпендикулярна

плоскости ее орбиты; угол между плоскостью экватора и плоскостью орбиты менее 3° . Из этого следует, что сезонные изменения при годовом вращении планеты практически отсутствуют.

Фигура, топография, поверхность

К сожалению, сведения о том, что представляет собой твердое тело Венеры, крайне ограничены. По результатам измерений на радиотелескопе Линкольнской лаборатории МИТ в Хайстеке, выполненных в 1968—1969 гг. на волне $\lambda = 3,8$ см [129, 233], было найдено, что в экваториальной плоскости сечение планеты аппроксимируется эллипсом, разность полуосей которого составляет $1,1 \pm 0,35$ км. Большая ось эллипса образует угол 55° (по часовой стрелке) с направлением на Землю в нижнем соединении. Центр массы смещен относительно центра фигуры планеты на $1,5 \pm 0,25$ км.

С точки зрения топографии и физических свойств большой интерес представляют результаты картирования отражательных свойств поверхности Венеры в радиодиапазоне. Эти эксперименты [129] позволили обнаружить локальные области повышенной отражательной способности протяженностью в сотни и тысячи километров. Карта отражательных свойств поверхности, ограниченная долготами 0 и -80° и широтами от -50 до $+40^\circ$, показана на рис. 4. Наиболее характерны области α и β . Выявлены также большие круговые образования, подобные лунным морям (заштрихованные), и внутри них отдельные специфические детали, обозначенные римскими цифрами. Природу областей повышенного отражения можно объяснить, помимо очевидных предположений о более неровной фактуре поверхности и о наличии возвышений, приводящих к уменьшению эффективного поглощающего слоя атмосферы, также за счет различия в материале поверхности и, следовательно, диэлектрической проницаемости ϵ . Среднее значение ϵ , выведенное из радиолокационных измерений, оценивается в пределах 4—4,5.

На поверхности Венеры путем радиолокации обнаружены перепады высот до 3—5 км. Район наибольшего возвышения приходится на долготу около 31° (по системе Ингалса — Эванса) [129], согласно которой за нулевой принят меридиан, проходящий через область α . Возможно, что неоднородности рельефа поверхности планеты выражены еще более резко. Вместе с тем данные о поляризации отраженных планетой радиоволн пока-

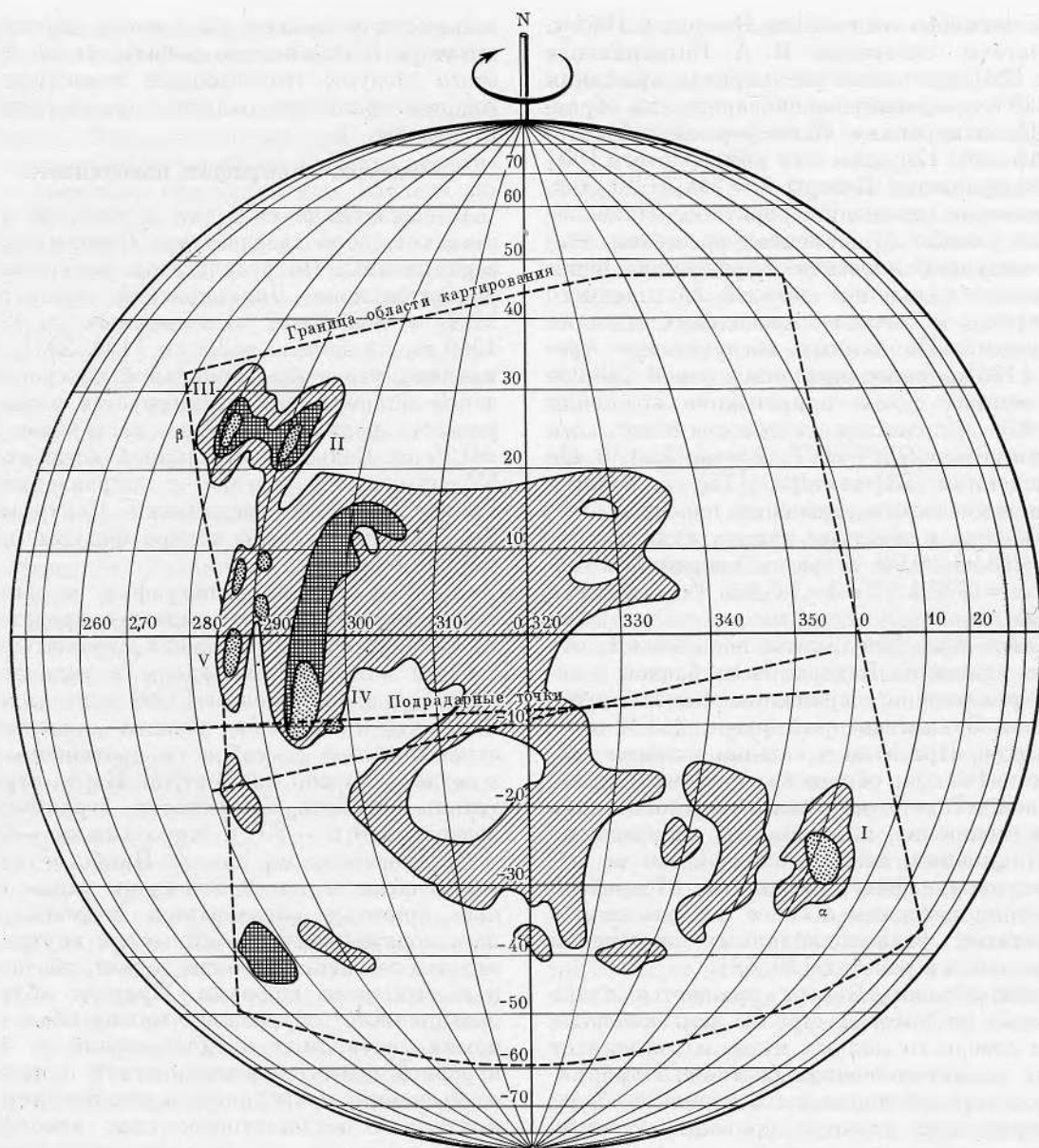


Рис. 4. Карта отражательных свойств поверхности Венеры

зывают, что поляризация основной доли энергии этих волн соответствует зеркальному отражению и отношение деполяризованного отражения к поляризованному для Венеры существенно меньше, чем для Луны. Это позволяет предполагать, что по сравнению с Луной микроструктура поверхности Венеры в среднем более гладкая.

В целом экспериментальные данные радиолокационного зондирования приводят к

представлениям о существенной переменности физических свойств поверхности Венеры и, по-видимому, достаточно сглаженном характере ее топографии.

Представления о сглаженности рельефа в экваториальной области совсем недавно были подтверждены в радиолокационном эксперименте, проведенном Голдстейном [98]. Прием отраженного сигнала производился на две антенны, разнесенные на 22 км. Это позволило получить изображение поверхности в пятне диаметром около 1500 км (координаты $\lambda = 320^\circ$, $\varphi = +2^\circ$) при разрешении

по высоте 200 м и по поверхности до 10 км. Удалось выявить более десяти кольцевых кратеров диаметром от 35 до 150 км, по виду подобных кратерам на Луне. Однако глубина их невелика. Так, кратер диаметром 150 км имеет глубину не более 0,5 км. Вся исследованная область также оказалась плоской, с относительным перепадом высот менее 1 км. Такое сильное сглаживание не является странным в условиях очень плотной атмосферы, подверженной, как мы увидим в дальнейшем, заметным движениям и, возможно, содержащей агрессивные примеси, способствующие более интенсивному протеканию эрозионных процессов на поверхности.

Полет «Венеры-7» дал возможность получить самые первые оценки физико-механических свойств поверхности Венеры. Качественный анализ условий посадки аппарата проводился по данным об изменении мощности принятого на Земле сигнала в момент соприкосновения с поверхностью. Гашение вертикальной скорости аппарата произошло за время, меньшее 0,2 сек., что, наиболее вероятно, соответствует твердому грунту. При попадании в маловязкую жидкость или толстый слой пыли процесс торможения аппарата и уменьшение уровня сигнала происходили бы существенно медленнее. С учетом данных о прочности аппарата можно получить верхнюю оценку прочности грунта $P_r < 80 \text{ кг/см}^2$. На Земле такому значению прочности соответствуют породы типа вулканических туфов. Вместе с тем сопоставление характера изменения мощности сигнала в момент посадки «Венеры-7» с результатами испытаний на соударение спускаемого аппарата при различных грунтах дает основание предполагать, что прочность грунта заметно ниже этого верхнего предела, но выше 2 кг/см^2 [39].

На станции «Венера-8» по измерению мощности радиоволн, отраженных поверхностью планеты при спуске аппарата, была оценена величина диэлектрической проницаемости, которая заметна (примерно в 1,5 раза) отличается от выведенной по данным радиолокации. Отсюда следует, что поверхностный слой планеты в районе спуска «Венеры-8», вероятнее всего, состоит из раздробленных пород. Его плотность оценивается приблизительно в $1,5 \text{ г/см}^3$ [6].

Огромное значение для понимания геологии Венеры имеют результаты анализа характера ее поверхностных пород, проводившегося А. П. Виноградовым и его сотрудни-

ками [10] при помощи установленного на «Венере-8» γ -спектрометра. Предварительное изучение спектра и суммарной интенсивности γ -излучения, создаваемого содержащимися в поверхностном слое естественными радиоактивными элементами (U, Th, K), приводит к выводу, что материал поверхности Венеры в месте посадки станции содержал 4% K, 0,0002% U и 0,00065% Th. Полученное содержание этих элементов и их соотношение дают основание предполагать, что материал поверхности близок к составу распространенных на Земле гранитов.

Атмосфера Венеры

Плотный облачный слой, почти без разрывов, не позволяет наблюдать поверхность Венеры в видимой области спектра. Вместе с тем наблюдения в видимом и особенно в инфракрасном диапазоне, ставшие возможными благодаря успехам инфракрасной спектрофотометрии, дали определенные сведения об атмосфере планеты. Было зарегистрировано присутствие в атмосфере Венеры таких газов как CO_2 , H_2O , CO, HF, HCl, оценены верхние пределы содержания возможных примесей, получены оценки температуры и давления вблизи видимой с Земли границы облаков [43]. Однако эти измерения, даже при достигнутом разрешении порядка 0,1 Å в ближней инфракрасной области спектра, давали лишь относительные содержания отдельных газов и не позволяли решить вопрос об основной составляющей атмосферы Венеры.

Получению абсолютных концентраций компонент и возможности экстраполяции значений температуры и давления на вершине облаков в подоблачную атмосферу мешает неопределенность оптических свойств облачного слоя.

Облака оказывают существенное влияние на оценки эффективной глубины формирования линий поглощения и на процессы переноса радиации, а различные возможные характеристики рассеяния, спектр размеров частиц и их природа допускают варьирование параметров отражения от облачного слоя в широких пределах; к тому же сама граница облаков выражена нечетко. Как следствие оценки параметров атмосферы на уровне облаков зависят от выбора тех или иных идеализированных моделей. Естественно, что оптические измерения бессильны ответить на вопрос о свойствах атмосферы под об-

лаками и значениях температуры и давления у поверхности планеты.

Радиоастрономические измерения, получившие интенсивное развитие с конца 50-х годов, неожиданно обнаружили необычайно высокую радиояркую температуру Венеры — около $600\text{--}650^\circ\text{K}$. Первая попытка такого рода была предпринята Майером и др. [173], которые на волне 3,15 см измерили $T_{\text{я}} = 560 \pm 73^\circ\text{K}$. Этот результат был в дальнейшем многократно повторен измерениями в сантиметровом и дециметровом диапазонах, подробную сводку которых можно найти в работах [30, 195].

Измеренная радиояркая температура оказалась в несколько раз выше радиоярких температур Земли и Марса, которые примерно соответствуют средним температурам поверхности этих планет. Первым естественным объяснением этого результата было предположение, что до такой температуры разогрета сама поверхность Венеры, интенсивно излучающая на сантиметровых волнах, для которых атмосфера почти прозрачна. В этом случае, однако, немедленно исключались из дальнейшего рассмотрения такие увлекательные и многообещающие гипотезы, как существование океанов, пышная растительность на планете и др., от которых даже чисто психологически отказаться не просто.

Были предприняты попытки примирить полученный результат с представлениями об умеренном климате на Венере. Так возникла гипотеза сверхплотной ионосферы планеты, гипотеза тлеющих электрических разрядов в ее атмосфере, гипотеза генерации излучения при движении электронов в магнитном поле и другие механизмы, каждый из которых может быть источником радиационного излучения нетепловой природы или «горячей» атмосферы и в принципе способен объяснить наблюдаемый характер микроволнового спектра Венеры. Правда, при ближайшем рассмотрении эти механизмы оказывались не вполне адекватными всей совокупности экспериментальных данных. Тем не менее вопрос об источнике высокой радиояркой температуры и, следовательно, о том, какова температура атмосферы и поверхности Венеры, оставался до конца не решенным.

Еще большая неопределенность существовала в оценках величины давления у поверхности планеты. При неизвестном химическом составе атмосферы, даже в предположении, что поверхность Венеры горячая, назывались значения от единиц до нескольких сотен атмосфер. Не было сведений и о том, каков

характер изменения температуры ниже облаков, какова глубина атмосферы. На эти принципиальные вопросы и были прежде всего призваны ответить космические аппараты.

Одним из важнейших результатов полета станций «Венера» явилось непосредственное определение химического состава атмосферы А. П. Виноградовым и его сотрудниками [9]. Станции «Венера-4» — «Венера-6» были оборудованы простыми газоанализаторами. Использовались амплитудный и пороговый методы для оценки содержания углекислого газа, азота, кислорода и водяного пара. На «Венере-6» колористическим методом определялось содержание аммиака [6]. Измерения проводились на нескольких уровнях при давлениях 0,6; 2 и 10 атм. Вопреки существовавшим ранее представлениям о преобладающем содержании азота оказалось, что почти целиком (на 93—100%) атмосфера Венеры состоит из углекислого газа, а объемное содержание азота (если он вообще присутствует) не более 2%. Кислорода в атмосфере Венеры менее 0,1%, водяного пара вблизи облачного слоя не более 0,1—1,0%, а содержание аммиака 0,01—0,1%.

Наземная спектроскопия дает меньшие верхние пределы для содержания кислорода, водяного пара и аммиака (соответственно 10^{-3} , 10^{-3} и $10^{-3}\%$). В отношении O_2 этот результат можно согласовать с пороговой оценкой газоанализаторов. Что касается H_2O и NH_3 , то следует учитывать разные уровни атмосферы, к которым относятся прямые и спектроскопические измерения, и возможность «выпадения» водяного пара и солей аммония за счет конденсации. Верхние спектроскопические оценки справедливы для атмосферы выше слоя облаков. Предельные значения содержания H_2O и NH_3 в нижней атмосфере дает анализ микроволнового спектра и данных радиолокационных измерений.

Отсутствие заметного ослабления интенсивности эмиссии вблизи линии резонансного поглощения водяного пара $\lambda = 1,35$ см можно интерпретировать как указание на то, что предельное содержание H_2O не превышает 0,1%, а характеристики поглощения NH_3 при больших давлениях ограничивают его содержание величиной 0,001% [31].

Химический состав атмосферы Венеры по совокупности результатов всех измерений приведен в табл. 3 (см. стр. 190). Значение среднего молекулярного веса $\mu = 43,4$.

Для измерения температуры и давления на станциях «Венера-4» — «Венера-8» В. С. Авдеевским и др. применялись простые и на-

дежные методы измерения параметров плотного газа при помощи термометров сопротивления и манометров мембранного (анероидного) типа [2, 3, 38, 39, 172].

Измеренный «Венерой-8» высотный профиль температуры на освещенной стороне очень близок к результатам предыдущих измерений в ночной атмосфере на станциях «Венера-4» — «Венера-7» (рис. 5). Температура атмосферы у поверхности, измеренная «Венерой-7» и «Венерой-8», равняется соответственно $747 \pm 20^\circ$ и $743 \pm 8^\circ$ К.

Сопоставление результатов радиоастрономических измерений в 10-сантиметровом диапазоне длин волн, в котором атмосфера Венеры наиболее прозрачна и радиоизлучение является в основном излучением поверхности и в котором проведено много достаточно точных радиоастрономических измерений, показывает, что при величине диэлектрической проницаемости $\epsilon=5$ усредненная по ночной стороне планеты температура поверхности $T_{\text{н}}=720 \pm 30^\circ$ К. С точностью до ошибок измерений это значение совпадает с результатами прямых измерений.

Величина давления у поверхности, выведенная по результатам полета «Венеры-7», составила 90 ± 15 кг/см². В месте посадки станции «Венера-8» давление оказалось равным $93 \pm 1,5$ кг/см². Высотный ход давления в атмосфере Венеры также показан на рис. 5.

На перекрывающемся участке (от 300 до 440° К по температуре и от 0,6 до 7 кг/см² по давлению) измерения станций «Венера» и данные «Маринера-5» и «Маринера-10»⁹, полученные радиорефракционным методом при заходе космических аппаратов за диск планеты [104, 127], находятся в хорошем согласии.

Из сопоставления с данными «Маринера-5», отнесенными к расстоянию до гравитационного центра планеты, следует, что районы посадок «Венеры-7» и «Венеры-8» соответствуют планетоцентрическому расстоянию $r=6051 \div 6052$ км. Эти локальные значения хорошо согласуются с имеющимися данными о среднем радиусе Венеры, вычисленном на основе радиолокационных измерений.

Как видно из рис. 5, экспериментальные профили атмосферных параметров, выведенные из измерений «Маринера-5», охватывают интервал высот между 35 и 90 км. Там же показаны расчетные кривые $T(h)$, получен-

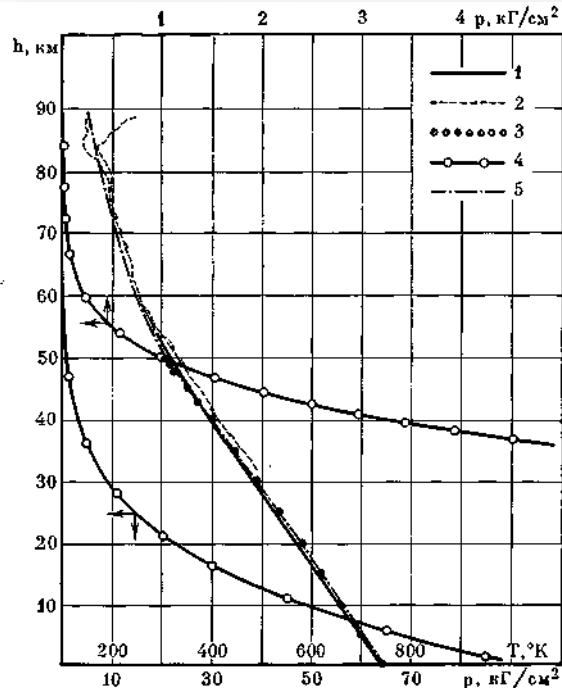


Рис. 5. Высотные профили температуры и давления в атмосфере Венеры по измерениям АМС «Венера-4» — «Венера-8» и «Маринер-5»

- 1 — Т, «Венера-4» — «Венера-8»;
- 2 — Т, «Маринер-5»;
- 3 — Т, адиабата;
- 4 — р, «Венера-4» — «Венера-8»;
- 5 — Т, модель атмосферы

ные в приближении лучистого равновесия для «серой» атмосферы [37] и согласно более строгим недавним расчетам Дикинсона [90]. В последних принята во внимание эффективность разогрева атмосферы между 65 и 115 км за счет поглощения солнечной радиации в ближней инфракрасной области спектра и уточнены характеристики охлаждения за счет излучения в фундаментальной 15-мкм полосе CO_2 . Результирующий равновесный температурный профиль (штрих-пунктир) свидетельствует об уменьшении температуры от 250° К на высоте 66 км до $T_{\text{м}} \approx 160^\circ$ К вблизи 90 км, что довольно хорошо согласуется с экспериментальной кривой (неоднозначность и инверсионный характер которой в области начала измерений «Маринера-5» (рис. 5) определяются выбором граничных условий при интегрировании полученной зависимости показателя преломления от высоты).

В отличие от простейшего приближения лучистого равновесия, приводившего к минимальному значению температуры $\sim 195^\circ$ К на высоте 105 км, согласно расчетам [90] на

⁹ На «Маринере-10» область зондирования была несколько меньше: до 40 км на частоте 2295 МГц и до 51 км на частоте 8415 МГц [127].

уровне около 120 км достигается второй минимум температуры $T \sim 180^\circ \text{K}$, а в промежуточной области имеет место небольшой пик с $T \sim 190^\circ \text{K}$. Дополнительным критерием для получения высотного распределения атмосферных параметров во всей области примерно от 60 до 120 км, которую по аналогии с Землей условно можно назвать стратомезосферой, служат оценки плотности атмосферы и градиента ее изменения по результатам фотометрических измерений ослабления блеска звезды Регул (α Льва) при его покрытия Венерой в 1959 г. [241]. Полученные характеристики на уровне затмения ($h_z = 120$ км) накладывают определенное граничное условие на скорость падения температуры (шкалы высот) в нижележащей области, от которой зависит интенсивность «оседания» атмосферы.

Профиль $T(h)$ ниже 60 км в целом соответствует распределению температуры в атмосфере при конвективном равновесии. Температурный градиент в пределах возможных ошибок измерений T и h близок к среднему адиабатическому $dT/dh \approx 8^\circ,6 \text{ км}^{-1}$.

Термодинамический анализ кривых измерений газового состояния в атмосфере Венеры при соответствующих температуре и давлении подтверждает этот вывод. Однако возможны некоторые особенности в газовом состоянии, в частности в области 50—37 км, на что указывают результаты анализа радиорефракционных профилей и микроволновых потерь, полученные по измерениям «Мари-

нера-5» [104]. Интересно, что ниже 40 км по измерениям плотномеров, устанавливавшихся на станциях «Венера-4» и «Венера-5», также наблюдались заметные отклонения от монотонного изменения плотности [171]. По данным измерений «Маринера-10» уменьшение температурного градиента по сравнению с сухоадиабатическим для CO_2 отмечено на уровне около 50 км, а на высотах 54, 56, 61 и 63 км выявлено существование заметных температурных инверсий [127]. По-видимому, уровень $h \sim 63$ км отделяет относительно спокойную стратосферу от нижележащей конвективно-перемешиваемой атмосферы.

Наблюдаемую величину микроволнового ослабления невозможно объяснить только за счет поглощения смесью CO_2 и H_2O . Эти потери оказываются $\sim 10^{-3}$ дБ/км на уровне 37 км для каждой из составляющей, т. е. в 2—3 раза меньше, чем требуется для согласования с данными «Маринера-5» (рис. 6) [104]. Хотя микроволновый спектр, по данным наземных радиоизмерений, в целом хорошо объясняется моделью атмосферы с поверхностным давлением 80—100 атм, состоящей из CO_2 при концентрации $\text{H}_2\text{O} \sim 10^{-3}$ [195], для объяснения этих особенностей в спектре можно допустить существование дополнительных примесей, распределение которых по высоте сопровождается фазовыми переходами, благодаря чему они локализованы на определенных уровнях. Относительно небольшие концентрации примесей, особенно в жидкой или твердой фазе, не оказывающие влияния на величину молекулярного веса и потому никак не проявляющиеся в измерениях давления, могли также повлиять на показания плотномеров в силу принципов их работы.

Облака

С предположением о различных примесях в атмосфере непосредственно связана проблема венерианских облаков, относительно структуры и природы которых не существует до сих пор единого мнения.

Основным источником доступной в настоящее время информации об облаках служат наблюдаемые с Земли оптические характеристики планеты, относящиеся к верхней части видимого облачного слоя (рис. 7). На основе этих наблюдений получены оценки среднего размера частиц облаков ($\sim 1,1 \text{ мкм}$), характеристики отражения (альbedo) в различных областях спектра, показатель преломления, коэффициент объемного рассеяния и др. [44, 133, 171].

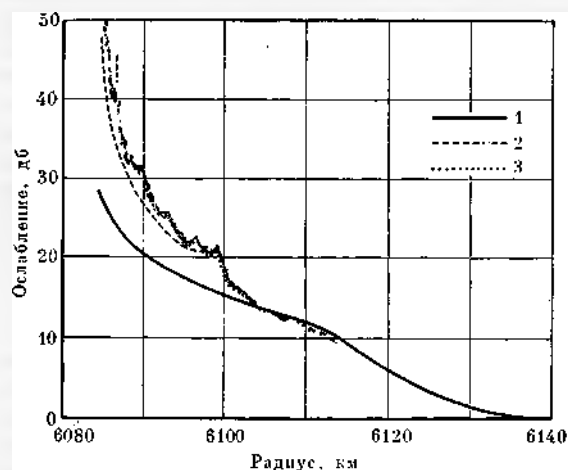


Рис. 6. Характер ослабления радиосигналов в атмосфере Венеры и аппроксимирующие модели

- 1 — CO_2 ;
- 2 — $\text{CO}_2 + 0,1\% \text{ H}_2\text{O}$;
- 3 — $\text{CO}_2 + 0,1\% \text{ H}_2\text{O} + \text{ртутно-галогеновые соединения}$

Совокупность оптических характеристик вместе с данными о высотных профилях температуры и давления не дает, однако, возможности определить, из чего состоят венерианские облака.

В принципе нельзя исключить слоистую структуру облаков, в состав которых входят различные компоненты.

Действительно, при температуре поверхности Венеры около 750°K многие компоненты могли перейти из литосферы в атмосферу и существовать в ней в виде паров и конденсатов на разных уровнях. Возможные равновесные геохимические реакции для системы литосфера — атмосфера подробно обсуждались Льюисом [153, 154], который, в частности, рассмотрел условия образования в атмосфере ртутно-галогенных облаков, конденсирующихся при температурах от 250° (Hg_2Cl_2) до 450°K (Hg_2I_2). Рейсул [202] указал на возможность существования таких облаков, исходя из анализа ослабления радиосигналов «Маринера-5». Были высказаны также предположения о наличии аммонийных соединений, возгоняющихся при $T > 330^\circ\text{K}$, но связывающихся с углекислотой, водой, хлористым водородом и другими газами на более высоких уровнях в атмосфере Венеры [50].

Наиболее притягательно, казалось бы, очевидное предположение о водно-ледяных облаках. Если исходить из измеренной на «Венерах» довольно высокой влажности верхней части тропосферы планеты, то водяные облака (вероятно, с растворами некоторых солей, что имеет место и для земных облаков) могли бы существовать независимо от присутствия конденсатов другой природы. При концентрации $\text{H}_2\text{O} \sim 1\%$ нижняя граница таких облаков должна находиться на высоте 59 км, а эффективная толщина облачного слоя составлять около 10–15 км. Если же концентрация $\text{H}_2\text{O} < 0,1\%$, уровень начала конденсации должен располагаться на 68 км. При $T_m \approx 160^\circ\text{K}$ сублимация будет происходить вплоть до ~ 110 км (рис. 8).

Наиболее сильные возражения против облаков из H_2O — отсутствие в спектрах Венеры характерных для льда депрессий на 1,5 и 2 мкм; слишком большое расхождение в показателе преломления: из поляризметрических наблюдений Венеры $n = 1,44$, а для льда $n \approx 1,31$; слабая прозрачность облаков для длин волн с $\lambda > 0,6$ мкм; малая концентрация водяного пара по спектроскопическим данным на уровне формирования полос H_2O , на котором определяется яркостная темпера-

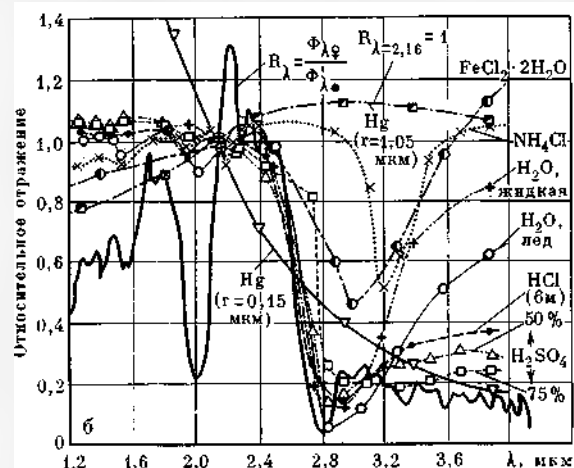
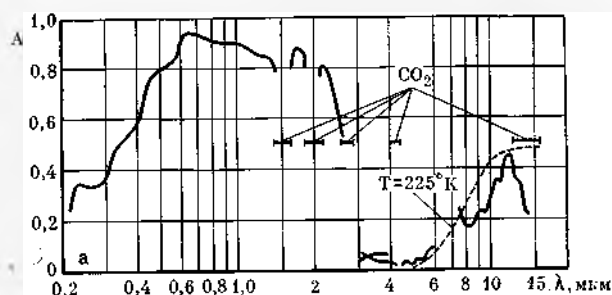


Рис. 7. Основные отражательные и эмиссионные характеристики Венеры (а) и спектр Венеры в ближней инфракрасной области в сопоставлении с лабораторными спектрами ряда соединений, предполагаемых в облаках Венеры (б)

Горизонтальные отрезки показывают расположение полос поглощения CO_2

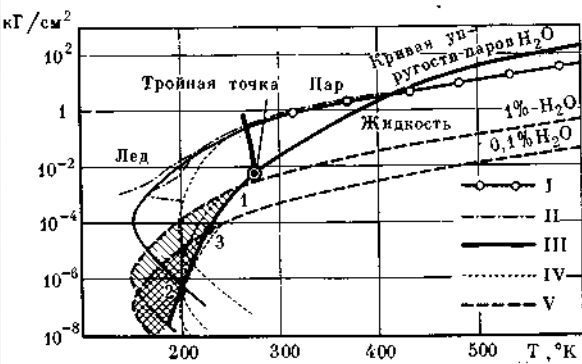


Рис. 8. Фазовая диаграмма H_2O с оценками уровней конденсации и протяженности облаков при концентрациях H_2O 1% и 0,1% для различных моделей атмосферы Венеры

- I — измерения станций «Венера»;
 - II — измерения «Маринера-5»;
 - III — модель атмосферы с $T_m \approx 160^\circ\text{K}$;
 - IV — модель с $T_m \approx 195^\circ\text{K}$;
 - V — парциальная концентрация H_2O .
- 1 — $T = 264^\circ$, $p = 0,25$ кг/см², $h \approx 59$ км;
 2 — $T = 198^\circ$, $p = 1,40 \cdot 10^{-6}$ кг/см², $h \approx 107$ км;
 3 — $T = 227^\circ$, $p = 2,68 \cdot 10^{-4}$ кг/см², $h \approx 76$ км

тура планеты $T = 240 \pm 10^\circ \text{ K}$ (подробнее см. [44, 121, 122, 197, 215]).

В свете имеющихся спектроскопических и поляриметрических данных отвергаются многие другие соединения, существование которых ранее предполагалось: C_2O_2 , SiO_2 , углеводороды и различные соли соляной кислоты — FeCl_2 , NaCl , NH_4Cl [120, 171].

Льюисом [155] было высказано предположение об обогащении облаков водным раствором HCl по сравнению с его относительно низким содержанием в газовой среде. При этом он исходит из представлений о наличии 6-мольного (25%) раствора соляной кислоты в облаках, что отвечает условию фазового равновесия H_2O и HCl по спектроскопическим данным.

Благоприятным обстоятельством здесь оказывается то, что показатель преломления водного раствора HCl возрастает с уменьшением температуры, приближаясь к измеренному значению на верхней границе венерианских облаков. Это условие достигается, однако, при $T < 200^\circ \text{ K}$, что заметно отличается от $T \approx 240^\circ \text{ K}$.

В последнее время энергично обсуждается другая любопытная гипотеза — об обогащении облаков концентрированным водным (порядка 75–80%) раствором серной кислоты, независимо выдвинутая Янгом [246] и Силлом [224]. В этом случае удается обойти серьезную трудность — согласовать оценки содержания водяного пара на уровне формирования спектральных линий ($f_{\text{H}_2\text{O}} \leq 10^{-3}$) с результатами прямых измерений абсолютной влажности в нижележащей атмосфере. Причиной этого являются замечательные высушивающие свойства H_2SO_4 . В удовлетворительном согласии с этим предположением оказываются особенности отражения (альбедо) Венеры в ближней инфракрасной области спектра, прежде всего характерная депрессия между 3 и 4 мкм и эмиссионный спектр в области 8–13 мкм (рис. 7, [194]). Что касается депрессий на $\lambda\lambda$ 1,4; 1,6; 2,0 и 2,8 мкм, то их, по-видимому, следует относить за счет поглощения в CO_2 . Показатель преломления 75%-ного раствора H_2SO_4 в точности соответствует измеренному для Венеры. Можно также объяснить предполагаемое жидко-капельное состояние облаков при температуре около -30° C , в пользу чего свидетельствуют поляриметрические измерения [120], и причину крайне низкого содержания сернистых соединений по данным наземной спектроскопии (см. табл. 3), что не согласуется с космической распространенностью серы и ее

поступлением из недр планеты вследствие вулканических эксплозий.

По оценкам Янга [246], наблюдаемые оптические характеристики видимых с Земли облаков в пределах оптической толщины $\tau \sim 1$ обеспечиваются сравнительно тонким слоем 75%-ного раствора H_2SO_4 на уровне с давлением $p \sim 50$ мбар (однородный слой капель диаметром 2,2 мкм). В этом случае потребное количество кислоты составило бы $0,29 \text{ мг/см}^2$, или $2,3 \cdot 10^{-6}$ по отношению к содержанию CO_2 . Если же исходить из условия постоянства весовых отношений H_2O и H_2SO_4 ниже уровня видимых облаков и предположить, что 99% воды на этом уровне связано серной кислотой, то при $f_{\text{H}_2\text{O}} \sim 10^{-3}$ содержание $f_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ оказывается примерно на три порядка выше. Неопределенность здесь связана с разбросом в оценках степени выпадения капель, зависящих от интенсивности перемешивания.

Заметим, что в протяженном облаке содержание воды должно увеличиваться с глубиной за счет высвобождения связанной воды из капель раствора при повышении температуры, что будет приводить к изменению концентрации раствора H_2SO_4 . В свою очередь, от общего содержания воды в атмосфере зависит протяженность облаков. Исходя из оценок равновесного соотношения между газовой фазой и облачными каплями на различных уровнях в атмосфере, при сохранении постоянства весовых фракций H_2SO_4 и H_2O на каждом уровне, Янг [246] нашел, что при $f_{\text{H}_2\text{O}} \sim 10^{-3}$ (чему соответствует 75%-ный раствор H_2SO_4 на уровне с температурой $T \approx 273^\circ \text{ K}$) облака могли бы простирались до уровня кипения при $T \approx 533^\circ \text{ K}$ и $p = 14$ атм ($h \approx 26 \text{ км}$), где концентрация раствора H_2SO_4 достигает $\sim 98,3\%$. Если же $f_{\text{H}_2\text{O}} \sim 10^{-5}$, то исходная весовая концентрация раствора H_2SO_4 должна быть выше (не менее 85% на уровне с $T \approx 250^\circ \text{ K}$, что хуже согласуется с поляриметрическими измерениями), а нижняя граница оказывается на уровне с $T \approx 373^\circ \text{ K}$ и $p = 2,4$ атм ($h \approx 44 \text{ км}$). Наконец, при $f_{\text{H}_2\text{O}} \sim 10^{-4}$ облака должны оканчиваться на высоте $h \approx 35 \text{ км}$, где как раз обнаружено сильное изменение характера ослабления солнечной «лучистой» энергии с глубиной по данным «Венеры-8» [172].

Таким образом, ряд данных как будто бы свидетельствует в пользу упомянутой, на первый взгляд несколько экзотичной гипотезы и позволяет устранить имеющиеся противоречия в рамках иных предположений. Тем не менее необходим, конечно, более детальный

анализ этой свежей интересной идеи, а в конечном счете — прямые измерения, которые наиболее определенно позволят ответить на вопрос о природе венерианских облаков.

Освещенность

Вопрос о том, проникает ли солнечный свет до поверхности Венеры или же целиком задерживается плотной атмосферой и облаками, был предметом многолетней дискуссии. Степень прозрачности атмосферы в видимой области спектра предопределяет как условия освещенности у поверхности, так и природу высоких температур на планете. Поэтому ответ на этот вопрос имеет принципиальное значение, однако получить его удалось лишь в самое последнее время в результате непосредственных измерений ниже видимых с Земли облаков. Эти измерения были выполнены на автоматической станции «Венера-8» при помощи специальных фотометрических приборов с сернисто-кадмиевым фотосопротивлением в качестве приемника, сохранявших работоспособность в условиях длительного воздействия температуры до 500°C и давления до 100 атм. Диапазон спектральной чувствительности приемника составлял от 0,4 до 0,8 мкм, с максимумом на 0,62 мкм. Вид индикатрисы датчика обеспечивал возможность регистрации как прямых лучей при любых зенитных углах, так и диффузного излучения [4].

Результаты измерений, выполненных при зенитном угле Солнца в месте посадки, равном $84,5 \pm 2,5^{\circ}$, показаны на рис. 9. На нем представлен характер ослабления величины солнечной энергии (в вт/м^2) в атмосфере Венеры с высоты около 50 км вплоть до ее поверхности. Как видно, характер ослабления лучистого потока неравномерен по высоте. От верхней границы видимых облаков (~ 70 км) до уровня начала измерений свет ослабляется примерно в семь раз, между 50 и 35 км — около трех раз и приблизительно вчетверо в слое ниже 35 км. Отсюда следует, что с ростом физической плотности атмосферы уменьшается ее оптическая плотность. Весьма характерен излом кривой вблизи 35 ± 3 км. Ослабление света от этой высоты до поверхности хорошо объясняется молекулярным (релеевским) рассеянием в углекислой атмосфере при соответствующем давлении. Выше 35 км для объяснения характера ослабления необходимо дополнительно предполагать наличие аэрозольного рассеяния или заметного истинного поглощения. Рассчитанные в этих двух предположениях мо-

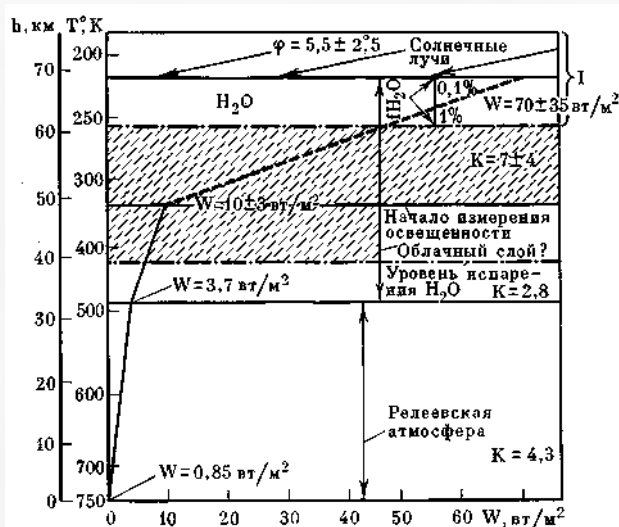


Рис. 9. Изменения освещенности в атмосфере Венеры с высотой по данным измерений «Венера-8»

K — показатель ослабления. Освещенность (для спектрального состава излучения, соответствующего солнечному) S (локс) = $350 \text{ W (вт/м}^2)$;

I — область образования гипотетических облаков из H_2O при различных относительных содержаниях $f_{\text{H}_2\text{O}}$; при $f_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1\%$ уровень конденсации примерно совпадает с условной верхней границей облаков

дели соответственно удовлетворяются при больших значениях оптической толщины $\tau \approx 50$ и альбедо единичного рассеяния $\omega \sim 1$, либо при $\tau_0 \approx \tau_{\text{рел}} = 3,5$ и $\omega_0 \sim 0,9$. Определенное влияние на эти оценки оказывает также учет степени вытянутости индикатрисы рассеяния [34].

Оптические измерения в атмосфере стали дополнительным источником информации о структуре облаков на Венере. Значительное ослабление света вплоть до 35 км может быть истолковано как указание на то, что облачность простирается вплоть до этого уровня. Однако уровень начала конденсации H_2O располагается, как мы видели, почти на 25 км выше. Это расхождение можно объяснить, если вспомнить о возможности существования фазовых переходов, в частности ртутно-галогеновых облаков [153]. Граница облаков из HgS оказывается при этом на высоте около 35 км. Другая возможность — существование жидко-капельной воды (выпадение «дождя») приблизительно до этого уровня (штрих-пунктир на рис. 9), вблизи которого располагается фазовый переход вода — пар при соответствующих p и T [4].

Наконец, в предыдущем разделе отмечалось, что вблизи 35 км оказывается уровень «кипения» концентрированного раствора сер-

ной кислоты для модели с относительно малым содержанием в атмосфере водяного пара ($f_{H_2O} \approx 10^{-4}$). Тогда в рамках гипотезы H_2SO_4 можно допустить существование однородного облачного слоя толщиной порядка 30—35 км.

Если исходить из предположения о незначительной деформации спектрального состава солнечного излучения при прохождении атмосферной толщи, то для перехода от измеренной величины лучистой энергии к значениям освещенности можно воспользоваться переводным множителем $\xi = 350$ лк/вт·м⁻², определенным по результатам калибровки. В этом случае ожидаемая освещенность у поверхности в месте посадки должна составить около 300 лк, а при нулевом солнечном зенитном угле — свыше 3000 лк. Таким образом, хотя поверхности Венеры достигает около 1% падающего на нее светового потока, это может оказаться достаточным для создания значительной освещенности (примерно соответствующей условиям в очень пасмурный день на Земле).

Свет, достигающий поверхности, претерпевает многократное рассеяние и является диффузным. Сейчас пока трудно надежно оценить, какова дальность видимости в таких условиях, какова величина цветового избытка. Эти характеристики представляют не только физический, но и практический интерес, в частности с точки зрения возможности некоторых любопытных эффектов, обусловливаемых сильным преломлением световых лучей (рефракцией) в столь плотном газе. При достаточной прозрачности атмосферы Венеры наблюдателю на ее поверхности горизонт во всех направлениях казался бы приподнятым и он испытывал бы иллюзию нахождения на дне гигантской чаши.

Тепловой режим

Данные измерений величины солнечной лучистой энергии в атмосфере Венеры и результаты расчетов переноса уходящей радиации подтверждают гипотезу, выдвинутую Саганом [210] в 1960 г., согласно которой высокая температура у поверхности планеты, вероятнее всего, обусловлена действием парникового эффекта. Физическая сущность этого механизма достаточно проста. Видимый солнечный свет, лишь частично поглощаемый атмосферой и облаками, проходит до поверхности планеты, разогревает ее, и эта разогретая поверхность излучает уже более длинные — инфракрасные волны, которые задерживаются плотной венерианской атмосферой.

Подобный механизм, но гораздо менее мощный действует и в нашей земной атмосфере и широко используется в теплицах, где к тому же отсутствует конвективная теплопередача. Расчеты лучистых потоков тепла [41, 52] показывают, что если даже небольшая часть солнечной радиации достигает поверхности Венеры, то углекислый газ с очень незначительной примесью водяного пара ($f_{H_2O} \sim 5 \cdot 10^{-5} \div 10^{-4}$) создает сильное экранирующее действие для уходящей тепловой радиации (рис. 10). С ростом температуры и давления степень экранирования возрастает. Существующие условия на планете, видимо, возникли в результате постепенного саморазогревания и отвечают некоторому равновесному состоянию. Очевидно, это равновесие не только температурное, но и геохимическое, соответствующее измеренному содержанию углекислого газа и давлению атмосферы. Возможно, определенное влияние на распределение поля тепловой радиации в толще атмосферного газа оказывают венерианские облака, отражающие некоторую долю уходящего потока от нижней границы.

Тепловые потоки для измеренных параметров атмосферы Венеры существенно меняются с высотой (рис. 10 [41]). Как видим, вблизи поверхности газ настолько сильно задерживает излучаемую радиацию, что поверхность практически не дает вклада в уходящий тепловой поток. Лучистое равновесие, по-видимому, достигается лишь вблизи 40—50 км. Тепловой баланс на меньших высотах может обеспечиваться только за счет дополнительного переноса тепла. Поскольку измеренный температурный профиль близок к адиабатическому, наиболее вероятно, что таким дополнительным механизмом теплового переноса служит конвекция.

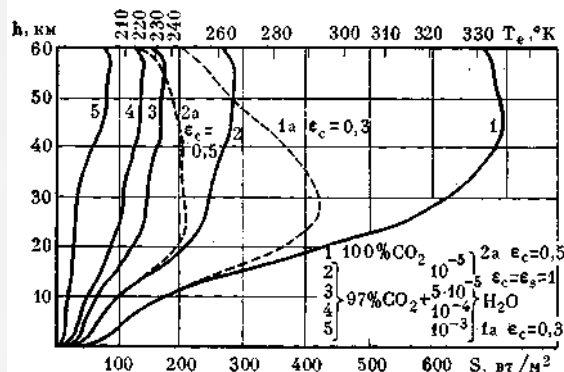


Рис. 10. Профили потоков тепловой радиации при различных содержаниях H_2O и степени черноты поверхности ϵ_s и облаков ϵ_o . T_e — эффективная температура излучения планеты

Исследование конвективной активности в атмосфере Венеры приводит к выводу, что наиболее вероятная величина скорости конвекции в нижних слоях атмосферы Венеры менее 0,05—0,2 м/сек [1]. К таким же представлениям приводят оценки, полученные независимо из расчета величины вертикальных токов с использованием уравнений, связывающих аэродинамику парашютного спуска станций «Венера» с измеренными значениями p и T . Следует при этом заметить, что конвекция может проникать в более высокие области атмосферы, так что конвективная зона становится протяженным областью атмосферной неустойчивости. Хотя моделирование проведено пока для области, ограниченной примерно 40 км, можно предполагать эффективность конвективного переноса во всей области тропосферы и, в частности, его важную роль в формировании структуры венерианских облаков.

Благодаря огромному теплосодержанию атмосфера Венеры должна обладать очень большой тепловой инерцией, так что разница между дневной и ночной сторонами крайне мала: максимальные суточные вариации у поверхности $< 1^\circ$.

Убедительным подтверждением этих теоретических представлений служат результаты измерений температуры станцией «Венера-8» на дневной стороне. Выравнивание температуры в течение суток, а также между экваториальными и полярными областями подтверждается и результатами недавних измерений яркостной температуры планеты методами наземной радиоинтерферометрии на волнах 11 и 3 см, относящихся соответственно к поверхности и нижней атмосфере [105, 225]. Согласно этим результатам, отсутствует заметный фазовый ($\Delta T_s < 12 \pm 6^\circ \text{K}$) и широтный ($\Delta T_s < 18 \pm 9^\circ \text{K}$) ход температуры на диске Венеры. Инфракрасная яркостная температура также не обнаруживает заметной зависимости от фазы. В диапазоне $\lambda \lambda 8-14$ мкм усреднение по диску дает $T_s = 220 \pm 10^\circ \text{K}$, что соответствует высоте около 70 км. Суточные изменения температуры вблизи этого уровня также практически отсутствуют [18].

Динамика атмосферы

С проблемой теплового режима непосредственно связаны вопросы динамики венерианской атмосферы, прежде всего крупномасштабной планетарной циркуляции. Один из механизмов такого типа — модель глубокой циркуляции, предложенная Гуди и Робинсо-

ном [115], — до недавнего времени рассматривался в качестве вероятного механизма для объяснения теплообмена на Венере в случае непрозрачности подоблачной атмосферы для солнечных лучей. Предпринимались и другие попытки расчета структуры планетарной циркуляции и теоретических оценок интенсивности атмосферных движений, в основе которых лежат методы численного моделирования или использование соотношений подобия [12, 20]. Видимо, широтно-долготная циркуляция играет заметную роль в тепловом режиме планеты. В частности, за счет переноса горячего и плотного газа в меридиональном направлении должен обеспечиваться подвод тепла в полярные районы.

Чрезвычайно важное значение для исследования динамики атмосферы Венеры имеют результаты измерений радиальной скорости на участках парашютного спуска станций «Венера», которые позволили получить интересные данные о характере горизонтальных движений, а также некоторые представления о структуре мелкомасштабных (турбулентных) полей [22, 23, 139]. Результаты всех измерений скорости горизонтальных движений показаны на рис. 11. Они относятся к локальным областям спуска каждой станции. Однако по причине уже упоминавшейся гро-

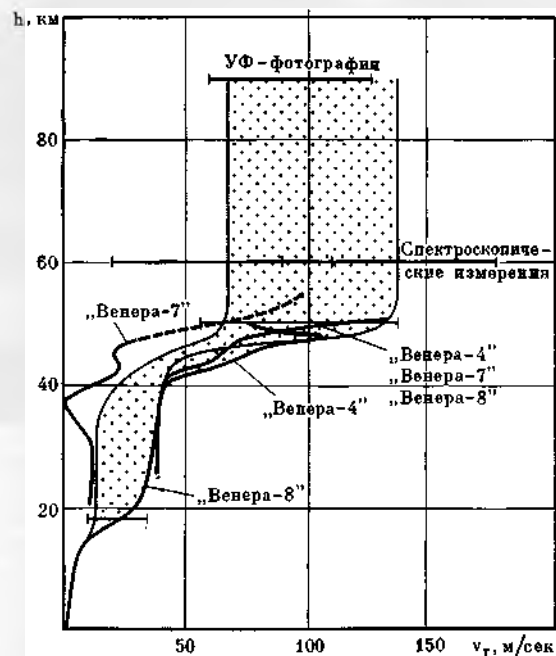
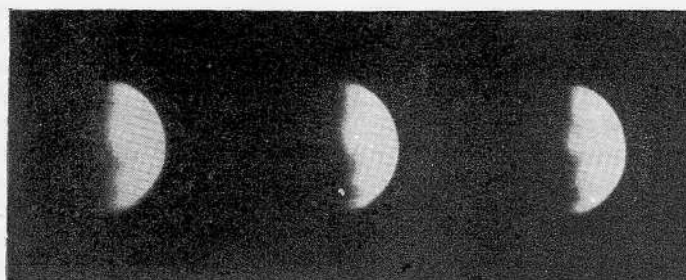


Рис. 11. Скорости горизонтальных движений в атмосфере Венеры по измерениям АМС «Венера-4», «Венера-7» и «Венера-8» и наземным измерениям

Венера 21-22 мая 1967 г.

2240
UV2315
UV0302
UV

Венера 7-8 июня 1967 г.

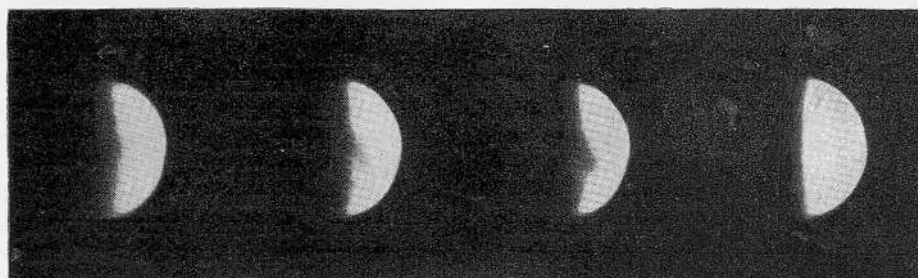
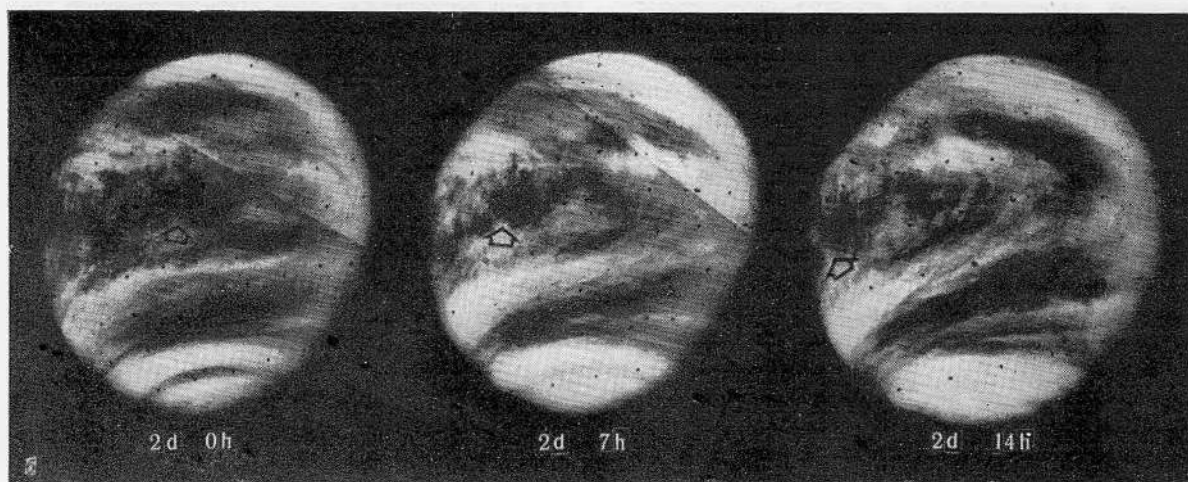
a 2230
UV0206
UV0311
UV0150
Зеленый

Рис. 12. Фотографии Венеры в ультрафиолетовых лучах

a — по наземным наблюдениям;

б — с «Маринера-10» (фотографии любезно предоставлены Б. Смитом и В. Мюрреем)

мадной теплоемкости атмосферы Венеры и как следствие — времени тепловой релаксации у поверхности порядка 10^{10} сек можно думать, что выравнивание неоднородностей тепловых полей происходит скорее за счет

крупномасштабных движений, нежели локальных ветров. С этой точки зрения данные рис. 11 естественно рассматривать как в определенной степени отражающие структуру глобальной циркуляции на планете.

Обращает на себя внимание довольно убедительное согласие отдельных измерений. Они свидетельствуют о существовании устойчивой зональной циркуляции в сторону, совпадающую с собственным вращением планеты, по крайней мере выше 30 км. Наиболее

полные измерения, которые обнаруживают наибольшие скорости ветра на освещенной стороне вблизи утреннего терминатора, проведены на «Венере-8». Как видим, горизонтальная компонента скорости ветра сильно переменна по высоте: на высотах около 45—50 км она достигает почти 100 м/сек, уменьшаясь до величины менее 1 м/сек ниже 10—12 км. Интересна область высот между 18 и 30 км, где скорость ветра почти не меняется, в то время как ниже и выше этой области градиент достигает 5 м/сек.

Очень слабая интенсивность движений в приповерхностном слое атмосферы немедленно приводит к выводу о том, что в атмосфере не может быть много пыли. Это, как мы видели, согласуется с результатами измерений освещенности. Что касается больших высот, то создаются представления о непосредственной связи измеренного ветра с механизмом стратосферной циркуляции, проявляющимся в дрейфе так называемых ультрафиолетовых облаков.

При наблюдении с Земли в ультрафиолетовых лучах на диске Венеры обнаруживаются отдельные контрастные детали, не различимые в видимой области спектра (рис. 12, а). Установлено, что перемещение этих деталей по диску происходит гораздо быстрее, чем собственное вращение планеты, приблизительно в 60 раз, что соответствует средней скорости дрейфа около 100 м/сек [69, 230]. Заметим, что на Земле опережающее вращение атмосферы, причем не более чем в 1,5—1,6 раза, найдено лишь на значительно больших высотах — 150—400 км.

Наблюдаемые неоднородности венерианских облаков в ультрафиолетовом диапазоне локализованы примерно на 25 км выше границы облачности в видимом свете. Периодическая повторяемость деталей, вероятно, отражает общую природу глобальной циркуляции в тропосфере и стратосфере Венеры.

Эти представления подтверждаются результатами фотографирования планеты с борта космического аппарата «Маринер-10» [184]. Последовательная съемка Венеры под ультрафиолетовым фильтром ($\lambda_{\text{max}} = 3550 \text{ \AA}$) с разрешением от 130 км до 100 м позволила выявить характерные особенности пространственных движений, непосредственно связанных с областями верхней тропосферы и нижней стратосферы. Помимо четко прослеживаемых дрейфовых движений в экваториальной зоне (отражающих систему устойчивой четырехсуточной зональной циркуляции), в структуре которой различимы отдельные

пояса шириной до 100 км, обнаружено возрастание угловой скорости с ростом широты, с образованием хорошо различимой спиральной структуры и вихрей у полюсов (рис. 12, б). На 50° широты циркуляция происходит, по-видимому, с периодом около 2 земных суток, при скорости движений также ~ 200 м/сек. В низких широтах меридиональные движения малы, каких-либо локальных крупномасштабных вихрей, подобных земным циклонам, не обнаружено. Наряду с этим в области подсолнечной точки, в пределах нескольких десятков градусов по долготе и широте, выявляются признаки крупномасштабной ячейковой конвекции, сохраняющейся на фоне устойчивых зональных движений. Взаимодействие этих двух форм движений предположительно приводит к возникновению возмущений, наблюдаемых в виде волновых движений вблизи полуденного меридиана.

В настоящее время трудно отдать предпочтение той или иной теоретической модели, развитой применительно к особенностям глобальной циркуляции на Венере. Очевидно, однако, что механизм циркуляции не является осесимметричным. Представления о возникновении зонального потока как следствия несимметрии конвективных движений за счет периодичности инсоляции на вершине атмосферы нашли отражение в двумерных моделях Шуберта и Янга [221] и Гираша [107]. При этом учитывались результаты моделирования циркуляции в цилиндрах с жидкостью (периодичность инсоляции имитируется вращающейся горелкой) и было показано возникновение в жидкости зональных течений в направлении, противоположном движению горелки. Численные эксперименты по моделированию циркуляции в двухуровневой модели атмосферы Венеры, выполненные С. С. Зилинским и др. [20], привели к относительно простой двухъячейковой схеме с центром низкого давления на дневной стороне, смещенным к вечернему терминатору; центр высокого давления находится на ночной стороне вблизи утреннего терминатора. Малкус [167], рассмотревший трехмерную модель, пришел к выводу о возможности возникновения вблизи вершины тропосферы слабых ячеек гадлевского типа и переноса за счет температурных контрастов между экватором и полюсом энергии и углового момента к высоким широтам.

С этой моделью можно в принципе совместить экспериментальные данные о пространственных движениях, полученные «Марине-

ром-10», если дополнительно предполагать большое влияние подсолнечной области высокого давления на структуру циркуляции. Возникающие в этом случае меридиональные градиенты давления должны приводить к ускорению с ростом широты ортогональных изобарическим поверхностям потоков с образованием спиральных движений и струйных течений. Сток энергии будет происходить в полярных вихрях вследствие схождения векторов скоростей движений у полюсов при низких давлениях [184].

Создаются, таким образом, представления о том, что в динамике атмосферы Венеры важную роль должен играть перенос момента количества движения в меридиональном направлении. Видимо, структура атмосферы в экваториальных и полярных областях имеет заметные различия, что прежде всего проявляется в отличиях профилей температуры, вертикальных и горизонтальных скоростях и направлениях движений. Дальнейшее изучение этих особенностей будет способствовать лучшему пониманию закономерностей формирования современных климатических условий на планете.

Верхняя атмосфера и околопланетное пространство

Отдельную проблему представляет структура атмосферы Венеры на больших высотах, в областях термосферы и экзосферы и физическая структура полей в околопланетном пространстве. В основе данных о верхней атмосфере Венеры лежат результаты измерений на космических аппаратах «Венера-4» и «Маринер-5», которые проводились в период, соответствующий условиям средней солнечной активности. Значение экзосферной температуры $T \approx 650^\circ \text{K}$ для этих условий отвечает наиболее вероятной оценке, полученной по результатам измерений резонансной эмиссии в спектральной линии водорода Лайман-альфа (L_α 1216 Å) [61]. Результаты теоретического моделирования хорошо согласуются с этой оценкой и указывают на вероятное существенное различие температур на дневной и ночной сторонах планеты, приблизительно от 900 до 400°K [91, 223], а также на возможность значительной вариации T в зависимости от фазы 11-летнего солнечного цикла.

Из спектрофотометрических измерений резонансного рассеяния в характерных линиях атомарного кислорода, проведенных на высотных ракетах и на космических аппаратах [147, 175], получены оценки содержания О в верхней атмосфере Венеры. Они представля-

ют очень большой интерес, поскольку определяют степень фотодиссоциации углекислого газа — основной компоненты венерианской атмосферы — ультрафиолетовым излучением Солнца, в результате чего образуются О и СО. Если бы верхняя атмосфера Венеры находилась в фотохимическом равновесии, то, как показывает несложный расчет, на высотах 200—300 км атомарный кислород был бы преобладающей компонентой, так же как это имеет место на Земле, где он образуется в результате диссоциации молекулярного кислорода. Однако содержание О оценивается в пределах 1—10% от общей плотности [96]. Это приводит к представлениям о высокой эффективности обратных рекомбинационных механизмов в термосфере Венеры, препятствующих накоплению кислорода за счет разрушения CO_2 в процессах диссоциации. Предположение о преобладающей концентрации CO_2 до высот приблизительно 200—250 км подтверждается также теоретическими расчетами профилей электронной концентрации в ионосфере Венеры и сравнением их с результатами измерений на «Маринер-5» [162, 163, 166, 169]. Эти результаты воспроизведены на рис. 13. Пучки прямых характеризуют наклоны профилей для расчетных значений шкалы высот, отвечающих разным ионам для нескольких значений плазменной температуры T_p . Как видим, до 300 км наилучшее согласование обеспечивается для иона CO_2^+ . При этом максимум электронной концентрации в дневной ионосфере, достигающий величины $(5,0 \div 5,5) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, оказывается расположенным на высоте 142—145 км, т. е. почти вдвое ниже, чем максимум слоя F_2 в ионосфере Земли (в котором преобладает ион O^+), с приблизительно вдвое меньшей электронной концентрацией. В ночной ионосфере плотность электронов в среднем $n_e \leq 10^3 \text{ см}^{-3}$, а в максимумах на уровнях 120 и 140 км достигает $n_e \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$ [127].

Были предприняты многочисленные попытки отыскать адекватный механизм, объясняющий преимущественно углекислый состав термосферы Венеры, а также термосферы Марса, где имеет место примерно аналогичная ситуация. В изучении последней достигнут сейчас наибольший прогресс благодаря замечательным результатам ультрафиолетовой спектрометрии с борта космических аппаратов, полученным Бартом и его сотрудниками [62, 63]. В частности, довольно неожиданным явилось обнаружение сильных эмиссий в спектрах излучений марсианской атмосферы, помимо резонансного свечения О,

принадлежащих системе камероновских полос CO и полосам CO₂⁺. Это указывает на значительные потери энергии из атмосферы излучением в ультрафиолетовой области спектра, в дополнение к заметному выхолаживанию в длинноволновом диапазоне, прежде всего за счет колебательных переходов CO₂. Можно думать, что подобные механизмы характерны и для термосферы Венеры, что, кстати, объясняет причину сравнительно низкой температуры верхних атмосфер обеих планет.

Что касается сохранения преобладающего содержания CO₂, то сейчас общепризнанным становится представление об интенсивности динамических процессов макроциркуляционного переноса с дневной стороны на ночную и турбулентной диффузии, другими словами, быстрого отвода атомарного кислорода из областей диссоциации [91, 223]. В более плотной нижележащей атмосфере значительно эффективнее происходят процессы рекомбинации. За счет интенсивной турбулентной диффузии обеспечивается постоянный подвод в верхнюю атмосферу молекул углекислого газа. Хотя требуемые значения коэффициентов турбулентной диффузии довольно велики (10^7 — 10^8 см²/сек, т. е. примерно на порядок больше по сравнению с известными для Земли), они могут быть достижимы в условиях верхних атмосфер Венеры и Марса. Необходимо при этом дополнительно выяснить реальную последовательность химических превращений, сопровождающих процессы циркуляционного или диффузионного массообмена, с учетом предельных содержаний участвующих компонент и констант скоростей соответствующих реакций.

По существующим оценкам, эффективность наиболее вероятного механизма рекомбинации атомарного кислорода заметно уменьшается выше 250 км. Это, очевидно, должно приводить к появлению слоя атомарного кислорода сравнительно небольшой протяженности, а выше него определенное влияние уже начинает оказывать гелий. Измеренные профили электронной концентрации в ночной ионосфере Венеры, показанные на рис. 13, можно объяснить путем фотоионизации гелия на дневной стороне со скоростью $3 \cdot 10^7$ см⁻² · сек⁻¹ выше 250 км с последующим горизонтальным переносом ионов He⁺ в неосвещенную полусферу. Если поступление гелия в атмосферу Венеры вследствие радиоактивного распада урана и тория в недрах планеты примерно соответствует его поступлению в атмосферу Земли ($\sim 3 \cdot 10^6$ атомов/см² · сек), то

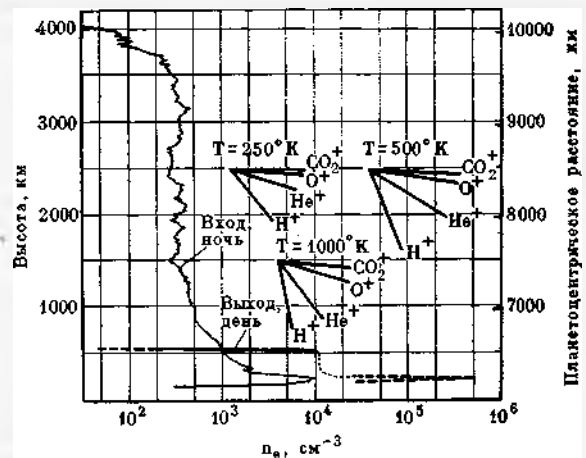


Рис. 13. Изменение электронной концентрации с высотой на ночной и дневной сторонах по данным измерений «Маринера-5» (согласно [169])

необходимый баланс между поступлением и термической диссипацией гелия обеспечивается, если дополнительно предположить унос примерно 10% от количества образующихся на дневной стороне ионов He⁺ солнечным ветром [163].

Как видно из рис. 13, выше приблизительно 800 км атмосфера Венеры, по-видимому, становится преимущественно водородной. Водородная корона Венеры, непосредственно измеренная с космических аппаратов [61, 147], примерно аналогична водородной короне Земли, но при более низкой температуре экзосферы протяженность ее меньше. Измерения «Маринера-5» выявили любопытную особенность водородной эмиссии с дневной стороны планеты — быстрое нарастание интенсивности свечения по направлению к лимбу (в диапазоне высот от 3000 до 450 км), что соответствует уменьшению шкалы высот приблизительно вдвое. Хотя подтверждения столь высокой интенсивности свечения с дневной полусферы не найдено в ракетных экспериментах Муса и др. [175], для объяснения этого интересного явления были выдвинуты различные гипотезы.

Наиболее вероятная гипотеза исходит из значительного содержания дейтерия в основании водородной короны, которой обладает Венера. При этом приходится, однако, допустить, что относительное содержание дейтерия на Венере $n_D/n_H \approx 0,1$, что значительно больше, чем в атмосфере Земли. Такое соотношение трудно объяснить в рамках механизма термического фракционирования водорода и дейтерия в основании экзосферы.

Между тем для планеты, практически лишенной собственного регулярного магнитного поля (напряженность его $1/3000$ от земного) [17], дополнительным, весьма эффективным механизмом может быть унос ионизованных солнечным ультрафиолетовым излучением частиц электрическим полем, возникающим в «индуцированной ионопаузе» Венеры на дневной стороне при натекании на планету солнечной плазмы.

Представление об «индуцированной ионопаузе» дает рис. 13, на котором виден резкий (почти на три порядка величины) спад (обрезание) электронной концентрации в освещенной Солнцем полусфере, в отличие от равномерного спада с ночной стороны. Это связано с образованием ударной волны в области, где давление солнечного ветра сравнивается с давлением индуцируемого магнитного поля. Ионопауза на Венере в какой-то степени подобна магнитопаузе на Земле, препятствующей непосредственному проникновению солнечной плазмы внутрь магнитосферы — области регулярного геомагнитного поля. Поэтому магнитопауза расположена значительно дальше от поверхности, на расстоянии порядка 10 земных радиусов. Поскольку Венера не оказывает сильного возмущающего воздействия на структуру межпланетного поля, естественно ожидать, что обтекающий ее солнечный ветер на ночной стороне практически не изменяет своих характеристик [234].

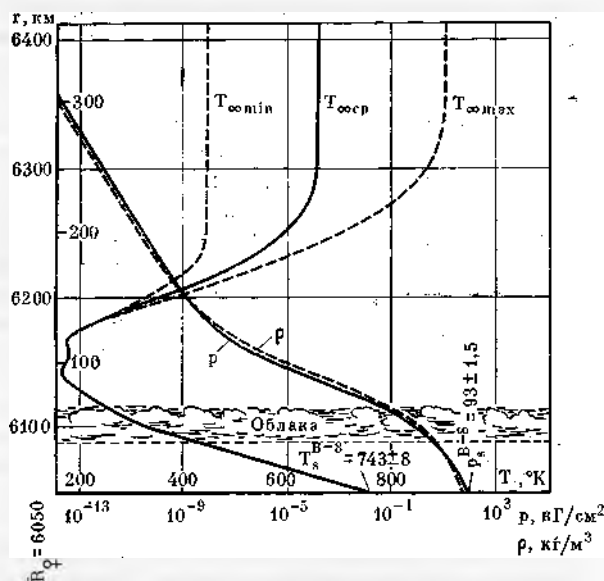


Рис. 14. Физическая структура атмосферы Венеры согласно модели [40]

Характер физической структуры атмосферы Венеры до высоты приблизительно 1000 км суммируется на рис. 14 согласно модели [40], содержащей основные физические параметры атмосферного газа.

Происхождение и эволюция

Гипотеза единого происхождения планет солнечной системы из гигантской протопланетной газопылевой туманности, естественно, заставляет искать у планет земной группы родственные черты, более или менее сходные признаки. Между тем результаты исследований последнего десятилетия принесли убедительные свидетельства, что Земля, Марс, Венера, Меркурий сильно отличаются друг от друга. В определенной мере эти отличия можно связать с различными стадиями эволюции, которые переживают сейчас планеты. Можно с определенной степенью достоверности представить себе, как развивалась Земля, природные условия на которой миллионы лет назад были, несомненно, иными, чем теперь. Характер такой эволюции зависит от многих условий, прежде всего от геометрических и механических характеристик планеты, расстояния до Солнца, изменений, происходивших в ее недрах, фрагментации пород. Эти процессы сопровождаются образованием и эволюцией планетной атмосферы, которая содержит поэтому в себе важнейшие признаки определенной стадии.

Газовый состав атмосфер планет земной группы формировался прежде всего за счет вулканических извержений, которыми сопровождались процессы дифференциации вещества планеты на оболочки вследствие разогревания внутренним теплом радиоактивного распада. В недрах планеты водяной пар и углекислый газ составляют основную долю вулканических газов. Неудивительно поэтому наличие в атмосфере Венеры как этих газов, так и обнаруженных спектроскопически угарного газа, хлористого и фтористого водорода (а также возможность присутствия сернистых газов, что подкрепляет гипотезу облаков из H_2SO_4). Вероятно, свыше миллиарда лет назад примерно аналогичный состав имела и атмосфера Земли. Однако, по-видимому, решающее воздействие на формирование земной атмосферы оказали в дальнейшем процессы фотосинтеза и появление в атмосфере свободного кислорода благодаря возникновению биосферы. Это, в свою очередь, обусловило окисление аммиака, также содержащегося в вулканических газах, с вы-

делением в атмосферу большого количества азота, а углекислый газ, хлористый и фтористый водород и сернистые соединения вошли в реакции с биосферой, гидросферой и твердым веществом планеты. При умеренной температуре поверхности и атмосферы Земля сохранила свою воду, основная масса которой сосредоточилась в океанах [7, 8].

Вероятно, большая близость Венеры к Солнцу предопределила иной характер эволюции ее атмосферы. Видимо, основным фактором, который привел к существующим условиям, оказалась потеря планетой воды. Вопрос о воде является, пожалуй, ключевым в проблеме эволюции Венеры.

Если исключить маловероятное предположение, что в процессе эволюции планеты вода не отгонялась из недр за счет вулканической деятельности, как это, по существующим представлениям, происходило на Земле, то надо понять, почему содержание воды в атмосфере Венеры по крайней мере в тысячу раз меньше, чем на Земле. Одно из возможных объяснений состоит в том, что температура самой холодной области в верхней атмосфере Венеры (в мезопаузе) несколько выше, а достаточно жесткая ультрафиолетовая радиация может проникать глубже, чем на Земле. Результатом будет более интенсивное разложение воды на кислород и водород и более энергичная диссипация легкого водорода из атмосферы в космическое пространство. Кислород же будет связываться твердым веществом поверхности планеты.

Высокая температура, давление, очень малое содержание воды и почти полное отсутствие кислорода — все эти современные особенности атмосферы Венеры взаимосвязанны и взаимообусловлены. При повышении температуры в атмосферу переходит больше воды, а при обезвоживании — также и углекислоты, что в свою очередь, должно способствовать дальнейшему росту температуры за счет парникового эффекта. При высоких температурах не может существовать биосфера в привычных нам формах, а отсутствие биосферы, по существу, исключает возможность содержания в атмосфере больших количеств свободного кислорода.

Сравнительное содержание распространенных летучих компонент на Земле и Венере приведено в табл. 4 (см. стр. 191) [132]. Как видим, количество углекислоты на Земле примерно такое же, как и на Венере. В атмосфере Земли количество ее ничтожно ($0,0003 \text{ кг/см}^2$), а основная масса находится в верхней оболочке твердого тела Земли. Та-

кое соотношение в содержании CO_2 между атмосферой и литосферой соответствует при существующей на Земле температуре равновесному состоянию, определяемому реакциями между карбонатами и силикатами при наличии жидкой воды. Углекислота на Земле оказалась связанной в карбонатах осадочных пород благодаря главным образом деятельности живых организмов. На горячей Венере — при отсутствии воды — углекислота не могла перейти в литосферу и сохранилась в атмосфере, создав столь высокое давление газовой оболочки планеты. Если бы температура на Земле возросла до температуры Венеры, давление земной атмосферы стало бы еще более высоким, чем сейчас на Венере. Дело в том, что к давлению около 100 атм за счет высвобождения углекислоты из карбонатов добавилось бы вследствие испарения океанов еще примерно 300 атм, что соответствует средней глубине Мирового океана.

О проблеме жизни

В свете современных концепций о природе Венеры естествен вопрос: представляет ли эта планета экзобиологический интерес? Этот вопрос обсуждался в ряде работ (см., например, [176, 212, 213, 214]). Авторы касались возможностей существования биологически активных форм как на поверхности, так и в облаках. В отношении поверхности можно утверждать, что большинство органических молекул, входящих в состав биологических структур, испаряются при температурах, существенно меньших 500°C , а протеины изменяют свои естественные свойства. К тому же на поверхности нет жидкой воды. Поэтому земные формы жизни, по-видимому, можно исключить. Довольно искусственными представляются другие возможности, включающие своего рода «биологические холодильники» или структуры на основе кремнийорганических соединений.

Значительно более благоприятными представляются условия в облаках, соответствующие на уровне около 50—55 км земным, за исключением преобладающего содержания CO_2 и практически отсутствия O_2 и N_2 . Тем не менее в облаках имеются условия для образования фотоаутотроф. Однако в условиях атмосферы существенная трудность связана с удержанием таких организмов вблизи уровня с благоприятными условиями, так чтобы они не увлекались в нижележащую горячую атмосферу. Чтобы обойти эту труд-

ность, Морозов и Саган [176] выдвинули предположение о венерианских организмах в форме изопикнических баллонов, заполняемых фотосинтетическим водородом. По их оценкам, диаметр таких баллонов, определяющий размер организмов, составил бы (при толщине оболочки, соответствующей толщине мембран у земных организмов) несколько сантиметров.

Несмотря на внешнюю привлекательность, такие чисто умозрительные представления кажутся нам весьма искусственными. Едва ли они могут рассматриваться как с точки зрения возникновения жизни в облаках, так и с точки зрения своего рода «остатков» биологических форм, некогда существовавших на планете. Это, конечно, не исключает того, что в определенный период своей истории Венера обладала значительно более благоприятными условиями, пригодными для проявления биологической активности.

Спецификой эволюции, особенностями теплообмена, природой облаков, характером поверхности далеко не исчерпываются проблемы Венеры, продолжающей, несмотря на огромные успехи, достигнутые за последние годы в ее изучении, по праву сохранять за собой название планеты загадок.

Венера таит в себе много тайн, раскрытие которых, несомненно, обогатит планетологию новыми фундаментальными открытиями. Мощностная газовая оболочка, своеобразный тепловой режим, необычность собственного вращения — эти и другие особенности резко выделяют Венеру из семьи планет солнечной системы. Что породило столь необычные условия? Является ли атмосфера Венеры «первичной», свойственной молодой планете, или такие условия возникли позже, в результате необратимых геохимических процессов, обусловленных близостью Венеры к Солнцу, — эти вопросы заслуживают самого пристального внимания и требуют дальнейших всесторонних исследований.

МАРС

Марс — четвертая и последняя из планет земной группы в порядке удаленности от Солнца. Двигается по внешней орбите (в отличие от «внутренних» планет — Меркурия и Венеры), а потому во время сближений с Землей бывает обращен к нам своим дневным полушарием и виден особенно хорошо. Тем не менее возможности получения новой информации при помощи наблюдений с поверхности Земли ограничены.

За последние годы наши знания о Марсе растут невиданными прежде темпами главным образом благодаря применению космической техники. Только космические аппараты дают возможность наблюдать Марс с близкого расстояния. Преимущества очевидны: многократно увеличивается детальность изображений Марса; устраняются помехи от земной атмосферы, так как наблюдения производятся за ее пределами; вместо громадных телескопов применяется легкая аппаратура. Все это позволяет выполнять исследования, которые с наземных обсерваторий проводить принципиально невозможно. Первые же попытки реализовать эти преимущества привели к новым открытиям. До 1971 г. все автоматические станции, направленные к Марсу, были пролетными, и широкие возможности аппаратуры сильно ограничивались малой длительностью полета около планеты. Стремление в полной мере использовать преимущества космических станций привело к осуществлению в 1971 г. запусков технически более сложных — с выводением автоматических станций на орбиты спутников Марса. 16 ноября спутником Марса стал космический корабль США «Маринер-9», а 27 ноября и 2 декабря — советские автоматические станции «Марс-2» и «Марс-3». 2 декабря с «Марса-3» была впервые осуществлена мягкая посадка спускаемого аппарата на поверхность планеты. Советский автоматический аппарат спустился в марсианской пустыне Phaethontis около 45° ю. ш. и 158° з. д. К сожалению, сложные условия посадки не позволили провести комплекс запланированных измерений.

В то время на Марсе бушевала мощная пылевая буря глобального масштаба. Тучи пыли, поднявшиеся в марсианской газовой оболочке, сделали ее практически непрозрачной для лучей в визуальной части спектра. Поэтому на первых снимках с «Марса-3» и «Маринера-9» поверхность Марса выглядела совершенно однородной, без заметных контрастов. Резко очерчен лимб планеты (что говорит о хорошей четкости переданного изображения), хорошо виден терминатор (граница дневного и ночного полушарий), но детали рельефа не видны. На более крупномасштабных снимках можно различить волнистую поверхность облаков, а над горизонтом — узенькую светлую полосу — тонкий слой высотной дымки. Местные прояснения начали появляться во второй половине декабря, удовлетворительная прозрачность атмосферы установилась после 23 января.

а полное проявление наступило в феврале. Запыленность марсианской атмосферы воспрепятствовала вначале фотографированию поверхности планеты. Но была получена возможность исследовать в непосредственной близости сильнейшую марсианскую бурю.

Благодаря использованию космических аппаратов и применению новых методов наблюдений с поверхности Земли количество информации о Марсе за последний период возросло в колоссальной степени. Громадные интерес представляют, в частности, телевизионные изображения поверхности Марса и его спутников, переданные «Маринером-9».

Некоторые глобальные характеристики Марса

Размеры, фигура и гравитационное поле планеты. Результаты измерений радиуса Марса различными методами хорошо согласуются между собой. Сводка новых оптических измерений и обширная библиография содержатся в [95]. Получен эллипсоид с экваториальным радиусом $R_0 = 3398 \pm 3$ км и полярным $R_d = 3371 \pm 4$ км. Комбинация результатов наземной радиолокации во время оппозиций 1967, 1969 и 1971 гг. [192] показала $R_0 = 3394 \pm 2$ км. Это средний радиус в пределах тропического пояса планеты.

По-видимому, наибольшую точность (со среднеквадратичной ошибкой порядка 1 км) дают измерения радиуса планеты методом радиозатмений по прекращению радиосвязи с космическим кораблем при его заходе за лимб Марса. Измерения на «Маринере-9» показали, что физическую поверхность Марса можно аппроксимировать трехосным эллипсоидом $x^2/A^2 + y^2/B^2 + z^2/C^2 = 1$, у которого полярный радиус $C = 3375,45$ км, а в плоскости экватора большая полуось $A = 3400,12$ км, малая $B = 3394,19$ км и долгота большой оси $L_A = 99^\circ,7$ [71]. Найдена значительная асимметрия Марса вдоль полярной оси: уровень поверхности почти во всем южном полушарии лежит на 3—4 км выше, чем в северном.

Точный анализ движения «Маринера-9» по орбите вокруг Марса привел к выявлению неоднородностей гравитационного поля планеты [156]. Они говорят о местных флуктуа-

циях плотности вещества в недрах. Результаты измерений можно выразить условно в форме положительных и отрицательных концентраций массы или в форме эквивалентных высот физической поверхности Марса над поверхностью сферического тела однородной плотности. Некоторые концентрации массы легко отождествляются с местными флуктуациями радиуса планеты.

Найденная по радиозатменным измерениям величина полярного сжатия Марса не согласуется с динамическим сжатием (т. е. со сжатием эллипсоида инерции планеты), полученным из предцессии орбит спутников Марса и рассчитанным на основе гидростатической теории в модели однородного Марса. Рассогласование можно в принципе объяснить конвекцией вещества в недрах Марса [208].

Полная масса планеты, вычисленная по движению его спутников [245], составляет около $6,423 \cdot 10^{23}$ кг. Анализ движения пролетных космических кораблей «Маринер-6» и «Маринер-7» позволил американским специалистам уточнить константу, состоящую из произведения гравитационной постоянной на массу планеты [55]: $GM_s = 42\,828,1 \pm 1,38$ км³/сек². Выделить массу планеты из этого выражения можно, к сожалению, только с потерей точности, поскольку гравитационная постоянная сама нуждается в уточнении. Уверенно можно назвать не более четырех значащих цифр, которыми обычно и ограничиваются.

Параметры, производные от значения массы и радиуса: средняя плотность планеты близка к $3,94$ г/см³; ускорение силы тяжести на поверхности Марса составляет 38% от его значения на Земле, критическая скорость $5,0$ км/сек.

Магнитное поле. Установленный на пролетном космическом аппарате «Маринер-4» (1965 г.) магнитометр для оценки дипольного момента и свойств магнитосферы Марса зарегистрировал возле планеты скачок напряженности на 5γ . Экспериментаторы связали его с прохождением фронта ударной волны солнечного ветра, а не с полем планеты. Основанные на результатах эксперимента оценки верхнего предела магнитного момента Марса дали $10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}$ от земного [231].

Феррозондовые магнитометры на ИСМ «Марс-2» и «Марс-3» (1971—1972 гг.) зарегистрировали на ближайших к планете участках орбиты изменение напряженности поля, которое в максимуме на магнитограмме превышало естественный фон межпланетного поля в данном районе в 7—10 раз [18]. Не исключена возможность, что наблюдавшийся эффект

* Новым существенным вкладом явилось проведение комплексных экспериментов на Советских аппаратах «Марс-4» — «Марс-7», включая прямые измерения параметров атмосферы. Предварительные результаты опубликованы в журнале «Космические исследования», 1975, 13, № 1. — *Прим. авторов.*

вызван усилением магнитного поля солнечного ветра по двум причинам: во-первых, токами, индуцированными в ионосфере планеты; во-вторых, в результате сжатия плазмы между ударным фронтом и планетой. Однако, по мнению проводивших этот эксперимент Ш. Ш. Долгинова и его коллег [18], данные о топологии и величине измеренного магнитного поля могут быть наилучшим образом согласованы с данными К. И. Грингауза [117] об интенсивности солнечного ветра и с данными о положении ударного фронта вблизи планеты только в предположении о существовании магнитного поля Марса с дипольным моментом $2,4 \cdot 10^{22}$ гс·см³ и напряженностью на магнитном экваторе около 60 γ, т. е. $2 \cdot 10^{-3}$ от земного.

Параметры осевого вращения и марсианские сезоны

Телескопические наблюдения нескольких поколений астрономов были первым источником сведений о направлении оси и скорости суточного вращения Марса. Осевое вращение происходит с постоянной угловой скоростью относительно звезд. Сидерический период равен 24 час. 37 мин. 22,668 сек. Длительность солнечных суток испытывает небольшие вариации вследствие неравномерности движения Марса по орбите и составляет в среднем 24 час. 39 мин. 35 сек. Количество солнечных суток в марсианском году $668 \frac{2}{3}$ — на единицу меньше, чем звездных.

Ось суточного вращения Марса отклонена от перпендикуляра в плоскости орбиты на 25°, т. е. почти так же, как и у Земли. Но сходство ограничивается только величиной наклона, а не направлением оси суточного вращения. Полярная ось Марса уходит своим северным концом в созвездие Лебедя, в точку с координатами: прямое восхождение $317^{\circ}3 \pm 0^{\circ}3$, склонение $+52^{\circ}6 \pm 0^{\circ}2$ (эпоха 1971,9, равноденствие 1950,0) [156]. Поблизости от полюса нет яркой звезды, которая могла бы выполнять роль Полярной.

Значительный наклон плоскости марсианского экватора к плоскости орбиты приводит к тому, что на одних участках орбиты освещаются и обогреваются преимущественно северные широты, на других — южные. Иными словами, на Марсе происходит смена сезонов.

В каждое время года Солнце проходит на марсианском небосводе примерно на такой же высоте, как и на соответствующих широтах на Земле. Но, в отличие от наших, марсианские сезоны в северном полушарии заметно

отличаются от сезонов в южном по своей длительности и температурным условиям. Весна и лето в южном полушарии Марса значительно короче весны и лета в его северных широтах (табл. 5) вследствие весьма заметной эллиптичности марсианской орбиты и вытекающих отсюда различий в скорости прохождения отдельных ее участков планетой.

Существенная разница продолжительности теплого времени года в двух полушариях Марса дополняется различием в яркости солнечного освещения при циклических изменениях расстояния планеты от Солнца. В перигелии Марс оказывается на 43 млн. км ближе к Солнцу, а средняя температура в подсолнечной точке и по всему дневному полушарию на 25—30° выше, чем в афелии. Это приводит к различиям климата северного и южного полушарий.

По марсианскому календарю (если построить его подобно нашему и отождествлять даты по аргументу склонения Солнца) афелий бывает в конце мая, а перигелий — в начале декабря. Таким образом, осень и зима на северных широтах Марса менее суровы, чем на южных.

Прецессия оси суточного вращения планеты в сочетании с движением перигелия орбиты вызывает «дрейф» даты перигелия по всему марсианскому календарю с периодом 51 тыс. лет [185]. С таким же периодом изменяет свою полярность разница в режиме инсоляции северного и южного полушарий. Кроме того, пульсирует амплитуда колебаний инсоляции между годовым максимумом (в перигелии) и минимумом (в афелии); такая пульсация происходит вследствие вариаций эксцентриситета орбиты Марса с периодом около 2 млн. лет [185].

По-видимому, наиболее существенные вековые изменения сезонной инсоляции полярных районов Марса должны быть обусловлены вариациями наклона полярной оси Марса к плоскости орбиты. Уорд [244] нашел, что крупномасштабные вариации наклона существуют вследствие сочетания двух известных движений, одно из которых — прецессия полярной оси Марса (вызванная действием солнечной гравитации на экваториальное вздутие планеты), а другое — движение плоскости орбиты (вызванное гравитационными возмущениями от планет). Уорд показал, что наклонение осциллирует, достигая максимума каждые 120 тыс. лет. Кроме того, амплитуда этих осцилляций изменяется с периодом в 10 раз большим, а средний уровень также изменяется в небольших преде-

лах: 750 тыс. лет назад наклонение составляло 33° , а 650 тыс. лет назад оно уменьшалось до 16° . Сейчас оно медленно возрастает от величины 25° . Крайние пределы изменений: $14^\circ,9$ и $35^\circ,5$. Такая же соответственно бывает угловая высота Солнца в небе над марсианским полюсом во время полярного дня.

Атмосфера Марса

Оптические свойства. При визуальных наблюдениях в телескоп газовая оболочка Марса в низких и умеренных широтах чаще всего оказывается прозрачной, и только временами в ней наблюдаются желтые помутнения и белые облака. Но при наблюдении через синий светофильтр атмосфера сильно рассеивает солнечные лучи, и сквозь нее плохо видны детали поверхности планеты. Впрочем, отдельные авторы [196] объясняют эффект понижения контраста с уменьшением длины волны отраженного света особенностями цвета самой поверхности Марса. Тем не менее при наземном телескопическом фотографировании на несенсибилизированную фотопленку, чувствительную только к синим, фиолетовым и ультрафиолетовым лучам, на Марсе чаще всего бывает видна лишь дымка неравномерной плотности с весьма яркими пятнами по краям диска планеты.

Полное давление у поверхности. Способность марсианской атмосферы поднимать и длительно удерживать пыль во взвешенном состоянии создает впечатление значительной плотности газов. Это впечатление ложное, и оно было одной из причин долго державшегося заблуждения. До 1963 г. атмосферное давление у поверхности Марса оценивалось в среднем около 80 мб (60 мм рт. ст. по барометру-анероиду). В результате применения более совершенных методов дистанционных измерений с наземной и космической аппаратурой в последние годы стало известно, что в действительности давление там в 10—20 раз меньше, чем считалось ранее, и приблизительно в 200 раз меньше, чем на Земле. У нас на уровне океана нормальное атмосферное давление 1013 мб. На Марсе оно составляет в среднем около 5,5 мб и варьирует от 3 мб на возвышенностях (на высочайшей вершине всего 1 мб) до 10 мб в низинах [81, 143] и в среднем в 10 000 раз меньше, чем на Венере. Кроме того, в каждом пункте Марса атмосферное давление может испытывать временные отклонения, которые перечислены в разделе о барометрических высотах рельефа (см. стр. 182).

Химический состав нижней атмосферы. Главная компонента — углекислый газ — легко отождествляется по характерным линиям в спектре рассеянного Марсом солнечного света. Обилие газов в планетных атмосферах выражают обычно в виде толщины слоя, приведенного к давлению в 1 атм. По многочисленным новым оценкам разных авторов, в марсианской атмосфере содержится приблизительно 75 ± 15 м·атм CO_2 . Оценки и библиография даны, например, в [45] и в [247]. Наземные спектрографы высокой разрешающей силы позволили по доплеровскому смещению выделить в спектре на фоне мощных теллурических полос слабые детали, принадлежащие марсианскому водяному пару [138]. Результат был уточнен по новым наземным наблюдениям [220]. На ИСМ были предприняты попытки исследовать влажность нижней атмосферы, не усредненную по всей видимой части дневного полушария, а в различных участках планеты [81, 177].

Содержание H_2O в марсианской атмосфере подвержено сезонным вариациям в каждом полушарии планеты и изменяется от необнаружимой величины до десятков микрон осаждаемого слоя воды. Наиболее влажным районом в 1972 г. была северная полярная область во время северной весны, где наблюдалось насыщение атмосферы водяным паром (т. е. 100% относительной влажности) при обилии H_2O 20—30 мкм осаждаемого слоя [81]. О случаях насыщения марсианской атмосферы водяным паром над отдельными пунктами говорит также эпизодическое возникновение там облаков из ледяных кристаллов [16].

При помощи наземной фурье-спектроскопии с использованием интерферометра Майкельсона на Марсе открыта окись углерода (угарный газ) CO [137] в количестве $5,6 \pm 1,0$ см·атм, т. е. менее чем 0,1% по объему. Новая оценка [248] обилия CO расходится с прежней и показывает 42 ± 15 см·атм.

В 1968 г. появилось сообщение [65] об открытии на Марсе молекулярного кислорода, которое было подвергнуто критике в [168]. Наконец, в 1972 г. более надежная оценка количества O_2 показала $9,5 \pm 0,6$ см·атм [60].

По наблюдениям с космических кораблей «Маринер-7» и «Маринер-9» в полярных областях Марса найден озон O_3 (до 57 мкм·атм), который появляется в конце осени, а в начале лета исчезает [148]. Первоначально предполагалось, что он адсорбирован на твердой поверхности зимнего покрова. Но в 1971—1972 гг. поглощение озоном в континууме Хартли (между 2000 и 3000 Å) отмечалось

начиная с 30° с.ш., где зимний покров отсутствовал. Сильный годовой ход озона связан, по-видимому, с изменениями содержания водяного пара [148]. В экваториальных районах озон не наблюдается.

Кроме перечисленных, другие компоненты в нижней атмосфере Марса не обнаружены; можно указать только верхние пределы их обилия, при которых они остаются незамеченными [64, 88, 126]. Теоретически вероятно присутствие аргона в относительно большом количестве [43], но современные исследования не дают ответа на вопрос о его наличии. В случае существования жизни на планете было бы возможно присутствие в атмосфере продуктов метаболизма [103, 157]; однако попытки обнаружить их на Марсе до настоящего времени не увенчались успехом [119]. Ведутся дальнейшие разработки методики поисков [201].

Химико-динамическая модель атмосферы Марса. В последние годы были указания [128, 164] на труднопреодолимое противоречие между малым содержанием CO и O_2 в атмосфере Марса, с одной стороны, и данными современной теории, с другой стороны. Окись углерода образуется в результате диссоциации CO_2 под действием солнечного ультрафиолетового излучения с $\lambda < 2270 \text{ \AA}$, которое проникает в нижнюю атмосферу, а также под действием электронного удара с энергией $E > 11,5 \text{ эв}$. Обратной реакции не происходит. Тем не менее малое наблюдаемое содержание CO говорит о существовании достаточно эффективной реакции рекомбинации. Указать такую реакцию и, следовательно, условия ее протекания не представлялось возможным.

По мнению авторов работы [165], рекомбинация окиси углерода в двуокись происходит в атмосфере Марса при каталитическом действии водяного пара. Поэтому содержание CO и O_2 в атмосфере из CO_2 должно изменяться в зависимости от содержания воды и от интенсивности перемешивания. В работе [165] приводятся скорости протекания 15 основных реакций и построена модель марсианской атмосферы с указанием скоростей рекомбинации на различных высотах и с выведенной отсюда концентрацией различных компонент.

Тепловой режим. Поверхность Марса, поглощая солнечную энергию, переизлучает ее в инфракрасном диапазоне. Марсианская атмосфера при отсутствии запыленности свободно пропускает всю солнечную радиацию с $\lambda > 1900 \text{ \AA}$, но сильно поглощает тепловое излучение поверхности планеты в полосе около 15 мкм и за счет этого нагревается. Су-

точная температурная волна распространяется путем лучистого переноса от основания атмосферы до высоты порядка 1 км [114]. Время тепловой релаксации существенно меньше, чем в атмосфере Земли. Таким образом, температура самого нижнего слоя в ясной атмосфере Марса определяется температурой поверхности и может изменяться в течение суток более чем на 100° K .

Среди теоретических исследований термического режима, а также динамики нижней атмосферы Марса видное место занимают работы Гираша и Гуди [108], в которых был использован оригинальный метод учета лучистого теплообмена атмосферы Марса с поверхностью планеты и с внешним пространством.

Используя экспериментальные данные по радиопросвечиванию марсианской атмосферы, Рейсул и Стюарт [203] нашли, что в местный полдень существует $20\text{--}25$ -градусный скачок температуры между теплой поверхностью Марса и менее теплым прилегающим слоем атмосферы. Но полученный ими результат может быть в большей или меньшей мере следствием осреднения температуры по сравнительно толстому нижнему слою атмосферы, который не успел прогреться к полудню.

Амплитуда суточных колебаний наблюдаемой температуры уменьшается с высотой; в ясной атмосфере на высоте 10 км амплитуда составляет 15° K [119], а в запыленной атмосфере — существенно больше. Абсолютная температура понижается с высотой, но на ночном полушарии была найдена инверсия [203], вызванная, вероятно, чрезвычайно быстрым остыванием поверхности. Кроме того, была зарегистрирована инверсия над зимней полярной шапкой и на границе шапки.

В средней атмосфере Марса выявлена весьма холодная область, где CO_2 находится в условиях насыщения, а возможно, и конденсации [203]. Эти результаты получены радиорефракционным методом в 1969 г. Измерения на «Маринере-9» [142] также показали температуру, согласующуюся с конденсацией двуокиси углерода возле утреннего терминатора на высоких широтах зимнего полушария Марса.

В более высоких слоях атмосферы средняя температура возрастает с увеличением высоты и на уровне около 230 км достигает $325\text{--}350^\circ \text{ K}$ [89, 236]. Температура в экзосфере подвержена сильным колебаниям, анализ которых говорит о влиянии процессов, не имеющих непосредственной связи с солнечной ак-

тивностью [236]. Однако в работе [21] отмечена прямая зависимость.

Вертикальный градиент температуры и пыль в нижней атмосфере Марса. Известно, что при субадиабатическом вертикальном градиенте температуры стратификация в атмосфере устойчива, а при сверхадиабатическом возникает конвекция, снижающая градиент. В ясной атмосфере Марса в дневное время наблюдаемый темп спада температуры с ростом высоты составляет в среднем $-2,3^\circ \text{ К/км}$, т. е. является субадиабатическим [119, 143]. Однако пока нет хороших измерений послеполуденного темпа спада температуры, когда вертикальный градиент должен приблизиться к адиабатическому. Кроме того, вероятно, существуют какие-то местные причины временных нарушений устойчивой стратификации. Иначе трудно объяснить механизм возникновения потоков, возносящих пыль на большую высоту. Во время большой пылевой бури 1971—1972 гг. по данным измерений, отдельные облака пыли поднимались на высоту до 30 км [150]. Днем в районе экватора нижний, наиболее запыленный слой атмосферы толщиной около 10 км был практически изотермичным и, следовательно, еще более устойчивым, чем при субадиабатическом градиенте [46, 142]. Возле нижней границы запыленного слоя (на поверхности) температура была несколько ниже обычной, а возле диффузной верхней границы — больше обычной для таких высот, что объясняется поглощением солнечных лучей пылью. Эффект нагревания, обусловленный наличием пыли, был замечен по крайней мере на протяжении двух или трех десятков километров от поверхности.

Вертикальный градиент температуры является весьма чувствительным критерием ясности марсианской атмосферы; он показывает, что пыль может присутствовать в атмосфере Марса даже в то время, когда, судя по телевизионным изображениям, на планете ясно.

Согласно расчетам Райен [209], для подъема пыли с поверхности Марса требуется скорость ветра существенно больше наблюдаемой скорости движения марсианских облаков. Пылевые облака поднимаются, вероятно, при шквальных порывах ветра, скорость которых значительно превышает среднюю, тогда как поддерживать пыль во взвешенном состоянии способна более слабая циркуляция.

Ветры и общая циркуляция. Динамическая и тепловая структура нижней атмосферы Марса была рассмотрена теоретически Гира-

шем и Гуди [108] и Г. С. Голицыным [11]. В обоих случаях найден скачок температуры в самом нижнем слое толщиной около 10 м. В слое толщиной порядка 1 км, по мнению авторов упомянутых работ, может иметь место режим свободной конвекции. Гираш и Гуди нашли, что основной компонентой системы марсианских ветров является сезонный зональный (т. е. направленный практически вдоль параллели) ветер со средней скоростью около 40 м/сек. Голицын получил следующие оценки средней скорости ветра для модели атмосферы с $p_0 = 5 \text{ мб}$: $u \approx 20 \text{ м/сек}$ на высоте порядка 10 м и $u \approx 40 \text{ м/сек}$ на высоте порядка 200 м; с дальнейшим ростом высоты скорость ветра изменяется больше по направлению, чем по модулю, и приближается к геострофической¹⁰ на высоте 2—4 км. Полный угол поворота днем заключен в пределах нескольких градусов, а ночью он может достигать нескольких десятков градусов. Оценка [12] скорости ветра в марсианской атмосфере на основе развитой Голицыным теории подобия крупномасштабных движений в атмосфере планет дает 50 м/сек, т. е. значение, близкое к полученным другими методами.

Таким образом, теоретические оценки скорости ветра в нижней атмосфере Марса дают около 40 м/сек, однако они сильно зависят от рельефа местности и не исключают скоростей, превышающих 100 м/сек [109].

Расчет различных вариантов модели общей циркуляции в марсианской атмосфере проводился многими авторами. Интересны результаты проведенного Леови и Минцем [151] численного моделирования атмосферной циркуляции Марса. Атмосфера принималась состоящей из CO_2 ; учитывался перенос солнечного и теплового излучений. В момент равенства в средних и высоких широтах обоих полушарий действуют циклоны; в средних широтах ветры западные, а в районе экватора — восточные. В сезон солнцестояния в тропиках сохраняются восточные ветры, более слабые в летнем полушарии. В зимнем полу-

¹⁰ Геострофический ветер — характерное для высот более 1 км (в земной атмосфере) горизонтальное равномерное прямолинейное движение воздуха, при котором градиент давления уравновешен кориолисовой силой, а сила трения пренебрежимо мала. Такой ветер направлен по изобаре, а его скорость

$$u = \frac{1}{2\omega \rho \sin \varphi} \frac{\Delta p}{\Delta n},$$

где ω — угловая скорость вращения планеты, ρ — плотность газов, φ — широта места, Δp — разность давлений, Δn — расстояние между соответствующими изобарами.

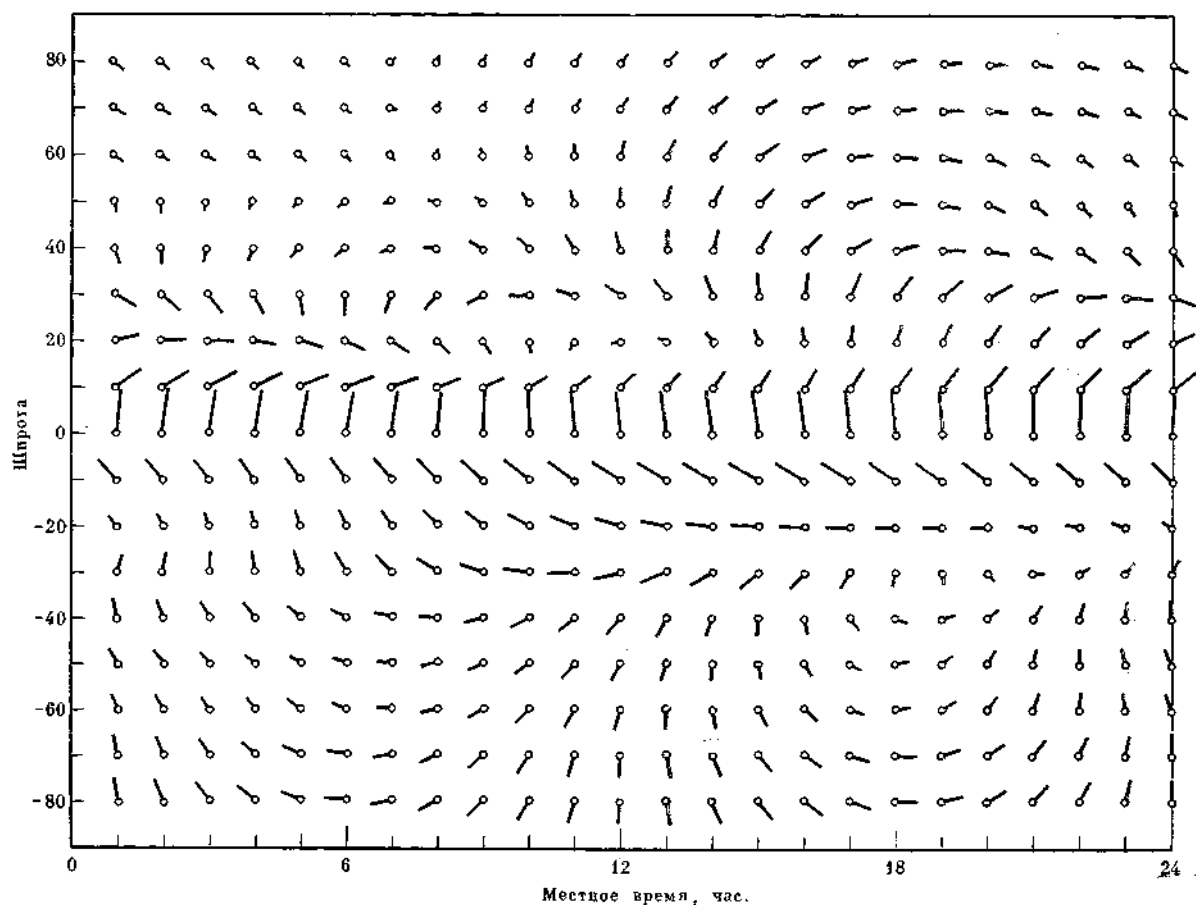


Рис. 15. Поле марсианских ветров на уровне атмосферного давления 2,2 мб во время глобальной пылевой бури, вычисленное на основе температурной модели атмосферы [119]

Исходные предположения: гидростатическое равновесие, гладкость Марса, постоянство давления у основания атмосферы. Направление и скорость ветра показаны векторами, исходящими из точек. Длина вектора, равная расстоянию между двумя соседними точками, соответствует скорости ветра 50 м/сек

шарии движения обусловлены конденсацией CO_2 в полярной шапке: этим вызван меридиональный перенос газа через экватор, а в средних и высоких широтах преобладают волновые циклонические движения и сильные западные ветры. Во всех случаях заметно проявляется суточная приливная компонента атмосферной циркуляции.

Поле ветров (рис. 15), вычисленное в 1972 г. на основе измерений температуры в атмосфере Марса с «Маринера-9», подтвердило наличие, помимо сезонных, также сильных суточных ветров [119], предсказанных ранее Гуди и Белтоном [114], Леови и Минцем [151] и др.

Получить сведения о динамике марсианской атмосферы непосредственно из наблюдений попытался Миямото [174]. Для оценки скорости ветра в нижней атмосфере Марса по наземным телескопическим наблюдениям обычно используются видимые перемещения облачных систем относительно физической поверхности планеты. Наблюдения желтых (вероятнее всего, пылевых) облаков дают скорости около 15 м/сек. В случае белых облаков, по-видимому, не всегда надежным бывает отождествление скорости ветра и скорости движения яркого пятна на Марсе. Один из авторов этой главы (Давыдов) неоднократно встречал в мемуарах известных наблюдателей Марса записи о наблюдениях белых пятен, которые перемещались почти со скоростью звука в течение многих часов. Очевидно, в таких случаях мы имеем дело не с механическим движением объекта, а с оптическим перемещением условий конденсации либо условий видимости [14] яркого пятна. Но такая возможность заставляет относиться с осторожностью и к более приемлемым оцен-

кам скорости ветра на Марсе тем же методом. Миямото нашел [174], что в конце весны в южном полушарии происходит смена направления сезонного ветра с западного на восточное. Этот сезон обычно сопровождается появлением глобальной мглы и приостановкой отступления границ полярной шапки. Миямото указывает примеры влияния топографии на атмосферную циркуляцию.

Режим общей циркуляции, по Миямото, близок к симметричному, тогда как Тант [238] пришел к выводу, что такой режим на Марсе не может быть стабильным и должен преобладать волновой режим.

Свечение верхней атмосферы и параметры ионосферы. Жесткая солнечная радиация вызывает ультрафиолетовое свечение верхней атмосферы Марса, наиболее яркое в полосах Камерона CO (λ 1900—2700 Å, до 300 kR) [236]. Найдены также другие яркие эмиссии по наблюдениям с космических кораблей «Маринер-6», «Маринер-7» и «Маринер-9» [62, 235] (рис. 16) и с космических аппаратов «Марс-2» и «Марс-3» [89].

Данные бортовой и наземной спектроскопии в сочетании с радиозатменными измерениями послужили основой для построения модели состава и строения ионосферы и верхней атмосферы Марса [63] в диапазоне высот от 100 до 230 км, т. е. практически до нижней границы экзосферы. Главной компонентой марсианской ионосферы, по данным ультрафиолетовой спектроскопии на борту «Маринера-9», является O_2^+ , а CO_2^+ — второстепенная компонента. Присутствуют также O и H , относительные концентрации которых на

уровне 135 км равны соответственно 10^{-2} и 10^{-6} [63].

Результаты экспериментов по радиозаходу за диск Марса ИСМ «Марс-2» и «Маринер-9» [25, 142] подтверждают существование и уточняют параметры марсианской ионосферы, наблюдавшейся ранее с пролетных космических кораблей «Маринер-4», «Маринер-6» и «Маринер-7». На высоте 134—140 км от поверхности Марса при зенитном расстоянии Солнца около 50° электронная концентрация составляет $(1,5 \div 1,7) \cdot 10^5$ электрон/см³ и коррелирует с измерявшимся на Земле потоком коротковолновой солнечной радиации. Кроме того, в работе [25] сообщается, что по наблюдениям с ИСМ «Марс-2» найден второй максимум на высоте 110 км с концентрацией $7 \cdot 10^4$ электрон/см³.

Оценки концентрации и температуры нейтрального водорода и темпа его диссипации из экзосферы. Высотное распределение концентрации атомов нейтрального водорода было найдено по измерениям интенсивности свечения верхних слоев марсианской атмосферы в спектральной линии L_α (1216 Å), наблюдавшегося с космических кораблей «Маринер-6» и «Маринер-7» в 1969 г. и «Марс-2», «Марс-3» и «Маринер-9» в 1971 г. Зная концентрацию n атомов на критическом уровне (на Марсе на высоте 230 км) и среднюю тепловую скорость \bar{v} атомов в экзосфере, по данным марсианских космических зондов, по формуле Джинса можно вычислить поток F атомов водорода, ускользающих с Марса:

$$F = n(\bar{v}/4)(E_G/E_K + 1)\exp(-E_G/E_K),$$

где E_G — гравитационная энергия, равная 0,123 эв для атомов водорода на Марсе, $E_K = kT$ — величина, пропорциональная кинетической энергии атомов.

Используя температуру $T = 350^\circ \text{K}$ и плотность $n = 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, по измерениям 1969 г. Барт и др. [63] получили поток диссипирующих атомов водорода $F = 2 \cdot 10^8 \text{ атом/см}^2 \cdot \text{сек.}$

Наблюдения 1971 г. показали более низкую температуру в основании экзосферы, чем в 1969 г.: по данным «Маринера-9» — 325°K [63], а по данным «Марс-2» и «Марс-3» — 315°K [19].

Величины, используемые для вычислений потока диссипирующих частиц, по-видимому, могут содержать значительные ошибки. Например, по измерениям на советских ИСМ концентрация атомов нейтрального водорода в 1971 г. была более низкой, а по американским данным она была переменной, но боль-

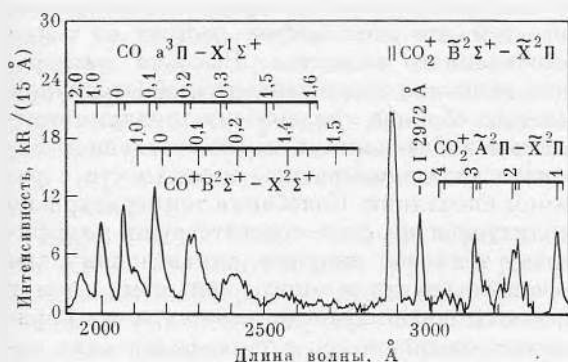


Рис. 16. Ультрафиолетовый спектр дневного свечения атмосферы Марса, средний по 120 записям с «Маринера-9» за ноябрь-декабрь 1971 г.

Оттождествлены камероновские полосы CO , первая отрицательная система полос CO^+ , интенсивный дублет и полосы CO_2^+ и линия нейтрального атомарного кислорода

шей, чем в 1969 г. Что касается температуры, то в основу ее оценки, в свою очередь, заложено измерение шкалы высот вертикального распределения концентрации. Температура, найденная таким методом, согласно [21, 96] может содержать ошибку $\pm(30 \div 50)^\circ\text{K}$, при некоторых условиях достигающую 100° .

Современные оценки темпа диссипации, базирующиеся на столь приблизительных величинах, вероятно, не могут служить надежным основанием для далеко идущих заключений, например, о том, сколько воды мог потерять Марс за всю свою историю.

Поверхность Марса

Температура поверхности планеты и теплофизические свойства грунта. Индикатором температуры служит интенсивность собственного теплового излучения поверхности в таких участках спектра, где отраженным солнечным излучением можно пренебречь.

Результаты наземных измерений, которые удовлетворительно согласуются с более детальными современными данными, наглядно иллюстрирует рис. 17, заимствованный из [181].

Наземные измерения температуры Марса, а тем более отдельных участков его поверхности возможны только на достаточно крупных телескопах и связаны с преодолением значительных технических трудностей. Направленные к Марсу в СССР и США космические зонды позволили приблизиться к исследуемому объекту в 50 тыс. раз, что привело к многократному увеличению количества и к существенному улучшению качества исход-

ного наблюдательного материала. Основным преимуществом новых данных о температуре поверхности Марса является высокое пространственное разрешение, составляющее несколько десятков километров, а в некоторых случаях — всего 15 км против 10^3 км при наземных телескопических наблюдениях.

Измерения температуры, так же как исследование других характеристик Марса, рисуют нам картину суровых природных условий. С точки зрения обитателей поясов умеренного климата Земли, на Марсе очень холодно. Даже в тропиках ночью — сильный мороз, и только днем солнечные лучи нагревают поверхность до плюсовых температур. Максимальная температура наблюдается сразу после полудня и достигает местами $300\text{--}305^\circ\text{K}$; к вечеру (но еще за 2 часа до захода Солнца) поверхность остывает, на ней образуется иней, а ночью температура падает ниже 200°K . Это возле экватора. Резкие суточные колебания температуры поверхности затухают под наружным слоем вещества; на глубине нескольких десятков сантиметров они почти неощутимы.

Средняя суточная температура повсюду отрицательна, за исключением, может быть, небольших геотермальных участков, возможность существования которых на Марсе будет обсуждаться ниже. В полярных зонах, как и следовало ожидать, значительно холоднее, чем в тропическом поясе; в зимнее время там зарегистрирована температура около 150°K . Полученное значение близко к точке конденсации CO_2 в условиях Марса.

Теплофизические свойства наружного покрова Марса (по крайней мере на значительной части поверхности) определяются прежде всего тем, что этот покров состоит из тонко измельченного вещества. Высокая дисперсность вещества подтверждается образованием пылевых облаков, наземными поляризметрическими наблюдениями и сопоставлением суточного хода температуры поверхности с режимом инсоляции. Колебания температуры по амплитуде и по фазе соответствуют коэффициенту тепловой инерции, характерному для песчаного грунта и много меньшему, чем у скальных пород. Выводы советских и американских специалистов о теплофизических параметрах марсианского грунта, базирующиеся на измерениях с космических аппаратов, в основном хорошо согласуются между собой.

Радиометрические наблюдения с «Марса-3» в диапазоне 8—40 мкм можно интерпретировать в рамках однородной модели грунта, имеющей следующие характеристики [46]:



Рис. 17. Широтное распределение температуры в светлых и темных областях поверхности Марса в зависимости от местного времени (в сезон равноденствия, весеннего в южном полушарии), полученное Моррисоном, Саганом и Поллаком [178, 181] на основе обработки радиометрических наблюдений Синтона и Стронга [229]

альbedo интегральное $0,15 \leq A_{\lambda} \leq 0,25$, тепловая инерция $0,004 \leq (kpc)^{1/2} \leq 0,008$ кал·град⁻¹·см⁻²·сек^{-1/2} (последняя величина характерна для раздробленного грунта со средними размерами частиц от 0,01 до 0,05 см), глубина проникновения тепловой волны составляет 4—7 см. Темные области систематически теплее светлых. Корреляция между тепловой инерцией и альbedo не обнаружена вопреки выводам Моррисона и др. [181]. В ряде случаев отмечены пятна повышенной тепловой инерции, связанной, вероятно, с прохождением трассы через крупные кратеры. К сожалению, ограниченная точность привязки трасс в этом эксперименте снижает уверенность сопоставления результатов с топографией в отношении мелких деталей.

Еще более подробные данные [145] получены в результате инфракрасных измерений с космического корабля «Маринер-9», которые проводились в двух диапазонах: 10 и 20 мкм. Привязка американских результатов к топографии контролировалась телевизионными изображениями. Это существенно облегчило интерпретацию радиометрических данных и позволило при анализе теплофизических свойств грунта исключить из рассмотрения «холодные пятна» в тех случаях, когда была твердо установлена связь таких пятен с местной облачностью.

Для трех больших, покрытых кратерами участков, сильно различающихся по визуальному альbedo, найдены лишь небольшие различия амплитуды суточных изменений температуры. Таким образом, в этих случаях установлено отсутствие связи между тепловой инерцией и отражательной способностью в визуальной части спектра. Напротив, области Syrtis Major и Mesogaea показали корреляцию между яркостью и температурой. 12-градусное различие в полуденной температуре соответствует разнице болометрического альbedo в 0,1, тогда как различие визуальной отражательной способности составляет при этом 0,15.

Киффер и др. [140] в поисках предельных значений тепловой инерции грунта в различных областях Марса не имели способа а priori выбрать соответствующие области для измерений. Из всех областей, наблюдавшихся в течение эксперимента, наименьшими суточными вариациями температуры отличается Hellas. Для всех изученных областей тепловая инерция и болометрическое альbedo не выходят за пределы следующих диапазонов: $0,004 < I < 0,017$, $0,2 \leq A_{\lambda} \leq 0,4$. Средние размеры частиц, вычисленные по величине инер-

ции, заключены в пределах от 0,006 до 0,5 см [140].

Одной из задач экспериментов с инфракрасными радиометрами на ИСМ были поиски активного вулканизма. Но ни в одном участке Марса температура не превысила 300° К. Впрочем, необходимо иметь в виду, что регистрируемая температура будет меньше истинной, если «горячее пятно» занимает лишь часть поля зрения радиометра. Лавовое озеро с температурой 1500° К могло быть обнаружено с высоты около 2000 км только при размерах более 0,5 км; 200-метровое лавовое озеро повысит показания радиометра всего на 3° К. Вероятность распознавания таких деталей на Марсе была очень мала; она сильно зависит как от размеров, так и от температуры «горячих пятен».

Зарегистрированные с «Маринера-9» локальные отклонения температуры некоторых участков от температуры окружающего фона можно объяснить, по заключению Киффера и др. [140], как следствия незначительных вариаций тепловой инерции, болометрического альbedo или топографическими отклонениями поверхности от местной горизонтали без привлечения внутренних источников энергии.

Однако, принимая во внимание соображения тех же авторов о трудностях распознавания лавовых озер небольшой площади (а тем более — просто теплых участков), было бы неправильно полагать, что современные данные исключают наличие таких деталей на Марсе. Они не обнаружены, но это еще не означает, что их нет.

Вопрос о минеральном составе поверхности Марса. Этот вопрос весьма сложен вследствие невозможности применить прямые методы исследования.

Выпадение метеоритного вещества должно было способствовать обогащению наружного покрова Марса железом. Существует мнение, что красноватый цвет поверхности планеты обусловлен наличием или по крайней мере примесью гидратированных окислов железа. В первую очередь называли охристый лимонит [54, 100]. В работе [49] показано, что в соответствующих условиях может образоваться гематит или гетит, но не лимонит. Результаты Синтона [228] противоречат «лимонитной» гипотезе; на Марсе возможно лишь небольшое содержание окислов железа.

По данным инфракрасной спектроскопии на борту «Маринера-9» пыль, поднятая ветром с поверхности Марса, содержит кремний, обилие Si соответствует содержанию $60 \pm 10\%$

SiO_2 [119], т. е. приблизительно эквивалентно обилию в песках земных пустынь [47].

Альbedo поверхности. Свойства светлых и темных областей в связи с вопросом о биологической активности на Марсе. Монохроматическое геометрическое альbedo полного диска Марса в визуальной области спектра круто возрастает от 0,05 в фиолетовых до 0,25 в красных лучах, достигает максимального значения 0,30 около $\lambda = 0,8$ мкм и медленно спадает с дальнейшим ростом длины волны отраженного излучения [43].

Отражательные свойства различных участков поверхности Марса неодинаковы. Для одной из самых светлых областей Arabia максимальное геометрическое альbedo составляет 0,43, — это в три раза выше, чем для темной области Syrtis Major [161].

На картах Марса, составленных по наземным телескопическим наблюдениям, светлые области занимают приблизительно $\frac{2}{3}$ поверхности планеты. Это так называемые континенты. Не более $\frac{1}{3}$ приходится на долю темных областей, получивших в прошлом латинские названия морей, заливов, озер и болот, заимствованные из географии и древнегреческой мифологии. Нет нужды пояснять, что классификация, опирающаяся на наименования водоемов и континентов, конечно, условна, так же как и в случае лунных «морей», в которых нет воды.

Найдено сходство спектральной отражательной способности светлых областей и желтых облаков. На этом основании считается, что именно светлые области покрыты слоем мелкой пыли, которую легко поднимает ветер; хотя следовало бы учитывать, что альbedo облака мелких частиц может быть выше, чем альbedo поверхности из того же материала.

Относительно природы темных областей нет единого мнения. Со времени выхода из печати книги Лоуэлла [158], содержащей заманчивую, но не подтвердившуюся гипотезу о возможном искусственном происхождении марсианских «каналов», обсуждается в различных вариантах идея о вероятной связи темных областей с биологической активностью на Марсе. Сторонники такой идеи исходят из очевидного факта, что покров растениеподобных организмов должен быть достаточно темным, поскольку растения используют энергию солнечных лучей и, кроме того, могут давать тень. Трудно объяснимые свойства марсианских темных областей часто относят к числу аргументов в пользу гипотезы о существовании марсианской биосферы. Например, сообщалось, что темные области, ис-

чезающие в желтой мгле во время пылевых бурь, вновь появляются на своих местах по мере прояснения марсианской атмосферы. Непонятно: почему они не оказываются занесенными слоем светлого вещества, оседающего на поверхности при утасании пылевой бури?

Кроме того, в последние годы установлено, что очертания классических темных областей во многих случаях не имеют никакой связи с границами различных форм рельефа [87]. Но важнейший аргумент — давно обсуждаемая изменчивость темных областей. Множество работ посвящено пока еще достаточно бесплодному обсуждению причин их загадочного поведения и значительно меньшее число — тщательным и квалифицированным наблюдениям свойств изменчивости. В чем они состоят?

По наземным телескопическим наблюдениям, согласно [56]: «Очертания темных областей в среднем стабильны, но местами они сильно изменяются в протяженности и в интенсивности. Реальность этих изменений, заподозренная Секки, была установлена Фламарионом; в некоторых случаях изменения носят вековой характер, но могут быть неправильными и сезонными».

Антониади приводит примеры изменений различного типа. Он указывает, что сезонным изменениям подвержена ширина наиболее заметной темной области Syrtis Major. Но, по нашему мнению, такой эффект может быть связан с селективностью наблюдений, поскольку сезон расширения указанной детали коррелирует с увеличением расстояния до Марса и с возрастанием минимальных линейных размеров исследуемых деталей возле порога угловой различимости.

Новые факты вековых и нерегулярных изменений выявил Де-Моттони [182] на основе большого наблюдательного материала. Здесь следует уточнить, что в большинстве случаев можно уверенно говорить только об изменениях контраста той или иной области с окружающим фоном. Кроме того, Дольфус обнаружил сезонные изменения поляризации как темных, так и светлых областей. Весной и в начале лета наблюдается аномальная отрицательная поляризация [93].

В проблеме темных областей Марса, к сожалению, не всегда возможно отделить факты твердо известные от недостаточно подтвержденных. После великого противостояния 1909 г. получили широкую известность сообщения о сезонном потемнении темных деталей на поверхности Марса. Ученые, допус-

кавшие возможность существования на Марсе жизни, указывали на внешнее сходство марсианской «волны потемнения» с ежегодным пробуждением оазисов растительности. Благодаря многократному пересказу в научно-популярной литературе в течение многих лет марсианская «волна потемнения» стала настолько популярной, что к ней стали относиться как к хорошо изученному факту. Между тем это не совсем справедливо.

Недавняя попытка Давыдова уточнить особенности сезонного хода «волны потемнения» по двум сотням лучших из лучших наземных фотоснимков, опубликованных разными наблюдателями и охватывающих промежутки времени с 1907 по 1971 г., совсем не показала какой-либо четкой сезонной закономерности. По-видимому, вопрос не только о причинах, но даже об основных свойствах (в том числе о регулярности) изменений оптических характеристик темных областей нельзя считать достаточно исследованным. Здесь необходимы длительные ряды спектрометрических наблюдений, исключающих оптические иллюзии, основанные на физиологических свойствах зрения. Но даже замена глаза прибором не исключает влияния переменности качества телескопического изображения, которое так сильно зависит от турбулентного движения воздуха на пути луча в земной атмосфере.

Мак-Корд, Элиас и Уэстфал [161] выполнили наземное спектрометрическое сравнение темной и светлой областей Марса в спектральном диапазоне от 0,3 до 2,5 мкм. За два месяца светлая область стала ярче и краснее, тогда как темная осталась прежней. Найденные изменения отличаются от тех, которые могут быть вызваны традиционной «волной потемнения». Но даже в случае выяснения ложности наших представлений о «волне потемнения» природа темных областей остается загадочной и нуждается в тщательном исследовании.

На всем протяжении того промежутка времени, когда предпринимались [51, 227] и обсуждались [204, 237] попытки сопоставления оптических характеристик темных областей на Марсе с оптическими свойствами земной растительности и органических веществ, параллельно с этим велись упорные поиски абиогенного механизма изменений в темных областях. Было предложено множество различных объяснений, краткое изложение которых можно найти в обзоре [43]. Например, Коген [77] связывает цвет темных областей и желтых облаков с окраской продуктов хи-

мического взаимодействия между Fe и CO: $\text{Fe}(\text{CO})_5$ имеет желтый цвет, $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$ — оранжевый, $\text{Fe}_3(\text{CO})_{12}$ — зеленый.

По критерию наибольшего признания в последние годы можно выделить одну группу родственных гипотез, связывающих изменчивые свойства поверхности темных областей с процессами выветривания и ветрового переноса раздробленного материала. По В. В. Шаронову [222], светлые продукты выветривания периодически уносятся пассатными ветрами. Летом обнажается темная поверхность, и это может быть причиной аномальной поляризации. Саган и Поллак [216] разработали гипотезу об изменениях размера частиц на поверхности некоторых областей Марса под влиянием сезонных вариаций ветрового режима. Нерегулярные изменения темных пятен Поллак и Саган объясняют сдуванием светлой пыли с темной поверхности — сравните с гипотезой Шаронова, в рамках которой таким способом объяснялись регулярные изменения. В основу этих моделей положено заключение о том, что темные области являются возвышенностями, а светлые — низинами. Однако радиолокация не подтвердила существования такой закономерности, так же как и обратной.

В 1972 г. возникла новая модификация старой идеи: вероятно, видимость темных областей на Марсе изменяется только в результате изменений запыленности или прозрачности марсианской атмосферы в связи с местными сезонными вариациями силы ветра. Это интересная мысль, но она не решает проблемы до конца, так как вариациями одной только прозрачности нельзя объяснить факт временного появления новых темных областей, не наблюдавшихся ранее.

Новая информация, приближающая нас к пониманию природы темных областей, получена в результате телевизионных съемок Марса с ИСМ «Маринер-9». Большая темная область Syrtis Major на снимках, полученных с высоты менее 2 тыс. км, оказалась состоящей из множества темных «перистых» пятен, а также светлых и темных полос, которые тянутся на десятки, а в некоторых случаях — на сотни километров и не имеют топографического рельефа даже на снимках с наилучшим угловым разрешением [159, 218]. Светлые полосы — более длинные и узкие, чем темные. Те и другие берут начало, как правило, в кратерах или на выступающих деталях рельефа, что наводит на мысль о связи происхождения таких полос с ветрами устойчивого направления.

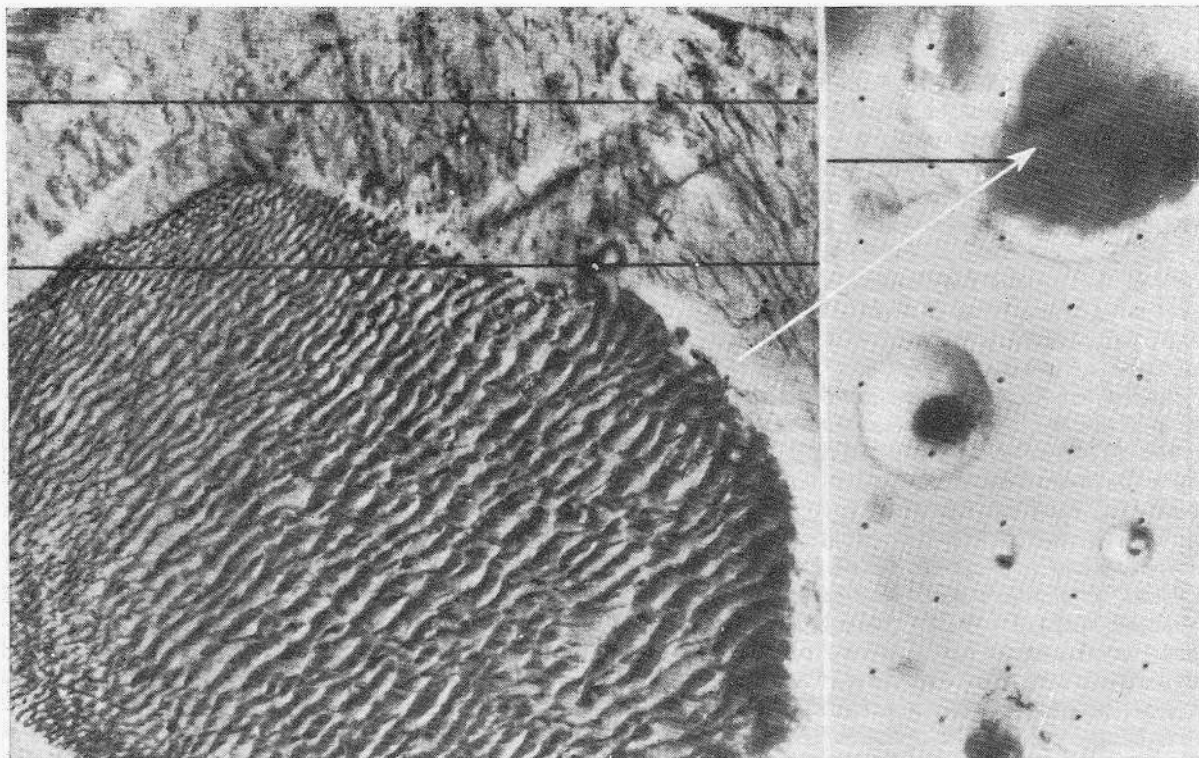


Рис. 18. Участок дна 150-километрового кратера в районе Hellespontus в кадре узкоугольной камеры «Маринера-9»

На снимке с широкоугольной камерой участок поверхности, покрытый дюнами, выглядит очень темным пятном

На одном из снимков с «Маринера-9» получено крупноплановое изображение темного пятна, занимающего часть кратерного дна внутри кольцевого вала. На снимке видно (рис. 18), что темный участок покрыт деталями одинаковой ориентации, которые похожи на дюны, сформировавшиеся под действием ветра устойчивого направления. Темные пятна, обнаруженные в некоторых других кратерах, вероятно, имеют ту же природу. Однако нет оснований полагать, что все без исключения разновидности темных пятен на Марсе являются дюнными полями. Саган и его соавторы [217] полагают, что в ряде случаев темные участки поверхности — обнажения твердых пород среди участков, засыпанных светлыми эоловыми наносами. Кроме того, они допускают существование на Марсе не только светлого, но и темного подвижного материала.

Сравнение одних и тех же пятен на снимках, полученных в разное время, позволило

американским специалистам выявить изменения величины альбедо отдельных участков по сравнению с альбедо соседних деталей в пределах поля зрения. Характерное время изменений составляет не более двух недель. Появление новых или исчезновение прежних ярких полос не было обнаружено.

Просмотр опубликованных снимков показывает, что наиболее заметные изменения сводятся к увеличению площади за счет перемещения границ темного пятна с сохранением всех деталей тонкой структуры в неизменном виде в пределах прежних границ. Саган и его соавторы [218] отстаивают ветро-пылевой генезис пятен и полос и их изменений во времени. Те же исследователи полагают, что местные изменения пятен и полос служат причиной классических сезонных и вековых изменений альбедо марсианских темных областей.

Параллельность «хвостов» у некоторых групп кратеров — убедительный аргумент в пользу утверждения о влиянии ветровых отложений на альбедо поверхности. В то же время нет оснований для полной уверенности в том, что ветро-пылевой механизм изменений является всеобщим и единственным для различных типов деталей. Биологическая активность, по-видимому, не исключается ника-

кими современными данными, хотя надо отчетливо представлять себе, что веских аргументов в пользу ее существования сегодня привести нельзя.

К вопросу о марсианских «каналах». Сейчас можно уверенно сказать, что наблюдавшиеся на Марсе серые линии необычно правильной геометрической формы — результат сложной и недостаточно исследованной оптической иллюзии, возникающей не только при визуальных наблюдениях, но даже при фотографировании Марса в слабые телескопы или при плохом качестве изображения.

На снимках, полученных с космических станций, сетка «каналов» на Марсе отсутствует. Тем не менее отдельные квазилинейные естественные образования существуют. Но среди них крупные не имеют достаточно правильной формы, а мелкие ни при каких условиях не могли быть замечены с Земли.

Полярные шапки. В зимнем полушарии планеты в телескоп отчетливо видно белое пятно возле полюса. Очевидно, наблюдениям доступна только небольшая часть полярной шапки Марса, а основной массив расположен в области полярной ночи, в наиболее холодных районах. Весной и в начале лета белая шапка быстро уменьшается, но появляется другая — возле противоположного полюса, где наступает зима. Процесс осенне-зимнего роста полярной шапки обычно скрыт сплошным облачным покровом, возникающим в это время над полярной областью.

Северная полярная шапка не достигает таких размеров, как южная, которая к середине зимы имеет поперечник в среднем 3,5 тыс. км, а в отдельных случаях — более 5 тыс. км. Но в течение весны и лета громадная южная шапка успевает почти полностью исчезнуть, тогда как северная уменьшается медленно, и ее остаток (в различные годы неодинаковый) всегда больше 350 км в поперечнике, по наземным наблюдениям. Такие различия связаны с особенностями инсоляции, упоминавшимися в разделе о марсианских сезонах.

В конце XIX и в начале XX столетия полагали, что полярные шапки Марса — это ледники и снега, весеннее таяние которых является основным источником влаги для гипотетической марсианской биосферы. Однако после того, как спектроскопические наблюдения показали бедность марсианской атмосферы водяным паром, мнение о белом полярном покрове изменилось: его принимали за тонкий слой водяного инея. О присутствии там кристаллов льда говорили результаты спектро-

фотометрии. Еще более новые данные способствовали коренному обновлению представлений о природе полярных шапок Марса.

Математическое моделирование, а затем и возможность достаточного улучшения пространственной разрешающей способности приборов при радиометрических измерениях температуры поверхности Марса в сочетании с результатами спектрометрии показали, что в состав белого полярного покрова входит твердая углекислота.

По мнению некоторых специалистов, сердцевина полярных шапок состоит из льда H_2O , который в зимнее время может покрываться твердой углекислотой. Весьма вероятно присутствие там клатратов двуокиси углерода.

Во время весенне-летнего сокращения размеров полярной шапки вдоль ее границ наблюдается темная кайма шириной в несколько сотен километров; реальность темной каймы подтверждена снимками с «Маринера-9». Некоторые специалисты связывали происхождение темной каймы с увлажнением грунта вследствие таяния ледников. Однако такая связь может быть только косвенной, а не прямой, поскольку температура горизонтальной поверхности там отрицательная, а более нагреты только обращенные к Солнцу склоны неровностей. Саган и его коллеги [217] предложили свою гипотезу возникновения темной каймы: они указывают на возможность сдувания светлой пыли с темного грунта ветрами, которые дуют вследствие разности температуры полярной шапки и ее окрестностей.

Рельеф Марса. Немного о методах измерения высот. Совсем недавно полагали, что поверхность Марса скорее всего гладкая и, может быть, даже вовсе лишена уклонов. Тени от гор заметить в телескоп не удавалось; линии полосы сумерек между освещенным и ночным полушариями планеты ровная, без темных выступов. Выведенные из этого факта оценки верхнего предела высоты марсианских гор с резкими тенями, которые могли остаться незамеченными с Земли, оказались слишком грубыми, вероятно, вследствие трудностей учета атмосферных помех. На помощь астрономам пришли новые методы.

Радиолокация Марса с поверхности Земли позволяет измерять расстояние до подрадарной точки (в центре видимого диска планеты) с весьма высокой точностью (до ± 75 м) по времени задержки радиозоха. Осевое вращение Марса приводит к смещению подрадарной точки вдоль одной параллели. Длительная работа радиолокатора дает профиль поверхности планеты вдоль подрадарной параллели. С те-

чением времени ареографическая широта подрадарной точки медленно изменяется; поэтому в нашем распоряжении имеются радиолокационные профили марсианского рельефа вдоль нескольких параллелей [97, 192].

К сожалению, радиолокация в принципе не позволяет сопоставить высоту уровней во взаимно удаленных точках Марса. Она дает высоты, измеренные от уровня сферы, центр которой совпадает с центром масс планеты. Между тем любая поверхность равных высот (т. е. гравитационно-эквипотенциальная), от которой можно отсчитывать высоту гор и глубину впадин на Марсе, заведомо не является в точности сферической, а имеет весьма сложную форму, отклоняясь от аппроксимационной сферы местами на величину до 10 км. Сравнивать высоты деталей по радиолокационному профилю, не зная формы поверхности равных высот, можно только на участке достаточно малой протяженности.

Отсчитывать все измеренные уровни от одной общей для всего Марса поверхности равных высот позволяют другие методы, в основе которых лежит измерение содержания газа над поверхностью Марса в вертикальном столбе единичного сечения. Очевидно, что над низинами газа больше, чем над возвышенными участками. Сравнивая атмосферное давление в двух различных пунктах, можно при помощи известной барометрической формулы найти разность уровней (или разность высот) твердой поверхности планеты в наблюдаемых пунктах. Высоты поверхности, полученные по барометрической формуле, называются барометрическими (pressure altitudes), а метод — барометрической гипсометрией.

Давление у поверхности (и, следовательно, барометрические высоты) можно найти по меньшей мере тремя способами: во-первых, при помощи спектроскопии по особенностям спектральных линий; во-вторых, по рассеянию света в атмосфере и, в-третьих, радиорефракционным методом с использованием космического аппарата. Бортовая гипсометрия с использованием всех этих методов на космических кораблях «Маринер-6», «Маринер-7» и «Маринер-9», а также спектральная гипсометрия с наземных обсерваторий и с космического аппарата «Марс-3» дали большой материал, на основе которого составлены предварительные карты высот поверхности Марса [81, 124, 125, 143].

Что принимается за нулевой уровень высоты на планете, где отсутствует столь удобный репер, как «уровень океана»?

В качестве начала отсчета выбран уровень

барометрического давления 6,1 мб — тройная точка H_2O , соответствующая снижению температуры кипения воды до $0^\circ C$. Над этим уровнем высоты (т. е. при более низких атмосферных давлениях) H_2O может пребывать только в состоянии льда или пара, тогда как в низинах она может быть и жидкой. Некоторые интересные результаты измерения барометрических высот будут приведены в дальнейшем изложении.

К сожалению, измерения барометрических высот могут содержать заметные ошибки вследствие вариаций атмосферного давления сезонного [82], суточного [81] и метеорологического [131] характера, а также за счет некоторых неизбежных упрощений в теории. Результаты, полученные в разные моменты времени, не принадлежат к одной и той же системе отсчета, поскольку дрейфует высота нулевого уровня, и масштаб высот не остается строго постоянным.

Внесение поправок за счет многих из перечисленных источников погрешностей в настоящее время невозможно. Тем не менее метод определения барометрических высот посредством измерений атмосферного давления — как в оптическом диапазоне (с предпочтением длинноволновой области спектра, где меньшее влияние вносят аэрозоли), так и в радиодиапазоне — остается единственным путем к сопоставлению высоты уровня поверхности во взаимно удаленных точках планеты и к получению такой важной характеристики рельефа, как полная амплитуда высот.

Обзор «геологических» форм на Марсе. Предварительные итоги геологического исследования [159], основанные на результатах телевизионного эксперимента 1971—1972 гг. на «Маринере-9», сводятся к тому, что поверхность Марса является результатом геологической истории более сложной, чем на Луне. На снимках Марса найдены следы как ударно-метеоритной, так и вулканической и тектонической активности, следы многих процессов эрозии поверхности, перемещения и отложения наносов.

Следуя в основном отчету [159] и лишь местами дополняя его сообщениями из других работ, кратко охарактеризуем основные типы марсианского рельефа.

Территории, покрытые кратерами. Такие территории занимают на Марсе большие площади. Однако они не являются доминирующим типом поверхности вопреки мнению, сформировавшемуся после получения первых снимков Марса с космических аппаратов.



Рис. 19. Марсианский вулкан Nix Olympica с поперечником 500 км у основания

Края вулканического щита отделены от прилегающей равнины крутыми обрывами. Главный кратер шириной 65 км расположен на высоте более 10 км и имеет несколько вулканических отверстий. Изображение получено с «Маринера-9»

Морфология кратеров и распределение по размерам говорят в пользу метеоритного происхождения большинства из них. Возможно, что небольшая часть их имеет вулканическое происхождение, но такие кратеры трудно отличить от метеоритных, когда те и другие сильно разрушены.

Гористые территории. Пример — область от 260 до 310° з.д. вдоль 20-й параллели южного полушария Марса. Многовершинные, в основном сглаженные, горы имеют сходство с горной цепью Апеннины на Луне. Кроме того, на Марсе встречаются вулканические горы, а также высокие склоны сбросового происхождения и валы ударно-взрывного происхождения.

Гладкие равнины расположены в окружении более высоких форм рельефа, занимают значительную часть северного полушария, а также поверхность крупных бассейнов в средних южных широтах и днища некоторых весьма крупных кратеров. Такая форма рельефа имеет, возможно, несколько разновидностей и отличается характерной особенностью: малым

количеством или отсутствием следов метеоритной бомбардировки.

Вулканы. В низких северных широтах от 90 до 140° и около 210° з.д. (в областях Tharsis — Amazonis — Elysium) расположено множество вулканических куполов. Среди них — четыре гигантских вулканических щита, крупнейший из которых (по объему) находится в области Nix Olympica (18°, 134°). На нем возвышается громадный вулканический конус. Кальдера на его вершине состоит из нескольких налагающихся кратеров с днищами на различных уровнях (рис. 19). Главный кратер диаметром 65 км расположен на высоте 25 км над окружающей местностью или 29 км над уровнем давления 6,1 мб. Подножие горы состоит из темного материала и ограничено от окружающей равнины крутыми обрывами. Поперечник основания около 500 км. Nix Olympica значительно крупнее, чем величайшее на Земле 225-километровое вулканическое образование на Гавайских островах с главным кратером Мауна-Лоа на высоте более 4 тыс. м над уровнем океана и около 9 км над равниной океанского дна.

Сравнительно недалеко от Nix Olympica расположена еще одна из высочайших марсианских вершин. Она принадлежит вулкану, расположенному в центре большого темного пятна Middle Spot (0°, 112°). Кальдера вулкана поднята на 13,5 км выше уровня подножия

горы, на 19,2 км над условным нулевым уровнем и более чем на 23 км от уровня поверхности самых низменных равнин [107]. Эту кальдеру диаметром 40 км удалось снять крупным планом (рис. 20), на снимке хорошо заметны вертикальные следы оползней и мелкие метеоритные воронки на внутреннем склоне кольцевого вала. Дно — плоское, гладкое.

В окрестностях вулканов встречаются многочисленные структуры, указывающие на эпоху широкого распространения вулканизма после завершения процесса формирования территорий, покрытых ударно-метеоритными кратерами.

В стороне от основных вулканических районов найден сравнительно небольшой, но особый по своему типу вулканический комплекс. Он расположен в Маре Туггениум, около -22° , 253° . В центре имеется круглая впадина диаметром около 15 км, окруженная трещиной разлома, которая очерчивает территорию приблизительно 45 км в диаметре. В радиальном направлении приблизительно на 200 км вокруг протянулись невысокие хребты и протоки, напоминая в комплексе цветок одуванчика. Широкий проток, отличающийся от других своей правильной формой, связывает центральную впадину с эллиптической впадиной подобных же размеров и расположенной в 35 км к юго-западу. На Марсе известно еще одно вулканическое образование с широким протоком, исходящим из кратера и впадающим в резко очерченную впадину. Этот комплекс расположен в районе Сеганиус возле 24° , 097° , но в последнем случае имеется типичный вулканический купол. Подробные описания и полученные с «Маринера-9» изображения этих пекулярных вулканов приведены в статье [76].

Предпринятые спектральные поиски вулканических газов, в частности водяного пара, в кальдерах марсианских вулканов не дали положительных результатов. На последнем этапе работы «Маринера-9» инфракрасные приборы показали наличие в одном кратере водяных облаков.

Грабены¹¹ и Большой Каньон. Отдельные территории иссечены сеткой широких и глубоких грабенов — следами разрывов и сбросов. Крупнейший из марсианских грабенов — Большой (или Главный) Каньон, который протянулся на 2,5 тыс. км в районе Tithonius Lacus — Corpates — Aurorae Sinus — Eos. Его ширина 100—250 км. В области Melas Lacus

Каньон окаймлен двумя котловинами, и полная ширина достигает 500 км. Склоны нарезаны гигантскими оврагами (рис. 21). Вдоль Главного Каньона на снимках видны линейные цепочки кратеров, не имеющих вала. Они как бы напизаны на длинную трещину.

Глубина Большого Каньона от уровня его краев достигает местами 6 км. В работе [159] отмечена сложность проблемы выноса породы из системы Каньона. Часть вещества могла быть вынесена вдоль Каньона в сторону уклона, с запада на восток. Но детали, указывающие на такой перенос, не обнаружены. Более того, на северной стороне системы Каньона виден обширный и глубокий, полностью замкнутый бассейн. Следовательно, либо это результат проседания, либо вещество было вынесено отсюда ветром.

Хаотические территории. Встречаются на Марсе в виде изолированных крупных пятен. Они не имеют известных аналогий ни на Земле, ни на Луне. Содержат блоки породы, замысловато изломанные и иссеченные. Такую форму объясняют проседанием наружных слоев вследствие ухода материала из-под поверхности.

Круглые бассейны. Напоминая кратеры гигантских размеров, они имеют равнинное дно и окружены гористыми областями. К образованиям такого типа принадлежат, например, Libya, Edom, Iapygia.

Величайшим марсианским бассейном является Hellas, имеющий в диаметре приблизительно 1,5 тыс. км. Это впадина глубиной около 4 км ниже уровня барометрического давления 6,1 мб. На снимках 1969 и 1971 гг. поверхность Hellas (или по крайней мере ее значительная часть) необычно гладкая, в отличие от соседних областей. Только в самой краевой зоне бассейна, вблизи гористого обрамления, можно различить весьма немногочисленные детали рельефа. Это один кратер у самых гор и небольшой купол среди гладкой равнины в нижней части рис. 3 в работе Леови, Бригса и Смита [149]; в то же время массивы облачности, скрывающие рельеф, отчетливо заметны не на этом, а на другом снимке того же масштаба с изображением участка, удаленного на 1000 км отсюда (рис. 5 там же). Леови и его соавторы указывают, что первый из этих участков на всех снимках, полученных ранее, выглядел совершенно гладким. Факт, бесспорно, интересный, но едва ли можно его обобщать на всю территорию бассейна или полагать достаточным для аргументации гипотезы о том, что отсутствие деталей рельефа в Hellas является оптической

¹¹ Грабен — ров, ограниченный сбросами.

горы, на 19,2 км над условным нулевым уровнем и более чем на 23 км от уровня поверхности самых низменных равнин [107]. Эту кальдеру диаметром 40 км удалось снять крупным планом (рис. 20), на снимке хорошо заметны вертикальные следы оползней и мелкие метеоритные воронки на внутреннем склоне кольцевого вала. Дно — плоское, гладкое.

В окрестностях вулканов встречаются многочисленные структуры, указывающие на эпоху широкого распространения вулканизма после завершения процесса формирования территорий, покрытых ударно-метеоритными кратерами.

В стороне от основных вулканических районов найден сравнительно небольшой, но особый по своему типу вулканический комплекс. Он расположен в Маге Tyrrhenum, около -22° , 253° . В центре имеется круглая впадина диаметром около 15 км, окруженная трещиной разлома, которая очерчивает территорию приблизительно 45 км в диаметре. В радиальном направлении приблизительно на 200 км вокруг протянулись невысокие хребты и протоки, напоминающая в комплексе цветок одуванчика. Широкий проток, отличающийся от других своей правильной формой, связывает центральную впадину с эллиптической впадиной подобных же размеров и расположенной в 35 км к юго-западу. На Марсе известно еще одно вулканическое образование с широким протоком, исходящим из кратера и выпадающим в резко очерченную впадину. Этот комплекс расположен в районе Seganius возле 24° , 097° , но в последнем случае имеется типичный вулканический купол. Подробные описания и полученные с «Маринера-9» изображения этих пекулярных вулканов приведены в статье [76].

Предпринятые спектральные поиски вулканических газов, в частности водяного пара, в кальдерах марсианских вулканов не дали положительных результатов. На последнем этапе работы «Маринера-9» инфракрасные приборы показали наличие в одном кратере водяных облаков.

Грабены¹¹ и Большой Каньон. Отдельные территории иссечены сеткой широких и глубоких грабенов — следами разрывов и сбросов. Крупнейший из марсианских грабенов — Большой (или Главный) Каньон, который протянулся на 2,5 тыс. км в районе Tithonius Lacus — Coprates — Aurorae Sinus — Eos. Его ширина 100—250 км. В области Melas Lacus

Каньон окаймлен двумя котловинами, и полная ширина достигает 500 км. Склоны изрезаны гигантскими оврагами (рис. 21). Вдоль Главного Каньона на снимках видны линейные цепочки кратеров, не имеющих вала. Они как бы нанизаны на длинную трещину.

Глубина Большого Каньона от уровня его краев достигает местами 6 км. В работе [159] отмечена сложность проблемы выноса породы из системы Каньона. Часть вещества могла быть вынесена вдоль Каньона в сторону уклона, с запада на восток. Но детали, указывающие на такой перенос, не обнаружены. Более того, на северной стороне системы Каньона виден обширный и глубокий, полностью замкнутый бассейн. Следовательно, либо это результат проседания, либо вещество было вынесено отсюда ветром.

Хаотические территории. Встречаются на Марсе в виде изолированных крупных пятен. Они не имеют известных аналогий ни на Земле, ни на Луне. Содержат блоки породы, замысловато изломанные и иссеченные. Такую форму объясняют проседанием наружных слоев вследствие ухода материала из-под поверхности.

Круглые бассейны. Напоминают кратеры гигантских размеров, они имеют равнинное дно и окружены гористыми областями. К образованиям такого типа принадлежат, например, Libya, Edom, Iarugia.

Величайшим марсианским бассейном является Hellas, имеющий в диаметре приблизительно 1,5 тыс. км. Это впадина глубиной около 4 км ниже уровня барометрического давления 6,1 мб. На снимках 1969 и 1971 гг. поверхность Hellas (или по крайней мере ее значительная часть) необычно гладкая, в отличие от соседних областей. Только в самой краевой зоне бассейна, вблизи гористого обрамления, можно различить весьма немногочисленные детали рельефа. Это один кратер у самых гор и небольшой купол среди гладкой равнины в нижней части рис. 3 в работе Леови, Бригса и Смита [149]; в то же время массивы облачности, скрывающие рельеф, отчетливо заметны не на этом, а на другом снимке того же масштаба с изображением участка, удаленного на 1000 км отсюда (рис. 5 там же). Леови и его соавторы указывают, что первый из этих участков на всех снимках, полученных ранее, выглядел совершенно гладким. Факт, бесспорно, интересный, но едва ли можно его обобщать на всю территорию бассейна или полагать достаточным для аргументации гипотезы о том, что отсутствие деталей рельефа в Hellas является оптической

¹¹ Грабен — ров, ограниченный сбросами.

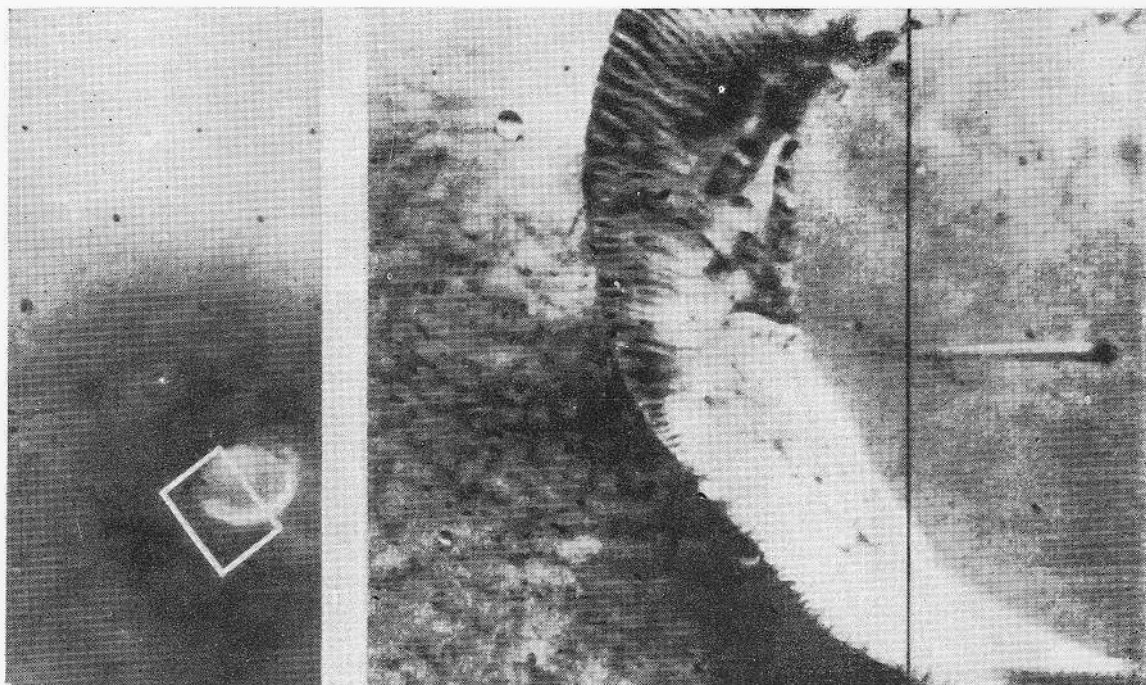


Рис. 20. Часть вала и дна 40-километрового кратера, которым увенчана высочайшая марсианская вершина, расположенная в центре темного вулканического щита с условным названием Middle Spot. Снимок с космического корабля «Маринер-9»

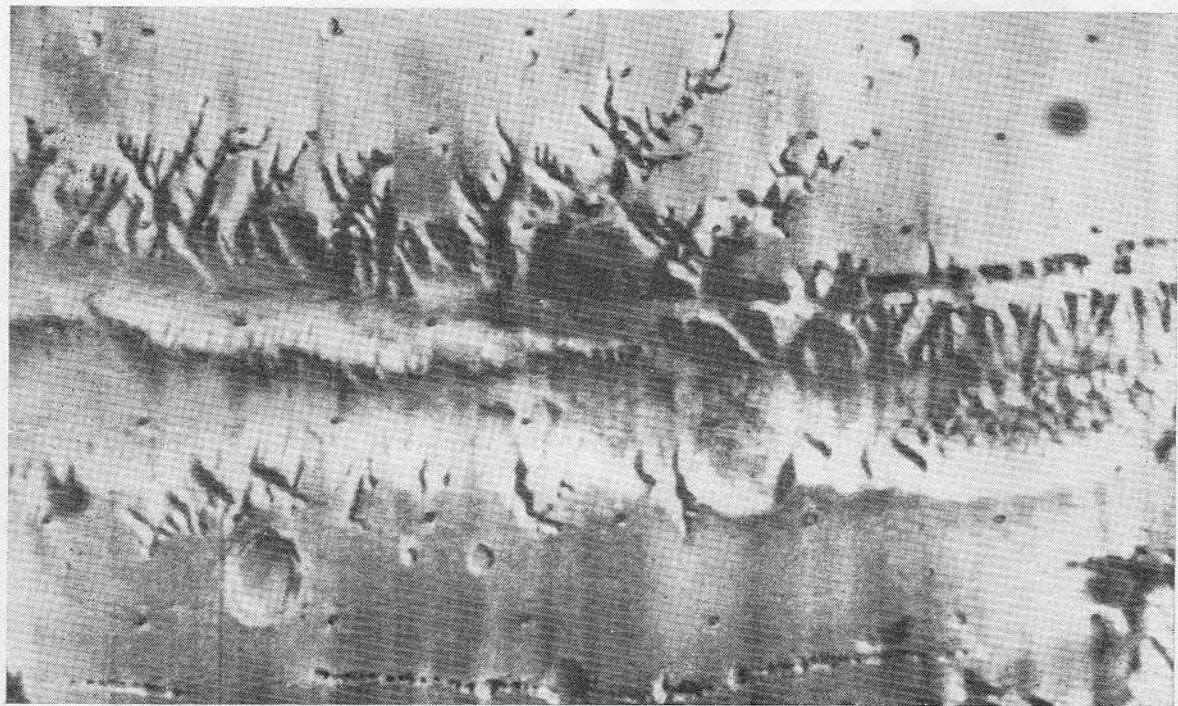


Рис. 21. Часть марсианского Большого Каньона. Снимок с «Маринера-9»



Рис. 22. Примеры крупных руслоподобных образований на Марсе

По снимкам с «Маринера-9»

иллюзией. Недостаточно ясны причины отсутствия здесь следов падения метеоритов, жестоко бомбардировавших соседние области. Для объяснения наблюдаемых особенностей выдвинуто несколько различных гипотез. Некоторые специалисты допускают возможность постоянного существования здесь облаков пыли [219], скрывающих истинный рельеф.

Автор другой гипотезы [15] предполагает, что в пределах области Hellas расположен большой водный бассейн, укрытый твердым слоем мерзлоты и ветровых наносов со сравнительно молодой наружной поверхностью. В такой модели могут образоваться только мелкие кратеры, размеры которых малы по сравнению с толщиной твердой коры на поверхности водоема. Падение более крупного метеорита образует сквозную пробойну, которая немедленно будет заполнена водой до архимедова уровня, довольно быстро затянется льдом и со временем будет «припудрена» пылью.

Руслоподобные образования. По современным представлениям, реки на Марсе в нашу эпоху течь не могут: средняя температура поверхности во всех климатических зонах отрицательна. Кроме того, из-за низкого атмосферного давления H_2O может существовать только в состоянии льда или пара на всей поверхности Марса, кроме низин. Поэтому обнаружение на снимках с «Маринера-9» русел (channels), имеющих замечательное сходство с флювиальными руслами на Земле, было открытием совершенно поразительным (рис. 22).

На рис. 22 три широкие извилистые долины с «притоками», на нижнем снимке видны типичные для рек береговые террасы, русловые наносы, острова с характерными очертаниями. На верхнем снимке в долине кое-где можно различить темную «ниточку» шириной в несколько километров, т. е. не уже Волги и Миссисипи, — вероятно, следы русла. А вокруг — типично марсианский пейзаж: древняя поверхность, изрытая за свой долгий век старыми и молодыми кратерами.

Некоторые руслоподобные образования на Марсе имеют в длину около 1,5 тыс. км, а в ширину — более 200 км. Это реальность, и она требует объяснения, которое не противоречило бы другим твердо установленным фактам. Чтобы прорезать такие русла, потребовалось громадное количество воды или другой жидкости. В работе [159] отмечено, что, кроме жидкого потока, следовало бы рассмотреть возможность эрозии флюидизированной системой «твердое тело — газ». Авторы той же работы полагают, что источником жидкости могла быть скорее литосфера, чем атмосфера. На это указывает то обстоятельство, что некоторые из крупнейших русел начинаются в хаотической территории. В местах повышенного геотермального потока, вероятно, происходит таяние подпочвенных льдов. Разжиженный материал накапливается в естественном водонепроницаемом резервуаре вплоть до его разрыва. Тогда возникает кратковременный мощный поток. Однако, заключают авторы работы [159], эта идея требует дополнительной разработки.

В некоторых случаях небольшие русла встречаются в обстановке, где наличие льда под поверхностью исключено, например внутри метеоритных кратеров на склонах центральных пиков. В такой обстановке для водной эрозии требуется интенсивное выпадение H_2O из атмосферы.

В нашу эпоху дождей на Марсе нет. Это следует из всей совокупности физических параметров нижней атмосферы.

Могла ли быть на Марсе дождливая погода в какие-либо периоды его истории? Возможность такого события была предметом обсуждения планетоведов еще задолго до обнаружения марсианских русел. Предполагалось, что в некоторые эпохи испарение полярных запасов твердой двуокиси углерода приводит к поступлению в атмосферу большого количества углекислого газа, к повышению плотности атмосферы. В такие эпохи на Марсе, по-видимому, могли бы существовать водоемы с открытой жидкой поверхностью, а высокое содержание водяного пара в теплой атмосфере должно поддерживать усиленный парниковый эффект. Однако требовалось указать первопричину гипотетического потепления. Наконец, в 1973 г. были опубликованы работы Уорда [244], а также Мюррея, Уорда и Юнга [185], в которых долгопериодические изменения инсоляции на Марсе подкреплены достаточно строгой аргументацией (см. раздел «Параметры осевого вращения и марсианские сезоны»). Сложные изменения режима инсоляции с взаимным наложением нескольких периодов цикличности позволяют допустить, что время от времени наступают эпохи, когда суммарная масса двух марсианских полярных шапок минимальна. К сожалению, в этой гипотезе среди других параметров неизвестна возможная амплитуда вариаций атмосферного давления на Марсе, так же как и количество твердой углекислоты в полярных областях.

Полярный рельеф. Оригинальные формы поверхности встречаются в областях, которые зимой бывают скрыты полярными шапками. Даже после отступления белого покрова поверхность кажется покрытой многослойными отложениями осадков. Эти отложения создают впечатление примерно одинакового зимой и летом сравнительно гладкого полярного рельефа, по-видимому замещающая впадины и покрывая другие разновидности геологических структур, наблюдаемых в более низких широтах.

Проблема воды на планете

По результатам спектральных измерений абсолютное содержание водяного пара в марсианской атмосфере весьма мало (см. раздел о химическом составе атмосферы). Однако в отдельных местах в определенные сезоны относительная влажность достигает 100%. Из курса физики известно, что абсолютное количество водяного пара в атмосфере ограничивается температурой и при низких темпе-

ратурах насыщение наступает при весьма низкой абсолютной влажности. Именно поэтому малое содержание пара над марсианской поверхностью не может служить надежным указанием на дефицит водных ресурсов. Вспомним, что у нас на Земле запасы воды значительно больше, чем ее содержание в воздухе.

Значительное количество H_2O в наружных слоях Марса может существовать не только в свободном состоянии, но также в химически связанном и в адсорбированном виде. Фанале и Каннон [102], основываясь на лабораторных измерениях адсорбции водяного пара и других газов на базальте, размолотом в порошок, пришли к заключению, что продукты выветривания геологических пород на поверхности Марса могут содержать адсорбированную воду в количестве до 45 г/см^2 . Уменьшение относительной влажности атмосферы во время дневного повышения температуры может приводить к частичной десорбции H_2O .

С точки зрения современной геофизики при извержении пород, из которых образовались вулканические конусы, из марсианских недр должно было освободиться значительное количество воды. В настоящее время основная часть запасов воды на Марсе может быть сосредоточена в слоях наносов в виде вечной мерзлоты [32] или, возможно, даже в крупных водоемах под слоем вечной мерзлоты [13], где обычный геотермический градиент приводит к положительным температурам.

Признаками значительных запасов воды в наружных слоях Марса могут быть некоторые наблюдаемые особенности:

- а) руслоподобные образования;
- б) признаки существования ледников в составе полярных шапок;
- в) наличие крупных бассейнов, по крайней мере в одном из которых имеется гладкая и достаточно нивелированная низменная поверхность.

Фобос и Деймос

Спутники Марса были открыты визуально Холлом в телескоп Морской обсерватории США в 1877 г., а впервые сфотографированы в Пулковской обсерватории в 1896 г. Они отличаются от известных спутников всех других планет необычно малой высотой и крайне малыми размерами.

Информация, полученная наземными методами, сводилась главным образом к определению и уточнению параметров орбитального движения Фобоса и Деймоса [226]. Они

обращаются вокруг Марса почти в плоскости экватора. Фобос пролетает над марсианской поверхностью в 70 раз ближе к ней, чем Луна к Земле, и совершает полный виток по орбите всего за 7 час. 39 мин. (сидерический период), т. е. обгоняет суточное вращение планеты. Это единственный известный нам случай в солнечной системе.

Уникальные снимки спутников Марса, полученные с «Маринера-9» [198], показывают, что это естественные малые небесные тела, что они нешарообразны и по форме напоминают скорее всего картофелины (рис. 23). Размеры Фобоса приблизительно $21 \times 26 \text{ км}$, а Деймоса — $12 \times 13\frac{1}{2} \text{ км}$. Оба имеют такое же альbedo, как у базальтов и углистых хондритов. Из достаточно темных минералов эти два наиболее обильны в солнечной системе. Но выбрать между ними мы не можем [198]. На поверхности спутников Марса — множество кратеров, которые определенно имеют ударное происхождение, так как существование

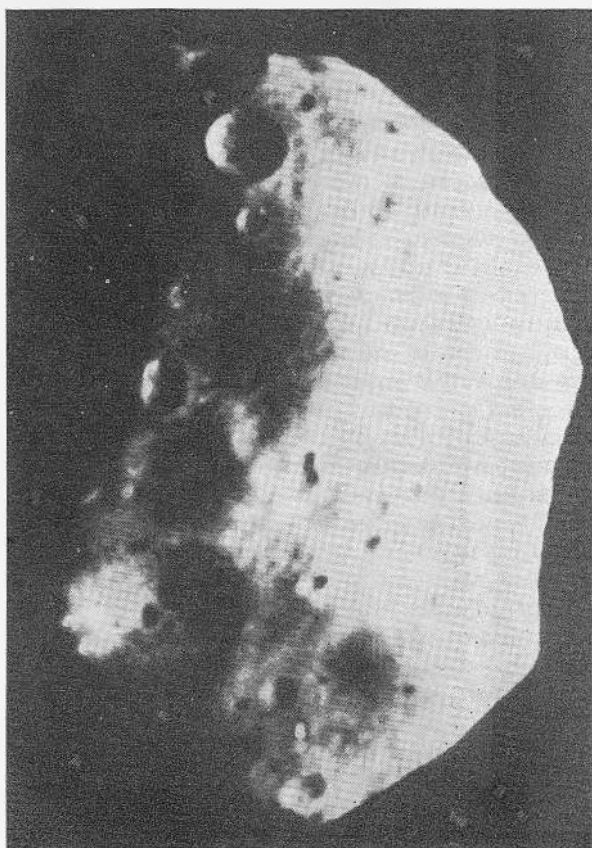


Рис. 23. Спутник Марса Фобос, каким «увидела» его телекамера с «Маринера-9»

Таблица 1. Геометрические, спиновые и массовые характеристики планет земной группы

Планета	Экваториальный полуось		Геометрическое полярное сжатие	Наклон плоско- сти экватора к плоскости орбиты	Направление осевого вращения	Длительность звездных суток
	линейный	максимальный угловой				
Меркурий	~2450	~6",3	?	<3°	Прямое	58,65 *
Венера	6050±5	31",9	Не обнаружено	<3°	Обратное	243,0 *
Земля	6378	—	1/296	23°27'	Прямое	23 час. 56 мин. 4,1 сек.
Марс	3397±3	12",5	~0,0051	25°,0±0°,3	»	24 час. 37 мин. 22,7 сек.

Таблица 1 (окончание)

Планета	Средние солнечные сутки	Число солнечных суток на один оборот по орбите	Масса планеты в единицах массы Земли	Средняя плотность, г/см³	g на экваторе, см/сек²	Критическая скорость, км/сек
Меркурий	175,9 *	0,500	0,05526±0,00048	5,38±0,08	~370	~4,3
Венера	116,8 *	1,924	0,8150	5,24	876	10,2
Земля	24 час. 0 мин. 0 сек.	365 1/4	1,0000 (без Луны)	5,52	981	11,2
Марс	24 час. 39 мин. 35 сек.	668 2/3	0,10744± ±0,00003	3,94	371	5,0

* В единицах средних солнечных суток всемирного времени.

Таблица 2. Средние элементы орбит планет земной группы в системе координат с эклиптикой и точкой весеннего равноденствия Земли в эпоху 1950,0

Планета	Среднее расстояние от Солнца		Период обращения*		Эксцентриситет	Наклонение
	млн. км	а.е.	сидерический	средний синодический		
Меркурий	57,91	0,38710	87,97	115,88	0,2056	7° 0'14"
Венера	108,21	0,72333	224,70	583,92	0,0068	3 23 39
Земля	149,60	1,00000	365,26	—	0,0167	—
Марс	227,94	1,5237	686,98	779,94	0,0934	1 51 0

Таблица 2 (окончание)

Планета	Долгота восходящего узла	Годичное изменение	Долгота перигелия	Годичное изменение	Средняя долгота планеты в на- чальную эпоху	Средняя скорость движения по орбите, км/сек	Средняя угловая скорость движе- ния по орбите за сутки
Меркурий	47°44'19"	+0",71	76°40'39"	+0",93	33°10'06"	47,83	4°05'32"
Венера	76 13 39	+0,54	130 52 03	+0,84	81 34 19	34,99	1 36 08
Земля	—	—	102 04 50	+1,03	99 35 18	29,76	0 59 08
Марс	49 10 19	+0,46	335 08 19	+1,10	144 20 07	24,11	0 31 27

* В единицах средних солнечных суток всемирного времени.

Таблица 3. Химический состав атмосферы Венеры и верхние пределы содержания возможных примесей

Компонента	Относительное содержание	Метод определения	Литература	Примечание
CO ₂	$0,97^{+0,03}_{-0,04}$		[9]	
N ₂ (включая инертные газы)	$2 \cdot 10^{-2}$	«Венера-4», «Венера-5», «Венера-6»	[9]	
H ₂ O	$(0,6 \div 1,1) \cdot 10^{-2}$		[9]	При $p = 2 \div 0,6$ кг/см ²
H ₂ O	$(0,4 \div 2) \cdot 10^{-3}$	Радиоастрономия	[134]	
H ₂ O	$\sim 7 \cdot 10^{-5}$	Спектроскопия	[146]	
O ₂	$< 10^{-3}$	«Венера-5», «Венера-6»	[9]	
O ₂	$< 10^{-5}$	Спектроскопия	[66]	
CO	$(1 \div 3) \cdot 10^{-5}$	»	[80]	
HCl	$2 \cdot 10^{-7}$	»	[79]	
HCl	$< 10^{-6}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
HF	$(1 \div 3) \cdot 10^{-9}$	Спектроскопия	[79]	
CH ₄	$< 10^{-6}$	»	[79]	
CH ₃ Cl	$< 10^{-6}$	»	[79]	
CH ₃ F	$< 10^{-6}$	»	[79]	
C ₂ H ₂	$< 10^{-6}$	»	[79]	
HCl	$< 10^{-6}$	»	[79]	
O ₃	$< 10^{-3}$	Спектроскопия	[135]	
O ₃	$< 3 \cdot 10^{-9}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
SO ₂	$< 3 \cdot 10^{-3}$	Спектроскопия	[85]	
SO ₂	$< 10^{-3}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
COS	$< 10^{-6}$	Спектроскопия	[83]	
COS	$< 10^{-8}$	»	[146]	
COS	$< 10^{-7}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
C ₃ O ₂	$< 5 \cdot 10^{-7}$	Спектроскопия	[86]	
C ₃ O ₂	$< 10^{-7}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
H ₂ S	$< 2 \cdot 10^{-4}$	Спектроскопия	[83]	
H ₂ S	$< 10^{-7}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
NH ₃	$< 3 \cdot 10^{-8}$	Спектроскопия	[146]	
NH ₃	$10^{-4} \div 10^{-3}$	«Венера-8»	[6]	При $p = 2 \div 10$ кг/см ²
NH ₃	$< 10^{-7}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
NH ₃	$< 10^{-5}$	Радиоастрономия	[31]	
NO	$< 10^{-6}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
NO ₂	$< 10^{-6}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
N ₂ O ₄	$< 4 \cdot 10^{-8}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
HCHO	$< 10^{-6}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
CH ₃ CHO и альдегиды более высокого порядка	$< 10^{-6}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂
CH ₃ COSCH ₃ и кетоны бо- лее высокого порядка	$< 10^{-6}$	ОАО	[189]	При 1 атм-км CO ₂

очагов вулканизма в недрах столь малых небесных тел принципиально невозможно. Самый крупный кратер на Фобосе имеет поперечник 5,3 км. Мощность удара, который привел к его образованию, близка к разрушительной для самого спутника.

Количество кратеров на единицу площади поверхности Фобоса и Деймоса приблизительно в 100 раз больше, чем на поверхности

Марса. Это говорит об эффективности процессов, сглаживающих рельеф на поверхности планеты, и о большом возрасте спутников.

Судя по установившейся к настоящему времени синхронности периодов осевого вращения и орбитального обращения вокруг планеты, последний удар весьма крупного метеорита произошел на Фобосе более чем 10^6 лет назад, а на Деймосе — 10^8 лет назад.

Таблица 4. Содержание летучих (кг/см³) [132, 170]

Летучие	Атмосфера Земли	Всего на Земле	Атмосфера Венеры	Атмосфера Марса
CO ₂	3·10 ⁻⁴	70±30	90±15	(1,4±0,2)·10 ⁻²
H ₂ O	10 ⁻² —10 ⁻³	375±75	10 ⁻¹ —10 ⁻¹	(0,5±2,5)·10 ⁻⁶
O ₂	0,23	~0,23	<10 ⁻³	<2,5·10 ⁻⁵
N ₂	0,75	~0,75	<2	<0,8·10 ⁻³
Ar	10 ⁻²	~10 ⁻²	?	<0,3·10 ⁻²
CO	10 ⁻⁶ —10 ⁻⁷	~10 ⁻⁸	<10 ⁻³	0,7·10 ⁻⁵
Cl	—	5,7	2·10 ⁻⁵	—
F	—	3·10 ⁻¹	10 ⁻⁷	—

Таблица 5. Продолжительность времен года на Марсе между моментами равноденствий и солнцестояний в нашу эпоху, в средних солнечных сутках всемирного времени

Северная весна и южная осень	199
Северное лето и южная зима	182
Северная осень и южная весна	146
Северная зима и южное лето	160
Длительность одного цикла	687

Еще раз о проблеме жизни на Марсе

До настоящего времени не получено сведений, достаточных для доказательства существования биологической активности на Марсе.

Имеются ли среди твердо установленных фактов такие, которые надежно исключают ее, — судить не астрономам, а биологам.

Новые сведения о Марсе, полученные в 1971—1972 гг., по-видимому, дают основания предпринимать дальнейшие усилия для решения этой проблемы. Такие усилия предпринимаются, и есть надежда, что завершение этой темы будет началом многих других исследований.

Многие вопросы, связанные с планетами земной группы, еще ждут своего решения и решаются в наши дни объединенными усилиями астрономии и космонавтики. Дальнейший рост наших знаний в этом направлении не только поможет лучше понять природу соседних планет, но и приблизит нас к решению ряда геофизических проблем, а тем самым откроет перспективы получения результатов во благо всего человечества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеевский В. С., Завелевич Ф. С., Маров М. Я., Нойкина А. И., Полежаев В. И. Моделирование лучисто-конвективного теплообмена в атмосфере Венеры. Космические исследования, 1970, 8, № 6.
2. Авдеевский В. С., Маров М. Я., Рождественский М. К. Результаты измерений на автоматических станциях «Венера-5» и «Венера-6» и модель атмосферы Венеры. Космические исследования, 1970, 8, № 6; J. Atmos. Sci., 1970, 27, 561.
3. Авдеевский В. С., Маров М. Я., Рождественский М. К. Результаты измерений параметров атмосферы Венеры на советской АМС «Венера-4». Космические исследования, 1969, 7, № 2, 233.
4. Авдеевский В. С., Маров М. Я., Мошкин Б. Е., Экономов А. П. Результаты измерений освещенности в атмосфере и на поверхности Венеры при помощи АМС «Венера-8». Докл. АН СССР, 1973.
5. Барабашов Н. П. Природа небесных тел и их наблюдение. Харьков, Изд-во Харьковского ун-та, 1969.
6. «Венера-8». Итоги космического рейса. Газета «Правда», № 254 (19762), 10.IX 1972 г.
7. Виноградов А. П. Введение в геохимию океана. М., «Наука», 1967.
8. Виноградов А. П. Атмосферы планет солнечной системы. Вестник МГУ, серия геология, 1969, № 4, 3.
9. Виноградов А. П., Сурков Ю. А., Андрейчиков Б. М., Калинкина О. М., Грецишова И. М. Химический состав атмосферы Венеры. Космические исследования, 1970, 8, № 4, 578.
10. Виноградов А. П., Сурков Ю. А., Курнозов Ф. Ф., Глазов В. Н. Содержание естественных радиоактивных элементов в венерианской породе по данным автоматической станции «Венера-8». Геохимия, 1973, № 1, 3.
11. Голицын Г. С. Оценка параметров пограничных слоев в атмосферах планет земной группы. Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1969, 5, № 8, 775.
12. Голицын Г. С. Теория подобия для крупномасштабных движений планетарных атмосфер. Докл. АН СССР, 1970, 190, 323.
13. Давыдов В. Д. Поведение гидросферы в условиях Марса и ее наблюдаемые проявления. Вопросы космогонии, 1960, 7, 142.
14. Давыдов В. Д. Гало-феномены в атмосфере Марса на ледяных и неизвестных кристаллах. Астрон. ж., 1970, 47, 172.
15. Давыдов В. Д. О природе области Hellas на Марсе. Астрон. вестник, 1971, 5, 232.
16. Давыдов В. Д. Критерий наличия кристаллов H₂O на Марсе. В сб. «Физика Луны и планет». М., «Наука», 1972, стр. 423.
17. Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузгов Л. Н. Исследование магнитного поля с межпланетной станции «Венера-4». Космические исследования, 1968, 6, № 4, 561.
18. Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузгов Л. Н. Магнитное поле в ближайшей окрестности Марса по данным спутников «Марс-2» и «Марс-3». Докл. АН СССР, 1972, 207, 1296.
19. Достовалов С. Б., Чувакин С. Д. О распределении нейтрального водорода в верхней атмосфере Марса. Космические исследования, 1973, 11, № 5, 787.

20. Зилигиневич С. С., Монин А. С., Туриков В. Г., Чаликов Д. В. Численное моделирование циркуляции венерианской атмосферы. Докл. АН СССР, 1971, 197, 1291.
21. Изаков М. Н. О температуре термосферы Марса. Космические исследования, 1973, 11, № 5, 761.
22. Кержанович В. В. Скорость ветра и турбулентность в атмосфере Венеры, полученные по данным доплеровских измерений скорости АМС «Венера-4» — «Венера-6». Космические исследования, 1971, 10, № 2, 261.
23. Кержанович В. В., Маров М. Я. Циркуляция и запыленность атмосферы Венеры по измерениям скорости ветра на АМС «Венера-8». Докл. АН СССР, 1973, 215, 554.
24. Козловская С. В. О внутреннем строении и химическом составе Меркурия. В сб. «Физика Луны и планет». М., «Наука», 1972, стр. 228.
25. Колосов М. А., Яковлев О. И., Круглов Ю. М., Трусов Б. П., Ефимов А. И., Кержанович В. В. Предварительные результаты исследований атмосферы Марса с помощью спутника «Марс-2». Докл. АН СССР, 1972, 206, 1071.
26. Котельников В. А., Александров Ю. Н., Апраксин Л. В., Дубровин В. М., Кислик М. Д., Кузнецов В. И., Петров Г. М., Ржига О. Н., Францексон А. В. Радиолокационные наблюдения Венеры в Советском Союзе в 1964 г. Докл. АН СССР, 1965, 163, 50.
27. Котельников В. А., Дубровин В. М., Дубинский Б. А., Кислик М. Д., Кузнецов В. И., Мишин И. В., Морозов В. А., Петров Г. М., Ржига О. Н., Сыцко Г. А., Шаховской А. М. Радиолокационные наблюдения Венеры в Советском Союзе в 1962 г. Докл. АН СССР, 1963, 151, 532.
28. Котельников В. А., Дубровин В. М., Морозов В. А., Петров Г. М., Ржига О. Н., Трунова З. Г., Шаховской А. М. Результаты радиолокации Венеры в 1961 г. Радиотехника и электроника, 1962, 7, № 11, 1860.
29. Кротиков В. Д., Троицкий В. С. Радиоизлучение и природа Луны. УФН, 1963, 81, 589.
30. Кузьмин А. Д. Радиофизические исследования Венеры. М., ВИНТИ, 1967.
31. Кузьмин А. Д., Наузов А. П., Смирнова Т. В. Оценка содержания аммиака в подоблачной атмосфере Сатурна по радиоастрономическим измерениям. Астрон. вестник, 1972, 6, № 1, 13.
32. Лебединский А. И. Физические условия на Марсе. Докл. АН СССР, 1956, 108, 795.
33. Ломоносов М. В. Явление Венеры на Солнце, наблюдаемое в Санктпетербургской Императорской Академии Наук Мая 25 дня 1761 года. Полн. собр. соч., т. 4. Изд-во АН СССР, 1955, стр. 351.
34. Лукашевич Н. Л., Маров М. Я., Фейгельсон Е. М. Об интерпретации измерений освещенности в атмосфере Венеры. Космические исследования, 1973, 11.
35. Маева С. В. Тепловая история планет земной группы. В сб. «Физика Луны и планет». М., «Наука», 1972, стр. 223.
36. Мамаков А. С., Нефедьев А. А. Измерение диаметра Меркурия. Астрон. циркуляр, 1972, № 669, 3.
37. Маров М. Я. Модель атмосферы Венеры. Докл. АН СССР, 1971, 196, № 1, 67.
38. Маров М. Я., Авдеевский В. С., Кержанович В. В., Рождественский М. К., Бородин Н. Ф., Рябов О. Л. Измерения температуры, давления и скорости ветра в атмосфере Венеры на автоматической межпланетной станции «Венера-8». Докл. АН СССР, 1973, 240, № 3, 559.
39. Маров М. Я., Авдеевский В. С., Рождественский М. К., Бородин Н. Ф., Кержанович В. В. Предварительные результаты исследования атмосферы Венеры при помощи АМС «Венера-7». Космические исследования, 1971, 9, № 4, 570.
40. Маров М. Я., Рябов О. Л. Модель атмосферы Венеры. Препринт ИПМ АН СССР, 1972.
41. Маров М. Я., Шари В. П. Перенос длинноволнового излучения в нижней атмосфере Венеры. Препринт ИПМ АН СССР, № 23, 1973.
42. Мороз В. И. Инфракрасный спектр Меркурия (λ 1,0—3,9 μ). Астрон. ж., 1964, 41, 1108; 1965, 8, 882.
43. Мороз В. И. Физика планет. М., «Наука», 1967. Перев. на англ.: Moroz V. I. Physics of Planets. NASA. Washington, 1969.
44. Мороз В. И. Атмосфера Венеры. УФН, 1971, 104, № 2, 255.
45. Мороз В. И., Крукишник Д. П. Спектроскопическое определение давления в атмосфере Марса по полосам CO₂. Астрон. ж., 1971, 48, 1038.
46. Мороз В. И., Ксанфомалиги Л. В., Красовский Г. Н., Давыдов В. Д., Парфентьев Н. А., Жезулев В. С., Филиппов Г. Ф. «Марс-3»: инфракрасная температура и тепловые свойства поверхности планеты. Препринт. Институт космических исследований АН СССР, 1974.
47. Петров Г. М. Пустыни земного шара. Л., «Наука», 1973.
48. Ржига О. Н. Результаты радиолокации планет. Космические исследования, 1969, 7, № 1, 84.
49. Страхов Н. М. К вопросу о возможности образования гидроокисей железа на поверхности Марса. Астрон. ж., 1966, 43, 1267.
50. Сурков Ю. А., Андрейчиков Б. М., Каликина О. М. О содержания аммиака в атмосфере Венеры по данным автоматической станции «Венера-8». Докл. АН СССР, 1973, 213, 296.
51. Тихов Г. А. Астробиология. М., 1952.
52. Шари В. П. Численное моделирование переноса теплового излучения в нижней атмосфере Венеры. Препринт ИПМ АН СССР, № 34, 1975.
53. Шаронов В. В. Природа планет. М., Физматгиз, 1958.
54. Шаронов В. В. Непосредственное цветовое сравнение диска Марса с земными образцами. Изв. Комис. по физ. планет, 1965, вып. 5, 44.
55. Anderson J. D., Efron L., Wong S. K. Martian Mass and Earth-Moon Mass Ratio from Coherent S-Band Tracking of Mariner 6 and 7. Science, 1970, 167, N 3916, 277.
56. Antoniadi E. M. La planète Mars. Paris, 1930. Transl. in: Astron. and Space, 1972, 2, 245.
57. Antoniadi E. M. La planète Mercure. Paris, Gauthier-Villars, 1934. Transl. in: Astron. and Space, 1972, 1, 43, 236, 348.
58. Ash M. E., Campbell D. B., Dyce R. B., Ingalls R. P., Pettengill G. H., Shapiro I. I. Astronomical Constants from Analyses of Inner-Planet Radar Data. Bull. Amer. Astron. Soc., 1971, 3, 474.
59. Banks P. M., Johnson H. E., Axford W. I. The Atmosphere of Mercury. Comments Astrophys. and Space Phys., 1970, 2, 214.
60. Barker E. S. Detection of Molecular Oxygen in the Martian Atmosphere. Nature, 1972, 238, N 5365, 447.

61. Barth C. A. Interpretation of the Mariner 5 Lyman Alpha Measurements. *J. Atmos. Sci.*, 1968, 25, N 4, 564.
62. Barth C. A., Hord C. W., Pearce J. B., Kelly K. K., Anderson G. P., Stewart A. I. Mariner 6 and 7 Ultraviolet Spectrometer Experiment: Upper Atmosphere Data. *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, 2213.
63. Barth C. A., Stewart A. I., Hord C. W., Lane A. L. Mariner 9 Ultraviolet Spectrometer Experiment: Mars Airglow Spectroscopy and Variations in Lyman Alpha. *Icarus*, 1972, 17, 457.
64. Beer R., Norton R. H., Martonchik J. V. Astronomical Infrared Spectroscopy with a Connes-Type Interferometer. II. Mars, 2500—3500 cm^{-1} . *Icarus*, 1971, 15, 1.
65. Belton M. J. S., Hunten D. M. A Search for O_2 on Mars and Venus: A Possible Detection of Oxygen in the Atmosphere of Mars. *Astrophys. J.*, 1968, 153, N 3, 1, 963.
66. Belton M. J. S., Hunten D. M., McElroy M. B. A Search for an Atmosphere on Mercury. *Astrophys. J.*, 1967, 150, 1111.
67. Bergstrahl J. T., Gray L. D., Smith H. J. An Upper Limit for Atmospheric Carbon Dioxide on Mercury. *Astrophys. J. Letters*, 1967, 149, L137.
68. Binder A. B., Cruikshank D. P. Mercury: New Observations of the Infrared Bands of Carbon Dioxide. *Science*, 1967, 155, N 3766, 1135.
69. Boyer C., Guérin P. Étude de la rotation rétrograde, en 4 jours, de la couche extérieure nuageuse de Venus. *Icarus*, 1969, 11, N 3, 338.
- 69a. Broadfoot A. L., Kumar S., Belton M. J. S., McElroy M. B. Mercury's atmosphere from Mariner 10: preliminary results. *Science*, 1974, 185, N 4146, 166.
70. Bullen K. E. On Internal Structure of the Planets. *Proc. Astron. Soc. Australia*, 1967, 1, 2.
71. Cain D. L., Kliore A. J., Seidel B. L., Sykes M. J. An Ellipsoid Approximation to the Mean Surface of Mars and Mars Atmospheres Using Mariner 9 Occultations. *Jet. Prop. Lab., Pasadena, Cal.*, 1972.
72. Camichel H., Dollfus A. La rotation et la cartographie de la planète Mercure. *C. r. Acad. sci. B*, 1967, 264, 1764.
73. Camichel H., Dollfus A. La rotation et la cartographie de la planète Mercure. *Icarus*, 1968, 8, 216.
74. Campbell D. B., Dyce R. B., Ingalls R. P., Pettengill G. H., Shapiro I. I. Venus: Topography Revealed by Radar Data. *Science*, 1972, 175, N 4021, 514.
75. Carpenter R. L. A Radar Determination of the Rotation of Venus. *Astron. J.*, 1970, 75, N 1, 61.
76. Carr M. H. Volcanism on Mars. *J. Geophys. Res.*, 1973, 78, N 20, 4049.
- 76a. Chase S. C., Miner E. D., Morrison G., Münch G., Neugebauer G., Schroeder M. Preliminary infrared radiometry of the night side of Mercury from Mariner 10. *Science*, 1974, 185, N 4146, 142.
77. Cohen A. J. Seasonal Colour Changes on Mars. *Astron. J.*, 1966, 71, 848.
78. Colombo G. Rotational Period of the Planet Mercury. *Nature*, 1965, 208, N 5010, 575.
79. Connes P., Connes I., Benedict W. S., Kaplan L. D. Traces of HCl and HF in the Atmosphere of Venus. *Astrophys. J.*, 1967, 147, N 3, 1230.
80. Connes P., Connes I., Benedict W. S., Kaplan L. D. Carbon Monoxide in the Venus Atmosphere. *Astrophys. J.*, 1968, 152, N 3, 741.
81. Conrath B., Curran R., Hanel R., Kunde V., Maguire W., Pearl J., Pirraglia J., Welker J., Burke T. Atmospheric and Surface Properties of Mars Obtained by Infrared Spectroscopy on Mariner 9. Preprint X-620-72-486, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, Dec. 1972.
82. Cross C. A. The Heat Balance of the Martian Polar Caps. *Icarus*, 1971, 15, 110.
83. Cruikshank D. P. Sulphur Compounds in the Atmosphere of Venus. II. Upper Limit for the Abundance of COS and H_2S . *Arizona. Univ. Commun. Lunar and Planet. Lab.*, 1967, 6, 199.
84. Cruikshank D. P., Chapman C. R. Mercury's Rotation and Visual Observations. *Sky and Telescope*, 1967, 34, 24.
85. Cruikshank D. P., Kuiper G. P. Sulphur Compounds in the Atmosphere of Venus. I. An Upper Limit for the Abundance of SO_2 . *Arizona Univ. Commun. Lunar and Planet. Lab.*, 1967, 6, 195.
86. Cruikshank D. P., Sill G. T. (Carm O.). The Infrared Spectrum of Carbon Suboxide. Pt II. Region 2—15 Microns. *Commun. Lunar and Planet. Lab.*, 1967, 6, N 99, 204.
87. Cutts J. A., Soderblom L. A., Sharp R. P., Smith B. A., Murray B. C. The Surface of Mars. 3. Light and Dark Markings. *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, 343.
88. Dalgarno A., McElroy M. B. Mars: is Nitrogen Present? *Science*, 1970, 170, N 3954, 167.
89. Dementyeva N. N., Kurt V. G., Smirnov A. S., Titarchuk L. G., Chuvahin S. D. Preliminary Results of Measurements of UV Emissions Scattered in the Martian Upper Atmosphere. *Icarus*, 1972, 17, 475.
90. Dickinson R. E. Infrared Radiative Heating and Cooling in the Venusian Mesosphere. I. Global Mean Radiative Equilibrium. *J. Atmos. Sci.*, 1972, 29, 1531.
91. Dickinson R. E., Ridley E. C. Numerical Solution for the Composition of a Thermosphere in the Presence of a Steady Subsolar-To-Antisolar Circulation with Application to Venus. *J. Atmos. Sci.*, 1972, 29, 1557.
92. Dollfus A. Etude des planètes par la polarisation de leur lumière. *Ann. astrophys. suppl.* N 4. Transl. as NASA TTF-488, 1957.
93. Dollfus A. Polarization Studies of Planets. In: Planets and Satellites. G. P. Kuiper, B. M. Middlehurst (Eds). Planets and Satellites. Univ. Chicago Press, 1961, chapter 9. Русский перевод: Дольфус А. Исследования поляризации планет. В кн.: Планеты и спутники. Перевод с англ. под ред. В. И. Мороза. М., 1963, гл. 9.
94. Dollfus A. Mesure du diamètre de Mercure lors de son passage devant le Soleil le 7 November 1960. *Icarus*, 1963, 2, 219.
95. Dollfus A. New Optical Measurements of Planetary Diameters. Pt IV. Planet Mars. *Icarus*, 1972, 17, 525.
96. Donahue T. M. Aeronomy of CO_2 Atmospheres: A Review. *J. Atmos. Sci.*, 1971, 28, N 6, 895.
97. Downs G. S., Goldstein R. M., Green R. R., Morris G. A., Reichley P. E. Martian Topography and Surface Properties as Seen by Radar: The 1971 Opposition. *Icarus*, 1973, 18, 8.
98. Driscoll E. Our Cratered Sister Planet. *Sci. News*, 1973, 104, 72.
99. Dyce R. B., Pettengill G. H., Shapiro I. I. Radar Determination of the Rotation of Venus and Mercury. *Astron. J.*, 1967, 72, N 3, 351.

100. Egan W. G., Foreman K. M. Evaluation of Mars Surface: Simulation Studies. *Astron. J.*, 1968, 73, N 5, pt 2, 92.
101. Epstein E. E., Dworetzky M. M., Fogarty W. G., Montgomery J. W. Mercury: Epilith Physical Parameters and a Heliocentric Longitude Dependence of Its 3.3 mm Radiation. *Radio Sci.*, 1970, 5, 401.
102. Fanale F. P., Cannon W. A. Adsorption on the Martian Regolith. *Nature*, 1971, 230, N 5295, 502.
103. Fanale F., Stemberge Ch., Horowitz N. H. Biological Studies of Mars: Theoretical Considerations and Practical Experiments. In: *Advances in Space Exploration*. Washington, D. C., 1969, p. 165.
104. Fjeldbo G., Kliore A. J., Eshleman R. The Neutral Atmosphere of Venus as Studied with the Mariner V Radio Occultation Experiments. *Astron. J.*, 1971, 76, 123.
105. Gale W. A., Sinclair A. C. E. Polar Temperature of Venus. *Science*, 1969, 165, N 3900, 1356.
106. Gary B. Mercury's Microwave Phase Effect. *Astrophys. J. Letters*, 1967, 149, L 141.
107. Gierasch P. J. The Four-Day Rotation in the Stratosphere of Venus: A Study in Radiative Driving. *Icarus*, 1970, 13, N 1, 25.
108. Gierasch P., Goody R. A Study of the Thermal and Dynamical Structure of the Martian Lower Atmosphere. *Planet. Space Sci.*, 1968, 16, N 5, 615.
109. Gierasch P., Sagan C. A Preliminary Assessment of Martian Wind Regimes. *Icarus*, 1971, 14, 312.
110. Goldreich P., Peale S. Spin-Orbit Coupling in the Solar System. *Astron. J.*, 1966, 71, 425.
111. Goldstein R. M. Radio and Radar Studies of Venus and Mercury. *Radio Sci.*, 1970, 5, 391.
112. Goldstein R. M. Radar Observations of Mercury. *Astron. J.*, 1971, 76, 1152.
113. Goldstein R. M. Review of Surface and Atmosphere Studies of Venus and Mercury. *Icarus*, 1972, 17, 571.
114. Goody R., Belton M. J. S. Radiative Relaxation Times for Mars. A Discussion of Martian Atmospheric Dynamics. *Planet. Space Sci.*, 1967, 15, 247.
115. Goody R. M., Robinson A. R. A Discussion of the Deep Circulation of the Atmosphere of Venus. *Astrophys. J.*, 1966, 146, 339.
116. Griffin J. S. Constants of the Solar System. *Spaceflight*, 1972, 14, 311.
117. Gringauz K. I., Bezrukh V. V., Volkov G. I., Breus T. K., Musatov I. S., Havkin L. P., Sloutchonkov G. P. Preliminary Results on Plasma Electrons from Mars 2 and Mars 3. *Icarus*, 1973, 18, 54.
118. Hämeen-Anttila K. A., Pikkarainen T., Camichel H. Photometric Studies of the Planet Mercury. *Moon*, 1970, 1, 440.
119. Hanel R., Conrath B., Hovis W., Kunde V., Lowman P., Maguire W., Pearl J., Pirraglia J., Prabhakara C., Schlachman B., Levin G., Straat P., Burke T. Investigation of the Martian Environment by Infrared Spectroscopy on Mariner 9. *Icarus*, 1972, 17, 423.
120. Hansen J. E. Information Contained in the Intensity and Polarization of Scattered Sunlight. *Inst. Space Studies Rept. Sept.*, 1972.
121. Hansen J. E., Akring A. Clouds of Venus: Evidence for Their Nature. *Science*, 1971, 171, 669.
122. Hansen J. E., Cheyney H. Comments: «On the Composition of the Venus Clouds». *J. Geophys. Res.*, 1968, 73, 6136.
123. Harris D. L. Photometry and Colorimetry of Planets and Satellites. In: *Planets and Satellites*. G. P. Kuiper, B. M. Middlehurst (Eds.). Univ. Chicago Press, 1961, chapter 8. Русский перевод: Гаппус Д. Л. Интегральная фотометрия и колориметрия планет и спутников. В кн.: Планеты и спутники. Перевод с англ. под ред. В. И. Мороза. М., 1963, гл. 8.
- 123a. Hobard H. T., Tyler G. L., Esposito P. B., Anderson J. D., Reasenberg R. D., Shapiro I. I., Fjeldbo G., Kliore A. J., Levy G. S., Brunn D. L., Dickinson R., Edelson R. E., Martin W. L., Postal R. B., Seidel B., Sesplaukis T. T., Shirley D. L., Stelzried C. T., Sweetnam D. N., Wood G. E., Zieglerbaum A. I. Mercury: Results on mass, radius, ionosphere, and atmosphere from Mariner 10 dual-frequency radio signals. *Science*, 1974, 185, N 4146, 179.
124. Hord C. W., Barth C. A., Stewart A. I., Lane A. L. Mariner 9 Ultraviolet Spectrometer Experiment: Photometry and Topography of Mars. *Icarus*, 1972, 17, 443.
125. Hord C. W., Simmons K. E., McLaughlin L. K. Mariner 9 Ultraviolet Spectrometer Experiment: Pressure-Altitude Measurements on Mars. Preprint, Lab. Atmos. and Space Phys. Univ. Colorado. Boulder, Colorado, 1973.
126. Horn D., McAfee J. M., Winer A. M., Herr K. C., Pimentel G. C. The Composition of the Martian Atmosphere: Minor Constituents. *Icarus*, 1972, 16, 543.
127. Howard H. T., Tyler G. L., Fjeldbo G., Kliore A. J., Levy G. S., Brunn D. L., Dickinson R., Edelson R. E., Martin W. L., Postal R. B., Seidel B., Sesplaukis T. T., Shirley D. L., Stelzried C. T., Sweetnam D. N., Zieglerbaum A. I., Esposito P. B., Anderson J. D., Shapiro I. I., Reasenberg R. D. Venus: Mass, Gravity Field, Atmosphere and Ionosphere as Measured by the Mariner 10 Dual-Frequency Radio System. *Science*, 1974, 183, N 4131, 1297.
128. Hunten D. M. Aeronomy of CO₂ Atmospheres. *Comments Astrophys. and Space Phys.*, 1972, 4, 1.
129. Ingalls R. P., Evans J. V. Scattering Properties of Venus at 3.8 cm. *Astron. J.*, 1969, 74, 258.
130. Ingalls R. P., Rainville L. P. Radar Measurements of Mercury: Topography and Scattering Characteristics at 3.8 cm. *Astron. J.*, 1972, 77, 185.
131. Ingersoll A. P. Motions in Planetary Atmospheres and the Interpretation of Radio Occultation Data. *Icarus*, 1970, 13, 34.
132. Ingersoll A. P., Leovy C. B. The Atmospheres of Mars and Venus. In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. Leo Goldberg (Ed.). Palo Alto Annual Revs. Inc.
133. Irvine W. M. Monochromatic Phase Curves and Albedos for Venus. *J. Atmos. Sci.*, 1968, 25, N 4, 610.
134. Janssen M. A., Hills R. E., Thornton D. D., Welch W. J. Venus: New Microwave Measurements Show No Atmosphere Water Vapour. *Science*, 1973, 179, N 4077, 994.
135. Jenkins E. B., Morton D. C., Sweigart A. V. Rocket Spectra of Venus and Jupiter from 2000 to 3000 Å. *Astrophys. J.*, 1969, 157, 913.
136. Jurgens R. F. Some Preliminary Results of the 70 cm Radar Studies of Venus. *Radio Sci.*, 1970, 5, N 2, 435.

137. Kaplan L. D., Connes J., Connes P. Carbon Monoxide in the Martian Atmosphere. *Astrophys. J.*, 1969, 157, N 3, Pt 2, 187.
138. Kaplan L. D., Münch G., Spinrad H. An Analysis of the Spectrum of Mars. *Astrophys. J.*, 1964, 139, 1.
139. Kerzhanovitch V. V., Marov M. Ya., Rozhdestvensky M. K. Data on Dynamics of the Subcloud Venus Atmosphere from Venera Spaceprobe Measurements. *Icarus*, 1972, 17, 659.
140. Kieffer H. H., Chase S. C. Jr., Miner E., Münch G., Neugebauer G. Preliminary Report of Infrared Radiometric Measurements from the Mariner 9 Spacecraft. *J. Geophys. Res.*, 1973, 78, 4291.
141. Klein M. J. Mercury: Recent Observations at 3.75 cm Wavelength—Summary. *Radio Sci.*, 1970, 5, 397.
142. Kliore A. J., Cain D. L., Fjeldbo G., Seidel B. L., Sykes M. J., Rasool S. I. The Atmosphere of Mars from Mariner 9 Radio Occultation Measurements. *Icarus*, 1972, 17, 484.
143. Kliore A. J., Fjeldbo G., Seidel B. L., Sykes M. J., Woiceshyn P. M. S-Band Radio Occultation Measurements of the Atmosphere and Topography of Mars with Mariner 9—Extended Mission Coverage of Polar and Intermediate Latitudes. Preprint, Jet Prop. Lab., Cal. Inst. Technol. Pasadena, Cal., 1972.
144. Kovalevsky J. Détermination des masses des planètes et satellites. In: *Surfaces and Interiors of Planets and Satellites*. A. Dollfus (Ed.). London and N. Y., Acad. Press, 1970, chapter 1.
145. Kuiper G. P. The Planet Mercury: Summary of Present Knowledge. *Commun. Lunar and Planet. Lab.*, 1970, 8, N 142—148, 165.
146. Kuiper G. P., Forbes F., Steinmetz D., Mitchell R. High Altitude Spectra from NASA CV-990 Jet. II. Water Vapor on Venus. *Commun. Lunar and Planet. Lab.*, 1968—1969, 6, N 100, 209.
147. Kurt V. G., Dostovalov S. B., Sheffer E. K. The Venus for Ultraviolet Observations with Venera 4. *J. Atmos. Sci.* 1968, 25, 668.
148. Lane A. L., Barth C. A., Hord C. W., Stesart A. I. Mariner 9 Ultraviolet Spectrometer Experiment: Observations of Ozone on Mars. Boulder, Colorado. S. a.
149. Leovy C. B., Briggs G. A., Smith B. A. Mars Atmosphere during the Mariner 9 Extended Mission: Television Results. *J. Geophys. Res.*, 1973, 78, 4252.
150. Leovy C. B., Briggs G. A., Young A. T., Smith B. A., Pollack J. B., Shipley E. N., Willey R. L. The Martian Atmosphere: Mariner 9 Television Experiment Progress Report. *Icarus*, 1972, 17, N 2, 373.
151. Leovy C., Mintz Y. Numerical Simulation of the Atmospheric Circulation and Climate of Mars. *J. Atmos. Sci.*, 1969, 27, 1167.
152. Levin B. J. Internal Constitution of Terrestrial Planets. In: *Surfaces and Interiors of Planets and Satellites*. A. Dollfus (Ed.). London and N. Y., Acad. Press, 1970, chapter 8.
153. Lewis J. S. Geochemistry of the Volatile Elements on Venus. *Icarus*, 1969, 11, 367.
154. Lewis J. S. Venus: Atmospheric and Lithospheric Composition. *Earth Planet. Sci. Letters*, 1970, 10, 73.
155. Lewis J. S. Refractive Index of Aqueous HCl Solutions and the Composition of the Venus Clouds. *Nature*, 1971, 230, 295.
156. Lorell J., Born G. H., Christensen E. J., Jordan J. E., Shapiro P. A., Reasenberg R. D., Slater G. L. Mariner 9 Celestial Mechanics Experiment: Gravity Field and Pole Direction of Mars. *Science*, 1971, 175, N 4019, 317.
157. Lovelock J. E., Gifford C. E. Planetary Atmospheres: Compositional and Other Changes Associated with the Presence of Life. In: *Advances in Space Exploration*. Washington, D. C., 1969, p. 179.
158. Lowell P. Mars and Its Canals. N. Y.—London, 1908.
159. McCauley J. F., Carr M. H., Cutts J. A., Hartmann W. K., Masursky H., Milton D. J., Sharp R. P., Wilhelms D. E. Preliminary Mariner 9 Report on the Geology of Mars. *Icarus*, 1972, 17, 289.
160. McCord T. B., Adams J. B. Mercury: Interpretation of Optical Observations. *Icarus*, 1972, 17, 585.
161. McCord T. B., Elias J. H., Westphal J. A. Mars: The Spectral Albedo (0.3—2.5 μ) of Small Bright and Dark Regions. *Icarus*, 1971, 14, 245.
162. McElroy M. B. Structure of the Venus and Mars Atmospheres. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, 29.
163. McElroy M. B. Ionization Processes in the Atmospheres of Venus and Mars. Preprint, Kitt Peak Nat. Observ. Tucson, Arizona, 1970.
164. McElroy M. B., McConnell J. C. Dissociation of CO₂ in the Martian Atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1971, 28, 879.
165. McElroy M. B., Donahue T. M. Stability of the Martian Atmosphere. *Science*, 1972, 177, N 4053, 986.
166. McElroy M. B., Strobel D. F. Models for the Night Time Venus Ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, 1118.
167. Malkus W. V. R. Hadley—Halley Circulation on Venus. *J. Atmos. Sci.*, 1970, 27, 529.
168. Margolis J. S., Shorn R. A., Young Gray L. D. High Dispersion Spectroscopic Studies of Mars. V. A Search for Oxygen in the Atmosphere of Mars. *Icarus*, 1971, 15, 197.
169. Mariner Stanford Group. Venus: Ionosphere and Atmosphere as Measured by Dual Frequency Radio Occultation of Mariner V. *Science*, 1967, 158, N 3809, 1678.
170. Maron I., Luchak G., Blitzstein W. Radar Observation of Venus. *Science*, 1961, 134, N 3488, 1418.
171. Marov M. Ya. Venus: A Perspective at the Beginning of Planetary Exploration. *Icarus*, 1972, 16, 415.
172. Marov M. Ya., Avdukevsky V. S., Borodin N. F., Ekonomov A. P., Kerzhanovich V. V., Lysov V. P., Moshkin B. Ye., Rozhdestvensky M. K., Ryabov O. L. Preliminary Results on the Venus Atmosphere from the Venera 8 Descent Module. *Icarus*, 1973, 20, 407.
173. Mayer C. H., McCullough T. P., Sloanaker R. M. Observations of Venus at 3.15 cm Wavelength. *Astrophys. J.*, 1958, 127, N 1, 1.
174. Miyamoto S. Martian Atmosphere and Crust. *Icarus*, 1966, 5, 360.
175. Moos H. W., Fastie W. G., Bottema M. Rocket Measurement of Ultraviolet Spectra of Venus and Jupiter between 1200 and 1800 Å. *Astrophys. J.*, 1969, 155, 887.
176. Morowitz H., Sagan C. Life in the Clouds of Venus? *Nature*, 1967, 215, 1259.
177. Moroz V. I., Ksanfomaliti L. B. Preliminary Results of Astrophysical Observations of Mars from Mars 3. *Icarus*, 1972, 17, 408.

178. Morrison D. Martian Surface Temperature. *Astron. J.*, 1968, 73, N 5, pt 2, 109.
179. Morrison D. Thermal Models and Microwave Temperatures of Planet Mercury. Spec. Rept. Smithsonian Astrophys. Observ., 1969, N 12.
180. Morrison D. Thermophysics of the Planet Mercury. *Space Sci. Revs.*, 1970, 11, 271.
181. Morrison D., Sagan C., Pollack J. B. Martian Temperatures and Thermal Properties. *Icarus*, 1969, 11, 36.
182. Mottoni G. de. Prospettive di areografia basate sui documenti fotografici e sulle osservazioni visuali. Atti 11 Conv. Soc. astron. ital., Padova, 1967, S. 1. S. a.
183. Murdock T. L., Ney E. Mercury: the Dark Side Temperature. *Science*, 1970, 170, 535.
184. Murray B. C., Belton M. J. S., Danielson G. E., Davis M. E., Gault D., Hapke B., O'Leary B., Storm R. G., Snomi V., Trask N. Venus: Atmospheric Motion and Structure from Mariner 10 Pictures. *Science*, 1974.
185. Murray B. C., Ward W. R., Young S. C. Periodic Insolation Variations on Mars. *Science*, 1973, 180, N 4086, 638.
186. Murray B. C., Willey R. L., Westphal I. A. Infrared Photometric Window. *J. Geophys. Res.*, 1963, 68, 4813.
187. Murray J. B., Smith B. A., Dollfus A. Cartography of the Surface Markings of Mercury. *Icarus*, 1972, 17, 576.
188. O'Leary B. T., Rea D. G. On the Polarimetric Evidence for an Atmosphere on Mercury. *Astrophys. J.*, 1967, 148, 249.
189. Owen T., Sagan C. Minor Constituents in Planetary Atmospheres: Ultraviolet Spectroscopy from the Orbiting Astronomical Observatory. Preprint, Cornell Univ., CRSR 489. Ithaca. N. Y., 1972.
190. Pettengill G. H., Briscoe H. W., Evans J. V., Gehrels E., Hyde G. M., Kraft L. G., Price R., Smith W. B. A Radar Investigation of Venus. *Astron. J.*, 1962, 67, N 4, 181.
191. Pettengill G. H., Dyce R. B. A Radar Determination of the Rotation of the Planet Mercury. *Nature*, 1969, 206, 1240.
192. Pettengill G. H., Shapiro I. I., Rogers A. E. E. Topography and Radar Scattering Properties of Mars. *Icarus*, 1973, 18, 22.
193. Pettit E. Planetary Temperature Measurements. In: Planets and Satellites. G. P. Kuiper and B. M. Middlehurst (Eds). Univ. Chicago Press, 1961, chapter 10. Русский перевод: Пертур Э. Измерения температур планет. В кн.: Планеты и спутники. Перевод с англ. под ред. В. И. Мороза. М., 1963, гл. 10.
194. Pollack J. B., Erickson E. E., Witteborn F. C., Chackertan Ch., Summers A. L., Van Camp W., Baldwin B. J., Angason G. C., Caroff L. J. Aircraft Observations of Venus' Near-Infrared Reflection Spectrum: Implications for Cloud Composition. *Space Sci. Div. NASA, Ames Res. Center. Preprint.*
195. Pollack J. B., Morrison D. Venus: Determination of Atmospheric Parameters from the Microwave Spectrum. *Icarus*, 1970, 12, 376.
196. Pollack J. B., Sagan C. An Analysis of Martian Photometry and Polarimetry. Spec. Rept. Smithsonian Astrophys. Observ., 1967, N 259, X.
197. Pollack J. B., Sagan C. The Case for Ice Clouds on Venus. *J. Geophys. Res.*, 1968, 73, 5943.
198. Pollack J. B., Veverka J., Noland M., Sagan C., Hartmann W. K., Duxbury T. C., Born G. H., Milton D. J., Smith B. A. Mariner 9 Television Observations of Phobos and Deimos. *Icarus*, 1972, 17, 394.
199. Price R., Green P. E., Gobllick T. J., Kingston R. H., Kraft L. G., Pettengill G. H., Silver R., Smith W. B. Radar Echoes from Venus. *Science*, 1959, 129, N 3351, 751.
200. Rabe E. Derivation of Fundamental Astronomical Constants from the Observations of Eros during 1928-1945. *Astron. J.*, 1950, 55, 112.
201. Radmer R., Kok B. A Unified Procedure for the Detection of Life on Mars. *Science*, 1971, 174, N 4006, 233.
202. Rasool S. J. The Structure of Venus Clouds — Summary. *Radio Sci.*, 1970, 5, 367.
203. Rasool S. I., Stewart R. W. Results and Interpretation of the S-Band Occultation Experiments on Mars and Venus. *J. Atmos. Sci.*, 1971, 28, 869.
204. Rea D. G., O'Leary B. T., Sinton W. M. The Origin of the 3.58 and 3.69-Micron Minima in the Infrared Spectra. *Science*, 1965, 147, N 3663, 1286.
205. Reynolds R. T., Summers A. L. Calculations on the Composition of the Terrestrial Planets. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, 2494.
206. Rösch J. Un problème: la densité de Mercure. *Astronomie*, 1971, 85, 207.
207. Rösch J., Camichel H., Chauvean F., Hugon M., Ratier G. An Attempt to Measure the Diameter of Mercury by Hertzprung's Method. *Icarus*, 1972, 16, 321.
208. Runcorn S. K. On the Implications of the Shape of Mars. *Icarus*, 1973, 18, 109.
209. Ryan J. A. The Martian Yellow Clouds. *Geol. Soc. America Spec. Papers*, 1966, N 87, 316.
210. Sagan C. The Radiation Balance of Venus. *Cal. Inst. Technol. Jet Prop. Lab. Techn. Rept 32-24. Abstr. Astron. J.*, 1960, 65, 352.
211. Sagan C. The Photometric Properties of Mercury. *Astrophys. J.*, 1966, 144, 1218.
212. Sagan C. Life on the Surface of Venus. *Nature*, 1967, 216, N 5121, 1198.
213. Sagan C. Life. *Encycl. Brit.*, 1970.
214. Sagan C. The Trouble with Venus. In: Planetary Atmospheres. Proc. Internat. Astron. Union Sympos. N 40. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Netherlands, 1970.
215. Sagan C., Pollack J. B. Anisotropic Nonconservative Scattering and the Clouds of Venus. *J. Geophys. Res.*, 1967, 72, 469.
216. Sagan C., Pollack J. B. A Wind-Blown Dust Model of Martian Surface Features and Seasonal Changes. Spec. Rept. Smithsonian Astrophys. Observ., 1967, N 255, VII.
217. Sagan C., Veverka J., Fox P., Dubichs R., French R., Gierasch P., Quam L., Lederberg J., Levinthal E., Tucker R., Eross B., Pollack J. B. Variable Features on Mars. II: Mariner 9 Global Results. Preprint. S. a.
218. Sagan C., Veverka J., Fox P., Dubichs R., Lederberg J., Levinthal E., Quam L., Tucker R., Pollack J. B., Smith B. A. Variable Features on Mars: Preliminary Mariner 9 Television Results. *Icarus*, 1972, 17, 346.
219. Sagan C., Veverka J., Gierasch P. Observational Consequences of Martian Wind Regimes. *Icarus*, 1971, 15, 253.
220. Schorn R. A., Spinrad H., Smith H. J., Moore R. C., Giver L. P. High-Dispersion Spectroscopic Obser-

- vations of Mars. II. The Water-Vapour Variations. *Astrophys. J.*, 1967, 147, 743.
221. Schubert G., Young R. E. The 4-day Venus Circulation Driven by Periodic Thermal Forcing. *J. Atmos. Sci.*, 1970, 27, 523.
 222. Sharonov V. V. La nature de la surface et de l'atmosphère de la planète Mars d'après les données photométriques et colorimétriques. *Mém. Soc. roy. sci. Liège*, 1963, 7, 386.
 223. Shimizu M. Exospheric Temperature of Venus. *Inst. Space and Aeronaut. Sci. Univ. Tokyo Rept.*, N 455. Tokyo, Sept. 1970.
 224. Sill G. T. Sulfuric Acid in the Venus Clouds. *Commun. Lunar and Planet. Lab.*, 1972, 9, N 171, 191.
 225. Sinclair A. C. E., Basart I. P., Buhl D., Gale W. A., Liwshitz M. Preliminary Report on Interferometer Observations of Venus at 11.1 cm Wavelength. *Radio. Sci.*, 1970, 5, N 2, 347.
 226. Sinclair A. T. The Motions of the Satellites of Mars. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1972, 155, 249.
 227. Sinton W. M. Further Evidence of Vegetation on Mars. *Science*, 1959, 130, 1234.
 228. Sinton W. M. On the Composition of Martian Surface Materials. *Icarus*, 1967, 6, 222.
 229. Sinton W. M., Strong J. Radiometric Observations of Mars. *Astrophys. J.*, 1960, 131, 459.
 230. Smith B. A. Photographic Observation of Mercury and Venus. *Icarus*, 1973, 18, 000.
 231. Smith E. J., Davis L. Jr., Coleman P. J., Jones D. E. Magnetic Field Measurements Near Mars. *Science*, 1965, 149, N 3698, 1241.
 232. Smith B. A., Reese E. J. Mercury's Rotation Period: Photographic Confirmation. *Science*, 1968, 162, 1275.
 233. Smith W. B., Ingalls R. P., Shapiro I. I., Ash M. E. Surface-Height Variations on Venus and Mercury. *Radio Sci.*, 1970, 5, 411.
 234. Spreiter J. R., Summers A. L., Rizzi A. W. Solar Wind Flow Past Nonmagnetic Planets — Venus and Mars. *Planet. Space Sci.*, 1970, 18, N 9, 1281.
 235. Stewart A. I. Mariner 6 and 7 Ultraviolet Spectrometer Experiment: Implications of CO₂⁺, CO and O Airglow. *J. Geophys. Res.*, 1972, 77, 54.
 236. Stewart A. I., Barth C. A., Hord C. W., Lane A. L. Mariner 9 Ultraviolet Spectrometer Experiment: Structure of Mars' Upper Atmosphere. *Icarus*, 1972, 17, 469.
 237. Strughold H. The Green and Red Planet. London, 1954.
 238. Tang W. A Study of the General Circulation of the Martian Atmosphere Based upon the Result of the Occultation Experiment from Mariner 4. In: *Moon and Planets*. Amsterdam, 1967, p. 246.
 239. Thomson J. H., Ponsonby J. E. B., Taylor G. N., Roger R. S. A New Determination of the Solar Parallax by Means of Radar Echoes from Venus. *Nature*, 1961, 190, N 4775, 519.
 240. Vaucouleurs G. de. Geometric and Photometric Parameters of the Terrestrial Planets. *Icarus*, 1964, 3, 187.
 241. Vaucouleurs G. de, Menzel D. H. Results of the Occultation of Regulus by Venus, July 7, 1959. *Nature*, 1960, 188, 28.
 242. Velocity of Light. *Sky and Telescope*, 1972, 44, 353, 365.
 243. Victor W. K., Stevens R. The 1961 JPL Venus Radar Experiment. *IRE SET-8*, N 2, 1962, p. 84.
 244. Ward W. R. Large-Scale Variations in the Obliquity of Mars. *Science*, 1973, 181, N 4096, 260.
 245. Wilkins G. A. The Determination of the Mass and Oblateness of Mars from the Orbits of Its Satellites. In: *Mantles Earth and Terrestrial Planets*. London — N. Y. — Sydney, Intersci., 1967, p. 77.
 246. Young A. T. Are the Clouds of Venus Sulfur Acid? *Icarus*, 1973, 18, 564.
 247. Young Gray L. D. Interpretation of High Resolution Spectra of Mars. II. Calculations of CO₂ Abundance, Rotational Temperature and Surface Pressure. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*, 1971, 11, 1075.
 248. Young Gray L. D. Interpretation of High Resolution Spectra of Mars. III. Calculation of CO Abundance and Rotational Temperature. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*, 1971, 11, 385.

ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ И ИХ СПУТНИКИ, МАЛЫЕ ПЛАНЕТЫ, МЕТЕОРИТЫ И КОМЕТЫ

РАЙМОНД Л. НЬЮБОРН, СЭМЮЭЛЬ ГАЛКИС

Лаборатория реактивного движения
Калифорнийского технологического института,
Пасаде́на, Калифорния, США

Более 99% массы солнечной системы (исключая само Солнце) находится в ее внешней части, за пределами орбиты Марса. Эта область, наиболее важная в космогоническом отношении, содержит большинство малых планет и комет, планеты-гиганты Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и их 29 спутников, а также планету Плутон — тело, более похожее на спутник, чем на члена семьи планет-гигантов.

Планеты-гиганты и, вероятно, их спутники заметно отличаются от планет и спутников внутренней части солнечной системы. В отличие от средней плотности, близкой к 5 г/см^3 для планет земной группы, средняя плотность планет-гигантов меняется от $0,7 \text{ г/см}^3$ для Сатурна до $1,6 \text{ г/см}^3$ для Нептуна. Радиусы планет-гигантов заключены в пределах от 3,7 до 11,2 земного радиуса. Все эти планеты вращаются быстро — с периодами приблизительно от 10 до 15 час. Такое быстрое вращение приводит к заметному сжатию фигуры, особенно у Юпитера и Сатурна. Вращательные эффекты, как известно, являются важным фактором, оказывающим влияние на распределение плазмы в магнитосфере Юпитера. Следующее различие между планетами земной группы и планетами-гигантами касается химической природы их атмосфер, которые относятся соответственно к окислительным и восстановительным. Крупные спутники планет-гигантов, как оказалось, также существенно отличаются от Луны. Некоторые из них, как полагают, состоят в значительной мере из различных льдов или по крайней мере покрыты льдом. Три спутника: Ио, Ганимед и Титан, — как считают, обладают атмосферами, для Титана это установлено уверенно.

Кроме важности планет-гигантов для изучения вопросов образования солнечной системы, полагают, что эти планеты и их спутники представляют большой биологический инте-

рес. Саган [407] и другие ученые показали, что синтез сложных органических соединений наиболее эффективно происходит в восстановительной атмосфере. Действительно, основные этапы возникновения жизни на Земле, как полагают, относились ко времени, когда земная атмосфера была богаче водородом, чем сейчас. Большое количество водорода должно было быть потеряно Землей в ходе геологической истории вследствие неспособности планеты удерживать легкие газы. Наоборот, планеты-гиганты могли удерживать любой газ, включая водород. Поэтому их первичные восстановительные атмосферы могут иметь первостепенное экзобиологическое значение [407]. В частности, спутник Титан — подходящее место для существования простых органических соединений. Это касается как восстановительной атмосферы, так и твердой поверхности, на которой сложные молекулы могут образовываться и накапливаться.

Вследствие многих различий в условиях, существующих на объектах внутренней и внешней областей солнечной системы, ожидается, что в атмосферах и на поверхностях планет разных групп осуществляются совершенно разные процессы. Для разработки гипотез об этих процессах необходимо хорошее понимание возможных условий на планетах и спутниках.

В данной главе приводятся имеющиеся сведения о внешней области солнечной системы по данным на середину 1974 г. с целью обеспечения ученых руководством для изучения этой области¹. В главе рассмотрены только данные наблюдений и их прямая интерпретация. Сведения более умозрительного характера ограничены литературными ссылками.

¹ Систематическое изложение вопросов, затронутых в этой главе, на русском языке можно найти в книге: В. И. Мороз. Физика планет. М., «Наука», 1967. — *Прим. ред.*

Таблица 1. Физические характеристики

Параметр ¹	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
Обратная масса ² [133]	1047,357	3498,1	22 759	19 332	3 000 000
Средняя ошибка определения массы ³ [133]	±0,005	±0,4	±87	±27	±500 000
Масса (масса Земли=1) ^{2,4}	317,89	95,18	14,63	17,22	0,11
Масса ^{2,5} , кг	$1,8989 \cdot 10^{27}$	$5,6854 \cdot 10^{26}$	$8,739 \cdot 10^{25}$	$1,029 \cdot 10^{26}$	$6,6 \cdot 10^{23}$
Экваториальный радиус, км	71 600 [224]	60 000 [125]	25 900 [108]	24 750 [157] ⁶	~3200 ⁷
Экваториальный радиус (радиус Земли=1) ⁸	11,23	9,41	4,06	3,88	~0,5 ⁷
Сжатие ⁹	1/16,7 [224]	1/9,3 [125]	1/100 [108]	1/38,6 [157]	Неизвестно
Средняя плотность ¹⁰ , г/см ³	1,314	0,704	1,21	1,67	~4,9 ⁷
Сила тяжести на поверхности на экваторе ¹¹ , м/сек ²	22,88	9,05	7,77	11,00	~4,3
Скорость убегания на экваторе ¹² , км/сек	59,5	35,6	21,22	23,6	~5,3

¹ В случае, если один и тот же источник использовался для всех пяти планет, его номер дается в этом столбце. Во всех других случаях он приводится после величины параметра. Дополнительная информация указана в примечаниях.

² Включена масса системы спутников и атмосферы.

³ Средняя ошибка из уклонений от групповых средних; группы образованы по результатам, полученным общим методом. Для Плутона дается только оценка.

⁴ При вычислении использовано значение 328900,12 для обратной массы системы Земля — Луна и 81,3025 — для отношения их масс [133].

⁵ При вычислении использованы приведенные выше данные, $G=6,673 \cdot 10^{-20}$ км³/сек²·кг и $GM_{\odot}=1,327125 \cdot 10^{11}$ км³/сек² [324].

⁶ Улучшенный анализ по кривой блесна [493] приводит к большей шкале высот для атмосферы Нептуна. Это должно уменьшить радиус (до оптической глубины единица) на ~200 км. Никаких изменений не было внесено вследствие сравнимости неопределенностей в нескольких величинах.

⁷ См. обсуждение в разделе «Плутон».

⁸ Вычислено при $R_2 = 6378,160$ км [324].

⁹ Сжатие или оптическое уплощение определяется как $(R_{\text{экв}} - R_{\text{пол}})/R_{\text{экв}}$.

¹⁰ Вычислено для сферидов вращения.

¹¹ Включая член, вызываемый центробежной силой, $g_3 = 9,78$ м/сек² на экваторе.

¹² Вклад за счет вращения не включен.

Акцент делается на планеты и большие спутники, которые, вероятно, представляют наибольший биологический интерес; кометы, малые планеты и малые спутники также будут рассмотрены, но менее подробно.

В табл. 1 и 2 представлены основные физические характеристики и элементарные фотометрические сведения для пяти внешних планет. При использовании таблиц следует иметь в виду, что некоторые из приведенных данных все еще очень неопределенны, особенно для трех дальних планет. Неопределенности обычно отмечены в таблицах и там, где это важно, более детально обсуждены в основном тексте главы. Точные определения специальных терминов, в частности фотометрических, можно найти в специальных словарях². Объяснение некоторых тер-

минов атмосферной физики будет дано в первом разделе («Юпитер») и общепринятых — по ходу изложений. В табл. 3 приведена важная информация о движении планет. Многие величины, содержащиеся в ней, известны с более высокой точностью, чем даны в таблице. Точные значения можно найти в оригинальных работах. Здесь мы стремились включить сведения, достаточные для большинства расчетов по физической планетологии, а не для исследований в области небесной механики.

ЮПИТЕР

Юпитер — наибольшая и ближайшая, а следовательно, наиболее изученная из планет-гигантов. После пролета 4 декабря 1973 г. «Пионера-10» Юпитер стал первой планетой-гигантом, изученной с космического аппарата с близких расстояний. И все же наши знания о Юпитере далеко отстают от знаний о Марсе и Венере. В ближайшее десятилетие планируется его интенсивное исследование.

² См., например, книги: В. В. Шаронов. Природа планет. М., Гостехиздат, 1958; П. Г. Куликовский. Справочник астронома-любителя. М., Физматгиз, 1973; Физические характеристики планет-гигантов. Под ред. В. Г. Тейфеля. Алма-Ата, «Наука», 1971. — Прим. ред.

Таблица 2. Фотометрические данные

Параметр ¹	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
Звездная величина в средней оппозиции V_0 [199]	-2,55	0,75	5,52	7,84	14,90 ³
Средняя поверхностная яркость в нулевой фазе ² , V , mag/(сек. дуги) ²	5,6	6,9	8,2	9,6	~13,2
Средняя поверхностная яркость в нулевой фазе (Земля=1)	$3,98 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$3,63 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$\sim 3,6 \cdot 10^{-7}$
Показатель цвета ³ $B - V$ [199]	0,83	1,04	0,56	0,41	0,80
Болометрическое альбедо Бонда, A	0,45 [457]	0,61 [496]	0,33 [533] ⁵	0,33 ⁶	0,14 ⁷
Рассчитанная эффективная температура ⁴ , °K	105	71	57	45	42 ⁸

¹ Фотометрические данные приведены в широко распространенной фотометрической системе UBV. Широкие полосы пропускания этой системы разработаны для звездных исследований, но полоса V неплохо соответствует чувствительности невооруженного глаза. Детальные фотометрические свойства даются также в основном тексте по данным современной узкополосной фотометрии. Терминология определена в словаре.

² Вычислена по величине V и данным табл. 1 и 3.

³ Показатель цвета Солнца 0,63 [199].

⁴ Вычислено по A , данным табл. 1 и 3 и значению солнечной постоянной 1353 Вт/м^2 . Приводимая температура — эффективная температура, которую должна была бы иметь каждая планета, если бы солнечный свет был единственным источником энергии.

⁵ Оригинальное значение относится к радиусу, приведенному в табл. 1.

⁶ Оценка дана в соответствии с подразделом «Видимая поверхность» разделов «Уран» и «Нептун».

⁷ Это значение, определенное Харрисом [199] для визуального альбедо. Принято, что фазовый интеграл равен марсианскому, а радиус — 0,45 земного.

⁸ Это эффективная температура быстро вращающегося тела с описанными свойствами (с большой неопределенностью). Плутон вращается достаточно медленно, так что можно ожидать большого различия между дневной и ночной температурами. Эффективная температура невращающегося тела должна быть $50\frac{1}{2}$ °K.

⁹ Андерсон и Фикс [21] показали наличие долгопериодического изменения средней величины. Они нашли величину 15^{m}_{07} для 1972 г. при нулевой фазе. См. дискуссию в разделе «Плутон».

Таблица 3. Небесно-механические данные

Параметр	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
Среднее гелиоцентрическое расстояние ¹ , а. е. [344]	5,203	9,539	19,182	30,058	39,439
Эксцентриситет орбиты ¹ [344]	0,0484	0,0557	0,0472	0,0086	0,2502
Наклонение орбиты [344]	1°48'	2°29'	0°46'	1°46'	17°10'
Сидерический период ² [344]	11,862	29,458	84,013	164,793	247,686
Средняя орбитальная скорость, км/сек [403]	13,06	9,65	6,80	5,43	4,74
Орбитальный момент количества движения (вычисленный), кг·км ² /сек	$1,929 \cdot 10^{37}$	$7,813 \cdot 10^{36}$	$1,700 \cdot 10^{36}$	$2,514 \cdot 10^{36}$	$\sim 1,8 \cdot 10^{34}$
Наклонение экватора к орбите, град	3,07 [372]	26,74 [372]	97,93 [372]	28,80 [372]	≥ 50 [21]
Период вращения	См. прим. ⁴	См. прим. ⁵	10,8 час [332] ³	15,8 час [331] ³	6,3874 суток [345]

¹ Средние элементы для эпохи 1,5 января 1960 г. (ET).

² Тропические годы.

³ Эти периоды известны приближенно (см. разделы «Уран»,

«Нептун», «Видимая поверхность»).

⁴ См. раздел «Юпитер», «Видимая поверхность».

⁵ См. раздел «Сатурн», «Видимая поверхность».

Ниже делается попытка дать обзор наших современных знаний о Юпитере и отметить очевидные пробелы в фундаментальных сведениях и наших представлениях.

Атмосфера

Исторические и общие сведения

По-видимому, первым темные полосы спектра Юпитера обнаружили Секки (1863 г.). В начале нашего столетия эти полосы с некоторыми деталями сфотографировал Слайфер. В начале 30-х годов XX столетия Вилдт предположил, а Данхем подтвердил, что они связаны с присутствием метана и аммиака. Первые измерения температуры планет были сделаны в середине 20-х годов нашего столетия Мензелом, Кобленцом и Лампландом на Лоуэлловской обсерватории и Петтитом и Никольсоном на обсерватории Маунт-Вилсон, использовавшими вакуумные термометры. Они показали, что Юпитер — определенно холодное тело, на что указывал в 1923 г. Джеффрис, исходя из теоретических соображений. Модельные исследования, аналогичные современной работе Запольского и Салпетера [535], показали, что масса Юпитера должна в основном состоять из водорода и гелия, так как никакие другие вещества не имеют достаточно малой плотности при низких температурах, чтобы можно было объяснить наблюдаемую среднюю плотность. В 1952 г. Баум и Код [39] на основании фотоэлектрических наблюдений покрытия звезды σ Овна получили, что для юпитерианской атмосферы средний молекулярный вес равен 3,3. Хотя, как показали недавние исследования, применение метода с использованием кривой Баума и Кода может дать большие ошибки [505], основной вывод Баума и Кода о том, что атмосфера Юпитера должна состоять главным образом из водорода и гелия, остается совершенно верным. Спектроскопически присутствие водорода обнаружили в 1960 г. Кисс и др. [253].

В классическом случае принималось, что газовую планетную атмосферу можно рассматривать как однородный прозрачный слой (если исключить чистое поглощение в отдельных дискретных длинах волн), расположенный над отражающим слоем (облака или твердая поверхность) с хорошо определяемой границей. Обилие веществ (содержание) определялось по интенсивности линий поглощения при некотором предположении о средней длине пути излучения в атмосфере. Пер-

вые юпитерианские модели Койпера [266] относились к таким моделям с отражающим слоем, так как 20 лет назад мы не располагали информацией, позволяющей строить другие модели. Многие определения обилий в атмосфере все еще опираются на это предположение, хотя известно, что в большинстве случаев это неверно.

В плотной атмосфере, особенно такой, как атмосфера Урана, весьма значительный вклад в непрозрачность атмосферы в видимом свете вносит релеевское рассеяние. Пока рассеивающие и поглощающие частицы равномерно перемешаны и свойства рассеивающих частиц не меняются с высотой и известны, проблемы распространенности и атмосферного альbedo еще вполне поддаются решению. Но в действительности такого случая не бывает. Если способный конденсироваться газ является малой составляющей в состоянии насыщенного равновесия, то оптическое рассеяние (как функция высоты) не зависит от плотности газа. В этом случае расчет спектральных линий и значения непрерывного альbedo в полученной неоднородной атмосфере требует трудоемких вычислений на больших ЭВМ. В то время как теория удовлетворяет большей части требований, связанных с прямой задачей предсказания поведения излучения, взаимодействующего с простой, статичной, одномерной (по вертикали) атмосферой с известными свойствами, то обратная задача, требующая определения характеристик атмосферы по наблюдаемому излучению, гораздо труднее. Для решения этой проблемы «атмосферного зондирования» для Юпитера необходимы сведения в широком диапазоне длин волн и для разных точек на диске. Эти данные можно получить с требуемым пространственным разрешением только путем проведения специальных экспериментов с космических аппаратов [459]. В настоящее время большая часть ведущихся работ связана с решением прямой задачи для семейства «разумных» моделей и сравнением их с данными наблюдений.

При дальнейших исследованиях встречаются трудности двух типов. Трудности первого типа, о которых упоминалось выше, связаны с неоднородностью атмосферы Юпитера (так же как и Сатурна). На этих планетах несомненно наличие полос, зон и пятен (обсуждаемых ниже), и даже ограниченная количественная информация, доступная в настоящее время, указывает на определенные вариации многих физических параметров от точки к точке на диске Юпитера. По этой

причине попытки температурного зондирования с пространственным разрешением, достижимым при наблюдениях с Земли (например, недавняя работа Оринга [349]), в лучшем случае могут дать величины, усредненные по большой площади весьма неоднородной планеты. Трудности другого типа связаны с тем, что Юпитер — динамическое тело с ясно заметными на фотографиях внешними изменениями от месяца к месяцу.

Расширение наших знаний о планетных атмосферах подобно итерационному процессу, который в конечном счете сходится к правильному ответу. Общая процедура сводится к расчету предварительных моделей, основанных на наилучших оценках состава атмосферы и температуры. Затем данные интерпретируются в свете этих моделей. В частности, на основании лучших имеющихся определений состава вычисляется непрозрачность в видимом и тепловом (инфракрасном) диапазонах, которая характеризует перенос энергии, а также делается попытка изучить энергетический баланс атмосферы и рассчитать профили температуры и давления для однородной одномерной атмосферы, находящейся в лучистом равновесии. Трефтон [467] в 1967 г. опубликовал подробности этого важного этапа в изучении четырех планет-гигантов. Пересмотр спектроскопических данных и кривых потемнения к краю с использованием улучшенных моделей подтвердил, что теория отражающего слоя недостаточна и что требуется неоднородная модель, по крайней мере для объяснения наблюдаемых изменений от центра к краю. На основе полученных уточненных одномерных моделей развиваются исследования в направлении создания реальных, трехмерных, динамических моделей Юпитера и его ионосферы. Но это уже вопросы, находящиеся на границе наших возможностей, они будут обсуждены ниже с точки зрения современного понимания планеты.

Состав

Молекулярный водород является основной составляющей юпитерианской атмосферы, его свойства изучены теоретически лучше, чем какой-либо другой нейтральной молекулы. Будучи гомополярной молекулой, H_2 не имеет обычного дипольного спектра. Дипольный момент может индуцироваться при достаточно большом давлении, однако при этом возникают широкие, с малой центральной интенсивностью линии, определить

эквивалентные ширины которых трудно. «Стратоскоп-2» [105] зарегистрировал на Юпитере только одну фундаментальную индуцированную полосу 2,4 мкм. Квадрупольный момент молекулярного водорода мал, и обилие водорода на Юпитере определено главным образом по линиям второго и третьего обертонов (3—0 и 4—0) квадрупольных вращательно-колебательных полос. Эти линии очень слабы и видны только вследствие высокого содержания водорода на Юпитере. Дополнительная трудность наблюдений возникает вследствие заметного сужения линий из-за столкновений молекул, прежде чем установится обычное расширение за счет давления. Это очень затрудняет определение формы линий, а следовательно, и давления. Правильная форма такой линии, суженная слабыми столкновениями, как считают, дается профилем Галатри [226, 238]. К сожалению, насыщение в таких линиях достигается, пока они еще очень слабы, и для получения хорошей точности определения содержания требуется наивысшее возможное разрешение. Такая работа еще продолжается. Лучшее определение обилия, имеющееся в настоящее время, дает значение около 65 км-амага³ над уровнем давления 1,7 атм [305].

Метан имеет богатый дипольный вращательно-колебательный спектр, простирающийся от 7,8 мкм далеко в видимую область. К сожалению, легко наблюдаемые высокие обертоны в видимой и ближней инфракрасной областях спектра столь сложны, что пока не изучены теоретически. Ни для одного обертона выше, чем полоса $3\nu_3$ при 1,4 мкм, не определены вращательные квантовые числа, и только K -ветвь этой полосы была проанализирована в 1968 г. Марголисом и Фоксом [303]. Лабораторные определения интенсивностей линий сделаны Бергстралом и Марголисом [54], а лоренцовских полуширин — Бергстралом [53]. Обилие метана оказалось около 45 м-амага над уровнем давления около 1,7 атм [302, 305, 225]. Независимое определение с использованием фурье-спектроскопии с усреднением по большей части диска дало значение 38 ± 8 м-амага над уровнем давления около 2 атм [299].

Аммиак также обладает богатым дипольным спектром. В недавнем исследовании

³ 1 амага — плотность газа при температуре 293° К и давлении 1 атм. Содержание каждой газовой компоненты в атмосфере планеты выражают в виде приведенной толщины слоя газа в сантиметрах, метрах или километрах при плотности 1 амага на всех уровнях в этом слое.

Мак-Бридж и Николс [318] определили колебательные квантовые числа для 42 полос. Эти авторы провели также анализ полос $5\nu_1$ аммиака около 6450 \AA [319]. Полоса $5\nu_1$ весьма сложна, многие ее характеристики блендированы, и неясно, можно ли получить точные значения содержания и температуры для Юпитера из лабораторных и наблюдательных данных. Анализ эмпирической кривой роста, проведенный Мэзоном [314], дает значение обилия 13 ± 3 м-амага и, по-видимому, является лучшим из опубликованных результатов. Обилие должно относиться к давлению около $1,7\text{--}2,0$ атм (тому же, что для метана и водорода), так как ожидается, что на этом уровне существует плотный облачный слой (см. подраздел «Строение атмосферы»). В недавнем исследовании Оринга [349] найдено гораздо более высокое содержание, что кажется несовместимым с другими определениями и с моделями, в которых принята относительная распространенность азота такой же, как на Солнце (см. [507] и подраздел «Строение атмосферы»). Этот результат может быть связан с пренебрежением влияния облаков.

Измерения тепловой температуры диска Юпитера по радиоизлучению дают сведения о распространенности аммиака как под аммиачными облаками [142, 189, 526, 120], так и над ними [187, 526]. Аммиак проявляет себя через инверсионное расщепление вращательных энергетических состояний молекулы. Эти переходы, как ожидается, служат главным источником непрозрачности в юпитерианской атмосфере. Галкис и Пойнтер [189], основываясь на наблюдаемом температурном спектре (см. следующий подраздел), определили относительную концентрацию аммиака $\sim 1,5 \cdot 10^{-4}$ ниже облаков. Указанное значение близко к ожидаемому для атмосферы, распространенность элементов в которой соответствует Солнцу [282]. Это поддерживает точку зрения о том, что юпитерианская атмосфера состоит из вещества первичной солнечной туманности.

Обнаружить гелий на холодном теле путем прямых спектроскопических наблюдений с поверхности Земли невозможно, это очень трудно сделать и с искусственных спутников Земли. «Традиционно» принималось, что распространенность гелия на Юпитере близка к солнечной. Первым прямым свидетельством его присутствия (по данным наблюдений) было обнаружение резонансной линии 584 \AA интенсивностью $10\text{--}20$ релей с «Пионера-10» [244]. К сожалению, из этих изме-

рений нельзя непосредственно определить обилие в глубокой атмосфере. Тем не менее совсем недавно были получены два грубых значения обилий для области ниже турбопаузы. Исследования многоцветных кривых блеска, полученные при покрытии Юпитером звезды β Скорпиона, позволили Сагану и др. [409] определить долю гелия — $0,16^{+0,19}_{-0,16}$ (по числу частиц). На Солнце величина отношения $\text{He} : (\text{H}_2 + \text{He}) \approx 0,12$ [80]. Долю гелия можно также определить по влиянию давления гелия на вращательный и трансляционный спектр H_2 в далекой инфракрасной области спектра [228]. Таким образом, эксперимент с инфракрасным радиометром на «Пионере-10» определенно показал присутствие гелия, причем предварительные отношения $\text{He} : \text{H}_2$ составляют $0,6$ в южной экваториальной полосе и $0,8$ в южной тропической зоне [94]. Пока не получены более полные экспериментальные данные и не проведен анализ их ошибок, представляется целесообразным продолжать использовать величину на Солнце ~ 9 км-амага, что соответствует относительному обилию гелия.

Недавно с помощью фурье-спектрометра, установленного на 150-сантиметровом солнечном телескопе обсерватории Мак-Мас, Риджуэй [395] идентифицировал три новые молекулы. По имеющимся данным он получил предварительные оценки количества этана (C_2H_6) — 10 см-амага и ацетилена (C_2H_2) — $0,2$ см-амага [395]. Он также обнаружил фосфин (PH_3) с весьма приближенной оценкой $0,9$ см-амага [396]. Наличие таких неравновесных соединений, как C_2H_6 , C_2H_2 и PH_3 , в указанных количествах подкрепляет мнение о возможности присутствия более сложных органических соединений.

На Юпитере обнаружены два изотопа. Бир и Тейлор [42] в спектрах Фурье для области $4,65 \text{ мкм}$ нашли CH_3D в количестве $1,3 \pm 0,3$ см-амага. Допуская фракционирование дейтерия, они получили отношение $\text{D} : \text{H} = 4,8 \cdot 10^{-5}$ с ошибкой грубо $\pm 50\%$ [42]. Их результаты в некоторой степени зависят от модели, которая является источником большей части возможной ошибки. Фокс и др. [153] сообщили о возможном обнаружении на Юпитере $^{13}\text{CH}_4$ с отношением распространенностей $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C} = 110 \pm 35$.

Все обилия, приведенные выше, представляют собой некоторого рода усредненные (как во времени, так и в пространстве) значения. Полученные данные всегда пытались привести к длине пути в газе при давлении в одну атмосферу. Данные о среднем потем-

нении к краю будут рассмотрены в подразделе «Видимая поверхность». Однако в целом ряде докладов на последнем (1974 г.) годичном собрании Отдела планетарных наук Американского астрономического общества даны свидетельства о дополнительных пространственных и временных изменениях интенсивности различных компонент юпитерианской атмосферы. Например, сообщалось [481] об изменении интенсивности линии $H_2\ 3-0\ S(1)$ на 40% в течение недели. Пока причины таких вариаций не поняты и не описаны, ко всем данным о распространенностях надо подходить с осторожностью.

Несколько исследований Юпитера в ультрафиолетовых лучах было проведено при помощи ракет и спутников. В ряде случаев наблюдалась эмиссия линии Лайман- α (1216 Å). В недавнем ракетном исследовании Ротман и др. [402] нашли яркость диска в этой линии 4,4 килорелей, тогда как, например, по данным «Пионера-10» она составила 1 килорелей [244]. Различия могут отражать реальные временные изменения или быть в случае ракетного эксперимента обусловлены влиянием яркого водородного тора на орбите Ио (см. раздел «Спутники Юпитера»). В этих и других спектрах наблюдаются и иные детали (см., например, Дженкинс [240]), но из-за низкого разрешения отождествление их остается неопределенным.

Таблица 4. Верхние пределы содержания необнаруженных в юпитерианской атмосфере газов

Газ	Длина волны, мкм	Верхний предел обилия, см. атм	Источник
C_2H_4 (этилен)	10,5	0,5	[168]
	5,3	5	[168]
	0,8715	200	[357]
CH_3NH_2 (метиламин)	12,8	0,05	[168]
	1,52	2	[104]
	1,0325	300	[357]
	14	1	[168]
HCN (цианид водорода)	4,75	70	[168]
	1,53	5	[104]
	1,0385	200	[357]
	4,7	2	[168]
C_2N_2 (дианоген)	8,0	300	[168]
H_2S (сероводород)	1,58	25	[104]
	10,22	0,08	[18]
	10,5	1	[168]
SiH_4 (силан)	0,9738	2000	[357]

Спектроскопические исследования дали оценки верхних пределов для других соединений в юпитерианской атмосфере. Пределы зависят от длины волны молекулярной полосы, так же как от их собственной интенсивности, вследствие того, что атмосфера Юпитера гораздо более прозрачна в некоторых областях (например, около 5 мкм), чем в других. В табл. 4 приводятся несколько значений верхних пределов, соответствующих разным спектральным областям.

Несколько исследователей провели на больших ЭВМ вычисления вероятного молекулярного состава юпитерианской атмосферы в предположении термодинамического химического равновесия. Начав с космических распространенностей, Льюис [282] показал, что при температурах от точки замерзания воды до температур выше 1000° К фактически весь кислород содержится в молекулах H_2O , весь углерод — в CH_4 , весь азот — в NH_3 , вся сера — в H_2S . При более низких температурах H_2O замерзает, H_2S удаляется путем образования облаков NH_4SH [507]. Такие молекулы, как PH_3 , C_2H_2 и C_2H_6 , — определены неравновесные соединения. Это указывает на существование динамических процессов.

Температура

В середине 60-х годов были существенно усовершенствованы приемники среднего и дальнего инфракрасного излучения, в то же самое время была повышена чувствительность радиотелескопов в миллиметровом диапазоне, что позволило практически изучать Юпитер в этих диапазонах. Температуры на длинах волн короче 1 мм приведены в табл. 5 двумя группами: яркостные температуры диска и температуры подсолнечной точки (температуры абсолютно черного тела) по тепловым картам.

Тепловое радиоизлучение Юпитера сперва было обнаружено в 1956—1957 гг. на волне 3,15 см [317]. Эти ранние наблюдения дали температуру $145 \pm 26^\circ K$, совместимую с оценкой равновесной температуры Юпитера и данными измерений в инфракрасной области спектра. Последующие наблюдения Юпитера на более длинных волнах показали быстрый рост температуры с увеличением длины волны. Драйк [130] предположил, что длинноволновое излучение генерируется высокоэнергичными электронами, захваченными магнитным полем Юпитера в областях, подобных радиационным поясам, существующим вокруг Земли. Позднее это было под-

Таблица 5. Яркостные температуры Юпитера (до 1 мм)

Длина волны, мкм	Яркостная температура диска, °K	Источник	Примечание
7,5—8,2	140	[168]	В полосе ν_4 CH ₄ . Покрыто 65% диска
9,2—12,0	127	[168]	В полосе ν_2 NH ₃ . Покрыто 65% диска
30—45	136±1	[24]	При калибровке принято, что Марс излучает как абсолютно черное тело с температурой 235° K
45—80	150±5	[24]	То же
65—110	153±7	[24]	»
30—300	133±1	[24]	»
1,5—350	134±4	[31]	Калибровка по звездам

Длина волны, мкм	Температура подсолнечной точки, °K	Источник	Примечание
5	См. примеч.	[509, 246, 360]	Излучение главным образом дискретных источников с температурой, вероятно, ~300° K
7,9	» »	[170]	Только кривая потемнения к краю, нормализованная к центру диска, $\Delta\lambda/\lambda \sim 0,015$
8,4	» »	[170]	То же
8,2—9,2	130—135	[508]	Коррелирует с деталями поверхности. Значения для полос выше, чем для зон
8—14	129	[517]	Приведена средняя температура за 5 ночей. Отдельные значения даны в источнике
17,5—25	150?	[168, 289]	Лоу сообщает о вариациях во времени и по диску, подробности не опубликованы
14—25	126	[94]	Данные «Пионера-10» для южной экваториальной полосы
28—40	123	[292]	Калибровка по α Boo и α Her. Юпитер наблюдался при большой воздушной массе
30—55	145	[94]	Данные «Пионера-10» для южной тропической зоны

тверждено наблюдениями. Известно, что тепловое излучение атмосферы Юпитера и излучение радиационных поясов (синхротронное) вносят одинаковый вклад в общее излучение Юпитера на длинах волн около 7 см. Присутствие синхротронной компоненты затрудняет точные измерения теплового спектра планеты. Попытки разделить излучение диска от нетеплового были сделаны с помощью радиоинтерферометрической аппаратуры и путем введения некоторых предположений о поляризационных свойствах синхротронного излучения. Из двух методов разделения интерферометрический более надежен, однако этим методом сделано немного измерений. Берге [46, 47], Бренсон [69] и Олсен⁴ использовали интерферометрический метод для определения атмосферной эмиссии на длинах волн от 2 до 21 см. Для определения теплового спектра в области

от нескольких миллиметров до 21 см Дикель [120] сопоставил свои поляризметрические наблюдения Юпитера с интерферометрическими данными и результатами моделирования атмосферы. Полученный в итоге спектр Юпитера показан на рис. 1. Ссылки на данные, использованные при построении рисунка, можно найти в статьях [346, 485, 184]. Наблюдаемый спектр (после исключения синхротронного излучения) поднимается от значения около 140° K на 1,25 см до более 350° K на 21 см. В общепринятой интерпретации спектра это связывается с глубокой конвективной атмосферой, в которой в качестве малой составляющей присутствует аммиак, являющийся главным источником непрозрачности в радиодиапазоне.

Существует много определенных вращательных температур Юпитера. Так как атмосфера неадиабатична, полученные таким путем температуры являются, очевидно, некоторым видом средневзвешенного по по-

⁴ Частное сообщение.

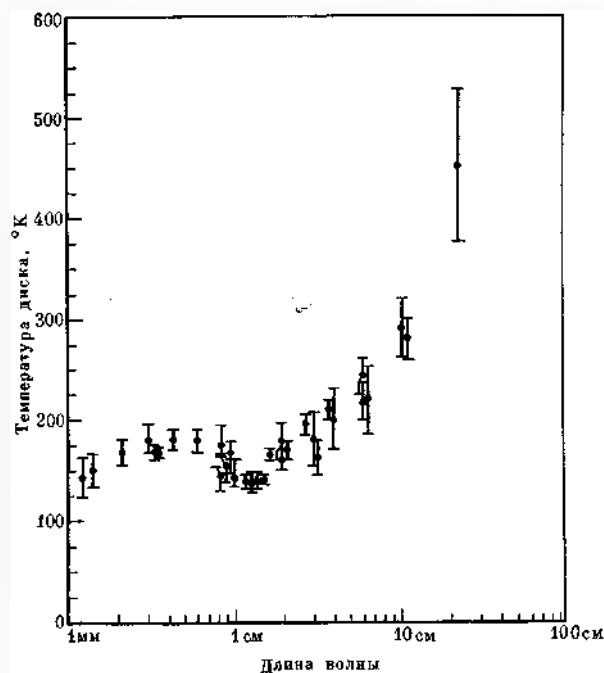


Рис. 1. Микроволновый спектр излучения диска Юпитера

глошающей области. Для определения в вертикально неоднородной модели атмосферы подходящего весового фактора часто применяют аппроксимацию Кертиса — Годсона, так что модель можно непосредственно сравнивать с наблюдениями. Эта процедура полезна даже для суженных столкновениями линий квадрупольного спектра H_2 [305]. В применении к Юпитеру, однако, должны быть приняты во внимание эффекты рассеяния и поглощения в облачных слоях, которые также должны быть промоделированы. Марголис [302] показал, что пока наблюдения строго ограничены центром диска, для определения температуры, давления и обилия можно использовать простую модель отражающего слоя. Это очевидно, так как верхний облачный слой сильно рассеивает излучение вперед и имеет умеренную оптическую толщину для инфракрасных лучей, тогда как второй облачный слой очень плотен и ведет себя как отражающий слой [305]. Для объяснения изменений от центра к краю требуется рассмотрение неоднородной атмосферы. Поэтому большая часть опубликованных вращательных температур имеет малую количественную ценность, так как они включают данные по всему диску. Тем не менее может быть установлено, что температура

на втором (главном) облачном слое должна быть выше любой из измеренных вращательных температур, а некоторые из них $\geq 180^\circ K$ [361, 304].

Даниэльсон [105] нашел, что ширина индуцированной давлением фундаментальной полосы H_2 соответствует температуре 200—225° K. Так как поглощение в таких полосах меняется пропорционально квадрату плотности, то эта температура должна относиться к хорошо определяемому уровню близ главного облачного слоя.

Смысл всех измерений температур будет более ясен с точки зрения моделей, обсуждаемых ниже в этом разделе.

Видимая поверхность

Облака. Даже в малые телескопы видно, что поверхность Юпитера состоит из перемежающихся светлых «зон» и темных «полос», причем первые имеют в общем беловатый или желтоватый цвет, а последние — чаще коричневатый или красноватый. Лучшие фотографии, полученные с Земли, и фотографии с «Пионера-10» показывают сложную картину пятен, фестонов, перьев и волн [151]. Местами выделяются серые, голубые, черные цвета. Общее впечатление — пастель, хотя отдельные области могут иметь значительное насыщение цвета.

В течение многих лет было известно, что облака на Юпитере — это перистые облака, состоящие из мелких частиц замерзшего аммиака. Как будет показано в разделе «Строение атмосферы», действительно, должен существовать слой аммиачных перистых облаков, но согласно недавним исследованиям он должен быть довольно разреженным. На более длинных волнах, по крайней мере в центре диска, через эти облака и прозрачную область под ними можно видеть второй, более существенный слой, который, вероятно, состоит из частиц гидросульфида аммония.

Источник окраски и причина полосатого вида Юпитера не известны в каких-либо деталях. Существует несколько гипотез о цвете. Например, Оуэн и Мэзон [359] предполагают, что доминирующий желтоватый цвет может быть вызван небольшой примесью $(NH_4)_2S$ в облачном слое, состоящем из NH_4SH . Льюис и Принн [286] добавили к этому предположение о присутствии $(NH_4)_2S_x$ или элементарной серы. Детальное изучение Принном [377] переноса ультрафиолетового

⁵ Иногда называемых также поясами. — Прим. ред.

($\lambda \leq 2700 \text{ \AA}$) излучения и фотолитиз⁶ в юпитерианской атмосфере показывает, что часть излучения с длиной волны больше 1600 \AA должна проникать через атмосферу к облакам и может вызвать фотолитиз NH_3 и H_2S . Он указывает, что так начинается цепь реакций, в результате которых может быть выморожен окрашенный материал, упомянутый выше. Саган и Харе [408, 251] сообщили о лабораторных экспериментах, в которых различные смеси CH_4 , C_2H_6 , H_2S и жидкой H_2O облучались ртутным излучением на 2537 или 2537 и 1849 \AA . Продукты реакций включают красновато-коричневый полимер с высоким молекулярным весом и различные аминокислоты. Другим неравновесным процессом, который может приводить к появлению сложных органических соединений, является электрический разряд. Поннамперума и его сотрудники [524, 87, 329] изучили продукты электрических разрядов в смеси CH_4 и NH_3 . Среди летучих продуктов были найдены водород и азот, а также HCN и различные нитрилы. Это важно для биологии, так как гидролиз нитрилов приводит к аминокислотам. Образовался также красноватый нелетучий продукт реакции, который при гидролизе превращается в несколько аминок- и иминокислот. Если юпитерианская атмосфера — конвективная до больших глубин, на что указывают радионаблюдения, то тогда под влиянием высоких температур должны разрушаться любые сложные органические молекулы. Возможно ли установившееся состояние с достаточно быстрым воспроизводством путей фотолитиза и/или разряда, чтобы сохранить заметные их количества, зависит от ряда совершенно неизвестных факторов. Распространенные десятилетия назад идеи о том, что цвета вызваны радикалами или растворами натрия в аммиаке, были оставлены, когда структура атмосферы Юпитера стала известна лучше.

Детальная структура и движения облаков на Юпитере — прямые доказательства его сложной динамической природы. Хотя чередующиеся темные полосы и светлые зоны, параллельные экватору, сохраняются, сложные явления происходят, в особенности на краях полос. Огромное количество сведений о внешнем виде Юпитера в течение длительного времени было собрано Пиком [364]; его книга должна быть принята во внимание при разработке стандартной номенклатуры для видимой поверхности. Информация о периодах вращения в отдельных полосах и зонах

была собрана Чепменом [89], Ризе [386] и Инге [229]. Эти данные, например, показывают, что с 1917 г. северный умеренный поток на южном краю северной умеренной полосы вращался даже быстрее, чем экваториальная полоса. За прошедшие годы было сделано много попыток связать активность в юпитерианских облачных полосах или Большом Красном пятне (см. ниже), определенную разными способами, с солнечной активностью. В качестве примеров недавних работ можно назвать следующие: положительное заключение получено в [32], отрицательное — в [149], на возможность существования такой зависимости указывается в [33, 379, 380].

Неизвестно даже, какие детали — пояса⁷ или зоны — расположены в атмосфере выше. Существует общее мнение, что верхнее облачное покрытие, очевидно, неоднородно. Тейфель [462] обнаружил большее поглощение в полосе метана $\lambda 6490$ над поясами, а Оуэн и Уэстфал [360] нашли даже в более сильной полосе метана $\lambda 8940$ меньшее поглощение над поясами. Наиболее горячие пятна находятся в поясах, причем локальные голубые или темные пятна показывают температуру 300°K или больше [509]. Это могут быть дыры, где излучение легко выходит из более глубоких областей. Карты температур, определенных по микронному излучению, по-видимому, указывают на более высокую температуру поясов (по отношению к зонам) даже там, где нет горячих пятен. Это может указывать на более глубокое расположение поясов по сравнению со светлыми окрашенными зонами. Происхождение поясов — сложная гидродинамическая проблема (см., например, [479, 450, 212, 164]), и даже эмпирическое описание их физических деталей все еще неполно.

Вращение. Одна из интересных проблем юпитерианской атмосферы состоит в том, что облака, образующие видимую поверхность, вращаются как две довольно различные системы. Точки в пределах около 10° от экватора образуют систему I, стандартный меридиан которой вращается с периодом $9^{\text{h}}50^{\text{m}}30^{\text{s}},003$. Точки, лежащие далее 10° от экватора в обеих полусферах, образуют систему II, стандартный меридиан которой вращается с периодом $9^{\text{h}}55^{\text{m}}40^{\text{s}},632$ [364]. Движение облаков относительно стандартных меридианов

⁷ Во избежание путаницы с полосами спектра поглощения видимые темные полосы поверхности Юпитера здесь названы поясами. — *Прим. ред.*

⁶ Фотохимическая диссоциация. — *Прим. ред.*

нов не позволяет сделать уверенный выбор периода, так как для отсчета нужен некоторый точный репер, указанные же числа имеют историческое значение. Так называемая экваториальная струя, которая входит в состав системы I, была особой метеорологической проблемой. Она вращается быстрее, чем любая другая часть видимой поверхности (исключая небольшое северное умеренное течение), и, очевидно, быстрее, чем тело Юпитера (система III).

Трудно определить «истинный период вращения», если у тела нет твердой поверхности для отсчета, а Юпитер может и не иметь такой поверхности (см. раздел «Строение недр»). Наиболее вероятное значение периода системы III основано на исследованиях в дециметровом и декаметровом диапазонах и равно $9^h55^m29^s,75 \pm 0^s,04$ [84]. Если окажется, что Юпитер всюду жидкий, концепцию «среднего» периода вращения (или вращения «тела») будет трудно определить и она будет мало полезна.

Большое Красное пятно. Наиболее выдающейся деталью видимой поверхности является знаменитое Красное пятно. Вытянутая область достигала примерно 38 500 км в длину и 13 800 км в ширину в 80-е годы прошлого века, когда она имела наибольшие размеры [385]. Большое Красное пятно, вероятно, было обнаружено 300 лет тому назад и определенно замечено при наблюдениях, сделанных более 120 лет назад [364]. Пятно стало особенно знаменитым в период 1879—1882 гг., когда его цвет стал очень интенсивным. С тех пор его видимость и цвет то ослабевали, то усиливались и, хотя цвет временами полностью исчезал, положение пятна, так называемая полость Красного пятна, всегда было ясным. Красное пятно, например, было очень заметно в течение 1962 и 1963 гг. и оставалось вполне «здоровым» в 1965 г. Оно начало слабеть в 1966 г., и в феврале 1968 г. было крайне слабым. Затем пятно внезапно начало усиливаться и скоро вернулось к своему прежнему виду, как четыре года назад [385, 387, 438—440, 391]. Это можно видеть по изоденситометрическим данным Баноса и Алиссандракиса [34]. В течение 1969 г. средние размеры пятна были около $28\,200\text{ км} \times 13\,700\text{ км}$ [385].

Замечательной чертой пятна является то, что оно оказывается не связанным жестко с какой-либо фиксированной поверхностью, а странствует по диску. В течение прошлого столетия оно сместилось по долготе на 1200° (смещение относительно среднего движения

Юпитера, которое преуменьшает движение Красного пятна). Наблюдаются многочисленные короткопериодические колебания относительно этого постоянного движения. Солберг [439] нашел трехмесячную периодичность в этих меньших «прогулках». Результаты за семь последовательных лет дают колебания со средней амплитудой $0^\circ,8$ и периодом $89,89 \pm 0,11$ суток [385]. Циркулирующее течение имело в это время период вращения около 90 суток относительно системы II и, может быть, заставляло колебаться Красное пятно. В то же время широта центра пятна остается, как всегда, приблизительно постоянной. В течение 1968—1969 гг. ее среднее значение было $-22^\circ,25 \pm 0^\circ,03$ и всегда оставалось в пределах между $-22^\circ,0$ и $-22^\circ,5$ [385]. Новые данные для 1969—1971 гг. сообщил Ризе [387, 389].

Интересно, что по измерениям на 5 и 8—14 мкм Красное пятно оказалось холоднее его окрестностей [246, 516]. Это согласуется с несколькими наблюдениями, которые показывают меньшее поглощение над ним [359, 333, 61] и наводит на мысль о его проникновении до высокого атмосферного уровня.

В январе 1966 г. небольшое темное пятно, двигавшееся вдоль северного края южного умеренного пояса, приблизилось к Красному пятну, начало двигаться вокруг его южной стороны и совершило вокруг него почти $1\frac{1}{2}$ оборота, прежде чем исчезло [390]. Период обращения составлял 9 суток. В следующем году четыре других темных пятна, из которых по крайней мере два пришли из южного экваториального пояса, обнаружили сходное поведение, хотя видны они были лишь на части оборота вокруг Красного пятна. Периоды обращения этих пятен составляли 12 суток. Ринс и Смит [390], сообщившие об этих интересных наблюдениях, предполагают, что, вероятно, в движение вовлекалось вещество на разных атмосферных уровнях.

Прежние гипотезы о природе Красного пятна были вариациями на тему твердого острова, плавающего в плотной атмосфере [364]. Расширение знаний о физических условиях в атмосфере Юпитера, однако, лишило такие гипотезы оснований [405]. Никакое известное вещество не может быть твердым и иметь более высокую плотность, чем плотность юпитерианской атмосферы, при температурах и давлениях, которые, как считается, существуют там. Если плавающий объект имеет достаточную вертикальную протяженность и достигает глубины, где вследствие

ние фазовых изменений образуется уровень, на котором может плавать объект, то он должен быть почти определенно разорван напряжениями на высотах, соответствующих давлению 0,1—10 Мбар [213]. Кроме того, объект, плавающий в среде с разрывом плотности, должен стремиться смещаться по широте (в направлении экватора) под действием силы Этвеша [405].

В 1961 г. Хайд [207, 208] предположил, что Красное пятно могло бы быть верхним концом столба Тейлора — стоячего столба жидкости, создаваемого двумерным атмосферным потоком, который не может преодолеть топографическую деталь. Крупномасштабное движение по долготе приписывается действительному изменению периода вращения мантии Юпитера, вызываемому гидродинамическими движениями в ядре [207]. Конечно, если у Юпитера нет твердой поверхности, то, чтобы спасти столбы Тейлора, понадобятся привлекаемые дополнительные явления, например магнитные пекли или верхние концы внутренних конвективных ячеек. Смолуховский [434] предположил, что топографические образования, которые приводят к созданию столба Тейлора, могли бы быть почти чистым твердым водородом, плавающим в жидком водороде, обогащенном гелием. Но здесь все еще остается вопрос объяснения неизменности широты пятна. Гипотеза столба Тейлора встречается также с гидродинамическими трудностями. «Первоначально» понятие столба Тейлора появилось в результате применения теоремы Тейлора — Прудмана к однородной жидкости. Такие столбы создавались в лаборатории [213]. Они оказываются полностью стоячими, в них отсутствуют вихри или обмен с окрестностями. Возникает вопрос, может ли возникнуть подобная структура в реальной бароклинной атмосфере, имея, возможно, некоторый обмен с окружающей средой. Хайд [211] считает это вероятным. Стоун и Бэйкер [451], так же как Саган [406] и Койпер [270, 271], полагают это невозможным. Кстати, здесь возникает семантический вопрос, следует ли называть эту структуру «столбом Тейлора», даже если она существует? Сам Хайд [209, 211] продолжает исследование проблемы, несмотря на то что его гипотеза рассматривается с осторожностью.

Голицын [175] предполагает, что характерный период больших изменений юпитерианской циркуляции может составлять $3 \cdot 10^5$ лет или более и поэтому Красное пятно может быть просто «большим долгоживущим

вихрем». Стрит и др. [453] изучили гипотезу Красного пятна, называемую «Cartesian diver», согласно которой обогащенная твердым водородом масса находится глубоко в атмосфере в состоянии нейтральной плавучести в стратифицированной жидкой смеси водорода и гелия. Она изменяет вид поверхности, вероятно, вследствие воздействия на атмосферную конвекцию или даже образования столба Тейлора. Койпер [271] изучил модель «упорядоченной кумулятивной конвекции» для Красного пятна и привел убедительные аргументы в ее пользу. Мак-Ворти [316], однако, нашел значительные недостатки в его описании динамики.

В настоящее время Большое Красное пятно Юпитера — очаровывающий загадочный объект, уникальный по своим размерам и устойчивости среди атмосферных явлений в солнечной системе. Пока более надежные количественные сведения о динамике юпитерианской атмосферы не будут получены, оно будет оставаться одной из наиболее интригующих загадок солнечной системы.

Фотометрические свойства. Получение фотометрических данных о Юпитере — непростая задача. Сложное атмосферное поглощение и рассеяние приводят к быстрому изменению фотометрических свойств с изменением длины волны. Большая скорость вращения ограничивает время для подробных исследований, а вековые изменения видимой поверхности меняют даже интегральные свойства диска, так же как и свойства деталей. Наконец, при наблюдениях с Земли фазовый угол Юпитера никогда не превышает 12° , так что невозможно измерить функцию фазы, фазовый интеграл или полную фотометрическую функцию.

Звездная величина Юпитера, приведенная к расстоянию в средней оппозиции, в разных оппозициях с 1862 г. менялась в пределах свыше $0^m,45$ [199]. Представленное в табл. 2 значение является средним из них; в 1963—1965 гг., например [530], действительное значение было $V_0 = -2^m,70$, т. е. на $0^m,15$ ярче. Харрис [199] полагает, что для визуальных данных при малых углах фазы для фазового коэффициента подходит значение $0,005$ $m/град$. Это означает, что текущие наблюдения будут всегда нужны тем, кому необходимы наилучшие возможные фотометрические данные.

Группа, связанная с Гарвардской обсерваторией, провела в 1962—1965 гг. в Южной Франции и Южной Африке обширную фотометрию Юпитера и Сатурна [235, 236]. Она

использовала наряду с системой *UBV* 10 узкополосных фильтров. Их детальные кривые пропускания даны Юнгом и Ирвином [530]. Эффективные длины волн и величины геометрического альбеда для 10 узких полос приведены в табл. 6. Они были исправлены

Таблица 6. Геометрическое альbedo Юпитера

Полоса пропускания	Эффективная длина волны, Å	Геометрическое альbedo
<i>v</i>	3147	0,261
<i>u</i>	3590	0,305
<i>s</i>	3926	0,350
<i>p</i>	4155	0,404
<i>m</i>	4573	0,449
<i>l</i>	5012	0,483
<i>k</i>	6264	0,547
<i>h</i>	7297	0,415
<i>g</i>	8595	0,305
<i>e</i>	10635	0,295

с целью согласования с данными табл. 2 и визуальной величиной Солнца — $26^m,8$. Используемые величины являются средними из данных, полученных в Южной Африке [236] и Франции [235]. Расположенные в хронологическом порядке, эти данные показывают изменение цвета от 1963 к 1965 г. [215].

Хорошей интегральной фотометрии Юпитера в отраженном свете на длинах волн более 1,1 мкм не существует. Причиной этого является протяженное поглощение CH_4 и NH_3 в указанной области длин волн, которое оставляет только несколько окон в непрерывном спектре. Спектры на более длинных волнах были получены Даниэльсоном [105], Джиллетом и др. [168], Крукшенком и Биндером [104], Джонсоном [241], Биром и др. [41], но ни один из авторов не дал абсолютных интегральных результатов (хотя измерения Даниэльсона с широкой щелью довольно близки к ним).

Кроме эксперимента на «Пионере-10», было проведено несколько исследований ультрафиолетового спектра при помощи ракет и спутников. Трудной проблемой была калибровка, и многие из ранних исследований не согласуются друг с другом. Недавно Уоллас и др. [497] провели фотометрические исследования с использованием более точных измерений солнечного ультрафиолетового излу-

чения. Их результаты, полученные на Орбитальной астрономической обсерватории (ОАО-2), охватывают область длин волн от 2100 до 3600 Å с разрешением 20 Å и показывают, что яркостный фактор при 10° равен 0,25 на 3000 Å, возрастает до 0,31 на 2500 Å и уменьшается снова до 0,25 между 2000 и 2100 Å. Истинные геометрические альbedo должны быть, вероятно, на 5% больше, тогда как поправки за абсолютную звездную величину Солнца и юпитерианский радиус, используемый в этой работе, должны уменьшить окончательный результат на ~7%. Флуктуации ультрафиолетового потока в пределах около $0^m,05$ происходят с 10-часовым периодом вращения планеты, причем наиболее слабой она бывает тогда, когда Красное пятно находится на центральном меридиане [411]. Не существует точных определений альbedo в области короче ~2000 Å, так как непрерывный спектр Солнца быстро падает почти до нуля ниже 1800 Å. Ракетные спектры показывают некоторую слабую эмиссию, возможно связанную с H_2 , в области от 1250 до приблизительно 1600 Å [402].

Так как фазовый угол Юпитера никогда не превышает 12° , фазовый интеграл q нельзя определить с Земли. Харрис [199], чтобы найти приближенное значение q , использовал кривые потемнения к краю и получил $q(U)=1,55$, $q(B)=1,60$, $q(V)=1,65$. Однако не существует однозначной зависимости между потемнением к краю и фазовым интегралом, и полученные значения должны иметь большие ошибки. Тейлор [457] принял фазовый интеграл равным 1,6 для всех длин волн и нашел болометрическое альbedo Бонда равным 0,45. Он считает, что неопределенность последней величины составляет около $\pm 0,07$.

Кривые потемнения к краю были определены рядом наблюдателей как в характерных молекулярных полосах, так и вне их (например, Гесс [206], Мюнх и Йонкин [340], Тейфель [9, 462], Оуэн [357], Мороз и Крукшенк [333], Аврамчук [1]). Биндер и Мак-Карти [64] получили кривые потемнения к краю в экваториальном и меридиональном направлениях в области 0,6—2,0 мкм. Подробная фотоэлектрическая фотометрия в 24 полосах от 0,30 до 1,10 мкм была проведена Пильчером и Мак-Кордом [367], которые сравнили северную и южную тропические зоны с полосой, включающей северный экваториальный пояс и экваториальную зону, и нашли значительные различия. Биндер [61] сделал еще более детальную работу

в восьми полосах от 1,4 до 1,63 мкм, получив данные для 41 точки на юпитерианском диске при трех углах фазы. По этим данным он построил карту поглощения NH_3 , нашел коэффициенты потемнения к краю и получил некоторые сведения о распределении CH_4 .

Недостаточным вниманием пользуется поляриметрический метод исследования атмосфер. Мороженко и Яновицкий [8, 334] изучили диск в целом, так же как и центр диска, в семи спектральных полосах. Они определили показатель преломления для атмосферного аэрозоля (1,36), который соответствует аммиаку и частицам с диаметром $\sim 0,4$ мкм. В детальной поляриметрии, например, Холл и Рили [192] нашли значительно большую поляризацию у полюсов Юпитера, чем близ экватора, а Герельс с сотрудниками [159, 162] — даже значительную асимметрию между полюсами. На коротких длинах волн близ экватора типична поляризация для случая молекулярного рассеяния. Наблюдения на более длинных волнах свидетельствуют о присутствии аэрозолей. Гораздо большие глубины достигаются, по-видимому, в районе полюсов, что указывает, вероятно, на меньшее количество частиц аммиака в этом районе. Есть основания ожидать, что при тщательной интерпретации и использовании уточненных моделей юпитерианской атмосферы поляризационные измерения могут дать некоторую прямую локальную информацию о высоте облаков и составе атмосферного аэрозоля во время наблюдений. Такую информацию трудно получить каким-либо другим путем.

Довольно неожиданным было недавнее сообщение о круговой поляризации видимого (6800 Å) света от Юпитера [248—250]. Сначала поляризация была положительной в южной полярной области и вдвое большая и отрицательная в районе северного полюса. Все отдельные значения были равны нескольким единицам 10^{-5} . По мере приближения Юпитера к оппозиции величина снижалась до нуля; после оппозиции она увеличивалась, но с противоположным знаком, показывая, что этот эффект вызывается многократным рассеянием в атмосфере.

Энергетический баланс

Заметное расхождение между солнечной энергией, поглощаемой Юпитером, и энергией, излучаемой планетой, было установлено Эликом [352]. Величина 0,45 для болометрического альbedo Юпитера, полученная Тей-

лором [457], означает, что Юпитер должен иметь эффективную температуру 105°K . К настоящему времени яркостные температуры фактически измерены на всех длинах волн в инфракрасной области спектра и представляется невозможным, чтобы эффективная температура могла быть столь низкой. Очень широкополосные измерения в области 1,5—350 мкм, проведенные Ауманом и др. [31], дали температуру 134°K . Эти измерения наиболее показательны, так как более 99% энергии абсолютного черного тела, имеющего температуру 105°K , излучается в этом диапазоне длин волн. Можно привести доводы в пользу того, что болометрическое альbedo Бонда для Юпитера имеет значительные ошибки (см. раздел «Фотометрия»). Если бы даже Юпитер был абсолютно черным телом (с болометрическим альbedo, равным нулю), его температура была бы только 124°K , а Юпитер, очевидно, не черное тело. По оценке Тейлора [457], общая погрешность болометрического альbedo Бонда составляет только 15% (или $0,45 \pm 0,07$). В случае альbedo 0,38 эффективная температура возрастает до 109°K .

Юпитер совершает полный оборот меньше чем за 10 час. Если время тепловой релаксации излучающей «поверхности» Юпитера сравнимо с 5 час., то вся поверхность планеты должна излучать эффективно. Если температура снижается до очень низких значений за время, много меньшее 5 час., то тогда эффективно излучать должна была бы только освещенная полусфера, температура которой в случае радиационного баланса должна быть в $2^{1/2}$ больше, чем 105°K (или 124°K).

В действительности «Пионер-10» [94] показал, что никаких различий температуры между дневной и ночной сторонами не существует, как это уже и ожидалось из теоретических расчетов и тепловых кривых потемнения к краю.

Даже в случае, если эффективная температура равна 125°K , вклад внутренних источников энергии должен составлять $7 \cdot 10^{-4}$ вт/см² — величину, равную поглощаемой солнечной энергии (принимая, что значение 0,45 для болометрического альbedo Бонда правильно). Эффективная температура 134°K соответствует мощности внутренних источников $1,2 \cdot 10^{-3}$ вт/см².

Эти внутренние источники имеют огромное значение для построения моделей внутреннего строения Юпитера и моделей атмосферы.

Строение атмосферы

Модели

Высотные профили давления и температуры для атмосферы Юпитера были рассчитаны рядом авторов. Эти модели основаны на многих упрощающих предположениях и, думается, представляют средние условия. Локальные вариации атмосферных параметров (погода) оставлены без внимания. Динамика включается в вычисления лишь постольку, поскольку она определяет среднюю статическую структуру.

Стандартная модель атмосферы обычно состоит из тропосферной области, в которой глубинная атмосфера находится в состоянии конвективного равновесия, а верхняя тропосфера — в лучистом равновесии. Для расчета лучистой области требуется правильная модель тепловой непрозрачности верхней атмосферы. Трефтон [467] показал, что преобладающим источником непрозрачности в этой области являются индуцированные давлением трансляционные и вращательные поглощения, создаваемые молекулярным водородом. Аммиак обеспечивает некоторую дополнительную непрозрачность, причем наибольший вклад вносится вращательно-колебательной полосой ν_2 на 10 мкм [165, 469]. Другими источниками атмосферной непрозрачности служат полосы метана ν_3 на 7,5 мкм, облачные слои и аэрозоли, которые могут присутствовать в атмосфере. Полоса метана обеспечивает полное поглощение шириной более, чем 100 см^{-1} спектра, даже выше уровня с эффективной температурой 134°K [458], но это составляет очень малую долю полной непрозрачности. При поляризационных наблюдениях Мороженко и Яновичко [334] замечены только малые концентрации аэрозоля, но эти наблюдения могут относиться к строго ограниченному высокому атмосферным уровням. Для удовлетворительного объяснения наблюдавшихся на «Стратоскопе-2» интенсивностей полос NH_3 3,0 мкм требуется гораздо большее количество твердых частиц.

Почти две трети энергии поступает в тропосферу Юпитера вследствие конвекции, создаваемой внутренними источниками энергии. Около 45% падающей солнечной энергии отражается, более 10% поглощается довольно высоко в атмосфере в сильных полосах метана [478], очень небольшая часть — газообразным аммиаком и молекулярным водородом, а остаток немногим более 40% должен поглощаться облаками на разных уровнях.

Трефтон и Стоун [479] недавно опубликовали модель атмосферы Юпитера, которая учитывает тепловую непрозрачность молекулярного водорода и аммиака и содержит приемлемый расчет динамических эффектов. Результаты приводятся в табл. 7; полагается, что в настоящее время это лучшие результаты. Эффективная температура принята равной 135°K , $\text{He}:\text{H}_2=0,1$, $\text{CH}_4:\text{H}_2=3 \cdot 10^{-3}$, максимум $\text{NH}_3:\text{H}_2=1,7 \cdot 10^{-4}$ и ускорение силы тяжести на поверхности 2500 см/сек^2 . Наиболее очевидный недостаток модели — отсутствие облачных слоев. Не был включен в модель также метан; следовательно, отсутствует атмосферное нагревание или непрозрач-

Таблица 7. Динамическая модель лучистой атмосферы Юпитера¹

Глубина, км	Температура, °K	Логарифм ² давления (дин/см ²)	Плотность ³ , г/см ³	Обилие H_2 , км-аммага	Оптическая толщина на 520 см^{-1}
0	105,6	3,843	1,694 (—6)	0,26	0,000
14,4	105,6	4,231	4,263 (—6)	0,63	0,003
22,3	106,1	4,444	6,927 (—6)	1,03	0,008
29,7	106,8	4,643	1,088 (—5)	1,63	0,020
34,2	107,5	4,764	1,430 (—5)	2,16	0,035
41,0	109,4	4,945	2,129 (—5)	3,27	0,080
46,3	111,8	5,083	2,862 (—5)	4,49	0,15
53,1	115,7	5,270	4,215 (—5)	6,91	0,30
57,0	119,9	5,349	4,933 (—5)	8,30	0,50
60,2	123,3	5,425	5,707 (—5)	9,87	0,70
63,7	127,6	5,505	6,636 (—5)	11,9	1,00
67,2	132,4	5,582	7,624 (—5)	14,2	1,40
69,9	136,9	5,639	8,422 (—5)	16,2	1,80
71,1	139,0	5,664	8,768 (—5)	17,1	2,00
73,8	144,8	5,717	9,521 (—5)	19,3	2,61
76,7	150,9	5,773	1,039 (—4)	22,0	3,37
79,2	156,2	5,819	1,116 (—4)	24,5	4,16
81,5	160,9	5,859	1,188 (—4)	26,8	4,95
85,7	169,7	5,930	1,362 (—4)	31,6	6,88
89,0	176,5	5,984	1,444 (—4)	35,8	8,65
95,2	189,1	6,079	1,677 (—4)	44,5	13,3
100,4	199,5	6,153	1,885 (—4)	52,8	18,2
109,1	216,6	6,269	2,268 (—4)	69,0	30,1
116,1	230,3	6,356	2,606 (—4)	84,3	42,6
122,1	241,9	6,427	2,922 (—4)	99,2	55,8
127,3	252,1	6,486	3,212 (—4)	113,7	69,7
131,9	261,1	6,537	3,487 (—4)	127,8	84,3

¹ По Трефтону и Стоуну [479].

² Логарифм десятичный. — Прим. ред.

³ В скобках указан показатель степени 10, на которую надо умножить число, например: $1,694(-6) = 1,694 \cdot 10^{-6}$. — Прим. ред.

ность и не промоделирована область инверсии температуры выше тропопавзы. Наконец, все еще остается некоторое разногласие с лучшими значениями непрозрачности H_2 , обусловленной давлением (см., например, [429]), что может привести к изменению результатов.

С этой точки зрения заслуживают внимания профили температуры и давления, полученные по S -полосе $(2,3 \text{ Гц})$ во время затмения эксперимента [255] на «Пионере-10». Измерения производились глубоко в нейтральной атмосфере и достигли уровня 2,8 атм при заходе на дневной стороне и уровня 2,4 атм при выходе на ночной стороне. Для состава 85% H_2 и 15% He температуры при этих давлениях превышали $700^\circ K$, что значительно выше, чем в конвективно-равновесной модели и чем предсказывается на основании наблюдений в инфракрасных лучах и в радиодиапазоне с поверхности Земли. Например, в модели Трефтона — Стоуна на уровне около 1 атм температура равна $180^\circ K$, тогда как затменный эксперимент дает температуру около $500^\circ K$ на том же уровне давления. Большинство измерений в инфракрасной области и в радиодиапазоне показывает температуру около $130\text{—}150^\circ K$ на уровнях давления от примерно 0,3 до 1 атм, в то время как результаты, полученные при затмении «Пионера-10», приводят к температурам между 300 и $450^\circ K$ для тех же пределов давления. Другое важное различие между моделями и данными наблюдений состоит в скорости температурного хода. Скорость температурного хода, измеренная «Пионером-10», составляет около $2,5^\circ K/км$, что существенно выше адиабатического хода для принятого состава. Пока неясно, как примирить эти расхождения. Клиоре и др. [255] предполагают, что присутствие облачных или пылевых частиц в пределах высот, соответствующих давлениям от 1 до 30 мбар, может исказить интерпретацию инфракрасных данных. Однако они правильно указывают, что это не может объяснить наблюдения в микроволновом диапазоне.

Сейчас для той части юпитерианской атмосферы, которая доступна оптической астрономии, фактически единодушно принята модель с двумя облачными слоями. Хотя это предполагалось в 1966 г. (Сэведж и Даниэльсон [412]), впервые надежная физическая основа для двух четко разделяемых слоев была дана в теоретических исследованиях Льюиса [281, 282]. Разновидности модели подвергались усиленной интерпретации. Во всех распро-

считанных моделях верхний облачный слой представляет собой аммиачные перистые облака в состоянии насыщенного равновесия с температурой в основании около $150^\circ K$ (точное значение, конечно, является функцией обилия аммиака); слой простирается вверх с быстро уменьшающейся плотностью к тропопавзе ($\sim 106^\circ K$). В простых одномерных моделях, таких, как мы рассматриваем здесь, оптическая толщина этого верхнего облачного слоя в видимом свете составляет 1,5—3,0 [225]. Поэтому почти все, что можно видеть на Юпитере в телескоп при визуальных наблюдениях, относится к верхнему слою, а очевидная двумерная структура поясов, зон и т. п. свидетельствует о большой вероятности значительных вариаций толщины слоя по диску. Нижний слой, как обычно принимается, является классическим отражающим слоем большой плотности, состоящим, вероятно, из NH_4SH , как предполагает Льюис, с основанием на уровне близ $225^\circ K$ [281].

Применение последних результатов, полученных Вейденшиллингем и Льюисом [507, стр. 472], к модели Трефтона и Стоуна [479] показывает, что основание нижнего слоя может быть ближе к уровню $200^\circ K$ и что он не толще, чем верхний слой из NH_3 . Это указывает на возможность видеть более глубокие уровни в юпитерианской атмосфере в облаках, где облака могут быть очень тонкими, вероятно, до облаков из водного льда с основанием на уровне с температурой, близкой к $270^\circ K$. Излучение на 5 мкм в темных поясах может большей частью приходить с этих нижних уровней. Обилие, давления в основаниях и даже грубые значения вращательных температур, приведенных в разделе о составе, находятся в хорошем согласии с моделью Трефтона — Стоуна. Наибольшие неопределенности связаны с отсутствием данных об аэрозоле и с плохим пространственным разрешением большинства наблюдений явно неоднородной планеты, несмотря на ожидаемое уточнение всех оптических параметров для атмосферных газов.

Минимум данных наблюдений в настоящее время относится к области выше тропопавзы. Здесь имеется температурная инверсия, вызываемая поглощением в полосах метана, особенно на 3,3 мкм, нагревающим верхнюю атмосферу. Наиболее ясно об этом свидетельствуют наблюдения *полярника* к краю, обнаруженного на волне 7,9 мкм Джиллетом и Уэстфалом [170]. Данные, полученные по инверсии кривой блеска Саганом и др. [409] при покрытии β Скорпиона Юпитером, ука-

зывают на температуру около 180°K при плотности 10^{15} молекул/см³, возрастающую до 220°K в области с плотностью $5 \cdot 10^{15}$ молекул/см³. Теоретические модели Уолласа и др. [498] точно связываются с моделью Трефтона — Стоуна на уровне 30 мбар и показывают рост до 140°K при $3 \cdot 10^{-2}$ атм и 155°K выше уровня 10^{-3} атм. Проведено несколько теоретических исследований ионосферы выше уровня 10^{15} молекул/см³ [423, 454, 323, 82].

Спектр радиоярких температур диска Юпитера (рис. 1) дает сведения о тепловой структуре и составе атмосферы Юпитера ниже облаков — в области, недоступной оптическим и инфракрасным наблюдениям. Хотя интерпретация радиоданных зависит от модели, тем не менее наблюдения дают важные ограничения для построения возможных моделей. Например, атмосфера, температурный профиль которой изотермичен непосредственно под облаками, несовместима с наблюдаемым спектром. Галкис и Пойнтер [189] показали, что наблюдаемый спектр согласуется с H_2 — He конвективной моделью атмосферы, в которой температура возрастает по крайней мере до 400°K и в которой аммиак присутствует в солнечно-космическом обилии. Галкис и др. [187] исследовали расширенные давлением характеристики поглощения аммиака в спектре Юпитера и нашли давление 0,48 атм при температуре 130°K .

Динамика

Полосатая структура Юпитера ясно показывает, что динамические силы играют важную роль в строении атмосферы планеты. Согласно оценке Стоуна [449], средний температурный профиль, такой, как использовался выше, очень близко соответствует лучисто-конвективному равновесию. Он нашел, что статическая устойчивость очень низка, что адвекция⁸ является очень слабым крупномасштабным эффектом из-за наличия внутренних источников тепла и больших размеров планеты и что отклонения от равновесия гасятся с постоянной времени порядка десятилетия [449]. Природа неустойчивости, вследствие которой на Юпитере наблюдаются зональные потоки, все еще остается неизвестной. Трефтон и Стоун [479] рассмотрели раз-

личные динамические моды и выбрали из них три, которые не исключаются наблюдениями и могут быть по отдельности или в комбинации ответственны за поведение Юпитера. Это «режим инерционной неустойчивости» Стоуна [448], «режим лучисто-конденсационной неустойчивости», рассмотренный Гиращем [164], и «режим вынужденной конвекции», который, по-видимому, никем не изучался. Таким образом, даже причина возникновения основной зональной структуры Юпитера остается неизвестной в деталях, не говоря уже о причинах возникновения экваториальной струи и Большого Красного пятна. Динамические процессы — это фронт исследований Юпитера в настоящее время.

Строение недр (модель внутреннего строения)

Есть основания надеяться, что в течение нескольких десятилетий внутреннее строение Юпитера будет понято лучше, чем любой другой планеты, исключая, возможно, Землю⁹. Для этого существуют два основных условия, оба уже в известной мере обсуждавшиеся. Юпитер должен почти полностью состоять из водорода и гелия, так как только они могут обеспечить структуру достаточно низкой плотности, и, вероятно, будут скоро изучены количественно в большом диапазоне давлений и температур. Далее, Юпитер имеет мощный внутренний источник энергии. Объяснение этого источника и способов, которыми энергия переносится от него к уровню атмосферы со средней оптической толщиной, равной единице, дает дополнительные строгие граничные условия, не существующие для большинства планет. Единственная модель, вероятно, будет определена после того, как будут уточнены уравнение состояния и свойства смеси водорода и гелия, определяющие перенос, и затем будут учтены точные граничные условия для потока энергии, состава и состояния атмосферы, магнитного поля и гравитационного потенциала, которые будут получены в ходе предстоящих космических полетов.

Существуют модели Юпитера двух основных типов, которые тесно связаны с двумя основными идеями о происхождении планеты. Гипотеза гравитационной неустойчивости предполагает, что флуктуации, происходившие в первичной туманности, имели

⁸ Адвекция — общее явление переноса массы, тепла, момента количества движения, скорости и других характеристик. В узком смысле адвекцией называют перенос в горизонтальном направлении, в отличие от конвективного вертикального переноса. — *Прим. ред.*

⁹ Эти вопросы рассмотрены в книге В. Н. Жаркова, В. П. Трубицына, Л. В. Самсоенко. Физика Земли и планет. М., «Наука», 1971. — *Прим. ред.*

достаточную величину, чтобы в некоторой области силы притяжения стали сравнимыми с разрушающими солнечными приливными силами и вещество в туманности стало сжиматься [79]. Процесс сжатия является существенным процессом образования звезд, исключая тела с массой 0,07 солнечной массы или менее, в которых никогда не происходит ядерного синтеза и продолжается сжатие и охлаждение [180]. Первые исследования эволюции однородного тела с массой Юпитера показали, что после раннего максимума температуры 40 000° К тело будет быстро охлаждаться и сжиматься, причем состояние с современным значением радиуса и светимости (выделение энергии) Юпитера достигается в течение $2 \cdot 10^9$ лет [177, 178]. Более реалистичные расчеты, учитывающие рекомендации Смолуховского [436] включить стратификацию и тепловой эффект несмешиваемости водорода и гелия, как ожидается, растянут это время до $\sim 4 \cdot 10^9$ лет¹⁰.

Статические модели Хаббарда [220] подходят к этим логическим рамкам. Это однородные, полностью конвективные (адиабатические) модели для современных граничных условий Юпитера. Такие модели полностью определяются температурой, давлением и отношением водорода к гелию [221]. Требуемое отношение водорода к гелию составляет около двух (по массе), которое, однако, значительно меньше солнечного отношения (более 3), хотя здесь нет очевидного противоречия с современными грубыми наблюдениями этого отношения в атмосфере.

Вторая группа оригинальных гипотез предполагает гравитационный захват газа ядром высокой плотности [79]. В таких теориях обычно принимается то же отношение водорода к гелию, что и для Солнца, ибо трудно объяснить, как они могли быть разделены во внешних планетах [79]. Модели, подобные хаббардовским, также могут быть применены здесь просто путем ограничения расчетов конвекции поверхностью ядра. Это дает еще одну степень свободы, так как допускает изменение в отношении водорода к гелию путем подбора подходящих размеров ядра¹¹.

Все однородные модели могут быть подвергнуты критике, так как в них игнорируются сложные детали фазовой диаграммы систе-

мы H_2 —He, ставшие теперь известными. Водород и гелий имеют очень ограниченную взаимную растворимость в жидком и металлическом состоянии [452, 435]. Смолуховский [435] считает, что между фазами существует устойчивая граница и что тепловой поток переходит через нее вследствие проводимости: внутри фазы перенос осуществляется путем конвекции. В «холодной» модели с центральной температурой 7500° К ожидается последовательность фаз, показанная на рис. 2 [435]. «Горячая» модель с центральной температурой 10 000° К должна быть жидкой всюду и состоять из богатого гелием ядра (содержащего растворенный водород), покрытого мантией из металлического водорода (содержащего растворенный гелий), и, наконец, иметь закритическую атмосферу, молекулярного водорода (содержащую гелий, вероятно, с разделением водородной и гелиевой фаз) [435, 436]. К каждой из моделей может быть добавлено также ядро из тяжелых элементов. Таким образом, вопрос, имеет ли

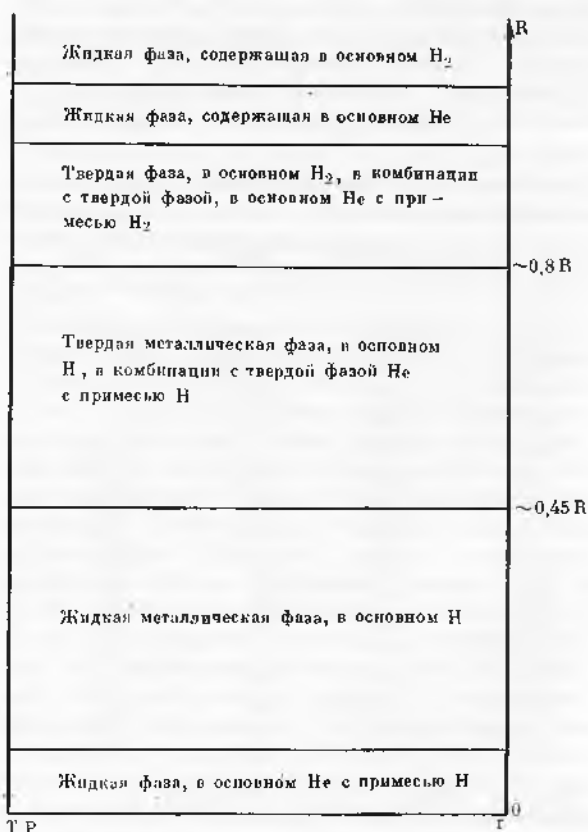


Рис. 2. Схематическое расположение фазовых состояний H и He внутри холодной модели Юпитера (по Смолуховскому [434])

¹⁰ Личное сообщение Г. С. Грабовского.

¹¹ Анализ химического состава оболочки и ядра Юпитера проведен в работе В. Н. Жаркова, А. Б. Макалкина, В. П. Трубицына. Астрон. ж., 1974, 51, № 6.— Прим. ред.

Юпитер твердую поверхность, остается открытым. Сложная фазовая диаграмма, которая не определена количественно, является сегодня главным источником неопределенности юпитерианских моделей.

Основной источник внутренней энергии, излучаемой Юпитером, может иметь в значительной мере гравитационную природу. Некоторые авторы указывают, что прямое гравитационное сжатие около 1 мм/год с современной центральной температурой $\sim 10\,000^\circ\text{K}$ могло бы обеспечить наблюдаемую светимость [433, 220, 148]. Если имеет место гравитационное несмешивание, вероятно, в результате образования ядра, тогда современная светимость возможна при низкой центральной температуре, но ядро должно расти примерно на $2 \cdot 10^{-11}$ полной массы Юпитера каждый год [148]. Разделение богатых водородом и гелием слоев рассматривается Салпетером [410] и Смолуховским [435] как возможный источник светимости, хотя его значение по отношению к прямому сжатию не может быть оценено количественно. Любое реальное фазовое изменение также может некоторым образом вносить вклад в общий энергетический баланс. Весьма невероятно, что простое охлаждение — излучение первичного тепла — является главным источником энергии [65].

Таблица 8¹. «Типичная» модель Юпитера

Радиус, 10^4 км	Доля массы	Давление, Мбар	Плотность, г/см ³
6,9	0,99	0,004	0,03
6,5	0,97	0,24	0,4
6,0	0,90	1,1	0,7
5,5 ²	0,80	2,5	1,1
5,0	0,70	4,5	1,6
4,5	0,60	7,6	1,9
4,0	0,40	11	2,3
3,5	0,30	15	2,6
3,0	0,20	20	3,0
2,5	0,10	24	3,4
2,0	0,06	28	3,7
1,5	0,03	32	3,9
1,0	0,01	35	4,1
0,5	0,001	36	4,2
0,0	0,0	37	4,2 ³

¹ Взято по Хаббарду и Смолуховскому [223].

² Приближенное значение радиуса, при котором в большинстве моделей происходит переход молекулярного водорода в металлический.

³ Не включено возможное плотное ядро.

На ранних стадиях коллапса вещества при образовании планеты в некоторых точках могли существовать высокие температуры, но даже они имели гравитационное происхождение. Сама первичная туманность на расстоянии Юпитера от Солнца, вероятно, была очень холодной [284].

Подробный анализ разрабатываемых моделей сложен главным образом потому, что уравнение состояния и свойства рассматриваемого вещества, определяющие перенос энергии, известны плохо и основаны почти полностью на теоретических выводах. Всесторонний очерк большинства теоретических методов был дан Хаббардом и Смолуховским [223]. Детали эволюционной теории описаны Гравовске и др. [178].

Типичная модель Юпитера, в которой не учитывались специальные ряды граничных условий и сложные детали фаз гелий — водород, приводится в табл. 8, заимствованной у Хаббарда и Смолуховского [223]. Она показывает общий ход давления и плотности внутри Юпитера.

Магнитосфера

Заключение о существовании юпитерианской магнитосферы сначала было сделано на основании радионаблюдений с поверхности Земли (см. [85]) и подтверждено позднее наблюдениями с космического аппарата «Пионер-10», на котором впервые были произведены измерения *in situ* [191]. Юпитерианская магнитосфера, как следует из измерений магнитного поля и частиц «Пионером-10», существенно отличается от земной. В частности, магнитное поле обладает большой внешней протяженностью приблизительно дискообразной конфигурации и простирается на расстояния более $20 R_J$. На рис. 3 схематически изображена модель магнитосферы Юпитера [488]. Высокоэнергичные электроны и протоны существуют всюду в магнитосфере и концентрируются в тонкую дископодобную конфигурацию на радиальных расстояниях свыше $20 R_J$. В пределах $20 R_J$ магнитное поле становится более дипольным по форме и заряженные частицы захватываются, по-видимому, таким же образом, как и в земных радиационных поясах.

В следующих подразделах мы сначала дадим описание нетеплового радиоизлучения Юпитера, а затем продолжим рассмотрение магнитного поля, энергичных частиц и плазмы, содержащейся в магнитосфере.

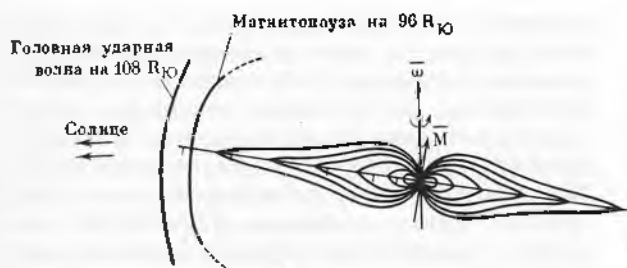


Рис. 3. Магнитодисковая модель магнитосферы Юпитера (принята по Ван Аллену и др. [488])

Нетепловое радиоизлучение

Радиоизлучение Юпитера наблюдалось в области длин волн от 1 мм до ~ 650 м. Типичный спектр плотности потока наблюдаемого излучения показан на рис. 4. В наблюдаемом спектре на длинах волн больше 7 см преобладает нетепловое излучение, на более коротких волнах доминирует тепловое излучение атмосферы. Детали тепловой части спектра показаны на рис. 1 и обсуждаются в разделах «Состав» и «Температура». Нетепловая часть спектра имеет по крайней мере две четко разделяющиеся компоненты: сантиметровую и дециметровую в диапазоне $\sim (0,1-1)$ м и декаметровую и гектометровую компоненту, которая имеет большое значение на длинах волн более 7,5 м.

Сантиметрово-дециметровая компонента обусловлена синхротронной эмиссией высокоэнергичных электронов, захваченных магнитным полем Юпитера. Происхождение гектометрово-декаметровой компоненты в настоящее время достаточно хорошо не объяснено. Современные знания о юпитерианском нетепловом излучении были суммированы Уорви-

ком [503, 504], Керром и Галкисом [85], Стансберри и Уайтом [447]. Дикель и др. [120] дали хороший обзор всех доступных наблюдений яркостных температур в микроволновом спектре.

Декаметровое и гектометровое излучение. За 20 лет после открытия поведение декаметрового излучения стало вполне ясным, хотя механизм его генерации остается все еще совершенно неизвестным. Активность в декаметровом диапазоне была обнаружена на наземных обсерваториях на частотах между 3,5 [534] и 39,5 МГц [502] и, возможно, на 43 МГц [260]. Во время недавних наблюдений Юпитера при помощи радиотелескопа, находящегося на околоземной орбите, на частотах, значительно меньших критической частоты ионосферы, был расширен диапазон частот, на которых обнаруживается Юпитер, от 3,5 МГц до 450 кГц [119]. В отличие от синхротронной эмиссии, которая непрерывна, декаметровая компонента излучается спорадически с интенсивными всплесками, продолжающимися короткое время. Спектр плотности потока всплесков показывает быстрое увеличение плотности с уменьшением частоты от 40 до 10 МГц (от 7,5 до 60 м), максимум наблюдается около 10 МГц, а затем плотность падает с уменьшением частоты.

Принимаемое на Земле декаметровое излучение обычно состоит из модулированного по интенсивности шума, образованного случайно протекающими всплесками, характеризующимися иерархией временной структуры. Весь период активности, содержащий много всплесков, известен как юпитерианская шумовая буря. Шумовые бури продолжаются обычно от нескольких минут до нескольких часов. Спокойные периоды между бурями могут продолжаться часами, днями или неделями. Обычно продолжительность всплесков заключена между 0,5 и 5 сек., но случаются всплески более кратковременные или более длительные. Ширины полос отдельных всплесков обычно заключены между 0,05 и 2 МГц. Всплески продолжительностью 0,5—5 сек. известны как *L*-всплески, тогда как более кратковременные называются *S*-всплесками. Волнообразная форма *L*-всплесков, вероятно, обусловлена дифракционными явлениями в межпланетной среде [129]. Волнообразная форма *S*-всплесков, с другой стороны, имеет преимущественно юпитерианское происхождение.

Измерения всех четырех параметров поляризации были сделаны Шерилом [422] и Барроу и Морроу [36]. Шерил пришел к выводу,

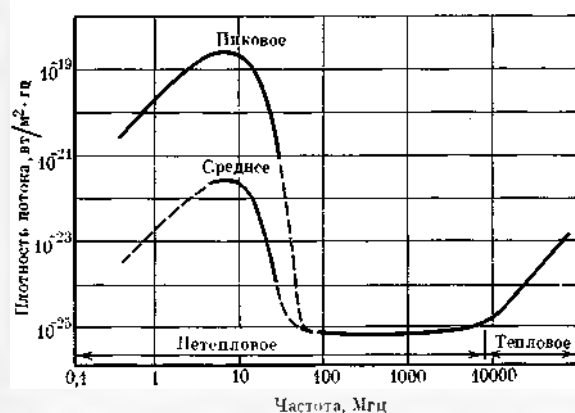


Рис. 4. Схематический вид наблюдаемого радиоспектра Юпитера

что обычно степень поляризации составляет по крайней мере 0,8 на частотах выше 15 МГц и практически 1,0 выше 20 МГц. На 22,2 МГц и более высоких частотах поляризация всегда правая. Левополяризованная круговая компонента относительно более заметна, когда частота уменьшается, однако правополяризованная компонента все еще преобладает до 10 МГц. Среднее отношение осей поляризации индивидуальных всплесков приблизительно $|0,5|$, но иногда бывают всплески, по-видимому, с чисто круговой поляризацией, с отношением осей, равным единице. Истинный смысл поляризационных данных в настоящее время неизвестен. Вероятно, излучение происходит с некоторым характерным видом поляризации в месте возникновения и существенно модифицируется при распространении через магнитосферу Юпитера на своем пути к Земле. Таким образом, поляризация, измеренная на Земле, видимо, отражает как первоначальные обстоятельства поляризации в точке генерации, так и налагающиеся эффекты распространения.

Характерной чертой юпитерианских всплесков является тенденция к повторению приблизительно при той же самой долготе центрального меридиана (ДЦМ), измеренной в системе II. Характерная гистограмма вероятности в функции ДЦМ показана на рис. 5 для двух различных частот. В области 18 МГц излучение, по-видимому, возникает по крайней мере в трех долготных зонах, обычно на-

зываемых источниками А, В и С (как указано на рис. 5) или главным источником, ранним источником и последним или третьим источником. Характерная структура гистограммы позволяет использовать их для определения периода вращения Юпитера. В 1962 г. Международный астрономический союз [230] принял период вращения $09^h55^m29^s,37$ как период, «наилучшим образом удовлетворяющий» данным гистограммы. Этот период был назван периодом системы III (1957,0). Совсем недавно стало ясно, что эта величина неверна [185, 84, 86, 446]. Среднее значение периода вращения Юпитера по декаметровому излучению, как оценивается в [84], равно $09^h55^m29^s,75 \pm 0^s,04$. Этот период на $0^s,4$ длиннее, чем период системы III. Такая поправка означает, что детали Юпитера в системе долгот, связанной с системой III (1957,0), будут дрейфовать в сторону более высоких долгот со скоростью около $3^\circ,6$ в год.

Верхний предел размеров источников, вызывающих отдельные события в излучении Юпитера, был определен интерферометрами с большой базой. Далк [131], использовавший базу длиной 487 000 λ , получил верхний предел размеров некогерентного источника равным $0'',1$ (400 км на Юпитере) на частоте 34 МГц. Керр и др. [86] наблюдали отдельные S-всплески на частоте 18 МГц с интерферометром с базой 450 000 λ . Их предварительные результаты показывают, что если источники всплесков некогерентны, по крайней мере некоторые из них должны быть меньше $0'',1$. Несмотря на достигнутое высокое угловое разрешение, неопределенность положения источников излучения остается все еще очень большой.

Необычное свойство декаметрового излучения, открытое Биггом [60], — эффект модуляции спутником Ио. Недавно Деш и Керр [119] сообщили о подобном эффекте модуляции спутником Европа, который выявился на частотах менее 1,3 МГц. Бигг нашел, что большинство случаев сильного излучения источника В происходит, когда Ио находится на орбите в 93° (в пределах нескольких градусов) от верхнего геоцентрического соединения, а большая часть событий, связанных с источником А, — когда Ио находится близ 246° . Этот эффект хорошо подтвердился (см. [503, 85]); однако теперь очевидно, что, в то время как многие события, связанные с источником А, зависят от положения Ио, многие не зависят от него. Консейл и др. [97] недавно показали, что выявляется тесная зависимость между скоростью солнечного ветра и

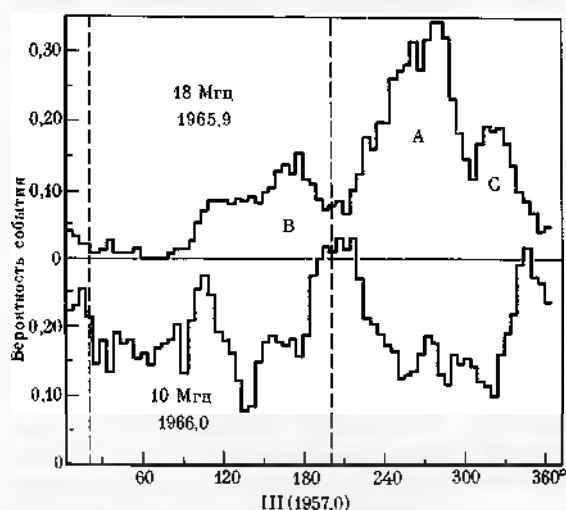


Рис. 5. Гистограмма вероятности событий в зависимости от долготы центрального меридиана (ДЦМ) Значения ДЦМ магнитных полюсов указаны вертикальными штриховыми линиями [85]

фазой Ио во время радиовсплесков на Юпитере. Большая часть излучения источника В зависит от спутника Ио. Влияние Ио, очевидно, гораздо менее заметно на частоте 10 МГц [132, 392], чем на более высоких частотах. Общепринятой теорией, объясняющей, как Ио модулирует излучение, не существует, хотя было выдвинуто несколько идей [145, 137, 190, 173, 77, 312, 413, 503, 172]. Недавно Гарнет [190] предположил, что фотоэлектроны излучаются поверхностью Ио и ускоряются в ее оболочке. Это предположение интересно в свете обнаружения «Пионером-10» ионосферы Ио.

Наши представления о всем механизме генерации дециметрового излучения все еще остаются весьма предположительными. Вероятно, происходят два явления: во-первых, образование анизотропного распределения частиц или волн и, во-вторых, генерация ими дециметрового излучения. Измерение истинных положений источников относительно диска Юпитера поможет исключить некоторые из многих противоречивых теорий.

Сантиметровое и дециметровое излучение. Юпитер излучает приблизительно постоянный поток с плотностью около $(6,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-26}$ Вт/м²·Гц (4,04 а.е.) на длинах волн от около 5 до 300 см. Интерферометрические наблюдения на длинах волн 10 и 20 см показывают, что излучение приходит из области, много большей, чем диск планеты. На рис. 6 показаны яркостные контуры 10-сантиметрового излучения, предложенные Берге [46]. Довольно интересный результат исследования Берге состоит в том, что температура диска для тепловой компоненты на частоте 2880 МГц, очевидно, составляет $\sim 260^\circ$ К, приблизительно вдвое больше эффективной температуры Юпитера. Бренсон [69] получил карты яркостных температур излучающих областей на частоте 1407 МГц для трех значений ДЦМ, отстоящих друг от друга на 120° . Они иллюстрируют поразительно большую протяженность излучающих областей и колебание излучающей области по мере вращения планеты. На длинах волн больше 21 см поясная структура не была точно измерена, экспериментальные данные не дают ответа на вопрос, увеличивается или нет общая протяженность излучения с ростом длины волны [183].

На большей части дециметрового спектра излучение линейно поляризовано, степень линейной поляризации достигает максимума $\sim 25\%$ на длине волны 21 см и уменьшается в направлении и коротких и длинных волн

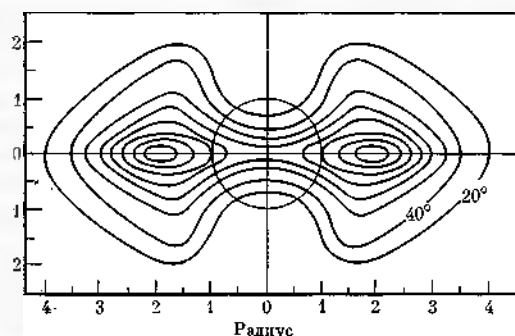


Рис. 6. Модель распределения яркостных температур (по Берге [46])

Интервал между контурами 20° К, ДЦМ (система III) — 20°

[120]. Направление электрического вектора колеблется в пределах $\pm 10^\circ$ относительно экватора планеты при ее вращении. Излучение показывает также круговую поляризацию небольшой степени [45, 257, 416]. Наблюдения круговой поляризации дают информацию о полярности диполя и напряженности магнитного поля в юпитерианской магнитосфере. Измерения круговой поляризации Комиссаровым и др. [257] были использованы для определения напряженности поля в радиационных поясах между 0,4 и 1,9 гс. Это находится в хорошем согласии с моделью магнитного поля, которая основана на измерениях «Пионера-10» и предсказывает напряженность поля 0,7 гс на расстоянии $1,8 R_J$. Результаты также показывают, что магнитный диполь Юпитера антипараллелен земному, на что впервые указал Уорвик [501] и подтвердил Берге [45].

Точные измерения положения центра диска дециметрового излучения относительно оптического диска были сделаны Робертсом и Экерсом [397], Мак-Каллохом и Комиссаровым [321], Берге [47], Стэнгардом и Конвеем [446]. Все измерения показывают, что магнитное поле Юпитера хорошо центрировано и довольно симметрично. Полученные результаты исключают смещения, превышающие несколько десятых диаметра.

Возможная зависимость плотности дециметрового потока от солнечной активности обсуждалась многими авторами (см. [85]). Недавно попытку исследовать возможную зависимость плотности потока от солнечной активности сделал Джерард [163] в период декабрь 1967 — август 1968 г. Он нашел свидетельства в пользу положительной корреляции между полным потоком 11,13-сантимет-

рового излучения от Юпитера и солнечной активностью, оцениваемой по солнечному потоку на 10,7 см. Клейн и др. [254] провели в 1971 г. измерения на длине волны 12,7 см, которые показали, что плотность юпитерианского потока меняется примерно на 20% с периодом 8 лет; однако они не смогли найти корреляцию этого изменения с солнечной активностью.

Средний период вращения Юпитера может быть найден на дециметровых волнах путем сравнения долготного распределения, или поляризованных углов, или полной интенсивности с подобным распределением, полученным несколькими годами позже. Точные результаты исследований в дециметровом диапазоне приведены в табл. 9.

Таблица 9. Определение периода вращения Юпитера по дециметровому излучению

Ссылка	Период вращения
Баш и др. [38]	$09^h55^m29^s,70 \pm 0^s,04$
Дэвис и Уильямс [411]	$09\ 55\ 29,50 \pm 0,29$
Комиссаров и Мак-Каллох [256]	$09\ 55\ 29,83 \pm 0,16$
Уайтоук и др. [515]	$09\ 55\ 29,69 \pm 0,05$
Галлис, Гари, Клейн, Стелд-рид [486]	$09\ 55\ 29,74 \pm 0,05$
Стеннард и Конвей [446]	$09\ 55\ 29,74 \pm 0,03$

Оценки Керра [84] дают взвешенное среднее из дециметровых измерений $09^h55^m29^s,71 \pm \pm 0^s,07$, которое незначительно отличается от периода, полученного на декаметровых волнах, но значительно отклоняется от периода системы III (1957,0). Нет никаких указаний, что период изменяется в интервале времени, охваченном наблюдениями. Значения периода, определенные по наблюдениям на дециметровых волнах, приведены в табл. 9.

Итак, отличительные характеристики этой компоненты следующие: плоский нетепловой спектр, большая характерной формы излучающая область, относительно высокая степень линейной поляризации, очень малая степень круговой поляризации и изменение всех упомянутых характеристик при вращении Юпитера. Драйк и Хватум [130] вскоре после открытия рассматриваемой компоненты предположили, что источником этого излучения служит синхротронное излучение релятивистских электронов. Чанг и Дэвис [88],

Филд [142—144], Торн [465] и другие провели фундаментальные работы, которые окончательно доказали, что синхротронный механизм действительно ответствен за это излучение. Совсем недавно Стансберри и Уайт [447] провели обзор предшествующих моделей и разработали новую модель для потоков электронов и протонов в радиационных поясах, основанную на сведениях о Юпитере до пролета его «Пионером-10».

Магнитное поле

Единственное пересечение головной ударной волны зарегистрировано магнитометром «Пионера-10» [431] на расстоянии $108 R_J$ при прохождении аппарата внутрь поля. Напряженность магнитного поля возросла от 0,5 до $1,5\gamma$ ($1\gamma = 10^{-5}$ гс) на головной ударной волне. Магнитопауза сначала наблюдалась на расстоянии $96 R_J$ как хорошо определенная граница с напряженностью поля, возрастающей до 5γ . Напряженность магнитного поля оставалась около 5γ на расстояниях от 90 до $50 R_J$, но поведение его было очень неправильно, с частыми падениями до 1γ . Очевидно, из-за большой переменности внешней магнитосферы кажется, что граница магнитопаузы, сначала открытая на $96 R_J$, движется за космическим аппаратом, когда он приближается к расстоянию $50 R_J$. Подобные многократные встречи с границей магнитопаузы наблюдались как при подходе, так и при уходе аппарата от Юпитера.

Начиная примерно с $25 R_J$ в направлении к Юпитеру напряженность поля начинает монотонно возрастать и направление его приближается к дипольному. На основе данных, полученных в области между $2,84 R_J$ и $6,0 R_J$, Смит и др. [432] смогли совместить модель эксцентрического диполя с наблюдениями. Момент диполя составляет $4,0 \text{ гс} \cdot R_J^3$, а угол наклона диполя к оси вращения Юпитера 11° . Долгота магнитного полюса в северном полушарии равна 222° (система III (1957,0)). Направление поля противоположно направлению земного поля. Диполь смещен от центра Юпитера на $0,11 R_J$ в направлении 16° северной широты и 176° долготы в системе III (1957,0). Наклон диполя и долгота полюса хорошо согласуются со значениями, полученными из радиоастрономических изменений.

Большая протяженность магнитного поля во внешнюю сторону очевидна при сравнении измеренной напряженности между 50 и $90 R_J$ с изоповерхностью дипольного поля 4 гс, из-

меренного в пределах расстояний $6 R_{\text{Ю}}$. Это поле должно бы приводить к полю, которое меняется обратно пропорционально кубу радиального расстояния от диполя с напряженностью $3,2\gamma$ на $50 R_{\text{Ю}}$, тогда как измеренная напряженность составляет $\sim 5\gamma$ во всей области. Это показывает, что магнитное поле раздувается или вытягивается от планеты. Раздувание, вероятно, обусловлено давлением, производимым коррелирующей плазмой в магнитосфере, управляемой центробежными силами. В поддержку точки зрения о преобладании дополнительного давления над магнитным говорит факт, что наблюдаемая плотность магнитной энергии внутри магнитосферы (10^{-10} эрг/см³) меньше, чем оценка плотности энергии солнечного ветра ($5 \cdot 10^{-10}$ эрг/см³).

Энергичные частицы

Еще до первого обнаружения головной ударной волны Юпитера космическим аппаратом «Пионер-10» были зарегистрированы энергичные частицы на расстоянии $360 R_{\text{Ю}}$ от планеты [424]. Появление частиц имело вид внезапного увеличения потока электронов с энергиями в пределах приблизительно от 1 до 30 Мэв. Пиковая интенсивность в 100 раз или более превышала уровень в межпланетном пространстве. Явление продолжалось около двух дней. Считается, что эти частицы вылетели в межпланетную среду из головной ударной волны или магнитосферы Юпитера.

Электроны и протоны высокой энергии в магнитосфере на расстояниях от $\sim 20 R_{\text{Ю}}$ до $100 R_{\text{Ю}}$ от центра Юпитера концентрируются подобно магнитному полю в дискообразной области близ магнитной экваториальной плоскости. Так как устойчивый захват частиц в этой области сомнителен, некоторые авторы рассматривают ее как область квазилушки. Внутри области, ограниченной примерно $20 R_{\text{Ю}}$, где магнитное поле более дипольно по форме, энергичные электроны и протоны захватываются устойчиво. В этой области частицы не очень сжаты к магнитному экватору. Подробные спектры электронов и протонов в области ловушки частиц пока не получены, хотя отдельные эксперименты дали предварительные сведения. Симпсон и др. [425] нашли, что пик ненаправленного потока электронов с энергией более 3 Мэв составляет $\sim 2,5 \cdot 10^8$ электрон/см²·сек (на $L=3,1$). Пиковый ненаправленный поток протонов с энергией более 35 Мэв достигает $6 \cdot 10^6$ протон/см²·сек на $L=3,4$. Ван Ален и др. [487] дали следующее предварительное выражение для

интенсивности I_0 ненаправленного потока электронов с энергией ≥ 21 Мэв в области $3,5 < L < 12 R_{\text{Ю}}$:

$$I(E_c > 21 \text{ Мэв}) = 3 \cdot 10^8 \exp \left[-\frac{L}{1,45} \right] \times \\ \times \left(\frac{\cos^6 \Lambda}{\sqrt{4 - 3 \cos^2 \Lambda}} \right)^{m/2}.$$

Здесь I выражено в электрон/см²·сек, L — параметр магнитной оболочки в единицах $R_{\text{Ю}}$, Λ — магнитная широта, $m=3,5+(3,86/L)^2$ — параметр пича-угла.

Плотность плазмы

В дополнение к энергичным частицам в магнитосфере должна также существовать «тепловая плазма». Плотность плазмы — важный параметр для теорий взаимодействия спутник — магнитосфера, декаметрового и дециметрового излучений и конфигурации самой магнитосферы. Аппаратура космического аппарата «Пионер-10» не могла дать прямых однозначных сведений о распределении этой плазмы; следовательно, чтобы определить эту характеристику, нужно опираться почти полностью на теоретические исследования. Указанную проблему рассматривали многие авторы [70, 231, 325, 326, 172]. Обзор этих теорий недавно сделали Мендис и Аксфорд [326]. В результате исследований получены некоторые общие заключения: 1) плазма должна вращаться с планетой; 2) тепловая плазма должна концентрироваться к экваториальной плоскости; 3) центробежные силы, обусловленные вращением планеты, играют важную роль в распределении плазмы; 4) нетепловая компонента плазмы в ионосфере ответственна за населенность магнитосферы; 5) максимальная плотность плазмы ограничивается рекомбинациями. Иоаннидис и Брайс [231] и Мендис и Аксфорд [326] построили модели, максимальная плотность в которых составляет ~ 30 см⁻³. Это имеет место около $L=10$ ($10 R_{\text{Ю}}$ в экваториальной плоскости).

САТУРН

Сатурн во многих отношениях подобен Юпитеру, явное исключение составляет лишь его система колец. Магнитное поле Сатурна все еще не обнаружено, но оно до сих пор могло ускользать от наблюдений. Средняя плотность планеты равна всего $0,70$ г/см³, поэтому в составе планеты снова должны преобладать водород и гелий. То же, вероятно, справедливо и для атмосферы, хотя не суще-

ствуется никаких определений ее среднего молекулярного веса. Теоретически проблемы атмосферы и внутреннего строения Сатурна по существу не отличаются от проблем, рассмотренных для Юпитера, и здесь не будут обсуждаться подробно. Конечно, наземные наблюдения Сатурна гораздо труднее. Поверхностная яркость Сатурна составляет только треть яркости Юпитера, и все средства наблюдения, опирающиеся на поверхностную яркость, требуют по крайней мере трехкратной экспозиции или времени накопления. Планета примерно вдвое дальше от Солнца, чем Юпитер, и вдвое дальше от Земли, поэтому полный поток, получаемый на Земле от Сатурна, грубо говоря, в 16 раз меньше, чем приходящий от Юпитера. Геометрическое разрешение поверхности Сатурна при наземных наблюдениях вдвое меньше, чем для Юпитера. Не удивительно, что знания о Сатурне менее обширны.

Атмосфера

Состав

Впервые молекулярный водород в атмосфере Сатурна был отождествлен в 1962 г. Мюнхом и Спинрадом [339], которые обнаружили две линии обертона 4—0 в его квадрупольном спектре. Линии обертонов 3—0 и 4—0 затем использовались обычным путем для определения состава, температур и давлений. В самой последней опубликованной работе указывается обилие 76 ± 20 км-амага H_2 при эффективном давлении¹² между 0,4 и 1,0 атм [138]. Бергстрал и Юнг [55] исследовали 14 пластинок, полученных в течение трех месяцев и содержащих линии $S(0)$ и $S(1)$ полосы 3—0, и показали, что видимое обилие в действительности меняется в пределах, вероятно, 75 и 140 км-амага или более.

Метан на Сатурне был обнаружен в той же исторической последовательности, как и на Юпитере. Недавно были проведены три исследования R -ветви полосы метана $3\nu_3$ в области 1,1 мкм. В одном использовалась щелевая спектроскопия с фотографической регистрацией [52], в другом — щелевая спектроскопия с фотоэлектрическим сканированием [473], в третьем — фурье-спектроскопия большей части диска (51). Во всех исследованиях принимались тщательные меры по исключению влияния колец. Результаты согласо-

уются не очень хорошо; значение, найденное Трефтоном, в три раза больше значения той же полуширины, определенного Бергстралом, тогда как результаты де Берга заключены между ними. Так же как для линий H_2 , имеются указания на временные вариации. Часть вариаций, вероятно, обусловлена различием методик определения непрерывного спектра. В настоящее время наилучшим представляется результат де Берга [51] — 42 ± 11 м-амага, относящийся к области выше уровня давления в основании отражающего слоя ($2,8 \pm 0,6$ атм), причем следует учитывать, что это сильно усредненное по планете значение и что модель отражающего слоя очень сомнительна для Сатурна. Все эти результаты дают много меньшее значение, чем прежняя оценка 350 м-амага, полученная Койпером [266] эмпирически по полосам в области более коротких волн. Различие, несомненно, отчасти вызвано тем, что Койперу не оставалось ничего другого, как сравнивать свои спектры с лабораторными данными, полученными при гораздо более высоких температурах, но может также отчасти служить указанием на сложную неоднородную атмосферу.

Обилие NH_3 на Сатурне остается спорным вопросом. Даяхем [135] сообщил о его присутствии в количестве, «вероятно, не более, чем 2 м при атмосферном давлении». Позднее Спинрад [443] и Оуэн [354] совсем не смогли обнаружить аммиак, и Оуэн предположил, что раньше имеющиеся слабые линии метана были приписаны аммиаку. В 1966 г. Дживер и Спинрад [171] снова сообщили о присутствии аммиака, причем интенсивность линий составляла около $0,15 \pm 0,06$ от интенсивности соответствующей полосы (6450 Å) в спектре Юпитера. Малые вариации температуры на Сатурне могут вызвать значительные изменения в количестве газообразного аммиака в атмосфере «над облаками». Дживер и Спинрад [171] считают, что существуют «ясно выраженные короткопериодические изменения (протекающие в течение нескольких лет) в атмосфере Сатурна». Спектры, полученные Крукшенком [103] в декабре 1970 г., не показали присутствия аммиака, верхний предел, определенный на основании этой работы, составил 7 м·атм. Крукшенк [103] сообщил, что наблюдения в 1969 г. сильной полосы аммиака 1,5 мкм Койпером, Крукшенком и Финком были безуспешны. Он допускает верхний предел обилия всего 20 см·атм над уровнем с оптической толщиной, равной единице, что должно быть выбрано для этой

¹² Для модели атмосферы с отражающим слоем эффективное давление в два раза меньше давления на нижней границе.

длины волны. Мартин и др. [313] на основании исследований в области 4150 см^{-1} в 1973—1974 гг. нашли верхний предел равным ~ 2 см-амага, тогда как Баркер и Оуэн¹³ сообщили об обнаружении по полосе $\lambda 6450$ в количестве, «на порядок величины меньше, чем на Юпитере» (~ 1 м-амага?). Эти наблюдения не так различны, как может показаться, так как видимое обилие в первой полосе в 50—100 раз меньше, чем в последней, к тому же оба измерения неточны. В спектре, полученном Джиллетом и Форестом [166], есть намек на сильную ν_2 -полосу аммиака $10,5 \text{ мкм}$. Измерения тепловой температуры диска Сатурна на радиоволнах поддерживают точку зрения о присутствии аммиака в его атмосфере. Интерпретация радиоданных указывает на относительную концентрацию аммиака под облаками от $3 \cdot 10^{-5}$ [274] до $1,5 \cdot 10^{-4}$ [189].

Данных наблюдений, свидетельствующих о присутствии гелия на Сатурне, пока нет. Если учесть доказательства его наличия на Юпитере, подтвердившие теоретические ожидания, не возникает сомнений, что гелий на Сатурне в конечном счете будет найден.

Спектр Сатурна со средним разрешением ($\Delta\lambda/\lambda \approx 0,015$), полученный Джиллетом и Форестом [166] в области $7,5\text{—}13,5 \text{ мкм}$, дает намек на присутствие двух других соединений, найденных на Юпитере, — фосфена (PH_3) в количестве, вероятно, 2 см-амага и малых количеств этана (C_2H_6). Для надежного доказательства их присутствия нужны спектры с высоким разрешением.

Температура

Современные измерения температуры Сатурна как в инфракрасной, так и в микроволновой областях спектра впервые были сделаны примерно в то же время, когда были проведены измерения Юпитера. Результаты измерений в инфракрасных лучах собраны в табл. 10. Радиоизлучение Сатурна наблюдалось в диапазоне длин волн от $\sim 1 \text{ мм}$ до $\sim 94 \text{ см}$. Яркостные температуры диска в радиодиапазоне показаны на рис. 7. Ссылки на данные, использованные на этом рисунке, можно найти в статьях [485, 346, 529]. Хорошо заметна характерная черта спектра Сатурна — зависимость измеренной температуры от длины волны. Температура возрастает приблизительно от 130° K в миллиметровом

Таблица 10. Яркостные температуры Сатурна (до 1 мм)

Длина волн, мкм	Яркостная температура ¹ , $^\circ \text{K}$	Источник	Примечание
5	~ 120	[290]	
7,7—7,9	129	[166]	15% диска закрыто кольцами
8,5—11,5	~ 103	[166]	То же
10—14	103 ± 3	[14]	»
10—14	99 ± 3	[14]	В действительности измерения относятся к широте $+17^\circ$
17—25	$97,3 \pm 2$	[341]	На лямбе $95,5 \pm 2^\circ \text{ K}$
30—45	89 ± 4	[24]	Все кольцо и диск
45—80	94 ± 2	[24]	То же
65—110	97 ± 5	[24]	»
125—300	93 ± 4	[24]	»
30—300	88 ± 1	[24]	»
45—300	91 ± 1	[24]	»
1,5—350	97 ± 4	[31]	»

¹ Величины, которые снабжены буквой «с» перед значением температуры, относятся к центру диска. Остальные дают температуру, усредненную по большей части или по всему диску. Возможный вклад кольца указан в последнем столбце.

диапазоне до значения, близкого к 540° K , на 94 см . Такой ход качественно подобен тепловому радиоспектру Юпитера.

Для объяснения заметного роста температуры с длиной волны было сделано несколько предположений. Предполагалось, что избыточное излучение обусловлено 1) нетепловым излучением радиационного пояса, 2) тепловым излучением колец Сатурна, 3) свободно-свободным излучением из ионосферы Сатурна и 4) излучением его атмосферы. До настоящего времени было мало экспериментальных данных, которые свидетельствовали в пользу первых трех механизмов. Берге и Рид [50], Бриггс [72], Берге и Мулеман [48] провели интерферометрические измерения в области длин волн от $3,7$ до 21 см , которые исключают сильное излучение из радиационного пояса или кольца. По оценке Берге и Мулемана, на 21 см не более 6% общего излучения может принадлежать видимым кольцам и не более 5% — радиационному поясу. Галкис, Мак-Донаф и Крафт [188] показали, что для объяснения спектра на основе свободно-свободного излучения из ионосферы Сатурна мера эмиссии должна быть на много порядков больше, чем ожидаемая для Юпитера. Поэтому маловероятно, что свободно-

¹³ Замечание Баркера на собрании Отдела планетных наук, Пало-Альто, апрель 1974 г.

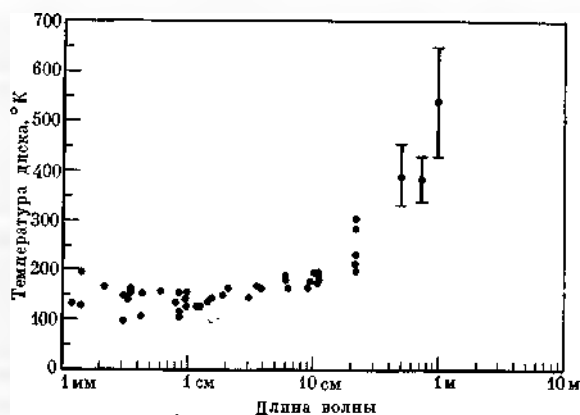


Рис. 7. Микроволновый спектр Сатурна

Величины ошибок указаны только для самых длинных волн, где мало наблюдения

свободная эмиссия из горячей ионосферы может объяснить наблюдаемый спектр. Некоторые авторы [274, 188, 525] показали, что многие особенности спектра Сатурна в сантиметровом диапазоне можно объяснить с помощью теплового излучения атмосферы, непрозрачность которой зависит от длины волны и в которой аммиак принимается главным источником непрозрачности в радиодиапазоне. Для объяснения наблюдений требуется глубокая конвективная атмосфера. Риксон и Уэлч [525] измерили также спектр Сатурна в окрестности инверсионной полосы аммиака 1,25 см и нашли доказательства того, что газообразный аммиак входит в состав верхней атмосферы Сатурна.

В трех исследованиях [52, 473, 51] метановой полосы $3\nu_3$ Сатурна были получены вращательные температуры между 130 и 140° K, несмотря на различное содержание. Энкрепаз и Оуэн [138] нашли вращательную температуру ~80° K по квадрупольным водородным линиям, указав на отклонения от равновесия по водороду при этих температурах. Эта проблема является еще более острой для Урана. Любая вращательная температура, определенная по водороду, в области, где кинетические температуры ниже 100° K, не может, вероятно, интерпретироваться обычным путем как равновесная термодинамическая.

Видимая поверхность

Облака Сатурна находятся в состоянии дифференциального вращения, причем по данным спектроскопических измерений доплеровского смещения, полученных Муром [330], период на экваторе составляет 10^4 м (±4 м), на широте 27° он на 6% больше, на

широте 42° — на 8% и на широте 57° — на 11%. Сатурн имеет так называемую экваториальную полосу, которая выглядит темной в синих лучах и яркой в красных, шесть облачных поясов в каждой полусфере и светлые зоны между ними. Всего при оптимальных условиях наблюдений выделяется по крайней мере 25 степеней оттенков [388].

В редких случаях на Сатурне появляются различные белые пятна, сохраняющиеся в течение нескольких дней или недель. Они никогда не достигают столь заметного вида или продолжительности жизни, как спорадические пятна на Юпитере [10]. Недавно наблюдавшееся на широте — 57,3° пятно было рекордным как по продолжительности существования, так и по величине широты. Его движение в течение 490 дней, с октября 1969 г. до февраля 1971 г., когда оно исчезло, представляется 169-дневной синусоидой со средним периодом вращения $10^4 36^m 27,9 \pm 0,2$ [388]. Размеры пятна составляли 8000 км с севера на юг и 6000 км с востока на запад.

Дольфус [122] собрал все данные о движении восьми хорошо наблюдавшихся пятен и нашел, что все три высокоширотных объекта (+57°, +36° и —36°) вращаются с периодом около $10^4 38^m$, тогда как четыре пятна, находившихся в пределах 8° от экватора, имели периоды между $10^4 12^m$ и $10^4 15^m$. Пятно на широте — 12,3° вращалось с периодом $10^4 21^m$. Таким образом, движение пятен не очень хорошо согласуется со спектроскопическим периодом вращения. Мур признал, что в его работе возможны большие ошибки, да и пятно может двигаться с определенно нетипичной скоростью вращения (или по крайней мере так, как это верно для Юпитера), так что результаты не удивительны. Девять пятен и одно спектроскопическое исследование недостаточны, чтобы сделать определенные выводы. Хайд [210] считает, что лучшие наблюдения покажут дискретную экваториальную струю, такую же, как и на Юпитере.

Опытные наблюдатели сообщали о наличии цветовых оттенков на Сатурне: оранжевом, голубом и др., но все цвета крайне слабы, исключая преобладающие вариации от белого до бледно-желтого и коричневатого-желтого [10]. Происхождение этих оттенков неизвестно, предположительно оно таково же, как и для Юпитера. Видимые облака — весьма вероятно, перистые аммиачные облака, но несколько более плотные, чем на Юпитере (см. раздел «Строение атмосферы»).

Крайне трудно провести хорошую интегральную (по всему диску) фотометрию Са-

турна вследствие присутствия колец. Ирвин и Лейн [233] использовали трехлетнюю гарвардскую фотометрию [235, 236], полученную с меняющимся относительно Земли наклоном колец, и редуцировали ее к данным при отсутствии колец. Полученные геометрические альбедо приведены в табл. 11. Эти авторы вычислили также приближенные фазовые коэффициенты (при отсутствии колец), составившие $0,013 \pm 0,007$ т/град для $\lambda\lambda 3500-5000$ и $0,035 \pm 0,010$ т/град для $\lambda\lambda 6200-10\,600$. В инфракрасных лучах от 2 до 3,2 мкм отражательная способность Сатурна выше, чем Юпитера, в области 3,2—4,2 мкм она очень низка для обеих планет [241]. Общая отражательная способность планеты и колец приблизительно на 30% выше около 2500 Å, чем у 3500 Å, и падает на более коротких волнах [497].

Более подробная фотометрия Сатурна проводилась большей частью путем полярных и экваториальных сканирований. Биндер и Мак-Карти [64], в частности, получили как экваториальные, так и меридиональные кривые потемнения к краю в девяти полосах от 0,6 до 1,55 мкм. Нормальные альбедо (или величины, близкие к ним) в функции длины волны для центра диска были получены Тейфелем и др. [463] в 1968 г. с разрешением

около 500. Избранные значения из их работы приведены в табл. 12. Экваториальная полоса является ярчайшей областью Сатурна в желтом и красном свете, а северная полярная область — самой темной [463]. В синих и фиолетовых лучах полярная область становится довольно яркой, а экваториальная полоса слабеет [463]. Как слабые, так и сильные полосы метана показывают падение поглощения от центра к лимбу вдоль экватора и увеличение от центра в направлении полюса вдоль центрального меридиана [463, 357]. Поглощение метана на широте -20° на 25—28% больше, чем на экваторе, — гораздо больше, чем вследствие прямого эффекта воздушной массы (по закону секанса) [463]. Эти эффекты можно интерпретировать путем изменения плотности аммиачных аэрозолей с широтой.

Энергетический баланс

Как уже говорилось, фотометрия Сатурна — гораздо более трудная задача, чем фотометрия Юпитера, из-за наличия колец. Никаких данных об интегральной фотометрии в ближней инфракрасной области спектра далее 1,06 мкм не опубликовано. Во многих исследованиях просто использовалось болометрическое альбедо Бонда для Юпитера, хотя имеющиеся данные показывают, что для Сатурна значение его несколько выше. Расчеты в настоящей главе основаны на неопубликованном значении 0,61, найденном Уокером [496]. Вычисленная на этом основании эффективная температура составляет 71°K . Быстро вращающееся тело с нулевым альбедо на расстоянии Сатурна от Солнца имело бы эффективную температуру 90°K . Широкополосные измерения Аумана и др. [31] дают температуру 97°K . Таким образом, оказывается, что Сатурн, подобно Юпитеру, излучает больше энергии, чем получает от Солнца, а именно в 3,5 раза больше, если принять болометрическое альбедо равным 0,61 и температуру 97°K . Указывалось, что кольца не так холодны, как думали, и что измерения Аумана и др. несомненно содержат вклад колец. Однако во время этих измерений (2 декабря 1968 г.) кольца были наклонены относительно Солнца всего на $13,2^\circ$ и не задерживали так много энергии, как в последние годы. В недавней работе Мерфи [341] для центра диска в области 17—25 мкм приводится температура $97,3^\circ\text{K}$ с небольшим уменьшением к краю. Тепловая непрозрачность в этой полосе пропускания меньше, чем непосредственно по обе стороны от нее, но вряд ли яркост-

Таблица 11. Интегральная фотометрия Сатурна¹

Полоса пропускания	Геометрическое альбедо	Полоса пропускания	Геометрическое альбедо
<i>U</i>	0,169	4 573 Å	0,318
<i>B</i>	0,302	5 012 Å	0,377
<i>V</i>	0,436	6 264 Å	0,498
3590 Å	0,484	7 297 Å	0,376
3926 Å	0,199	8 595 Å	0,297
4155 Å	0,240	10 635 Å	0,417

¹ По данным Ирвина и Лейна [233].

Таблица 12. Детальная фотометрия Сатурна¹

Длина волны, Å	Нормальное альбедо	Длина волны, Å	Нормальное альбедо
4100	0,26	6050	0,67
4400	0,31	6200	0,50
4800	0,42	6400	0,72
5200	0,48	6600	0,71
5600	0,52	6800	0,67
5850	0,67		

¹ Данные для центра диска по Тейфелю и др. [463].

ная температура в области 17—25 мкм может заметно превышать истинную эффективную температуру, так как иначе явно нарушится энергетический баланс.

Строение атмосферы (модели)

Как и в случае Юпитера, на Сатурне в тепловой непрозрачности доминирует поглощение H_2 , индуцированное давлением [478]. Термическая структура менее ясна, так как хуже определены источники внутренней энергии, неизвестно отношение водород/гелий и ниже температура (поэтому необходимо учитывать относительные количества орто- и параводорода). Неизвестно также обилие аммиака, который не был включен Трефтоном и Мюнхом [478] в качестве источника непрозрачности в расчеты лучистого равновесия. Есть свидетельства метанового поглощения в верхней атмосфере Сатурна, так же как и для Юпитера, повышающего температуру в области 7,7—7,9 мкм до 129° K [166].

Лучисто-конвективная модель для Сатурна была построена Паллукони [362] (см. табл. 13). Главное различие структур атмосфер Сатурна и Юпитера вызвано меньшей локальной силой тяжести, которая сильно

увеличивает шкалу высот. Паллукони принял влажный адиабатический градиент там, где он превышал лучистый, что является хорошим приближением в динамической модели [479], если учесть, что влияние других неопределенностей много больше. В принятый им состав (данный в примечаниях к таблице) не включены H_2S , так же как облака NH_4SH . На самом деле такой слой можно бы ожидать на верхней границе видимого облачного слоя из твердой H_2O , включенной в состав. Эффективное давление, при котором формируются линии H_2 и CH_4 , было принято ~0,5—1,5 атм. Это область в слое аммиачных облаков и соответствует вращательной температуре 130—140° K в модели Паллукони. Температура ~120° K, найденная Лоу и Дэвидсоном [290] по наблюдениям на длине волны 5 мкм, достаточно хорошо соответствует температуре верхней части облаков. Исследование инверсионной линии NH_3 1,25 см показывает, что оптическая толщина, равная единице, достигается при температуре около 135° K и давлении около $\frac{2}{3}$ атм [525]. Все это совместно, как можно было ожидать, с данными ограниченного числа современных наблюдений, на которых основаны расчеты модели.

Важно отметить, что отсутствуют оптические данные, свидетельствующие о наблюде-

Таблица 13. Номинальная модель атмосферы Сатурна¹

Давление, атм	Температура, °K	Плотность, г/см ³	Высота ² , км	H_p , км	H_g , км	w , м/л	Примечание
0,100	77,0	$3,59 \cdot 10^{-5}$	81,1	26,9	26,9		
0,168	77,0	$6,04 \cdot 10^{-5}$	67,1	26,9	26,9		
0,300	95,0	$8,37 \cdot 10^{-5}$	49,8	33,1	51,7		Тропапауза
0,727	130,0	$1,55 \cdot 10^{-4}$	15,3	45,4	69,7	0,003377	
1,00	145,2	$1,91 \cdot 10^{-4}$	0,0	50,7	77,3	0,0762	Нуль-пункт высоты ²
1,12	151,0	$2,05 \cdot 10^{-4}$	-5,9	52,7	80,2	0,205	Основание облаков NH_3
3,00	210,0	$3,95 \cdot 10^{-4}$	-67,5	73,4	109,5		
3,94	230,0	$4,74 \cdot 10^{-4}$	-88,4	80,3	119,1	0,0743	
5,10	250,0	$5,64 \cdot 10^{-4}$	-109,9	87,2	128,0	0,574	Твердая H_2O
6,92	275,9	$6,94 \cdot 10^{-4}$	-138,1	96,3	141,3	4,82	Раствор $H_2O - NH_3$
							Основание облачного слоя
10,0	309,9	$8,93 \cdot 10^{-4}$	-175,5	108,1	157,6		
30,0	434,1	$1,91 \cdot 10^{-3}$	-317,0	151,5	216,4		
100,0	617,8	$4,48 \cdot 10^{-3}$	-536,0	215,6	302,1		
300,0	841,3	$9,99 \cdot 10^{-3}$	-813,7	293,6	405,5		
1000,0	1166,2	$2,37 \cdot 10^{-2}$	-1232,1	406,9	554,9		

¹ По Паллукони [362]. Использован состав: 88,572% H_2 ; 11,213% He; 0,105% H_2O ; 0,063% CH_4 ; 0,013% Ne; 0,015% NH_3 и 0,019% другие (по числу частиц). H_p — шкала высот по

давлению, H_g — шкала высот по плотности, w — масса облака на единицу объема газа.

² Нуль-пункт высот выбран произвольно при давлении 1 атм.

ниях областей, лежащих ниже верхней части облачного слоя, как это имеет место для Юпитера. Это тоже не удивительно, так как ожидается большая плотность облаков. Рассмотренные выше кривые потемнения к краю в экваториальном поясе должны указывать, что простая модель отражающего слоя для образования спектральных линий непригодна. Они скорее указывают на уменьшение поглощения от центра к краю, чем на увеличение. Возможно, что модель отражающего слоя может быть использована для определения относительного содержания в центре диска, тогда как для объяснения потемнения к краю должно быть учтено рассеяние. Так было в случае Юпитера. Наконец, следует помнить, что имеются значительные пространственные вариации по диску (см., например, [64]), так же как, вероятно, и временные. Статическая модель атмосферы едва ли может объяснить такие изменения.

Строение недр (модель внутреннего строения)

С современной точки зрения модель внутреннего строения Сатурна такова же, как и рассмотренная для Юпитера. Однако практически трудно построить полностью конвективную модель Сатурна. Хотя его средняя плотность много ниже, чем Юпитера, у Сатурна меньше масса, а следовательно, и меньшее гравитационное сжатие. Поэтому во всех моделях Сатурна всегда требуется гораздо большее отношение гелий/водород, чем в Юпитере, а также должно быть ядро с высоким молекулярным весом [223]. Полностью конвективные модели Хаббарда [249] требовали только 27% водорода (по массе) и очень высокую центральную температуру. Если внутренний источник энергии несколько слабее, чем считали раньше, из-за неточности определения потока от колец (см. раздел «Энергетический баланс») при учете ядра, то всегда можно подобрать вполне «удовлетворительное» отношение гелий/водород. «Типичная» модель внутреннего строения Сатурна, по данным Хаббарда и Смолуховского [223], представлена в табл. 14. Она только иллюстрирует общий ход вероятных физических условий в Сатурне. Частные модели можно найти в оригинальных работах¹⁴.

Таблица 14. «Типичная» модель Сатурна¹

Радиус, 10 ⁴ км	Доля массы	Давление, Мбар	Плотность, г/см ³
5,7	0,98	0,001	0,01
5,5	0,95	0,01	0,06
5,0	0,84	0,1	0,3
4,5	0,8	0,4	0,6
4,0	0,7	0,9	0,9
3,5	0,6	1,9	1,1
3,0 ²	0,5	2,5	1,4
2,5	0,4	4	1,7
2,0	0,3	5	1,9
1,5	0,25	6	2,0
1,0	0,2	7	~3
0,5	0,05	~10	±3
0,0	0,0	~10	~3 ³

¹ По Хаббарду и Смолуховскому [223].

² Приближенный радиус, на котором в большинстве моделей предполагается переход молекулярного водорода в металлический.

³ Не включено возможное плотное ядро.

УРАН И НЕПТУН

Уран и Нептун — довольно трудные для исследования тела. Причины очевидны. Визуальная поверхностная яркость Урана составляет менее 1/10 от яркости Юпитера, а полный поток в видимой области спектра в 1000 раз меньше. Поток от Нептуна еще слабее. Плотности потоков в инфракрасной и микроволновой областях также меньше, чем от Юпитера. Тем не менее постоянное усовершенствование приборов для оптической и микроволновой областей спектра дало возможность значительно продвинуться в изучении этих уникальных тел, особенно за последние пять лет.

Атмосферы

Состав

Наличие на Уране и Нептуне водорода на основе наблюдений впервые было установлено в 1952 г. Герцбергом [205] при сравнении планетарных характеристик, наблюдавшихся Койпером [266] на Уране и Нептуне, с лабораторными спектрами, имеющими дипольную линию $S_2(0)H_2$ (λ8270), индуцированную давлением. В 1963 г. Спинрад [442] сообщил о наблюдении первой квадрупольной линии H_2 на Уране — $S(0)$ полосы 4—0, и, наконец, в 1973 г. квадрупольные линии на Нептуне были обнаружены Трефтоном [475].

¹⁴ Детальная модель внутреннего строения Сатурна, с учетом ядра рассчитана в работе В. Н. Жаркова, А. Б. Макалкина, В. П. Трубицына. Астрон. ж., 1974, 51, № 6.

В настоящее время имеется несколько рядов наблюдений квадрупольных линий в спектре Урана. Эти наблюдения согласуются друг с другом не очень хорошо. Сейчас неясно, могут ли быть различия вызваны реальными изменениями, как в случаях Юпитера и Сатурна, или они просто отражают трудности наблюдений. Для Урана и Нептуна, в частности, трудно определить даже положение непрерывного спектра. Так как попытки получить реальные обилия сильно зависят от модели, то в табл. 15 проведены только эквивалентные ширины (проблема обилия рассматривается в разделе «Строение атмосферы»). Все дипольные линии H_2 , индуцированные давлением, — очень широкие и мелкие и поэтому особенно трудны для точного измерения в спектре, где всюду существует сильное поглощение CH_4 . Приблизительные эквивалентные ширины трех из этих линий даны для каждой планеты Белтоном и Спинрадом [43]. Впервые о наличии полос поглощения в спектре Урана сообщил в 1869 г. Секки. В 1932 г. Вилдт заподозрил, что они принадлежат метану, в 1933 г. Данхем доказал это для инфракрасной полосы на Юпитере, а Адель и Слайфер в 1934 г. показали то же для случая Урана. Работа Слайфера (первое десятилетие XX в.) подтвердила более ранние предположения, что спектр Нептуна очень похож на спектр Урана, за исключением поглощения, которое оказалось даже более сильным. Таким образом, работы Вилдта, Данхема, Слайфера и Аделя подтверждают также присутствие метана на Нептуне. Каждое лабораторное исследование

CH_4 с возрастающими длиной пути и разрешением приводит к отождествлению ранее не объяснимых характеристик в спектрах Урана и Нептуна. Исследование Оуэном [356] в 1967 г. полос $\lambda 7500$ (Койпер) CH_4 на длине пути 5,15 км-амага указало на присутствие 3,5 км-амага метана на Уране и 6 км-амага на Юпитере. Эти величины неизбежно грубы, так как неизвестно влияние различия в температуре между лабораторными условиями и условиями на планетах на эквивалентные ширины линий. Лабораторные спектры с 8,45 км-амага метана и новые спектрограммы Урана в полосе $\lambda 7500$, полученные Лютцем и Рамзеем [294], позволили уточнить интенсивность линий и длины волн и показали, что обилие метана на Уране может быть еще большим. Совсем недавно Оуэн и др. [358], показали, что линия $\lambda 6420$, обычно приписываемая вынужденному дипольному переходу в H_2 , на самом деле, по крайней мере, в основном вызывается метаном. Даже лабораторный столб 10,1 км-амага CH_4 был недостаточен для подбора этой и других характеристик Урана. Принимая, что спектры формируются на среднем пути в атмосфере, составляющем трехкратную длину вертикального столба, снова получаем указание на более чем 3,5 км-амага метана. Истинное обилие зависит как от температуры, так и от модели, но определенно очень велико. Как видно в спектрах, полученных Галкиным и др. [158], многие полосы очень высоких оборотов имеют значительную интенсивность даже ниже 5000 Å. Согласно фотометрии Уомстекера [500], обилие метана на Нептуне не-

Таблица 15. Эквивалентные ширины (в мÅ) квадрупольных линий H_2 в спектрах Урана и Нептуна

Линия	Уран					Нептун	
	Джизер и Спинрад [171]		Лютц [293]	Прайс [376]	Трефон [474] ¹	Энкреназ и Оуэн [138]	Трефон [475]
	Декабрь 1964 г.	Март 1965 г.	Май и июль 1971 г.	Май 1972 г.	3—0, 1972 г. 4—0, 1972—1973 гг.	Февраль 1973 г.	Май—июль 1973 г.
$S(0), 4-0$ $\lambda 6435$	26 ± 10	37 ± 12	—	62 ± 19	30 ± 3	30^{+4}_{-3}	28 ± 4
$S(1), 4-0$ $\lambda 6368$	35^{+25}_{-10}	49 ± 15	—	58 ± 13	29 ± 3	29^{+6}_{-3}	31 ± 4
$S(0), 3-0$ $\lambda 8273$	—	—	95 ± 25	—	170 ± 18	—	—
$S(1), 3-0$ $\lambda 8151$	—	—	114 ± 15	—	167 ± 20	—	—

¹ И личное сообщение.

сколько меньше, чем на Уране, а не больше, как обычно принимается. Для обеих планет нужны дополнительные наблюдения.

В оптических спектрах Урана и Нептуна аммиак не был отождествлен. Его присутствие ожидается теоретически, но только глубоко в атмосфере [284]. Сильным, основанным на наблюдениях аргументом в пользу присутствия аммиака служит довольно одинаковая яркостная температура всех планет-гигантов по измерениям близ инверсионной полосы 1,25 см [189].

Прямые данные о наличии гелия на Уране и Нептуне отсутствуют. Температура термосферы Нептуна, обсуждаемая в следующем разделе, указывает на то, что обилие не превосходит 50% (по числу частиц).

Трефтон [477] нашел в спектре Урана несколько сильных неотожествленных линий между 1,04 и 1,07 мкм. Он подозревает, что они могут принадлежать изотопу метана или одному из простых углеводородов — производных метана, но равным образом могут принадлежать какому-либо другому новому атмосферному газу.

Температуры

Лоу [288] провел первые тепловые измерения Урана в инфракрасной области в 1966 г. и определил температуру ($55 \pm 3^\circ \text{K}$ в окне 17, 5—25 мкм). Харпер и др. [198] нашли для области 350 мкм значение 45°K , а Лоу и др. [292] — $49 \pm 3^\circ \text{K}$ по измерениям между 28 и 40 мкм. Недавно Моррисон и Крукшенк, работая на большой высоте (4200 м) в обсерватории Мауна-Кеа, смогли измерить поток от Урана и Нептуна в области 17—28 мкм. По их данным, температура составляет $54,7 \pm 1,8^\circ \text{K}$ для Урана и $57,2 \pm 1,6^\circ \text{K}$ для Нептуна [336]. Эти величины основаны на несколько различающихся планетарных радиусах, но при таких температурах и длинах волн изменение радиуса на 1% вызывает изменение температуры на $0,1^\circ \text{K}$.

Радионизлучение Урана и Нептуна наблюдалось в диапазоне от 1,4 мм до 11 см. Типичные спектры яркостных температур дисков этих планет показаны на рис. 8 и 9. Ссылки на большую часть данных, использованных при составлении рисунков, можно найти в работах [184, 346, 485]. Как и в случаях Юпитера и Сатурна, яркостные температуры рассматриваемых планет близки к 130°K в области длин волн около 1 см и возрастают в сторону более длинных волн. Если бы источником энергии было только

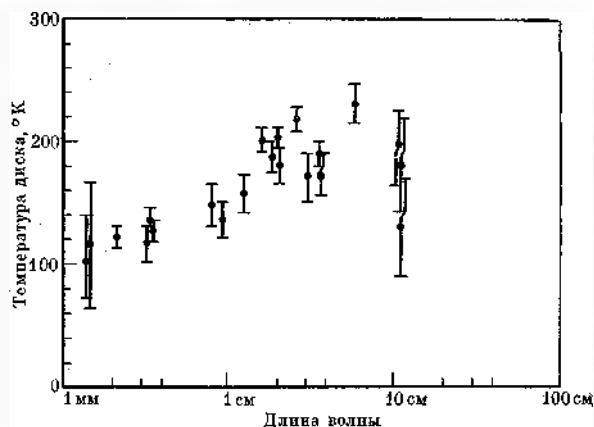


Рис. 8. Микроволновый спектр Урана

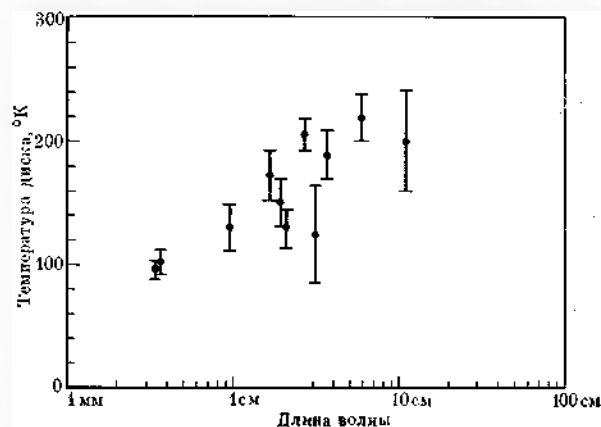


Рис. 9. Микроволновый спектр Нептуна

Солнце, то температура этих планет была бы около 50°K . Почему эти планеты теплее по данным измерений в радиодиапазоне, просто объясняется тем, что радионизлучение возникает глубоко в атмосфере, где последняя теплее и плотнее, чем на уровне возникновения инфракрасного излучения. Небольшие количества аммиака, как ожидается, обеспечивают непрозрачность атмосферы [184]. В то время как имеется большое число молекул, которые поглощают на длинах волн около 1 см, прозрачность увеличивается с ростом длины волны. В этой области только две молекулы, NH_3 и H_2O , имеют очень сильные линии поглощения, и поэтому они, вероятно, в основном составляют атмосферы планет-гигантов. В дальнейшем можно сделать вывод о присутствии NH_3 на основании различий процессов конденсации воды и аммиака.

Единственные линии с хорошо определенными квантовыми числами, наблюдаемые на Уране и Нептуне, принадлежат молекуляр-

ному водороду. Вращательные температуры могут быть определены для каждой пары линий в данной полосе, указанной в табл. 15, если, как принимается, H_2 является равновесным, а не нормальным водородом. Эти температуры обычно попадают в интервал $110-120^\circ K$. Разброс измерений и специфическое поведение, уже обсуждавшееся на более обширном материале для Сатурна, требуют соблюдения осторожности при интерпретации. Попытки Оуэна [355] приписать квантовое число полосе $\lambda 6800$ метана указывают на вращательную температуру $60 \pm 15^\circ K$. Так как эта величина на $25^\circ K$ ниже, чем температура, которую можно ожидать для наблюдаемых количеств метана в состоянии насыщения, ее смысл совершенно неясен.

В 1968 г. в Австралии и Японии наблюдалось покрытие Нептуном звезды BD—17°4388. Оригинальные данные наблюдений в Австралии были опубликованы Фриманом и Линга [157], в Японии — Ковалевским и Линком [259]. Полный анализ наблюдений в Австралии методом инверсии кривой блеска был недавно опубликован Веверка и др. [493], указавшими на шкалу высот верхней атмосферы 55—58 км. Это приводит к температуре $150^\circ K$ для атмосферы из чистого H_2 и еще более высокой в прямой зависимости от значений молекулярного веса. Авторы [493] указали, что значительное обилие метана на Нептуне должно обеспечить эффективное лучистое охлаждение термосферы. Это означает, что отношение $H:He$ определено не больше 50% (по плотности).

Уран является уникальной планетой солнечной системы по наклонению оси, составляющему 98° . В 1966 г. ось Урана практически находилась в плоскости, перпендикулярной солнечному радиус-вектору, причем все части планеты попадали на освещенную сторону за 10,8 часа — период вращения Урана. В 1985 г. северный полюс Урана (если принять, что север определяется вектором угловой скорости) будет обращен к Солнцу и температура в этой видимой полусфере, как можно ожидать, возрастет на 20% в предположении отсутствия эффективного теплового обмена между северным и южным полушариями. Действительно, Стоун [450] полагает, что время лучистой релаксации для Урана столь продолжительно, что существенные сезонные явления маловероятны. Он предсказывает, что, получая больше тепла от Солнца, полярные области будут горячее, чем экваториальные.

Видимые поверхности

Даже в крупный телескоп Уран обычно виден как малый голубовато-зеленоватый диск без заметных деталей, за исключением потемнения к краю. Баллонный телескоп «Стратоскопа-2» во время полета 26—27 марта 1970 г. не показал никаких характерных черт на поверхности. Даниэльсон и др. [108] определили верхний предел контраста любой поясоподобной структуры на длинах волн $\lambda 3800-5800$ равным 5%. Однако лучшие наблюдатели, использовавшие большие телескопы-рефракторы (апертура >50 см), обычно сообщали о двух слабых экваториальных полосах по обе стороны яркой зоны и более темных полюсах в моменты наилучшей видимости [11]. Самое интересное, что фактически все наблюдатели находили полосы несколько наклоненными к плоскости спутников [11]. Вероятно, контраст полос меняется.

Нептун по наблюдениям в средние и крупные телескопы почти всегда описывается как малый голубовато-зеленый диск без деталей. В описании Дольфюса [121] отмечаются заметные потемнения к краю и очень слабые пятна неправильной формы, полосатая структура не замечена.

В связи с отсутствием заметных деталей на поверхности для определения периодов вращения использовались спектроскопический и фотометрический методы. В первом методе скорость вращения измерялась по доплеровскому смещению спектральных линий. В 1930 г. Мур и Мензел [332] опубликовали значение периода спектроскопического вращения для Урана — 10,8 часа (период, цитируемый обычно и сегодня). Они отмети-

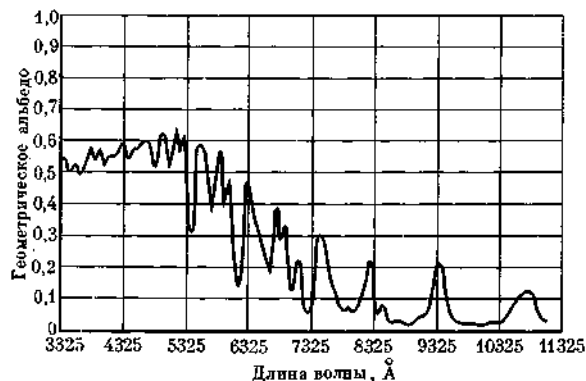


Рис. 10. Геометрическое альбедо Урана ($\lambda 3325-11100$) (принято по данным Йонкина [531])

ли, что он может быть ошибочным на полчаса, хотя и находится в хорошем согласии с ранними спектроскопическими наблюдениями Лоуэлла и Слайфера, проведенными в 1912 г. В 1928 г. Мур и Мензел [331] определили, что период вращения Нептуна составляет $15,8 \pm 1,0$ часа (принят и в настоящее время).

В 1917 г. Кэмпбелл (вторичная ссылка [11]) сообщил о колебаниях яркости Урана в 1916 г. в пределах $0^m,15$ с периодом $10^h 49^m 26^s,4$. Позднее колебания, по-видимому, исчезли.

Харрис [199] опубликовал большой список положительных и отрицательных сообщений о колебаниях яркости Урана. Реальны ли эти колебания и связаны ли они с активностью пояса или это результат неточности ранних фотометрических наблюдений, все еще неясно, однако никто из наблюдателей, применявших современный фотоэлектрический фотометр, не сообщал о вариациях яркости. Аналогичное положение имеет место и для Нептуна.

Большие количества метана в атмосферах Урана и Нептуна вызывают огромное поглощение в красной и инфракрасной областях спектра и по крайней мере частично ответственны за голубовато-зеленоватый цвет этих планет. Предполагается, однако, что некоторое водородное поглощение (индуцированное давлением) необходимо для объяснения геометрического альbedo [500]. Наиболее важное ограничение при построении моделей атмосфер связано с необходимостью удовлетворить данным о геометрическом альbedo.

Существуют три значительных ряда данных по альbedo: наблюдения Уомстекера [500], полностью покрывающие диапазон $0,3-1,1$ мкм с разрешающей силой $\lambda/\Delta\lambda \sim 30$, для обеих планет; данные Эпплби и Ирвина [23] и Эпплби [22] в десяти длинах волн для Урана и в семи для Нептуна с несколько большим разрешением и наблюдения Йонкина [531] для Урана, полностью покрывающие область $0,33-1,11$ мкм с разрешением 50 \AA ($\lambda < 0,7$ мкм) и 100 \AA ($\lambda > 0,7$ мкм). Приведенные к одним и тем же радиусам, эти три ряда согласуются достаточно хорошо. По данным Йонкина, в красной и инфракрасной областях спектра наблюдаются наибольшие пики и провалы, так как имеется лучшее разрешение в этом участке, занятом сильными полосами метана. Кривая геометрического альbedo, по данным Йонкина, приведенная к радиусу, данному в табл. 1, изображена на рис. 10. Работа Уомстекера [500] показы-

вает, что Нептун примерно идентичен Урану в области длин волн короче $0,54$ мкм, но характеризуется более низкими пиками и более мелкими провалами в области поглощения метана, что, вероятно, указывает на большую ширину полос метана. Биндер и Мак-Картти [63] измерили альbedo Урана на длинах волн $1,26; 1,62; 1,74; 2,17$ и $2,27$ мкм с полосами пропускания от $0,098$ до $0,062$ мкм и получили величины $0,02$ или меньше для каждой длины волны. Ультрафиолетовое альbedo было определено с помощью орбитальной астрономической обсерватории Сэвведж и Колдуэлл [411] нашли одинаковые значения альbedo для Урана и Нептуна на длинах волн 2590 и 4000 \AA , тогда как Уран имеет еще более высокое альbedo ($\sim 0,7$) на $\lambda 2110$.

Йонкин и Мюнх [531, 533] нашли болометрическое геометрическое альbedo Урана равным $0,32$. Приведенное к радиусу, указанному в табл. 1, оно становится равным $0,27$. Принимая для фазового интеграла на всех длинах волн значение $1,25$, предложенное Йонкиным, мы получили для болометрического альbedo Бонда Урана величину $0,33$. Существующая фотометрия Нептуна достаточно сходна с фотометрией Урана, поэтому для Нептуна можно принять то же значение альbedo, что и для Урана. Так как максимальный угол фазы при наблюдениях с Земли не превышает $3^\circ,1$ для Урана и $1^\circ,9$ для Нептуна, очевидно, что точное исследование радиационного баланса возможно только с космических зондов.

Одним из важных типов данных, которые обеспечивают существенное граничное условие при построении моделей атмосфер, являются кривые потемнения к краю. Очевидны трудности получения надежных данных для тел, угловые диаметры которых равны только $4''$ и $2'',5$; фактически данных для Нептуна нет. Даниэльсон и др. [108] по снимкам Урана, сделанным «Стратоскопом-2», получили прекрасные кривые для участка $\lambda\lambda 3800-5800$. Синтон [427] показал, что на 8870 \AA имеет место некоторое поярчение к краю в середине сильной полосы метана, где альbedo составляет всего $1-2\%$.

Строение атмосфер (модели)

Так же как в случаях Юпитера и Сатурна, тепловая непрозрачность атмосфер Урана и Нептуна определяется главным образом водородом [467, 470]. Дополнительная непрозрачность, создаваемая метаном, стала бы

существенной, как предположили Фокс и Озье [152], только в случае, если бы обе планеты имели мощные внутренние источники энергии. Рассмотренные выше измеренные в инфракрасных лучах температуры Урана совместимы с ожидаемой эффективной температурой, вычисленной при чисто солнечном нагреве, за исключением данных для 300—500 мкм, где температура аномально низка. Значение температуры Нептуна, найденное для области 17—28 мкм, по-видимому, высоко, и Трефтон [476] предполагает, что планета имеет внутренний источник тепла, который может быть следствием приливной диссипации, вызываемой Тритоном — очень большим близким спутником Нептуна.

Очевидные источники видимой непрозрачности в атмосферах Урана и Нептуна включают релеевское и рамановское рассеяние H_2 , очень слабое квадрупольное и более сильное индуцированное дипольное поглощение H_2 и очень сильное поглощение метана. Чисто молекулярная атмосфера, обладающая только этими источниками поглощения, не может удовлетворить измеренным геометрическим альбедо и эквивалентным ширинам линий H_2 и CH_4 на обеих планетах [43, 500]. Прини и Льюис [378] показывают, что плотный облачный слой из частиц твердого NH_3 должен образовываться на Уране на уровне при температурах около 170° K и давлении 8 бар, если, как ожидается, этот газ присутствует в атмосфере и если профиль температуры, определенный Трефтоном [467] в его работе по тепловой непрозрачности, является разумным первым приближением. Должна быть также тонкая дымка CH_4 с основанием на уровне ~60° K и 0,4 бар. Такая модель совместима с кривой потемнения к краю, полученной по снимкам «Стратоскопа-2» [108]; количество H_2 над верхним краем облаков NH_3 (≥ 370 км-амага) достаточно хорошо согласуется с измеренными эквивалентными ширинами квадрупольных линий H_2 в такой модели [43] и с наблюдаемыми геометрическими альбедо [500]. Недавняя работа Даниэльсона [106] указывает, что относительное обилие CH_4 не может быть выше примерно 10^{-2} , так как иначе получится слишком толстый облачный слой CH_4 . Положение с Нептуном менее ясно вследствие малого числа наблюдений. В связи с более высокой силой тяготения на поверхности давление в облачном слое NH_3 должно быть выше, количество H_2 над этим слоем — больше и любое отражение от слоя должно иметь меньшее значение, чем на Уране. Высоко

в атмосфере Нептуна могут существовать тонкие аргонные облака [477].

Детальная кривая блеска, полученная в 1968 г. во время покрытия Нептуна звездой BD — 17°4388, обеспечивает количественными данными только верхнюю атмосферу Нептуна. Веверка и др. [493] нашли, что «квазилинейная» шкала высот равна 55—58 км, хотя имеются локализованные структуры, показывающие колебания между 30 и 80 км. При плотности 10^{15} см⁻³ в атмосфере из чистого H_2 температура должна быть около 130° K с малым положительным градиентом в сторону больших высот. Любая примесь тяжелых газов приводит к росту этой температуры прямо пропорционально среднему молекулярному весу. Из-за отсутствия многих данных анализ сложных деталей профиля преломляющей способности не проводился. Веверка и др. [493] ожидают, что ионосфера Нептуна несколько холоднее, чем юпитерианская, вследствие присутствия больших количеств метана и его фотопродуктов, которые являются эффективными излучателями, а также ожидают более низкую эффективную температуру Нептуна. Данных наблюдений для верхней атмосферы Урана не существует.

Строение недр

Реальных моделей внутреннего строения Урана и Нептуна в том смысле, какие имеются для Юпитера и Сатурна, не существует¹⁵. Вычисленные Запольским и Салпетером [535] диаграммы масса — радиус для однородных холодных тел показывают, что эти планеты, вероятно, содержат большие количества легких элементов, но не так богаты водородом, как Юпитер и Сатурн [222]. Некоторое число моделей, содержащих металлический аммиак (NH_3) или смесь CH_4 , NH_3 , H_2O и Ne, в пропорциях, соответствующих обилиям на Солнце, построено в 60-е годы [393, 373, 383] однако недавние существенные измерения (~10%) значений радиусов Урана и Нептуна привели к тому, что они устарели даже в качестве грубых моделей. Макалкин [300] пересчитал холодные (уравнение состояния для 0° K) модели Нептуна Рейнольдса и Саммерса [393], используя новые значения радиусов. Наиболее подходит модель с большей жидкой оболочкой и меньшим твердым ядром с более высокой

¹⁵ См. также В. Н. Жарков, В. П. Трубицын, Л. В. Самсоенко. Физика Земли и планет. М., «Наука», 1971. — Прим. ред.

центральной плотностью, но в действительности это не вполне соответствует данным наблюдений. Макалкин [300] полагает, что горячая модель дает большие возможности для улучшения соответствия, но замечает, что соответствия можно добиться также и путем изменения состава. Жарков и Трубицын [6] рассмотрели горячие модели Урана и Нептуна с адиабатическими температурными градиентами. В таких моделях ядро из тяжелых элементов должно быть жидким, даже начиная со столь низких температур, как 50°K , на уровне давления 1 бар¹⁶.

В настоящее время невозможно установить, имеют ли Уран и Нептун твердые поверхности, а если имеют, то поверхности находятся, вероятно, на глубине 5000 км. Уточненные значения радиуса, сжатия и гравитационных членов более высоких порядков, периода вращения, состава атмосферы и ее структуры нужны в качестве граничных условий, прежде чем удастся построить модель внутреннего строения, которая даст надежные результаты.

ПЛУТОН

Общие сведения и физические характеристики

Плутон был открыт 18 февраля 1930 г. Томбо [466] после 25 лет целенаправленных интенсивных поисков. Его орбита обладает наибольшим эксцентриситетом и наиболее высоким наклоном среди всех планет. Близ перигелия, которого он достигнет в 1989 г., он будет даже ближе к Солнцу, чем может подойти Нептун, а в середине интервала между узлами орбиты он поднимается на миллиард с четвертью километров над плоскостью эклиптики. Вследствие такого наклона в настоящее время катастрофическая встреча Плутона с Нептуном невозможна. В 1965 г. Кохен и Хаббард [96] опубликовали результаты исследования возмущений, покрывающие период 120 000 лет. При этом была обнаружена, по-видимому, устойчивая либрация пары Плутон — Нептун с периодом 19 670 лет. Исследование показало, что в действительности Нептун и Плутон никогда не подходят друг к другу ближе, чем на 18 а.е., и что наибольшее сближение происходит всегда, когда

Плутон находится в афелии. Более поздние исследования только усилили это заключение.

Вильямс и Бенсон [521] провели вычисления на интервале $4,5 \cdot 10^6$ лет и подтвердили существование колебаний с периодом 20 000 лет на более длительном отрезке времени, а также обнаружили другие резонансы, один из них с периодом 3 955 000 лет. Общее влияние всех этих явлений приводит к увеличению минимального расстояния Плутон — Нептун и очевидной устойчивости внешней части солнечной системы. Интересно заметить, что минимальное расстояние (16,7 а.е.) между Плутоном и Нептуном, как указали Уилкинс и Синклер [518], значительно больше минимального расстояния (10,6 а.е.) между Плутоном и Ураном.

Литтлтон [295] выдвинул идею о том, что Плутон мог быть спутником Нептуна, оторвавшимся от него. Койпер [269] и Рабе [381, 382] поддерживали гипотезы отрыва, как вероятное следствие протопланетной теории происхождения солнечной системы. Предлагались два механизма отрыва, которые, однако, совершенно различны. Плутон с физической точки зрения гораздо более похож на спутник планеты-гиганта, чем на сами планеты. С другой стороны, исследования резонансных явлений, упомянутые в предшествующем абзаце, указывают на исключительную устойчивость орбиты Плутона. Вильямс и Бенсон [521] считают невероятным, что либрация с периодом 20 000 лет началась позже, чем в период времени, когда массы планет стали близки к их современным значениям. Современную устойчивость и ранний отрыв от Нептуна нельзя считать несовместимыми, но упомянутое исследование неизбежно делает гипотезу отрыва менее привлекательной, чем казалось раньше. Только детальное изучение и сравнение Плутона и Тритона, вероятно, покажут, могли ли они иметь общее происхождение.

Во все телескопы, кроме самых крупных, Плутон виден как точечный источник света, но даже и в крупнейшие его диск можно видеть только при наилучших условиях наблюдений. По прямым измерениям Койпера [265] в 1950 г. диаметр Плутона составил $0'',23$, или около 5860 км. Ошибка может достигать 50%. Гораздо более точный метод измерения таких малых углов — фотометрические наблюдения покрытий звезд, но такие покрытия — редкое случайное событие. При «очень близком прохождении» недавно установлен крайний верхний предел диаметра Плутона — 6800 км [194].

¹⁶ В работе [6] показано, что в Уране и Нептуне при адиабатическом градиенте температуры (несмотря на высокое давление в недрах) остается жидкая вода — основной компонент этих планет. — *Прим. ред.*

Массу Плутона определить трудно, так как требуется измерять возмущение движения большого тела — Нептуна меньшим — Плутоном. Кроме того, определение массы Плутона усложняется тем, что он со времени своего открытия совершил небольшую часть оборота. За все время, в течение которого наблюдался Плутон (с учетом наблюдений до его открытия), с 1846 г. он совершил только половину оборота. Наилучшее определение массы Плутона в настоящее время дает значение 0,11 земной массы [417]. Эта масса с учетом диаметра 6400 км приводит к плотности $4,9 \text{ г/см}^3$. На самом деле, история попыток определения массы Плутона — это история постоянных неточностей с «лучшим» значением 0,91 массы Земли, принимавшимся до недавнего времени (до 1968 г.). По мнению Холлидея [193], малые изменения в массах Сатурна или Урана могут легко привести к большому изменению в массе, найденной для Плутона. Наиболее «безопасным» может быть заключение Аша и др. [30]: «Масса Плутона не может быть определена достоверно из существующих данных».

Впервые период вращения Плутона был измерен в 1955 г. Уокером и Харди [495] фотометрическим методом. Позднейшие определения периода вращения, полученные путем сопоставления более чем 20-летних данных, дали значение $6,38737 \pm 0,00018$ суток [345]. Хотя период вращения постоянен, звездная величина V в средней оппозиции и амплитуда кривой блеска меняются. Андерсон и Фикс [21] нашли, что средняя яркость Плутона уменьшилась на $0^m,20$, а амплитуда кривой блеска возросла от $0^m,11$ 20 лет назад до $0^m,22$ в настоящее время. Приписывая эти изменения вариациям альбедо в подземной точке ¹⁷ на Плуtone при движении планеты вдоль орбиты, они отнесли вариации на счет наклона оси Плутона. Наклон оказался «вероятно, большим, чем 50° ».

Атмосфера

Вследствие малой массы и низкой температуры Плутон может и не обладать атмосферой. Многие потенциально возможные атмосферные молекулы, такие, как CO_2 , H_2O и NH_3 , должны находиться в замерзшем виде на поверхности. Другие молекулы — H_2 и He — должны были улетучиться. Атмосфера могла бы содержать крайне малые количества CH_4 и/или N_2 , но даже при 50°K давление

паров этих составляющих крайне низко. Тяжелые инертные газы, например аргон и неон, могли бы создать постоянную атмосферу, но они трудны для обнаружения спектроскопическим методом. Харт [201] нашел, что спектрофотометрия Фикса и др. [147] допускала бы неоновую атмосферу с давлением 1 атм, но это кажется несовместимым с атмосферным давлением 3 атм, так как в результате релеевского рассеяния увеличится ультрафиолетовое альбедо.

Койпер [263] при спектроскопическом исследовании Плутона с низкой дисперсией (720 и 340 Å/мм) в видимой красной области спектра не нашел свидетельств присутствия атмосферы. В настоящее время доступна значительно более высокая дисперсия, но наибольшие надежды на обнаружение атмосферы, которая может состоять в значительной мере из инертных газов, должны быть связаны с экспериментом по затмению космического аппарата.

Фотометрические свойства

Как уже отмечалось при обсуждении вопросов о периоде вращения и наклоне оси, звездная величина Плутона, приведенная к расстоянию в средней оппозиции, увеличивается, так же как и амплитуда ее суточных колебаний. В перигелии Плутон должен быть более чем на одну звездную величину ярче, чем на его среднем расстоянии. Причина — большой эксцентриситет орбиты, а не эффект ярких полярных шапок, как считали авторы, открывшие его [21]. Андерсон и Фикс [21] сообщили также, что во всей фотометрии Плутона был использован фазовый коэффициент $0,05 \text{ т/град}$.

Фикс и др. [147] измерили относительные яркости Плутона в 21 полосе между 3400 и 5900 Å, причем полная ширина на половине максимума пропускания составляла 128 Å. В работе установлен медленный рост альбедо в красную сторону от $\lambda 3800$ и более крутой в сторону синих лучей и признаки структуры в области около 4800 и 5800 Å. В фотометрии Харриса [199] тело оказалось значительно краснее Солнца на $\lambda 6900$ и $\lambda 8200$.

Радиус Плутона известен настолько плохо, что пытаться определить альбедо по величине радиуса почти бессмысленно. Харрис [199] выбрал радиус равным 0,45 земного, что дает $P_v = 0,13$. Затем он принял фазовый интеграл равным его значению для Марса ($q_v = 1,04$) и вычислил визуальное альбедо Бонда $A_v = 0,14$. С длиной волны альбедо Плутона ме-

¹⁷ Точка на поверхности планеты, для которой Земля находится в зените. — *Прим. ред.*

няется очень медленно, и это значение было внесено в табл. 1 предположительно как болометрическое альbedo Бонда. Очевидно, что необходимо измерить точные величины радиуса и фазового интеграла по крайней мере для одной длины волны, чтобы указанные выше величины имели реальный смысл. Представляется вероятным, что болометрическое альbedo Бонда для Плутона значительно меньше, чем для Нептуна, и может дать более высокую температуру Плутона. Однако медленное вращение Плутона будет приводить к значительному различию в истинных температурах на дневной и ночной сторонах, причем первая, вероятно, достигает 50°K .

Согласно поляриметрическим измерениям Келси и Фикса [247], планета, видимо, имеет микроскопически грубую поверхность, значения степени поляризации $0,27\%$ при фазовом угле всего $0^{\circ},8$ определенно совместимы с низким альbedo, поскольку это указывает на глубокую отрицательную ветвь поляризационной кривой.

Строение недр

Так как даже плотность Плутона весьма неопределенна, бесполезно исследовать строение его недр, пока не будут проведены основные физические измерения планеты с некоторой точностью при помощи космических аппаратов. Существование значительного магнитного поля маловероятно, так как Плутон мал и вращается медленно.

СПУТНИКИ И КОЛЬЦА

Менее десяти лет назад спутники планет солнечной системы (за исключением Луны) были практически вне пределов интересов астрофизических исследований. Обширная фотометрия Харриса [199] и отдельные работы Койпера и его учеников составляли большую часть современных знаний о спутниках, помимо сведений об их массах и движениях. В течение последних пяти лет изучение спутников стало одним из актуальных направлений исследований по физике солнечной системы, для которого потребовалось 100 страниц в недавнем обзоре Моррисона и Крукшенка [338]. Здесь упор будет сделан на галилеевых спутниках Юпитера и Титане — телах, имеющих, вероятно, наибольший биологический интерес. Упомянутый обзор рекомендуется для получения дополнительной физической информации. Обзор по небесной механике можно найти в статьях Уил-

кинса и Синклера [518] и Портера [372]. Ни один обзор, как бы ни был он краток, не был бы полным без описания бесчисленных малых спутников, наблюдаемых в виде колец Сатурна, которые будут описаны вместе со спутниками Сатурна.

Спутники Юпитера

Известно 12 спутников Юпитера: пять близких к планете и движущихся по круговым орбитам в экваториальной плоскости и семь далеких, обращающихся по сильно наклоненным к экватору орбитам с большим эксцентриситетом. Основные элементы орбит даны в табл. 16, там же приведены средние яркости и изменения яркости, вызванные вращением. Пятый спутник, иногда называемый Амальтеей, и четыре больших галилеевых спутника (они были открыты Галилеем в 1610 г.), по-видимому, всегда обращены одной и той же стороной к главному телу, вращаясь вокруг своей оси с тем же периодом, что и период обращения вокруг планеты [242, 338]. Почти ничего не известно о других семи спутниках, а также об Амальтее, которая так близка к Юпитеру (расстояние 1,54 радиуса от поверхности планеты), что фактически невозможна ее точная фотометрия.

Галилеевы спутники — большие тела и по праву имеют важное значение. Ганимед больше, чем планета Меркурий, и все они, кроме Европы, больше Луны. Прогресс в понимании этих тел связан с получением, наконец, точных физических данных. В 1971 г. наблюдалось покрытие Ио звезды β Скорпиона С [224, 460, 350] и в 1972 г. — покрытие Ганимедом звезды SAO 186800 [83], что позволило значительно уточнить радиусы этих двух спутников. С помощью этих значений радиусов стало возможным получить новые данные из наблюдений взаимных покрытий, которые случаются каждые шесть лет, когда Земля находится в плоскости орбит спутников [73]. Наконец, новые величины масс были получены при полете «Пионера-10» [17]. Эти данные и величины, полученные из них, приведены в табл. 17.

Кроме уточненных значений радиусов покрытие Ганимедом, очевидно, дало первые прямые свидетельства существования атмосферы на галилеевом спутнике, что говорит о давлении по крайней мере 10^{-6} бар, но, вероятно, не выше, чем 10^{-3} бар [83]. Затмеваемая звезда была очень слабой, и имеются сомнения в реальности сведений о давлении. В эксперименте «Пионера-10» по радиозатмению

Таблица 16. Спутники Юпитера

Спутник	Большая полуось, км	Эксцентриситет ¹	Накло- нение ^{1, 2}	Сидерический период	Визуальная звезд- ная величина V в средней оппози- ции ³	Изменения из-за враще- ния в V ⁴
V ³	181 500	0,0028	0°27',3	11 ^b 57 ^m 22 ^s ,70	~13 ^m 0	— ⁷
I (Ио) ³	422 000	0,0000	0°01',6	1 ^d 18 ^b 27 ^m 33 ^s ,51	4,80	0,16
II (Европа) ³	671 400	0,0003	0°28',1	3 ^d 13 ^b 13 ^m 42 ^s ,05	5,17	0,31
III (Ганимед) ³	1 071 000	0,0015	0°41',0	7 ^d 03 ^b 42 ^m 33 ^s ,35	4,54	0,15
IV (Каллисто) ³	1 884 000	0,0075	0,15',2	16 ^d 16 ^b 32 ^m 11 ^s ,21	5,50	0,15
VI ⁴	11 487 000	0,158	27°,6	250 ^d ,57	14,88	<i>U</i>
VII ⁴	11 747 000	0,207	24°,8	259 ^d ,65	16	<i>N</i>
X ⁴	11 861 000	0,130	29°,0	263 ^d ,55	18,6	<i>K</i>
XII ⁴	21 250 000	0,169	147°	631 ^d	18,8	<i>N</i>
XI ⁴	27 540 000	0,207	164°	692 ^d	18,1	<i>O</i>
VIII ⁴	23 510 000	0,378	145°	739 ^d	18,8	<i>W</i>
IX ⁴	23 670 000	0,275	153°	758 ^d	18,3	<i>N</i>

¹ Эксцентриситеты и наклоны для регулярных спутников слабо переменны, а для нерегулярных сильно пере-
менны.

² К экваториальной плоскости Юпитера.

³ По Расселу и др. [403], за исключением фотометрических данных.

⁴ По Портеру [372], за исключением фотометрических данных.

⁵ По Харрису [199], за исключением VI спутника, данные для которого заимствованы у Андерсона [19, 20].

⁶ По Моррисону и Крушкену [338].

⁷ Возможно, переменна с более ярким ведущим краем.

Таблица 17. Физические характеристики галилеевых спутников

Параметр ¹	Ио (I)	Европа (II)	Ганимед (III)	Каллисто (IV)
Масса (Юпитер = 1) [17]	4,696 · 10 ⁻⁵	2,565 · 10 ⁻⁵	7,845 · 10 ⁻⁵	5,603 · 10 ⁻⁵
	±0,06	±0,06	±0,08	±0,17
Масса (Луна = 1) ²	1,213	0,663	2,027	1,448
Средний диаметр, км	3636 ± 5 [350]	2980 ± 100 ³	5270 ⁺³⁰ ₋₂₀₀ [83]	5000 ± 150 [124]
Средняя плотность ⁴ , г/см ³	3,54	3,51	1,94	1,63
Средняя сила тяжести на поверхности ⁴ , м/сек ²	1,80	1,46	1,43	1,14
Скорость убегания ⁴ , км/сек	2,56	2,09	2,75	2,38
Болометрическое альbedo Бонда [338]	0,62 ± 0,13	0,74 ± 0,14 ⁵	0,35 ± 0,08	0,11 ± 0,03
Эффективная температура ⁶ , °K	96	87	109	118
Максимальная температура ⁷ , °K	135	123	155	167

¹ Если один и тот же источник использовался для всех четырех спутников, номер ссылки указан в этом столбце (параметр). Во всех других случаях он следует за индивидуальными данными.

² Вычислено по данным, приведенным выше, масса Луны равна 7,347 · 10²² кг [195], масса Юпитера — 1,8985 · 10²⁷ кг [17]. В отличие от числа в табл. 1, это значение не включает массу спутников.

³ Это число — среднее из трех значений, найденных по наблюдениям взаимных покрытий, представленных на собрание отдела планетарных наук Американского астрономического общества в 1974 г.

⁴ Вычислено по массе и диаметру, данным выше $G = 6,673 \cdot 10^{-20}$ км³/сек² · кг.

⁵ Исправлено из 0,68 по новым значениям радиуса, приведенным выше.

⁶ Вычислено по $F = 4(1 - A)^{-1} \sigma T_e^4$, принимая поток $F = 1353$ Вт/м² на расстоянии 1 а.е. и постоянную Стефана — Больцмана $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² · град⁴. A — болометрическое альbedo Бонда.

⁷ Вычислено по $F = (1 - A)^{-1} \sigma T_e^4$. Это максимальная равновесная температура, которую тело с данным альbedo, освещенное нормально, может иметь на расстоянии 5,203 а.е. от Солнца при отсутствии внутренних источников тепла.

в S -полосе [255] обнаружена электронная плотность $6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ на высоте $100 \pm 40 \text{ км}$ над поверхностью Ио и нейтральная атмосфера, соответствующая давлению от 10^{-8} до 10^{-10} бар (в зависимости от состава), на этом спутнике. Оптические наблюдения покрытия дали только верхний предел около 10^{-7} бар [37, 430].

В 1964 г. Биндер и Крукшенк [62] сообщили о видимом избытке яркости Ио около $0^m,1$, когда она появилась после солнечного затмения Юпитером, причем избыток исчез в течение 15 мин. Предполагалось, что это может быть свидетельством конденсации атмосферы во время затмения и испарения под лучами Солнца. По оценке Льюиса [283], требуется около $2 \cdot 10^{-7}$ бар пара, чтобы удовлетворить наблюдениям. После 1964 г. фотометрические исследования затмения Ио проводились много раз, одни дали положительные, другие — отрицательные результаты. Если явление реально, то оно непостоянно, и результаты «Пионера-10» по атмосферному давлению должны указывать на отсутствие его связи с конденсацией атмосферы. Результаты, полученные в 1973 г. при помощи фотометров, специально сконструированных для исключения рассеянного света от Юпитера, все были отрицательные (увеличений яркости обнаружено не было) [328, 156].

Наиболее неожиданным и захватывающим явлением в атмосфере Ио была открытая Брауном [75] эмиссия D -линии натрия, проходящей от спутника. Вскоре эти наблюдения были подтверждены Брауном и Чаффи [76], а затем Трефтон и др. [480] нашли, что натриевое излучение приходит из большой области вокруг Ио (более $10''$ по радиусу). Количество атомов в среднем составляет $\sim 10^{11}$ атомов/см² в предположении, что атомы распределены равномерно по полю зрения и оптическая толщина слоя мала, хотя очевидно, что имеются вариации во времени. Между тем Джадж и Карлсон [244] сообщили о наличии тора из водорода вокруг Юпитера на орбите Ио с поверхностной яркостью 10 килорелей (принимая, что все это L_α -излучение). Вероятно, водородный тор вокруг Юпитера подобен тору, который, как предположили Мак-Донаф и Брайс [322], должен быть найден вокруг Титана. Наиболее приемлемым объяснением (из предложенных до сих пор) является выброс с поверхности Ио под действием заряженных частиц из юпитерианской магнитосферы, сопровождаемый резонансной флуоресценцией в облаках водорода и натрия [315].

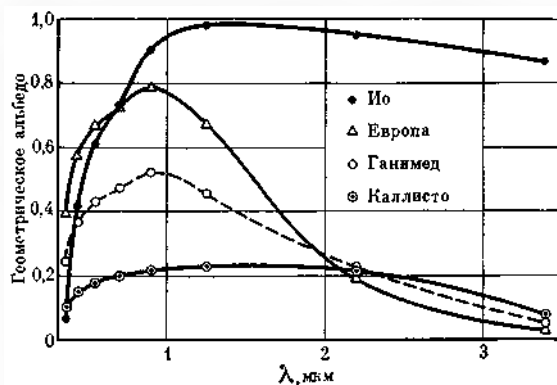


Рис. 11. Геометрическое альбедо галилеевых спутников (0,4—3,4 мкм) (по данным Ли [278] с нормализацией по Моррисону и Крукшенку [338])

Фотометрия галилеевых спутников показывает, что свойства их поверхностей значительно меняются от спутника к спутнику. Это хорошо иллюстрируется широкополосной фотометрией Ли [278] (рис. 11) с нормализацией согласно Моррисону и Крукшенку [338]. Более детальное исследование с высоким спектральным разрешением показало, что Европа и Ганимед покрыты в основном замерзшей водой [368, 146] с температурой, близкой к 150°K , и размерами зерен около $0,1 \text{ мкм}$ [252]. Киффер и Смит [252] оценили ее содержание в 75 и 60% для второго и третьего спутников соответственно, тогда как на первом и четвертом спутниках замерзшая вода может быть малой составляющей. Ио сохраняет высокое и в основном без особенностей альбедо даже на длине волны 5 мкм [169]. Киффер и Смит [252] предлагают в качестве возможных составляющих поверхности первого спутника сильно гидратированные минералы.

Исследование поляризации также указывает на различия между галилеевыми спутниками. У Каллисто наблюдается значительно более глубокая отрицательная ветвь (свыше двух раз), чем у других спутников [127, 490].

Несколько измерений яркостной температуры было сделано в окнах прозрачности земной атмосферы 8—14 и 17—28 мкм. В табл. 18 приводятся данные Моррисона и Крукшенка, температура Европы исправлена с учетом нового определения радиуса, приведенного в табл. 17. Температуры в области 10 мкм на 10°K выше, чем для области 20 мкм , это удивительный результат. Хансен [197] показал, что имеется определенная

Таблица 18. Температуры галилеевых спутников¹

Наблюдатель	Длины волн, мкм
Джиллет, Меррил и Стейн	11—12
Хансен	8—14
Моррисон	8—14
Моррисон, Крукшенк и Мерфи	17—28
Хансен	17—25
Моррисон	17—28

Таблица 18 (продолжение)

Наблюдатель	Ио (I)	Европа (II) ²
Джиллет, Меррил и Стейн	139 ± 3	132 ± 3
Хансен	137 ± 3	131 ± 3
Моррисон	138 ± 4	130 ± 4
Моррисон, Крукшенк и Мерфи	128 ± 5	123 ± 5
Хансен	124 ± 4	122 ± 4
Моррисон	130 ± 3	123 ± 3

Таблица 18 (окончание)

Наблюдатель	Ганимед (III)	Каллисто (IV)
Джиллет, Меррил и Стейн	142 ± 3	157 ± 3
Хансен	142 ± 3	152 ± 4
Моррисон	145 ± 4	153 ± 5
Моррисон, Крукшенк и Мерфи	138 ± 5	151 ± 7
Хансен	132 ± 5	142 ± 6
Моррисон	143 ± 4	155 ± 5

¹ По Моррисону и Крукшенку [338].² Исправлено по новому определению радиуса Европы (1490 ± 50 км).

Таблица 19. Микроволновые яркостные температуры Ганимеда и Каллисто

Длина волны (источник)	Ганимед	Каллисто
3,55 мм [176]		276 (255 ± 80)
8,2 мм [7]		233 (280 ± 120)
2,82 см [363]	55 ± 14 (55 ± 14)	88 ± 18 (88 ± 18)
3,71 см [49]		101 (101 ± 25)

эмиссионная характеристика на 12 мкм у трех наблюдавшихся им галилеевых спутниках (I, III, IV), которая может быть причиной различия, но она сама нуждается в объяснении. Хансен [196] для 10 мкм и Моррисон и Крукшенк [337] для 20 мкм получили кривые изменения потоков во время затмений. В целом результаты наилучшим образом объясняются тонким слоем с малой проводимостью, лежащим над толстым слоем с высокой проводимостью, для I, II и III спутников, для IV спутника картина несколько сложнее.

Табл. 19 дает яркостные температуры Ганимеда и Каллисто в диапазоне миллиметровых и коротких сантиметровых длин волн. Температуры приведены (где возможно) к радиусам спутников, данным в табл. 17. В скобках указаны опубликованные значения температур. Эти измерения очень трудны из-за обычной проблемы обнаружения слабого сигнала в присутствии близкого сильного сигнала. На основании четырех измерений, приведенных для Каллисто, ожидается, что наиболее точны интерферометрические измерения на волне 3,71 см и измерения с высоким отношением сигнал/шум на волне 2,82 см, проведенные с боннским 100-метровым радиотелескопом. Они очень интересны, так как дают яркостную температуру значительно более низкую, чем инфракрасная. Итак, различие яркостных температур двух спутников больше, чем можно было бы ожидать на основании их альбедо [363]. Паулини-Тот, Витцель и Горголевский [363] предположили, что низкие яркостные температуры можно объяснить возникновением радиоизлучения под поверхностью, где изменения температуры с фазой меньше. Это объяснение, если оно правильно, приводит к заключению, что внутренняя часть спутников холоднее, чем поверхность. Измерения яркостной температуры на волнах 3,55 и 8,2 мм (в противоположность измерениям в сантиметровом диапазоне) дают значительно более высокие температуры, чем измерение в инфракрасных лучах и в сантиметровом диапазоне, однако их статистическая неопределенность велика. Кузьмин и Лосовский [276] выдвинули предположение, что высокие яркостные температуры — результат почти прозрачной ледяной поверхности этих спутников. В моделях Льюиса [283] скорость понижения температуры в ледяной коре составляет 1° К/км и для объяснения наблюдений требуется толщина коры ~100 км. Эти теории предсказывают независимость температуры

от длины волны, что несовместимо с имеющимися в настоящее время данными.

Вопросы образования, внутреннего строения и химии галилеевых спутников рассматривались Льюисом [283—285] и Поллаком и Рейнольдсом [370]. Эти исследования показывают, что все четыре тела, вероятно, обладают ядром из гидратных силикатов, а Ганимед и Каллисто могут также иметь толстые мантии из замерзшей или жидкой воды (жидкой, если существует хотя бы слабая радиоактивность в их внутренних частях). Каждая из них имеет по крайней мере тонкую твердую кору (возможно, ледяную на всех, кроме Ио), хотя низкое альbedo Каллисто требует наличия на поверхности дополнительного темного вещества.

Все галилеевы спутники — интересные тела, очевидно совершенно отличные от любого тела вблизи Солнца. Только Ио и Европа имеют плотности, сходные с планетами земной группы (или, вероятно, малыми планетами), а их альbedo во много раз больше, чем у других близких тел без атмосфер. На Ио отмечен ряд уникальных явлений, по-видимому ассоциирующихся с юпитерианской магнитосферой. В следующее десятилетие эти спутники несомненно будут предметом усиленного изучения с помощью космических зондов, а также наземных наблюдений.

Кольца и спутники Сатурна

Сатурн обладает 10 спутниками, которые (кроме самого внешнего — Фебы) имеют довольно регулярные орбиты, а также знаменитой системой колец¹⁸. Кольца Сатурна — уникальное явление в солнечной системе. Впервые они были замечены Галилеем в 1610 г. как странный «добавок» на обеих сторонах планеты. Реальную природу этого «добавка» как части плоского кольца вокруг планеты установил Гюйгенс в 1655 г. В 70-х годах XVII в. Кассини нашел, что кольцо разделено темной линией на два концентрических кольца. Темная линия была названа щелью Кассини, внешнее кольцо обозначено буквой А и внутреннее — буквой В. В 1850 г. Бонд в Гарварде и Дэвис в Англии независимо открыли очень слабое третье кольцо — «креповое кольцо», или кольцо С, расположенное внутри первых двух. В течение многих лет оставалось в значительной мере спорным существование чет-

вертого, крайне слабого кольца с внешней стороны А. Некоторые данные о реальности этого кольца D получил Фейбельман [141] во время последнего периода видимости кольца с ребра. Это недавно подтвердил Койпер [272], нашедший свидетельство существования вещества, простирающегося почти до Дионы. Были также сообщения о наличии вещества внутри крепового кольца [67, стр. 382]. Наиболее убедительные свидетельства этого были представлены Герином [181, 182, 102]. Полученные им фотографии, по-видимому, определенно подтверждают идею о присутствии по крайней мере небольших количеств вещества до атмосферы планеты. Это вещество отделяется от кольца С темной щелью; поэтому Герин называет его кольцом D (это логично, но, к сожалению, может приводить к путанице с веществом вне кольца А). Было предложено любое вещество, располагающееся за пределами кольца А, называть кольцом D' [154]. Радиальные размеры колец приведены в табл. 20.

Толщина колец определяется непросто, так как они очень тонки. Только однажды кольца наблюдались, когда Земля была точно в их плоскости, — в октябре и декабре 1966 г. [67]. Даже тогда кольца не исчезали полностью (при наблюдении в большие теле-

Таблица 20. Размеры колец Сатурна¹

Параметр	Размеры	
	в км	в радиусах Сатурна
Экваториальный радиус Сатурна	60 000 ± 240	1,00
Внешний край кольца D	72 600 ± 2000 ²	1,21
Щель Герины	Ширина ² ~ 4200 км	
Внутренний край кольца С	76 800 ± 2000	1,28
Внутренний край кольца В	92 000 ± 850	1,54
Внешний край кольца В	117 800 ± 350	1,97
Щель Кассини	Ширина ³ ~ 2600 км	
Внутренний край кольца А	120 400 ± 400	2,01
Внешний край кольца А	136 450 ± 350	2,28
Большая полуось орбиты Януса	168 700 ²	2,81

¹ Взято по Дольфусу [125], за исключением отмеченных в следующих примечаниях.

² Взято по Франклину, Коломбо и Куку [154].

³ Края колец А и В нерезкие. Прямые измерения ширины щели Кассини часто дают гораздо большие значения (например, ~ 3500 км, Дольфус [125]).

¹⁸ См. также книгу М. С. Боброва. Кольца Сатурна. М., «Наука», 1970. — Прим. ред.

скопы), как это иногда предсказывалось. В то время фотометрические исследования были предприняты Фокасом и Дольфюсом [150] и Киладзе [4]. Полученные результаты несколько противоречивы. Бобров [4] проанализировал оба ряда данных и нашел их внутреннее согласие. Толщина колец не может быть меньше 500 м, так же как невероятно, чтобы она была больше 4 км. Систематические ошибки, по-видимому, приводят к недооценке толщины [4], и, вероятно, лучше всего использовать значение 2—3 км, пока не будут проведены дополнительные наблюдения.

Ни одно из колец не является твердым. В 1857 г. Максвелл показал теоретически, что твердое кольцо, вращающееся вокруг планеты, не может быть устойчивым, а Килер в 1895 г. спектроскопическим методом нашел в кольцах дифференциальные движения. Довольно прямым доказательством того, что кольца состоят из отдельных частиц, служат наблюдения звезд по крайней мере в шести случаях, когда звезды были видны через кольцо А, несмотря на то, что их звездные величины были $7^m,2$ или слабее [3]. По крайней мере в двух случаях звезды 8^m были видны часть времени при прохождении за ярким, более плотным кольцом В [3]. Трудная проблема механической устойчивости кольца здесь рассматриваться не будет. Дополнительную информацию можно найти в работах [67, 98, 99, 528].

Дополнительные сведения о кольцах могут быть получены из четырех источников, но только один из них — фотометрия — охватывает значительный период. Инфракрасная и микроволновая радиометрия и радарные исследования начаты совсем недавно. Обзор большей части фотометрических исследований был сделан Моррисоном и Крукшенком [338] и здесь будет только кратко изложен.

Визуальная поверхностная яркость кольца В и частично кольца А выше средней поверхностной яркости Сатурна [101], что указывает на очень высокое альbedo отдельных частиц, так как оптическая толщина колец невелика. Многие определения оптической толщины кольца сходятся к значениям 0,7—1,0 для кольца В и 0,4—0,5 для кольца А [338]. Имеется очень большой эффект оппозиции от $0^m,2$ в желтых лучах до $0^m,4$ в инфракрасных и ультрафиолетовых [234]. Так как резкое усиление отражения во время оппозиции обычно отождествляется с темными поверхностями, эффект для колец Сатурна классически (с 80-х годов XIX в.)

связывался с взаимным затенением частиц колец, но такой эффект не должен зависеть от цвета, что не соответствует наблюдениям Ирвина и Лэйна. Эффект может быть комбинацией затенения и обратного рассеяния.

Недавняя инфракрасная спектрометрия показала, что частицы колец главным образом ледяные или хотя бы покрыты льдом [366], что и является причиной их высокого альbedo в желтых, красных и инфракрасных лучах. Установлено резкое ослабление альbedo в области короче 6000 Å, очень сходное с поведением Ио [277, 35]. Это не характерно для обычного чистого льда.

Таблица 21. Температура колец Сатурна

Длина волны, мкм	Планетоцентрическая широта Солнца, град.	Наблюдавшееся кольцо	Яркость, температура, °K	Источник
20	≤ 5	А и В?	< 60	[31]
12,7	18	А и В	82,7	[14]
20	26	А	89	[341]
20	26	В	94	[341]
11	26	В	91	[338]
20	26	В	96	[338]

Результаты радиометрии в окне 8—14 мкм собраны в табл. 21. Представляется очевидным рост температуры колец с увеличением угла Солнца, что указывает на затенение при малых углах Солнца. Наиболее удивительна высокая температура для тел с таким высоким альbedo. Эффективная температура абсолютно черного тела на расстоянии Сатурна от Солнца составляет только 90° K. С учетом излучения Сатурна она должна возрасти до $\sim 94^\circ$ K для кольца В [341]. В действительности оценки болометрического альbedo Бонда для частиц кольца лежат в пределах 0,5—0,8 или еще выше [338]. Это требует включения довольно больших неизотермических частиц, которые гораздо теплее на солнечной-земной стороне.

Недавно Голдстейн и Моррис [174] показали, что кольца Сатурна — удивительно эффективный отражатель (при эксперименте с передачей и приемом сильного эхо на волне 12,6 см). Измеренное доплеровское расширение отраженного сигнала соответствует ожидаемому для крайних частиц в ярком внутреннем кольце, подкрепляя таким образом результаты. Мощность полученного отра-

женного сигнала оказалась равной $62 \pm 6\%$ от значения, которое было бы получено в случае изотропного отражателя без потерь в нем (с тем же самым геометрическим сечением, что кольца А и В), находящегося на том же расстоянии. Этот результат был совершенно неожиданным. Соответствующие величины составляют 6% для Меркурия, 12% для Венеры, 8% для Марса и от 5 до 15% для малых планет Икар и Торо. Интерпретация этих результатов пока еще весьма предположительна, хотя в общем согласуется с тем, что радарные наблюдения требуют, чтобы размеры частиц были порядка сантиметра или более.

Голдстейн и Моррис [174] предположили, что рассеивающие объекты, грубо говоря, имеют размеры порядка метра или более. Поллак и др. [371] постулировали существование сантиметровых частиц с высоким альбедо, обеспечивающим высокую отражательную способность путем многократного рассеяния. Они также указали, что радиояркостные температуры колец дают существенные ограничения для их моделей. Петтенджил и Хагфорс [365] предложили третью гипотезу, которая не требует большого альбедо единичного рассеяния. Они указали, что обратное рассеяние от прозрачных сфер может быть значительно сильнее, чем простое внешнее отражение от передней поверхности эквивалентной сферы. Увеличение определяется процессами внутреннего рассеяния. Они считают, что для случая колец Сатурна радарные данные воспроизводятся сглаженными ледяными частицами с радиусом более 8 см.

Проведено несколько измерений яркостной температуры как на отдельных антеннах, так и с помощью интерферометров. Измерения на отдельных антеннах дают совместное излучение системы Сатурн — кольца, тогда как интерферометрические измерения позволяют выделить вклад колец и измерить его непосредственно. Один из методов изучения влияния колец состоит в наблюдении зависимости отдельных антенных яркостных температур диска от планетоцентрической широты Земли (относительно плоскости колец). Во втором методе оценивается вклад диска по модели атмосферы, а остаток приписывается кольцам. Недавно Жансен [239] собрал данные по одиночным антеннам, относящиеся к яркостным температурам. Он указывает, что, за исключением данных на волне 1 мм, статистически значимые изменения яркостной температуры с плането-

центрическим углом отсутствуют. Измерения могут быть объяснены и при отсутствии колец, показывая тем самым, что их температура должна быть низкой. Ратер и др. [384], проводившие наблюдения на длине волны 1 мм, нашли, что яркостная температура Сатурна на $45 \pm 15^\circ \text{K}$ больше, чем полученная ими для Юпитера. Они пришли к выводу, что температура колец составляет $35 \pm 15^\circ \text{K}$. В связи с большими размерами рассеивающих частиц, что следует из радарных наблюдений, Поллак и др. [371] решили, что низкая яркостная температура должна быть обусловлена явлением излучения. Жансен [239] сопоставил данные Ратера и др. с некоторыми более ранними данными и нашел результаты измерений на длине волны 1 мм совместимыми с излучательной способностью 0,4. Бриггс [72] оценивает верхний предел размеров частиц в 80 см, предполагая, что они состоят из чисто водяного льда.

Интерферометрические наблюдения Сатурна с высоким разрешением были проведены на волнах 3,7; 11 и 21 см [72, 48, 50]. Эти наблюдения показали, что почти все излучение Сатурна возникает на диске планеты. Берге и его сотрудники оценили яркостную температуру колец менее 10 и 40°K соответственно на длинах волн 20 и 10 см. Бриггс в согласии с Берге оценил яркостную температуру колец менее 20°K на длинах волн 3,7; 11 и 21 см. Далее Бриггс нашел, что, когда лепестки его интерферометра были перпендикулярны полярной оси Сатурна, видимые размеры Сатурна уменьшались. Такой эффект не наблюдался, когда лепестки были расположены вдоль полярной оси. Бриггс интерпретировал эти данные моделью, в которой кольца закрывают часть диска Сатурна, уменьшая таким образом видимые размеры диска. Частицы колец, которые хорошо рассеивают, но плохо излучают, могут рассеивать излучение диска сами, имея низкую температуру. Эта картина совместима как с радио-, так и локационными данными.

Исследования по нескольким направлениям сходятся к тому, что частицы колец должны иметь диаметры по крайней мере несколько сантиметров. Два из них здесь совсем не рассматривались. Вследствие эффекта Пойнтинга — Робертсона из кольца за $5 \cdot 10^8$ лет должны быть выметены частицы размером приблизительно меньше 3 см [506, 4], и за тот же срок должно подвергнуться эрозии несколько сантиметров льда [200]. Следовательно, все малые частицы

Таблица 22. Спутники Сатурна¹

Спутник	Большая полуось, км	Эксцентриситет	Наклонение ²	Период, сутки
Янус ³	168 700	~0	~0	0,845
Мимас	185 800	0,0201	1°31',0	0,942422
Энцелад	238 300	0,00444	0°01',4	1,370218
Тетис	294 900	0	1°05',6	1,887802
Диона	377 900	0,00221	0°01',4	2,736916
Рея	527 600	0,00098	0°21'	4,517503
Титан	1 222 600	0,029	0°20'	15,945452
Гиперион	1 484 100	0,104	(17—56') ⁴	21,276665
Япет	3 562 900	0,02828	14°,72	79,33082
Феба	12 960 000	0,16326	150°,05	550,45

¹ Согласно Портеру [372] (кроме Януса).² К плоскости кольца.³ По Франклину, Коломбо и Куку [154].⁴ Меняется от 17 до 56' [403].

должны иметь сравнительно недавнее происхождение. Кольца не могут быть также монослоем, так как, очевидно, необходимо затенение и многократное рассеяние. Таким образом, некоторые классические модели, предполагавшие микронные размеры частиц или монослой различной толщины, по-видимому, исключаются последними исследованиями. Пока не существует вполне удовлетворительных моделей, и физические исследования одного из прекраснейших объектов солнечной системы еще могут преподнести сюрпризы.

Спутники Сатурна расположены вполне регулярно. Исключение составляет Феба, имеющая вытянутую регрессивную¹⁹ орбиту. Основные элементы орбит приведены в табл. 22. Янус был открыт в 1966 г., когда кольца были видны с ребра. Даже тогда, когда свет колец почти отсутствует, наблюдать Янус очень трудно, так как его звездная величина составляет 13,5 или 14^m, а расположен он близко к очень яркой планете [123, 428, 464]. Окончательное подтверждение того, что наблюдавшийся объект действительно спутник, а не конденсация в кольце, вероятно, станет возможным, когда кольца снова станут видны с ребра, хотя лучшие фотографии выглядят очень убедительно.

Спутники Сатурна — большей частью довольно массивные тела, все они больше, чем семь нерегулярных спутников Юпитера, и по крайней мере пять (вероятно, семь) из них превышают по размерам крупнейшую малую

планету. Титан больше и массивнее Луны и будет подробно рассмотрен ниже. Основные физические сведения о всех спутниках (кроме Януса) можно найти в табл. 23.

Для некоторых спутников Сатурна имеются дополнительные фотометрические и радиометрические данные. Их обзор сделал Моррисоном и Крукшенком [338] и не будет здесь повторяться, кроме некоторых сведений о Япете. Япет был открыт Кассини в 1671 г., сообщившим о больших изменениях его яркости. Он указал: «Однако представляется, что одна часть его поверхности не так способна отражать к нам солнечный свет, который делает его видимым, как другая» [10]. Это действительно верно. Мерфи и др. [342] нашли антикорреляцию между видимой яркостью и инфракрасным потоком от Япета, имеющего температуру $117 \pm 4^\circ \text{K}$ и визуальное альbedo $0,04 \pm 0,01$ вблизи минимума блеска, температуру $110 \pm 4^\circ \text{K}$ и визуальное альbedo $0,25 \pm 0,05$ близ максимума блеска. Они приняли для альbedo в максимуме значение 0,28. Поляризационные наблюдения Целльнера [536] согласуются с яркой веной полусферы и темной ведущей. Ни одно из упомянутых исследований не совместимо с вытянутой формой. Наиболее детальная фотометрия Япета была проведена Миллисом [327], который показал, что соседние минимумы различаются на 0^m,3. Это явление он с основанием приписал изменению угла Солнца, причем результирующий фазовый коэффициент и эффект оппозиции были сравнимы с таковыми для Луны, Каллисто и некоторых астероидов — всех с темными поверхностями. Много меньший фазовый коэффициент был найден для яркой стороны, сравнимой с яркими Ио и Европой. Миллис [327] получил также первую хорошую цветовую кривую, показывающую колебания 0^m,07 в $B-V$ и 0^m,045 в $U-B$. В таком случае Япет — поистине замечательный объект с одной полусферой, в шесть раз более яркой, чем другая. Лучшая теория сегодня, «которой посчастливилось», по-видимому, теория Кука и Франклина [100]. Они предположили, что тонкая ледяная кора была разрушена с одной стороны метеорной бомбардировкой ее ведущей полусферы.

Титан, конечно, — наиболее интересный из спутников Сатурна из-за его протяженной атмосферы. Койпер [263] в 1944 г. впервые открыл на спутнике присутствие метана и в 1952 г. эмпирически оценил его обилие в предположении чисто метановой атмосферы равным 200 м-амага [266]. Более 20 лет по-

¹⁹ С обратным вращением по отношению к экваториальной плоскости планеты. — *Прим. ред.*

Таблица 23. Физические данные спутников Сатурна

Параметр ¹	Мимас	Энцелад	Тетис	Диона	Рей
Масса (Сатурн = 1) ²	$(6,59 \pm 0,15) \cdot 10^{-8}$	$(1,48 \pm 0,61) \cdot 10^{-7}$	$(10,95 \pm 0,22) \cdot 10^{-7}$	$(20,39 \pm 0,53) \cdot 10^{-7}$	$(3,2 \pm 5,6) \cdot 10^{-8}$
Масса (Луна = 1) ³	0,00051	0,001	0,0085	0,0158	~0,025
Средний диаметр, км	~400 ⁵	550 ± 300 ⁴	1200 ± 200 ⁴	1150 ± 200 ⁵	1450 ± 200 ⁶
Средний диаметр (Луна = 1) ⁸	~0,1	0,16	0,35	0,33	0,42
Средняя плотность ⁹ , г/см ³	~1,0	~1,0	0,7	1,5	~1,1
Визуальная величина V в средней оппозиции ¹⁰	12,1	11,77	10,27	10,44	9,76
Изменения при вращении в V	Неизвестно	~0,4 ¹²	0,16 ⁵	0,20 ⁵	0,19 ⁶

Таблица 23 (окончание)

Параметр ¹	Титан	Гиперион	Япет	Феба
Масса (Сатурн = 1) ²	$(2,4619 \pm 0,0029) \cdot 10^{-4}$	~2,0 · 10 ⁻⁷	$(3,94 \pm 1,93) \cdot 10^{-6}$	Неизвестно
Масса (Луна = 1) ³	1,905	0,0015	0,02	—
Средний диаметр, км	4850 ± 300 ⁴	160—920 ^{5, 7}	1800 ± 200 ⁵	60—320 ^{5, 7}
Средний диаметр (Луна = 1) ⁸	1,40	—	0,52	—
Средняя плотность ⁹ , г/см ³	2,34	—	~0,7	—
Визуальная величина V в средней оппозиции ¹⁰	8,35 ¹⁵	14,16	11,03	16,56 ¹¹
Изменения при вращении в V	0,00 ⁵	Неизвестно	1,92 ¹³	0,25 ^{11, 14}

¹ Все ссылки даются в этих сносках.² По Данномбу, Клеппинскому и Зейдельману [133].³ Вычислено с массой Луны, равной $7,347 \cdot 10^{22}$ кг [195].⁴ По Дольфусу [124].⁵ По Моррисону и Круишенку [338].⁶ По Мерфи, Крукшенку и Моррисону [342].⁷ Нижний предел при геометрическом альбедо 1,0, верхний предел — при 0,03.⁸ Вычислено для диаметра Луны 3475 км [195].⁹ Вычислено по данным, приведенным выше.¹⁰ По Харрису [199] (кроме Титана и Фебы).¹¹ По Андерсону [19, 20].¹² По Францу и Миллису [155].¹³ По Миллису [327], см. текст.¹⁴ Феба, очевидно, не «привязана» к Сатурну. Ее период вращения, по-видимому, меньше одних суток [19, 20].¹⁵ По Бланко и Каталано [86].

ложение не менялось — до удивительного сообщения Трефтона [471] о возможном присутствии на Титане H_2 . Далее Трефтон предположил [472], что даже спектрофотометрические наблюдения Мак-Корда и др. [320] показывают, что или обилие метана должно быть на порядок больше, чем считали раньше, или быть малой составляющей. По наблюдениям Трефтона [471], водород присутствует на Титане в количестве ~5 км-амага (с очень большой неопределенностью).

Самые последние радиометрические исследования Лоу и Риеке [291] не показали присутствия линий H_2 , индуцированных давлением, в районе 17 мкм, так что обилие, вероятно, много меньше 5 км-амага. Трефтон [477] нашел присутствие на Титане по крайней мере одного спектроскопически актив-

ного газа, поглощающего в области 1,05—1,1 мкм. Заметно дополнительное поглощение близ 1,65 мкм [301]. Далее, имеется заметная эмиссия близ 12 мкм [167], вероятно, лучше всего соответствующая полосе 12,2 мкм этана (C_2H_6) [107]. Как этан (C_2H_6), так и этилен (C_2H_4) имеют полосы в районе 1,65 мкм, но Трефтон [477] не смог найти доказательств присутствия и того и другого в окрестности 1,06 мкм. В качестве возможного объяснения он предполагает, что эти линии принадлежат изотопу CH_4 [477].

Дальнейшая спектроскопическая интерпретация свидетельствует о наличии на Титане облаков. Поляризационные наблюдения Веверки [491] и Целльнера [537] указывают на присутствие непрозрачного облачного слоя. Далее, альbedo Титана быстро умень-

шается в сторону синей, фиолетовой и ультрафиолетовой областей спектра [35, 78]; этот эффект полностью противоположен молекулярному (релеевскому) рассеянию. Уменьшение альbedo фактически требует присутствия аэрозоля, преимущественно в виде тонкой пыли, поглощающей пропорционально λ^{-1} [35].

Главное граничное условие для моделей атмосферы Титана определяется фотометрическими и тепловыми данными. Йонкин [532] на основании спектрофотометрии с высоким разрешением в области 0,50—4,08 мкм определил геометрическое альbedo. Используя измерения от 0,30 до 0,50 мкм и синтетический спектр, основанный на сходных результатах для Юпитера и Сатурна, от 4,08 до 4,0 мкм, он [532] определил болометрическое геометрическое альbedo равным 0,21 и предложил использовать болометрическое альbedo Бонда $0,27 \pm 0,04$. В этом случае эффективная температура Титана будет $84 \pm 2^\circ \text{K}$.

Детальные тепловые измерения показывают удивительную картину, данную в табл. 24, заимствованной у Лоу и Риеке [291]. Даже невращающееся абсолютно черное тело (с нулевым альbedo), перпендикулярное направлению на Солнце, на расстоянии Титана от Солнца может достичь температуры только 127°K . В атмосфере должен

действовать или довольно эффективный парниковый механизм, или неравновесный излучатель. Пик на 8 мкм, как ожидается, связан с метановой инверсией, так же как на Юпитере и Сатурне. Пик на 12 мкм может быть обусловлен, как указано выше, C_2H_6 . Остальное, по-видимому, может быть промоделировано по крайней мере двумя путями.

Поллак [369] рассчитал для Титана ряд парниковых моделей, среди которых лучше всего удовлетворяла доступным тогда данным модель из смеси примерно 50% H_2 и 50% CH_4 с поверхностной температурой 150°K и давлением 0,4 атм. Парниковый эффект создавался переходами в газах, индуцированными давлением, кроме того, имелась видимая непрозрачность метановых облаков. Наибольшее затруднение состоит в том, что характеристики H_2 , которые индуцированы давлением и должны заполнять область около 17 мкм, отсутствуют [291].

Даниэльсон, Колдуэлл и Ларах [107] предположили, что слой аэрозоля с микронными размерами частиц должен поглощать большую часть падающего теплового излучения, но не может эффективно его переизлучать в длинах волн, в несколько раз превышающих их размеры, при этом возникает тепловая инверсия и этим объясняется высокая температура на 5 мкм. Температура поверхности должна быть близка к 80°K вследствие нагрева прямым солнечным излучением и переизлученным атмосферой. Наибольшая трудность здесь состоит в том, что альbedo Бонда оказалось выше (0,27), чем приняли авторы (0,20).

Лоу и Риеке [291] предложили небольшую модификацию, сохранив инверсионный слой частиц, но добавив слабый парниковый эффект при той же поверхностной температуре $80-90^\circ \text{K}$, чтобы предохранить достаточно большее количество CH_4 от конденсации, несмотря на высокое альbedo. Детальных расчетов комбинированной парниково-инверсионной модели атмосферы Титана еще не было сделано, но она кажется правдоподобной. Конечно, достоверные количественные модели могут быть построены после проведения измерений поверхностных радиотемператур и отождествления неизвестных поглощающих веществ в атмосфере Титана.

Как ожидают, кора Титана — фактор, определивший наличие и состав атмосферы. Эта проблема и проблема убегающего водорода были рассмотрены Хантеном [227], который показал, что атмосфера из чистого H_2 должна была крайне быстро улечься, но что 10—25%

Таблица 24. Инфракрасная фотометрия Титана¹

λ , мкм	$\Delta\lambda$, мкм	p^2	T_B , °K ²
1,65	0,3	$\sim 0,01$	—
2,2	0,6	0,05	—
3,6	1,0	0,01	—
5,0	1,0	$\leq 0,10$	165
8,8	1,0	—	136
10,3	1,3	—	125
10,6	5,0	—	124
11,6	0,8	—	128
12,6	1,0	—	129
17	2	—	101
19	1	—	97
21	8	—	93
22,5	5	—	91
24,5	1	—	86
34	12	—	82

¹ По Лоу и Риеке [291].

² Геометрическое альbedo.

³ Принят диаметр 5100 км скорее, чем 4850 км, данный в табл. 23.

H_2 , возможно, могло бы сохраняться постоянно (возникая, вероятно, при фотоллизе NH_3). Мак-Доноф и Брайс [322] недавно обратили внимание на то, что, хотя скорости молекул в атмосфере Титана достаточны для улетучивания, они, по-видимому, не превышают скорости убегания от Сатурна. Следовательно, атомы и молекулы, потерянные Титаном, под воздействием гравитационного поля планеты остаются на орбите Сатурна, пока не будут ионизованы или снова захвачены Титаном.

Никаких прямых наблюдательных данных о поверхности и строении недр Титана нет. Например, несмотря на высокоточные фотометрические исследования, проведенные несколькими учеными, не обнаружено изменений яркости Титана, которые можно было бы приписать вращению. Обычно считают, что он обращен к Сатурну всегда одной и той же стороной (периоды вращения вокруг оси и обращение вокруг планеты одинаковы), однако это не более чем догадка. В моделях Льюиса [283, 285] предполагается, что поверхность может состоять в основном из метанового гидратного льда, хотя очевидно, что справедливость этого предположения зависит от поверхностной температуры, которую еще нужно определить. Недра, возможно, содержат гидросиликатную мантию, окруженную гидроаммиачным раствором, лежащим непосредственно под твердой корой [283, 285], тогда как ядро может состоять из троилита (FeS). К сожалению, единственной достоверной величиной, характеризующей недра Титана, является его плотность, но даже эта величина имеет неопределенность, вероятно, 20% вследствие неточности определения радиуса спутника.

Спутники Урана

Уран имеет пять спутников, которые образуют исключительно правильную систему. Основные сведения о них приведены в табл. 25. Спутники слишком малы для прямых измерений их радиусов, и ни один из них не был обнаружен в средней инфракрасной области, вследствие чего не удалось провести радиометрические определения их радиусов. Если они покрыты льдом и имеют очень высокое альbedo, диаметры их могут быть малы — 200 км у Миранды и 700 км у Титании. В случае крайне темных поверхностей они могут иметь диаметры 1300 км (Миранда) и 4000 км (Титания). Если принять неуверенные определения масс Койпером (см. табл. 25) за действительные, то мы получим,

что истинные диаметры должны быть близки к нижним пределам (для сохранения плотностей выше 1 г/см^3).

Спутники Нептуна

Нептун обладает только двумя спутниками. Очевидно, большой и массивный Тритон имеет обратное движение по орбите (эксцентриситет орбиты не обнаружен), тогда как крошечная Нереида — прямое движение по большой орбите с высоким эксцентриситетом. Основные сведения приведены в табл. 26. Для Тритона имеются очень грубые оценки массы и диаметра: $(1,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ массы Нептуна [258] и 3770 ± 1300 км [124].

Тритон, по-видимому, достаточно велик, чтобы удержать атмосферу, но пока она не была обнаружена. Спинрад [444] установил верхний предел 8 м-амага для метана. Согласно Моррисону и Крукшенку [338], максимальная поверхностная температура Тритона (при предположении небольшой атмосферной непрозрачности) ниже температуры конденсации гидрата метана, хотя и выше, чем для чистого метана. Любая атмосфера, которую он может иметь, должна в основном состоять из инертных газов.

МАЛЫЕ ПЛАНЕТЫ

Науке присуще убеждение в существовании общего порядка во Вселенной. В прошлом была к тому же особенно сильна вера в простую математическую симметрию во всех вещах. Это привело в 1766 г. к открытию Титциусом простой математической прогрессии, описывающей расстояния известных тогда планет от Солнца. Позднее об этой закономерности много раз сообщал Боде, и часто эту закономерность называют законом Боде. Когда в 1781 г. был открыт Уран, его расстояние хорошо соответствовало закону. Однако было одно исключение. Закон предсказывал планету на гелиоцентрическом расстоянии 2,8 а.е., где не было известно никакой планеты. Это привело к предложению организовать коллективные поиски «недостающей планеты». Но еще до получения письма с предложением об участии в коллективной работе, Пиацци, работавший над созданием звездного каталога, открыл малую планету [287]. Это тело, открытое 1 января 1801 г., было названо Церерой. Его среднее расстояние от Солнца равно 2,77 а.е. В следующем году во время наблюдений Цереры Ольберс нашел вторую малую планету, названную Палладой [287]. Он

Таблица 25. Спутники Урана¹

Спутник	Большая полуось, км	Эксцентриситет	Наклонение ² , град.	Период, сутки	Масса ³ (Уран=1)	Величина в средней оппозиции ⁴
Миранда ⁶	129 800	0,017	3,4	1,41348	$1 \cdot 10^{-6}$	16,5
Ариэль	190 900	0,0028	~0	2,52038	$15 \cdot 10^{-6}$	14,4
Умбриэль	266 000	0,0035	~0	4,14418	$6 \cdot 10^{-6}$	15,3
Титания	436 000	0,0024	~0	8,70587	$50 \cdot 10^{-6}$	14,01
Оберон	583 400	0,0007	~0	13,46325	$29 \cdot 10^{-6}$	14,20

¹ Взято по Койперу [268], за исключением оговоренных случаев.

² К плоскости, которая, как считается, является плоскостью экватора Урана. Данхэм [134] сообщил, что малые взаимные наклонения в действительности существуют у всех орбит спутников.

вуют у всех орбит спутников.

³ Очень неуверенные значения, вычисленные в предположении равных плотностей и альбедо для всех пяти тел.

⁴ По Харрису [199].

⁵ Элементы орбиты по Уиткеру и Гринбергу [514].

Таблица 26. Спутники Нептуна¹

Спутник	Большая полуось, км	Эксцентриситет	Наклонение, град.	Период, сутки	Звездная величина V в средней оппозиции ²
Тритон	355 550	0	159,945	5,876844	13,55
Нереида	5 567 000	0,74934	27,71	359,881	~18,7

¹ По Портеру [372], за исключением V.

² По Харрису [199].

сразу же предположил, что это могли быть части большей планеты, которая взорвалась [287]. В том же году Хут предположил, что вещество, из которого сформировались планеты, просто собралось во многие меньшие тела, а не в одно большое [287]. В 1804 г. Хардинг нашел Юнону, а в 1807 г. Ольберс добавил к этому свою вторую планету — Весту. В 1845 и 1847 гг. Энке открыл Астрею и Гебу [287]. Еще два меньших тела были найдены в 1847 г., и с тех пор не проходило ни одного года, чтобы не было сделано хотя бы одного открытия [403].

В 1851 г. некоторые астрономы пришли к соглашению официально присвоить этим планетам название «малые планеты» [287], однако чаще используется предложенный Вильямом Гершелем термин «астероид» (звездоподобный)²⁰. После открытия малой планеты и публикации сообщения об этом она получает предварительное обозначение [161]. Если она переоткрывается при втором появлении, ей присваивается очередной номер в дополнение к хронологическому списку подтвержденных объектов и названных ученым,

ее открывшим [161]. Первоначально малым планетам присваивались только женские имена, однако этот обычай соблюдался недолго [161]. К началу 1974 г. список малых планет включал 1846 объектов. Ежегодные эфемериды малых планет, имеющих номер, публикуются Институтом теоретической астрономии в Ленинграде, а все наблюдения малых планет, эфемериды объектов, еще не получивших номера, и списки элементов орбит с дифференциальными поправками публикуются обсерваторией в Цинциннати в «Циркулярах малых планет» [203].

Статистика и группы

К настоящему времени проведены две работы по систематическому поиску малых планет. Статистические исследования, основанные на них, относительно свободны от влияния селекции, которая не исключена при использовании каталога занумерованных объектов. Первым был обзор Мак-Дональда в 1950—1952 гг., проведенный с 25-сантиметровым ($f/7$) четырехэлементным фотографическим объективом [273]. В синих лучах предельная видимая величина достигала 16^m. Во второй работе использовались пластинки Па-

²⁰ В СССР также применяются оба термина. — Прим. ред.

ломарско-Лейденского обозрения неба, полученные в 1960 г. на 122-сантиметровой камере Шмидта ($f/2,5$) [218]. Видимая величина всюду достигала 20^m , кроме только небольшой группы областей, которые неблагоприятны для объектов с большим эксцентриситетом и высоким наклоном [261]. Общее число малых планет ярче фотографической величины $21^m,2$ в средней оппозиции составляет $(4,8 \pm 0,3) \cdot 10^5$ [161]. Шубарт [414] оценил полную массу всех этих планет всего лишь в $2,4 \cdot 10^{21}$ кг, что составляет $4 \cdot 10^{-4}$ массы Земли.

Подавляющее большинство всех астероидов имеет орбиты с большими полуосями между 2,17 и 3,3 а.е. Нижний предел, по-видимому, определяется взаимодействием с Марсом. Вильямс [519] предполагает, что пояс малых планет сначала простирался до гораздо меньших гелиоцентрических расстояний, но был очищен в результате столкновений и тесных сближений с Марсом (за исключением изолированных групп). Верхний предел главного пояса находится в резонансном отношении 2:1 с Юпитером, так что среднесуточное движение тела составляет ровно половину юпитерианского. Среднее наклонение орбит малых планет вблизи внутреннего края главного пояса составляет около 4° и возрастает до 11° к внешнему краю, причем большие астероиды расположены менее тесно к эклиптике, чем меньшие [161]. Средний эксцентриситет малых планет согласно Паломарско-Лейденскому обозрению составил 0,147, полные пределы 0—0,385 [261, 218].

Как вне пояса, так и внутри него существует несколько групп малых планет, представляющих особый интерес. Малые планеты — троянцы занимают точки L_4 и L_5 лагранжевого решения проблемы трех тел для системы Солнце — Юпитер, предшествуя и следуя за Юпитером, грубо говоря, на 60° . Специальное исследование предшествующей (L_5) точки показало, что в районе этой точки содержится около 700 членов, яркость которых в средней оппозиции превышает $20^m,9$ [217]. Интересно, что возле последующей точки по предварительным данным насчитывается лишь 300 членов²¹. Имеется устойчивый резонанс при отношении соизмеримости 3:2 с Юпитером (на 4,0 а.е.), где содержится 23 занумерованных объекта и 10 открытых при работе над Паломарско-Лейденским обозрением; они известны как группа Гильды [216]. Существует один астероид, названный 279 Туле, при соотношении 4:3 (на

4,3 а.е.) [216]. Имеются две малые планеты (1362 Грика и 1101 Клематис) с либрацией при резонансном отношении 2:1 [306]. Наконец, известна группа из 24 членов (в том числе 15 занумерованных) в группе Хунгарии при резонансе 9:2 (на 1,9 а.е.) [306].

Малые планеты, которые пересекают орбиту Земли, относятся к группе Аполлона, по имени первой подобной планеты. Известны 17 из них, но многие будут переоткрыты только случайно [309, 160]. Сам Аполлон был вторично открыт во время специального поиска, предпринятого Мак-Кроски в 1973 г., когда его увидели впервые после открытия в 1932 г. [309]. Малые планеты, которые приближаются к Солнцу ближе, чем перигелий Марса (1,38 а.е.), но не пересекают орбиту Земли, причисляются к группе Амура [160]. Приблизительно 16 из них известны, а один, два либо более потеряны [160]. Особенным объектом является астероид 944 Гидальго. Его среднее расстояние от Солнца (5,8 а.е.) наибольшее среди расстояний известных астероидов, при эксцентриситете 0,66, он движется между 2,0 и 9,7 а.е. [306]. Кроме того, это единственная малая планета, которая подходит к Юпитеру ближе, чем на 1 а.е. В 1973 г. она прошла мимо Юпитера на расстоянии 0,38 а.е. [306]. Орбита Гидальго имеет также высокое наклонение $42^\circ,5$, наибольшее из известных за много лет. «Виртуально вездесущий» Гидальго, так же как и астероиды группы Амура и Аполлона, имеет высокий эксцентриситет орбит. Среди всех этих объектов только 433 Эрос (эксцентриситет 0,22) имеет эксцентриситет менее 0,36, тогда как рекорд принадлежит 1566 Икару — 0,83. Большинство малых планет групп Аполлона и Амура не выделяются особенно высокими наклонениями орбит, но это отчасти может быть следствием наблюдательной селекции. Недавно открытые члены группы Аполлона обладают наклонениями: 1973 ЕА около 40° , 1972 ХА — 41° , 1973 НА — 67° [309]! Одна малая планета типа Амура — 1580 Бетулия имеет наклонение 52° . Было найдено, что некоторое число астероидов групп Аполлона и Амура находится в резонансе или имеет либрацию около резонанса с Землей, хотя «захваты» могут быть не очень большой продолжительности [232].

Уже очень давно (Кирквудом в 1866 г.) было замечено, что главный пояс малых планет, по-видимому, имеет структуру, а именно заметны прогалы на периодах, соизмеримых с периодом Юпитера. Особенно заметны «прогалы Кирквуда» при соотношениях 2:1, 3:1,

²¹ Личное сообщение Т. Герельса.

и 5:2 [92], хотя, как прежде, было замечено, есть случайные объекты, находящиеся точно в соизмеримых соотношениях или имеющих либрацию. Хираяма в ряде статей с 1918 по 1933 г. показал существование в поясе «семейств» астероидов с очень сходными «собственными» элементами орбит. «Собственные» элементы представляют движение тела, освобожденное от большинства вековых возмущений [74, стр. 524—529]. Эти семейства Хираямы, как вообще принимается, являются фрагментациями, возникающими вследствие столкновений [216]. Структурные образования были названы Альвеном «струйными потоками» в случае, когда группировка к тому же происходит в угловых переменных. Полный список семейств Хираямы и многих потоков среди нумерованных астероидов дан Арнольдом [27]. Дополнительные семейства были найдены в ходе Паломарско-Лейденского обзора [216].

Происхождение и эволюция

Классические теории происхождения малых планет, как описано выше, были сформулированы Ольберсом и Хутом в год открытия Цереры. В какой-то мере эти идеи объединил Койпер [267], который предположил, что, вероятно, 100 тел (первоначально 5—10 [264]) образовались путем аккреции, а остальные возникли в результате столкновений. В 1953 г. Койпер [267] заметил, что некоторая аккреция должна продолжаться и в настоящее время. Альвен пошел гораздо дальше, рассматривая в качестве действующего и ныне механизма аккреции гравитационную фокусировку в «струйных потоках» [12]. Ряд ученых также работали над механикой этой проблемы (см., например, [109, 40, 482, 484]. Недавнее всестороннее исследование Напьера и Додда [343] показывает, что столкновения между некоторым ограниченным числом первичных астероидов — определено наиболее вероятная причина происхождения главного пояса.

Важной проблемой является выяснение источника астероидов, пересекающих внутреннюю часть солнечной системы, и метеоритов, достигающих Земли. Есть основания считать, что некоторые, но, вероятно, не все астероиды группы Аполлона могут быть ядрами угасших комет [306, 307]. Есть свидетельство, полученное при спектrophотометрических исследованиях малых планет (обсуждаемых в следующем разделе, что по крайней мере один член группы Аполлона — 1685 Торо —

обладает теми же характеристиками, что и члены группы Флоры в главном поясе, и имеет обычные хондритовые характеристики [91, 243]. Здесь, однако, возникает трудная проблема, связанная с экспозиционным возрастом каменных метеоритов, который очень мал сравнительно со временем, нормально требуемым, чтобы вследствие возмущений без катастрофических столкновений тело перешло из главного пояса на орбиту, пересекающую земную. Только совсем недавно были предложены два механизма, которые, по-видимому, могут обеспечить достаточное количество каменных метеоритов при низкоскоростных столкновениях с малой экспозицией для космических лучей [538, 520]. Оба механизма доставляют вещество только из непосредственных окрестностей резонансных точек. Это должно означать, что все каменные метеориты могли возникнуть из ограниченного числа астероидных источников.

Большинство железных метеоритов достаточно стары и могли прийти из нескольких областей пояса. Многие метеоры входят в земную атмосферу из хорошо известных потоков, связанных с кометами. Они обычно хрупкие и сгорают задолго до попадания на поверхность Земли. В кометных осколках могут существовать и более крупные тела. В этом случае нет динамических явлений, которые могли бы препятствовать достижению ими поверхности Земли. В общем существует полное согласие, что метеориты возникают в поясе малых планет и/или в кометах, но вопрос о том, метеориты какого типа откуда приходят, еще остается спорным и подлежит изучению. Более подробно можно ознакомиться с этим вопросом в работах [25, 26, 510, 511, 16, 202].

Физические данные

Очевидно, что массы и диаметры малых планет имеют фундаментальное значение. Известны массы только трех малых планет, причем одной из них с большой неопределенностью. В 1968 г. Гертц [204] сообщил, что масса 4 Весты составляет $(1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-10}$ массы Солнца на основании сближений с 197 Аретой. В том же году Шубарт [415] сообщил новые значения масс 1 Цереры и 2 Паллады, выведенные по данным о их взаимодействии, причем масса Цереры оказалась равной $(5,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-10}$, а Паллады — $(1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}$ массы Солнца. Масса Цереры, грубо говоря, равна половине массы всего пояса малых планет [414].

Таблица 27. Диаметры малых планет

Малая планета	Измерения, км		
	прямые ¹	инфракрасные ²	поляризационные ³
1 Церера	770	1000	1050
2 Паллада	490	530	560
3 Юнона	195	240	225
4 Веста	390	530	515

¹ Определения Барнарда, цитируемые Дольфусом [127].

² Определения Цельнера, цитируемые Чепменом и Моррисоном [92].

³ По Чепмену и Моррисону [92].

Положительные прямые измерения диаметров были проведены только для первых четырех астероидов. Известны еще два метода определения диаметров. В одном для определения альbedo и диаметра используется инфракрасная радиометрия и визуальная фотометрия [335], в другом — поляриметрия для определения альbedo, которое затем в совокупности с визуальной фотометрией дает диаметр [492]. Все три метода сравниваются в табл. 27. Результаты поляризационных и инфракрасных наблюдений согласуются хорошо, но дают систематически большие значения диаметров, чем данные прямых измерений. Церера наблюдалась также на 3,7 см [71]. Использование поляризационных диаметров приводит к радиояркостной температуре диска $160 \pm 53^\circ \text{K}$ в хорошем согласии с температурой, ожидаемой при нагревании солнечным излучением [71]. Большие диаметры Цереры и Весты приводят к плотности 2—2,5 г/см³, но в связи с большой неопределенностью как в массах, так и в радиусах эта величина имеет малую значимость. Диаметры были измерены для нескольких других малых планет и используются для определения геометрического альbedo, которое обсуждается ниже.

Значительная доля информации о малых планетах получена из их кривых блеска на одной или более длинах волн. Так как большинство астероидов имеет или неправильную форму, или некоторые вариации отражательной способности (или и то и другое), обычно нужна только точная фотометрия, чтобы найти период повторения флуктуаций яркости (фазы кривой блеска) и, следовательно, период вращения. Это сейчас сделано с различной точностью примерно для 50 астероидов. В 1971 г. результаты были суммированы Тей-

лором [461]. Хорошо определенные периоды вращения меняются от 2,273 часа для 1566 Икара до 18,813 часа для 532 Геркулины [461], но существует несколько объектов, которые, по-видимому, имеют значительно более длинные периоды. При наблюдениях на достаточно большой части периода обращения можно видеть малые планеты с разных сторон, причем амплитуда будет уменьшаться по мере приближения луча зрения к оси вращения. Для определения координат полюса и направления вращения были разработаны разные методы [461, 489]. Результаты суммированы Веселы [489]. К сожалению, некоторые методы приводят к неоднозначным решениям в случае немногочисленных данных для астероидов, которые имеют довольно экстремальную форму и число которых довольно значительно. Определение формы, также как и положения оси вращения, рассмотрено Данлэпом [136]. В основном вариации альbedo по поверхности можно моделировать на основании кривых блеска, полученных с достаточной подробностью и точностью. Здесь полезно использовать кривые для нескольких длин волн, так как с длиной волны может меняться «величина альbedo», тогда как форма кривой блеска может сохранять постоянный вид.

С появлением точной спектрофотометрии малых планет, приведенной к абсолютной шкале при помощи измерений радиусов поляризационным методом или по наблюдениям в инфракрасных лучах, стало возможным впервые получить некоторые сведения об их составе. Сводка исследований, сделанная в середине 1972 г., дана Чепменом и др. [90], а популярное сообщение о более поздних работах можно найти в статье Чепмена и Моррисона [92].

Можно сделать некоторые обобщения. Существует два больших класса астероидов: красные объекты со средним значением геометрического альbedo в спектрах (0,1—0,2) и более высоким значением в красных (0,14—0,23); темные нейтральные объекты с почти одинаковой отражательной способностью по спектру, обладающие геометрическим альbedo от 0,09 до 0,03. Малые планеты второго класса имеют слабый наклон или структуру спектра и уменьшающееся альbedo в области короче 4000 Å. У астероидов первого класса часто наблюдаются четкие детали спектра. В весьма обобщенном виде можно полагать, что в первом (красные) классе преобладает вещество типа силикатов, а во втором (темные, нейтральные) — веще-

ство типа углистых хондритов. Чепмен и Салисбери [93] провели подробное сравнение отражательной способности 41 метеорита, полученной в лаборатории, с характеристиками 36 астероидов. Только 1685 Торо, пересекающий орбиту Земли [91], и 43 Ариадна [243] и 8 Флора [92], находящиеся на внутренней границе главного пояса, напоминают обычные хондритовые метеориты. Они [93] нашли, что 16 Психея и 29 Амфитрита соответствуют энстатитовым хондритам, 4 Веста — базальтовым ахондритам, 2 Паллада — углистым хондритам и 192 Навсикая — метеориту Шантонне (ударные, брекчированные *L 6* хондриты). Наиболее поразителен тот факт, что существует много астероидов, не похожих на известные метеориты, и метеоритов, не похожих на изученные астероиды [93]. Это совместимо с идеей, что большинство обычных каменных метеоритов образуется из очень немногих нетипичных малых планет. Так как сообщения о детальных исследованиях этого типа появились в течение последних пяти лет, важные новые геохимические результаты можно ожидать в будущем. Исследование астероидов только началось.

КОМЕТЫ

История и номенклатура

Самое раннее упоминание кометы содержится в древнекитайских летописях, в которых отмечено ее появление во время войны около 1055 г. до н. э. [214]. Записи наблюдений кометы Галлея относятся, возможно, к 240 г. до н. э. или даже 467 г. до н. э. [214, 308]. Ни одного появления кометы Галлея не было пропущено со времени ее видимости в 86 г. до н. э. [287, 308].

У древних халдейцев имелась, очевидно, две школы [287]; одна группа придерживалась мнения, что кометы подобны планетам, но движутся достаточно далеко от Земли, так что невидимы большую часть времени, тогда как другая группа полагала, что кометы были «пламенем, созданным вихрем сильно вращающегося воздуха». Аристотель рассматривал кометы как атмосферное явление — продукт сухой и ветреной погоды [287]. Вскоре их стали считать причиной ветров, а затем и явлений, которые ассоциировались с ветрами, — наводнений и больших пожаров. Сначала они были приметами, потом только плохими приметами; в течение тысячелетий люди пугались комет. Даже в 1910 г. многие были страшно испуганы

появлением кометы Галлея, и мошенники сделали большой бизнес на кометных пилюлях и газовых масках, предотвращающих «ее вредное влияние» [15].

Среди образованных людей кометы считались «приличными» в течение нескольких сотен лет до 1910 г. Тихо Браге показал, что большая комета 1577 г. была определенно дальше Луны, так как наблюдения, сделанные по всей Европе, ясно указывали на малый параллакс кометы [287]. Еще в 1665 г. Борелли писал, что комета 1664 г. двигалась, вероятнее, по эллиптической орбите «или другой кривой линии», а не по прямой [287]. Эдмунд Галлей, используя новую гравитационную теорию своего друга Ньютона, показал, что поведение комет довольно хорошо соответствует поведению членов солнечной системы. Он показал, что орбита кометы 1682 г. была почти идентична орбитам комет 1607 и 1531 гг., и нашел некоторые записи о четырех более ранних кометах, промежутки между появлениями которых были кратны приблизительно 77 годам [287]. Затем он предсказал ее появление в 1758 г., и, конечно, она появилась.

В настоящее время каждая комета, открытая или переоткрытая в данном календарном году, получает предварительное обозначение, содержащее год открытия и букву алфавита (по порядку открытия), а именно 1974a, 1974b и т. д. Примерно через два года после того, как их орбиты становятся хорошо определенными, комета переобозначается в соответствии с годом и порядком ее прохождения через перигелий с использованием римских цифр после года: 1971 I, 1971 II и т. д. Каждая комета получает также имя человека, ее открывшего (или нескольких человек, ее открывших, но не свыше трех имен). Если установлено, что период кометы менее 200 лет, названию обычно предшествует буква P для периодических комет, часто имени может предшествовать или следовать за ним обозначение, соответствующее последнему прохождению через перигелий, например 1910 II P/Halley. Если наблюдатель открыл более одной периодической кометы, тогда название сопровождается числом, например P/Temple 1 и P/Temple 2. В немногих случаях, когда комета была потеряна в течение нескольких оборотов, имя наблюдателя, открывшего ее заново, добавляется к названию кометы; например, P/Swift — Gehrels: комета P/Swift 1 была потеряна на протяжении восьми последовательных прохождений и заново открыта Герельсом на девятом обороте

в 1973 г. Имеется несколько случаев, когда комете было дано или добавлено имя умершего ученого, активно исследовавшего ее орбиту, наиболее известные P/Halley и P/Encke.

Орбиты комет

Эдмунд Галлей доказал, что по крайней мере одна или более комет движутся по эллиптическим орбитам с большим эксцентриситетом. Казалось, что другие кометы движутся по параболам или даже гиперболам и что они составляют огромное большинство. Поэтому кометы были разделены на периодические и непериодические. По мере повышения точности астрометрических измерений это разделение начало казаться все более и более искусственным. Каталог Марсдена [308] содержит 503 кометы с периодами более 200 лет. Из 392 комет, наблюдавшихся с 1800 по 1969 г., только у 10 орбиты остались формально гиперболическими, после того как они были прослежены до расстояний за орбитой Нептуна и отнесены к барицентру солнечной системы. Только одна комета 1899 I имеет гиперболический избыток, в три раза превышающий формальную вероятную ошибку; Марсден считает, что и эта одна комета должна быть исключена из списка гиперболических комет, если сделать допущение о действии негравитационных эффектов [308]. Марсден, так же как и большинство специалистов (но никоим образом не все), считает, что все кометы первоначально связаны с солнечной системой, но могут покинуть ее (получив гиперболическую скорость) вследствие возмущений со стороны планет. В настоящее время кометы обычно называют короткопериодическими (периодические) или долгопериодическими, причем разделение приходится на период 200 лет. Такое деление произвольно и не имеет физического смысла, так как известны пять комет с периодами между 100 и 200 годами и семь с периодами от 200 до 300 лет. Это означает, что в категорию короткопериодических комет включаются все кометы, которые были видны более одного раза.

Более физически обоснованное разделение комет должно основываться на орбитальных характеристиках. В табл. 28 собраны наклонения и периоды всех комет, которые были видны более одного раза. Очевидно, что подавляющее большинство короткопериодических комет имеет очень короткие периоды и движется предпочтительно возле плоскости эклиптики. Наклонение всех комет с перио-

Таблица 28. Характеристики орбит 65 комет, появляющихся более одного раза

Число с наклонением	$i < 30^\circ$	55
	$i < 60^\circ$	60
	$i < 90^\circ$	62
Число с периодами	$P < 10$ лет	46
	$P < 20$ лет	55
	$P < 50$ лет	58

дами меньше 13 лет не превышает 32° . С другой стороны, у кометы с большими периодами не обнаружено преимущественного расположения вблизи эклиптики. Их линии аписид распределены почти случайно, хотя имеется некоторая группировка и небольшое (многие считают значительное) сгущение около галактической плоскости [522, 296, гл. I]. Другое значительное различие связано со средним расстоянием в перигелии, которое для 503 долгопериодических комет равно 0,84 а.е., всего около половины расстояния в перигелии для короткопериодических комет (1,5 а.е.) [308]. Смысл этих динамических различий будет рассмотрен в разделе «Происхождение и эволюция».

Наблюдаемое поведение комет

На больших расстояниях от Солнца комета обычно имеет совершенно звездоподобный вид, если ее вообще можно видеть. Когда комета приближается на гелиоцентрическое расстояние около 3 а.е., вокруг нее начинает развиваться небольшая туманность, называемая комой. Спектроскопически излучение первоначальной туманности в значительной мере определяется полосой (0—0) фиолетовой системы CN около 3880 Å [456]. На расстоянии около 2 а.е. возникает эмиссия сложной группы $\lambda 4050$ C₂, так же как системы α -аммония NH₂ (со слабыми полосами, разбросанными в видимой и ближней инфракрасной областях спектра), но эти полосы видны в гораздо меньшей области около ядра, чем CN [456]. На расстоянии 1,8 а.е. появляются полосы Свана C₂ (первоначально (1—0) на $\lambda 4737$, (0—0) на $\lambda 5165$ и (0—1) на $\lambda 5636$), имеющие большую протяженность, чем полосы C₂, но не столь большую, как у CN [456, 29]. На 1,5 а.е. могут быть видны все обычно присутствующие радикалы (OH, CH, NH), так же как другие обертоны C₂ и CN (0—1 CN обычно появляется около 2 а.е.) [456]. В 1970 г. Код и др. [95] сооб-

пили о присутствии около кометы Таго — Сато — Косака большой короны H, обнаруженной по эмиссии Лайман- α 1216 Å с орбитальной астрономической обсерватории. После этого водород наблюдался около комет Беннетта, Энке и Когоутека, очевидно, атомарный водород является главной характеристикой всех активных комет, хотя время его появления не было зарегистрировано при наблюдениях. Линии метастабильного кислорода [O I] в области 226300—6400 наблюдались в кометах, после того как была достигнута дисперсия, достаточная для их разделения от линий свечения земного неба и других кометных эмиссий. Теперь они наблюдаются на расстояниях более 1,5 а.е. [445]. Около 0,7 а.е. обычно появляются D-линии Na в эмиссии [456]. У комет, проходящих очень близко к Солнцу (подобно комете Икейя — Секи, 1965f), находят также эмиссионные линии K, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu и ионизованного Ca [375].

Несмотря на поярчение по мере приближения к Солнцу, кома обычно сжимается после достижения максимума около 1,4 а.е. [456]. В то же время континуум отраженного солнечного света, который полностью доминировал на расстояниях свыше 3 а.е. и соответствовал звездообразному ядру или иногда малой области вокруг него [128, 262], может расти по протяженности и преобладать во всей центральной части спектра (как было в случае кометы Беннетта) или оставаться столь слабым, что фактически не обнаруживается (в случае кометы P/Энке), при этом спектр кажется состоящим из чисто эмиссионных линий.

На расстояниях ближе 1,5 а.е. от Солнца кометы обычно развивают хвосты (типа I), которые, как представляется, состоят главным образом, если не полностью, из ионов, причем преобладают эмиссии CO^+ и N_2^+ [456]. В ионных хвостах видны также CO_2^+ , CN^+ , NH^+ и H_2O^+ . В редких случаях хорошо заметный ионный хвост может образоваться на значительно больших расстояниях. У кометы Хьюмаса (1961e) большой хвост образовался на расстояниях более 2,5 а.е., причем как в спектре комы, так и в спектре хвоста доминировало излучение CO^+ и N_2^+ [399, 179]. Сильная эмиссия CO^+ была видна даже на расстоянии 5 а.е. [455]. Обычно начиная с расстояния около 1 а.е. от Солнца комета может образовать хвост (типа II), который имеет только непрерывный спектр отраженного света Солнца, очевидно рассеянный очень малыми частицами (~ 1 мкм).

Иногда заметные хвосты II типа наблюдались на очень больших расстояниях (3,9—5,0 а.е.) [353, 420]. Ионные хвосты обычно выглядят очень прямыми, часто с внутренней волокнистой структурой и/или турбулентной структурой, тогда как «пылевые» хвосты более бесструктурны и часто искривлены. В зависимости от геометрического расположения два хвоста могут быть видны отдельно или налагаться друг на друга (в случаях, когда комета обладает хвостами обоих типов).

Любая попытка рассмотреть «среднюю» комету или предсказать ее поведение имеет только статистический смысл. Кометы — индивидуальные образования. Их поведение есть сложная функция, во всяком случае, отношения пыли к газу, газового состава и возраста (оцениваемого по числу их прохождений на расстояниях меньше ~ 5 а.е. от Солнца); можно предполагать также зависимость от многих других переменных. Первые попытки предсказать яркость кометы Когоутека (1973f) — прекрасный пример этого. В действительности долгопериодические кометы ярчают почти всегда медленнее с изменением расстояния, чем короткопериодические, и надежда, что комета Когоутека увеличивала бы яркость пропорционально r^{-6} или даже r^{-4} на всем пути от 5 а.е., была крайне оптимистична. Типичное увеличение яркости долгопериодических комет происходит пропорционально $r^{-2,8}$ [128], так что их поведение можно описать простой экспонентой. Реальную сложность положения показал Секанина [419] для кометы P/Энке.

Модели комет

Общепринятой модели комет не существует. Наиболее широко распространена модель ледяного конгломерата Уиппла [512], которая была значительно расширена, особенно Дельсемме и сотрудниками [413] и Секаниной [418]. Она хорошо соответствует средней комете, и наблюдения комет здесь будут обсуждаться с точки зрения этой модели. Конкурирующие идеи будут кратко обсуждены в разделе «Происхождение и эволюция».

Уиппл [512] представил комету как твердое с малой плотностью образование из замороженных газов, хорошо перемешанных с пылью и крупными обломками. При приближении к Солнцу летучие вещества начинают испаряться, образуя атмосферу из пыли и газа, которая относится назад под влиянием лучистого давления и солнечного ветра в форме хвоста. Относительно внезапное на-

чало активности на 3 а. е. объясняется открытием, что вода является главной компонентой комет, контролирующей скорость испарения [113]. К модели ледяного конгломерата Уиппла привела попытка объяснить видимое вековое ускорение кометы Энке. Негравитационный «реактивный» эффект газов, испаряющихся с части полусферы вращающегося ядра, обращенной к Солнцу, кажется вполне достаточным, чтобы объяснить это явление для кометы Энке, а также и для других комет [311]. Секанина [418] предположил, что некоторые или все кометы обладают каменным ядром. С увеличением возраста комет их активность должна падать, причем прекращение активности зависит от количества газа, который может диффундировать к поверхности. Тогда конечный продукт, как указывалось раньше, может быть астероидом типа Аполлон [307].

Главная проблема состоит в определении «родительских молекул» всех радикалов и ионов, действительно наблюдаемых в кометах, т. е. состава замерзших газов в ядре. Наблюдаемое обилие и протяженность Н и ОН согласуются с фотодиссоциацией H_2O [56]. Сама вода была наконец обнаружена на частоте 22,23 ГГц только в 1974 г. [237]. Микроволновые исследования выявили присутствие двух других устойчивых нейтральных соединений в комете Когоутека: метилцианида (CH_3CN) [486] и цианистого водорода (HCN) [437]. Неясно, однако, могут ли они быть источником CN, так как длительность фотодиссоциации для CH_3CN кажется слишком большой [374], а для HCN неизвестна. Родительские молекулы могут быть гораздо более летучими, чем вода, и все же их скорость испарения может зависеть от испарения воды, если они захвачены как клатраты, в соответствии с предложением Дельсемме и др. [115]. Образование гало из ледяных гранул, выделяемых из ядра, с увеличением эффективной поверхности высвобождения вещества является интересной возможностью, рассмотренной Дельсемме и Миллером [115—117]. Эта идея дополнительно привлекательна тем, что объясняет так называемое фотометрическое ядро — оптически толстую область в коме, гораздо большую по размерам, чем может иметь «реальное» ядро.

Если образуются радикалы и ионы, то их возбуждение легко объяснить для большинства соединений, за исключением, возможно, самой внутренней части комы [301], где происходит резонансно-флуоресцентное возбуждение бесстолкновительного газа [455]. Это

было показано количественно, например, для случая CN, когда интенсивность индивидуальных вращательных линий в комете полностью зависит от гелиоцентрической скорости кометы, так как доплеровский эффект смещает длины волн и, следовательно, интенсивность возбуждающего солнечного излучения, в частности, когда смещаются фраунгоферы линии [455, 29, 301, 110]. Смещение интенсивности с изменением скорости известно как эффект Свингса. Эффект Гринстейна имеет подобный характер, но значительно меньше и возникает вследствие реальных скоростей (~ 1 км/сек) газов в комете [455, 301, 29]. Хотя вращательные температуры, определенные для C_2 , всегда довольно высоки (3000—5000° К) сравнительно с гетероядерными молекулами (200—500° К), это объясняется, вероятно, не какими-либо фундаментальными различиями в механизме возбуждения, а тем, что гомополярные молекулы не могут совершать вращательных переходов [455]. Как показал Арпигни [28] для CO^+ , резонансная флуоресценция хорошо работает также и для ионов. Она, по-видимому, полностью неадекватна только для метастабильного кислорода [455]. Обычно принимается, что это возбуждение происходит непосредственно при диссоциации родительских молекул [59].

Поток водорода из кометы Беннетта (1969i) был измерен после прохождения перигелия на расстояниях от 0,6 до 1,04 а. е. [56]. Скорость истечения, грубо говоря, следовала закону r^{-2} (r — гелиоцентрическое расстояние), причем на $r = 0,81$ а. е. она составила $0,7 \cdot 10^{29}$ атом/сек·стер [56]. Для кометы Р/Энке соответствующая величина на 0,715 а. е. до прохождения перигелия была $\sim 5 \cdot 10^{28}$ атом/сек·стер [56]. Принимая, что весь водород образуется из воды и что вся вода в конечном счете полностью распадается (ОН также диссоциирует), число молекул воды, испущенных ядрами, составило бы половину этого значения. Старая, более близкая к Солнцу периодическая комета Энке даже до прохождения перигелия производит воды в 10^2 раз меньше, чем «новая» комета Беннетта после перигелия. Это ясно указывает или на то, что комета Энке значительно меньше кометы Беннетта, или на то, что она не является долговременным «бесконечным» источником, контролируемым только солнечным излучением. Возможно и то и другое.

Пределы размеров кометных ядер могут быть определены путем измерения их видимой яркости в неактивном состоянии (на рас-

стояниях свыше 3 а. е.) в предположении различной отражательной способности. Сводка таких данных, сделанная Ремером [400], показывает, что, например, комета Р/Энке имеет диаметр между 1,2 и 7,0 км, тогда как комета Хьюмаса была гигантом — с размерами между 19 и 110 км, а комета Туттля — Джакобини — Кресака — карликом с диаметром 0,2—0,8 км. Исследование Дельсемме и Рада [118] показывает, что диаметр кометы Беннета 7,5 км и альbedo Бонда 0,66, тогда как среднее альbedo Бонда для кометы Энке гораздо меньше, причем водный лед покрывает только малую долю поверхности или больше не контролирует образование Н. Ядро с плотностью 1 г/см^3 и диаметром 4 км должно обладать массой $3 \cdot 10^{13} \text{ кг}$, а диаметром 50 км — $5 \cdot 10^{17} \text{ кг}$. Пределы 10^{12} — 10^{18} приблизительно соответствуют тому, что принимается обычно для наименьшей и наибольшей комет.

Моделирование хвостов комет имеет долгую историю. Механическая теория пылевых хвостов была развита русскими астрономами Бредихиным, Орловым и другими много лет назад. Сущность проблемы состоит в том, что частицы с различными начальными условиями движутся под влиянием двух сил — гравитации и давления солнечного излучения [68], детали механизма испускания пыли все еще остаются совершенно открытым вопросом [44, 527]. Видимые возражения против чисто механической теории, связанные с наблюдениями [353] нерадиальных хвостов на больших расстояниях, объясняются испусканием ледяных зерен на очень больших гелиоцентрических расстояниях [420]. Левин [279] считает, что должно сохраниться деление пылевых хвостов на две категории (II и III типы Бредихина) и что в хвостах одной из них в действительности наряду с пылью содержится большое количество газа. Однако это не создает серьезного кризиса физической теории.

Хвосты типа I — другая проблема. Структурные детали в них показывают ускорение, значительно превышающее вызываемое световым излучением. Попытка объяснить это ускорение привела Бирмана [57] к предсказанию солнечного ветра задолго до его фактического обнаружения. Довольно детальная модель взаимодействия типичной долгопериодической кометы с солнечным ветром была разработана Бирманом, Брозовским и Шмидтом [58]. Модель предсказывает существование ударного фронта на расстоянии около 10^6 км перед ядром, где поток стано-

вится дозвуковым, и перед контактной поверхностью на расстоянии около 10^8 км , внутрь которой солнечный ветер не может проникать. Уоллис [499], с другой стороны, предполагает, что бесстолкновительный обмен зарядами замедлит солнечный ветер. Другие указывают на возможную неустойчивость контактной поверхности. Фотоионизация, так же как и обмен зарядами, недостаточна для объяснения ионных плотностей в кометах [412]. Была предложена теория критических скоростей ионизации (см. [421]). В действительности не существует реальных представлений о механизме взаимодействия кометы с солнечным ветром, и поэтому нет общепринятого механизма образования и поведения кометных хвостов.

Было бы неправильно ограничивать рассмотрение комет рамками модели ледяного конгломерата, не обсудив некоторые возникающие при этом проблемы. Как уже указывалось, некоторые кометы показывают активность на гелиоцентрических расстояниях 5 а. е. и более, но такие расстояния слишком велики, чтобы связать активность с испарением H_2O . Если комета раньше никогда не приближалась к Солнцу, тогда это можно легко объяснить наличием слоя более летучих соединений, которые могли бы активизироваться на больших расстояниях. Комета с избыточным отношением летучих к воде не могла бы захватить их все как клатраты и должна иметь активность, не контролируемую водой. Такое объяснение обычно предлагается для «новых» комет. Существует тем не менее «проблема потомков». Хорошо известная комета Р/Швассмана — Вахмана 1 движется по почти круговой орбите (эксцентриситет 0,132) за Юпитером (расстояние в перигелии 5,54 а. е., а афелии 7,21 а. е.). Этот объект, обычно имеющий звездную величину $\sim 19^m$, внезапно, менее чем за сутки, становится ярче на 7^m (более, чем в 600 раз) [394]. Между 1939 и 1950 гг. отмечено по крайней мере 20 вспышек, и так как комета наблюдалась довольно редко, они должны быть довольно обычным явлением [394]. Грубые спектры, полученные в двух случаях, показали только чисто непрерывный спектр рассеянного солнечного излучения. Причина этих вспышек неизвестна. Единственная другая комета с приблизительно круговой орбитой, комета Р/Оттерма ($e=0,144$, $q=3,39$ до недавнего возмущения Юпитером), никогда не показывала такой активности [394]. Отмечены сильные флуктуации яркости некоторых комет вблизи Солнца. Комета Р/Тут-

тля — Джиакобини — Кресака вспыхнула на 8—10^м менее чем за 5 суток в мае 1973 г. [401], за сутки или двое до прохождения перигелия на расстоянии 1,15 а.е. Меньшие вспышки продолжались в течение нескольких недель. Для объяснения иногда предлагались «пакеты газа», иногда солнечная активность (см. [2]). Даже довольно прозаические объекты, такие, как комета Р/Д'Арреста, ставят отдельные проблемы. Комета Д'Арреста после перигелия обладает хорошо выраженным фотометрическим ядром, но перед прохождением перигелия его крайне трудно определить и оно неизменно слабое и диффузное [5]. Такое поведение не имеет хорошего объяснения с точки зрения модели ледяного конгломерата. По крайней мере три диффузные кометы (кометы Р/Вестфала 1913 VI, Энсора 1926 III и Пайдушаковой 1954 II) исчезли при приближении к Солнцу. Вероятно, они просто «израсходовали весь газ». Будет очень интересно найти комету Р/Вестфала при ее следующем появлении (если она появится) в конце 1975 г.

Происхождение и эволюция

Вопрос о природе и происхождении комет имеет долгую и трудную историю. Идею, что кометы возникли каким-то путем в межзвездном пространстве, часто называли гипотезой Лапласа, так как он провел первое математическое исследование вероятности захвата, хотя идея о межзвездном образовании относится по крайней мере к Кеплеру [394]. Идея об образовании комет в солнечной системе путем выбросов из больших планет обычно приписывается Лагранжу [394], и иногда все формы гипотез о происхождении в солнечной системе называются лагранжевскими, хотя фактически один Всехсвятский [494] защищает гипотезу Лагранжа в ее первоначальном виде. До появления модели ледяного конгломерата Уиппла обычно соглашались, что кометы — неплотный рой отдельных частиц с небольшим взаимным притяжением [403]. Примерно в то же время, как появилась теория Уиппла, Литтлтон [296] изучил эту гипотезу и показал, что взаимное тяготение незначительно и что каждая частица движется по своей собственной независимой кеплеровской орбите около Солнца. В течение последних пяти лет почтенные ученые защищали все четыре комбинации гипотез: межзвездное происхождение и возникновение внутри солнечной системы, «компактное» ядро и «неплотный

рой», так же как и различные промежуточные теории. Витковский [523] поддерживал идею компактного ядра межзвездного происхождения, Литтлтон [296, 298] — очень неплотного роя межзвездного происхождения, Роби [398] предполагал неплотную структуру, создаваемую солнечной плазмой, а Альвен [13, 483] — создание компактных структур из неплотных при помощи механизма струйных потоков, которое продолжается в настоящее время. Однако так как большинство специалистов сегодня предпочитают компактные структуры, образовавшиеся где-то в пределах гравитационного влияния Солнца, то дальнейшее рассмотрение ограничивается лишь такими теориями.

Как отмечено выше в разделе «Орбиты комет», существуют два четких динамических семейства комет. Эверхарт [140, 139] показал, что нет эволюционного пути, связывающего два семейства. Он предполагает, что оба распределения (а также кометы третьей группы с очень большими перигелийными расстояниями, которые мы никогда не могли наблюдать) могли возникнуть из отдаленного источника (отдаленность в смысле малой энергии связи с Солнцем) и что все кометы входят в систему с близкими параболическими орбитами [140]. Кометы с перигелиями близ Юпитера и Сатурна могли затем вследствие возмущений стать короткопериодическими, а кометы с малыми перигелийными расстояниями должны оставаться почти невозмущенными и составлять долгопериодическое семейство [140]. Чтобы поддерживать постоянное число короткопериодических комет, количество комет с перигелием в районе Юпитера в настоящее время должно было бы составлять $3 \cdot 10^4$ — 10^5 [114].

В таком случае возникает вопрос о происхождении и поведении возможного «отдаленного» источника комет. Оорт [351] предполагает, что кометы возникли в то же самое время и в одной и той же общей области, где и планеты. Затем вследствие возмущений они были выброшены наружу в огромное облако между 30 000 и 100 000 а.е. Их орбиты под воздействием возмущений звезд должны были расположиться случайно, при этом должны быть потеряны следы происхождения комет в плоскости эклиптики [351]. Уиппл [513], Сафронов [404], Нежинский [347] и другие поддерживают эту точку зрения. Ее крупнейшим недостатком является крайне малая эффективность. Камерон [81] предположил, что кометы возникли в независимых субдисках солнечной туманности

уже далеко за Плутоном и достигли даже больших афелийных расстояний в результате потерь массы в солнечной туманности и в Солнце на стадии Т Тельца. О'Делл [348] рассматривает интересный вариант, в котором кометы представляют собой огромное скопление ($\sim 10^{33}$) малых тел (радиус ~ 70 мкм) на большом расстоянии, аккумулирующих на своих поверхностях межзвездные летучие вещества. Приближаясь к Солнцу, они сжимаются, образуя структуру, трудно отличимую от ледяного конгломерата Уинлла.

Литтлтон [297] подверг сильным сомнениям полученные из наблюдений свидетельства существования «облака Оорта» [351]. Подтверждение его существования дали Марсден и Секанина [310], которое основано на улучшенных элементах орбит комет с очень большим периодом, а также с относительно большим перигелийным расстоянием (так, что негравитационные силы вследствие убегания летучих незначительны). Отчасти спор является семантическим. Литтлтон ясно показал, что не существует свидетельств в пользу «пояса», в котором число комет в единице объема очень велико, но оказывается есть группирование в «пространстве, связанном энергетически» ($E \propto 1/a$, где a — большая полуось).

Была рассмотрена возможность накопления некоторых комет близ Солнца, вероятно, между гигантскими планетами. Действие планет-гигантов на кометы столь сильно, что такие орбиты скоро трансформируются [140, 245]. По оценке Эверхарта [140], все орбиты между Юпитером и Нептуном пустеют за время около 10^7 лет без нового пополнения. Лучшей в настоящее время, по-видимому, является теория, согласно которой кометы возникают как часть первичной туманности, по крайней мере в области за Юпитером, а более вероятно за Плутоном, и держатся на «хранении в холодильнике» большую часть их жизни. Они никогда не видны, хотя их перигелийные расстояния падают ниже ~ 5 а.е., и они видны регулярно только

в случае перехода на короткопериодические орбиты под влиянием планет-гигантов.

Средняя короткопериодическая комета с периодом 10 лет может жить 10^4 лет или больше, прежде чем потеряет все летучие вещества. Что станет с ней после? Она может полностью диссипировать, оставив после себя только метеорный поток. В мантийно-ядерной модели Секанины [418] должны быть, однако, каменные остатки, проявляющиеся в виде астероидов типа Аполлон [306, 307], как уже указывалось выше. Окончательный ответ на этот вопрос может быть получен только после более подробного изучения и комет и астероидов с Земли и космических кораблей.

*

Мы благодарны многим людям, которые прямо или косвенно помогли нам быстро собирать данные, использованные в работе. Мы признательны советским составителям В. Г. Тейфелю и О. В. Добровольскому. Мы благодарны Андерсону, Керру, Фенеле, Голдстейну, Грабовске, Гроссману, Жансену, Джонсону, Наллу, Олнессу, Олсену, Поллаку, Смолуховскому, Трефтоу, Уотсону и Уонгу за материалы, присланные нам для использования до их публикации. Гэри мы благодарим за помощь в сборе данных по радиокрестным температурам, использованным при составлении рисунков. Мы особенно признательны Тейлору, который прочитал всю работу и сделал критические замечания по ее содержанию. Мы признательны Оуэну и Махони за их помощь при издании рукописи. Мы также благодарны издательству Д. Рейдель К° (Дордрехт, Голландия) за разрешение использовать небольшое количество исторических и описательных материалов из нашей ранней статьи, опубликованной этим издательством [346].

Эта глава представляет собой исследование, проведенное в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту НАСА № NAS 7-100.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аврамчук В. В. О результатах спектрофотометрии полос поглощения метана (6190 Å) и аммиака (6441 и 6478 Å) на диске Юпитера. Астрон. ж., 1970, 47, № 3, 577.
2. Андриенко Д. А., Деменко А. А., Деменко И. М., Зосимович Н. Д. Вариации блеска комет и условия в межпланетном пространстве. Астрон. ж., 1971, 48, № 4, 843.
3. Бобров М. С. О наблюдении покрытия звезд кольцами Сатурна. Астрон. ж., 1962, 39, № 4, 669.
4. Бобров М. С. Об оценках толщины колец Сатурна по данным наблюдений 1966 г. Астрон. ж., 1972, 49, № 2, 427.
5. Всехсвятский С. К. Физические характеристики комет. М., Физматгиз, 1958.

6. Жарков В. Н., Трубицын В. П. Адиабатические температуры на Уране и Нептуне. Изв. АН СССР, серия Физика Земли, 1972.
7. Кузьмин А. Д., Лосовский В. Я. Измерения радиоизлучения спутника Юпитера Каллисто. Докл. АН СССР, 1973, 211, № 4, 804.
8. Мороженко А. В. Поляриметрические исследования планет-гигантов. III. Юпитер. Астрон. ж., 1973, 50, № 1, 163.
9. Тейфель В. Г. Спектрофотометрия полос поглощения метана на диске Юпитера в ближней инфракрасной области (0,7—1,0 μ). Астрон. ж., 1966, 43, № 1, 154.
10. Alexander A. F. O'D. The Planet Saturn. London, Faber and Faber, 1962.
11. Alexander A. F. O'D. The Planet Uranus. N. Y., American Elsevier, 1965.
12. Alfvén H., Arrhenius G. Structure and Evolutionary History of the Solar System. I. Astrophys. Space Sci., 1970, 8, 338—421.
13. Alfvén H., Mendis A. Nature and Origin of Comets. Nature, 1973, 246, 410—411.
14. Allen D. A., Murdock T. L. Infrared Photometry of Saturn, Titan, and the Rings. Icarus, 1971, 14, 1—2.
15. Alter D. Comets and People. Griffith Observer, 1956, 20, 74—82.
16. Anders E. Interrelations of Meteorites, Asteroids, and Comets. In: Physical Studies of Minor Planets. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 429—446.
17. Anderson J. D., Null G. W., Wong S. K. Gravity Results from Pioneer 10 Doppler Data. J. Geophys. Res., 1974.
18. Anderson R. C., Pipes J. G., Broadfoot A. L., Wallace L. Spectra of Venus and Jupiter from 1800 to 3200 Å. J. Atmos. Sci., 1969, 26, 874—888.
19. Andersson L. Photometry of Jupiter VI and Phoebe (Saturn IX). Bull. Amer. Astron. Soc., 1972, 4, 313.
20. Andersson L. New Findings About Jupiter's and Saturn's Satellites. Sky and Telescope, 1973, 45, 22—23.
21. Andersson L. E., Fix J. D. Pluto: New Photometry and a Determination of the Axis of Rotation. Icarus, 1973, 20, 279—283.
22. Appleby J. F. Multicolor Photoelectric Photometry of Neptune. Astron. J., 1973, 78, 110—112.
23. Appleby J. F., Irvine W. M. Multicolor Photoelectric Photometry of Uranus. Astron. J., 1974, 76, 617—619.
24. Armstrong K. R., Harper D. A., Jr., Low F. J. Far-Infrared Brightness Temperatures of the Planets. Astrophys. J., 1973, 178, L89—L92.
25. Arnold J. R. The Origin of Meteorites as Small Bodies. II. The Model. Astrophys. J., 1965, 141, 1536—1547.
26. Arnold J. R. The Origin of Meteorites as Small Bodies. III. General Considerations. Astrophys. J., 1965, 141, 1548—1556.
27. Arnold J. R. Asteroid Families and «Jet Streams». Astron. J., 1969, 74, 1235—1242.
28. Arpigny C. The Resonance-Fluorescence Excitation of the CO⁺ Comet-Tail Bands in Comet Humason (1961e). Ann. astrophys., 1964, 27, 406—416.
29. Arpigny C. Comet Spectra. In: Comets, Scientific Data and Missions. Proc. Tucson Comet Conf. G. P. Kuiper and E. Roemer (Eds). Tucson, Univ. Ariz., 1972, p. 84—111.
30. Ash M. E., Shapiro I. I., Smith W. B. The System of Planetary Masses. Science, 1971, 174, 551—556.
31. Aumann H. H., Gillespie C. M., Jr., Low F. J. The Internal Powers and Effective Temperatures of Jupiter and Saturn. Astrophys. J., 1969, 157, L69—L72.
32. Balasubrahmanyam V. K., Venkatesan D. Solar Activity and the Great Red Spot of Jupiter. Astrophys. Letters, 1970, 6, 123—126.
33. Banos C. J. Contribution to the Study of Jupiter's Atmosphere. Icarus, 1971, 15, 58—67.
34. Banos C. J., Alissandrakis C. E. Isodensitometry of Jupiter's Red Spot and Jupiter. Astron. and Astrophys., 1971, 15, 424—432.
35. Barker E. S., Trafton L. M. Ultraviolet Reflectivity and Geometric Albedo of Titan. Icarus, 1973, 20, 444—454.
36. Barrow C. H., Morrow D. P. The Polarization of the Jupiter Radiation at 18 Mc/s. Astrophys. J., 1968, 152, 593—608.
37. Bartholdi P., Owen F. The Occultation of Beta Scorpil by Jupiter and Io. II. Io. Astron. J., 1972, 77, 60—65.
38. Bash F. N., Drake F. D., Gundermann E., Heiles C. E. 10-cm Observations of Jupiter, 1961—1963. Astrophys. J., 1964, 139, 975—985.
39. Baum W. A., Code A. D. A Photometric Observation of the Occultation of σ Arietis by Jupiter. Astron. J., 1953, 58, 108—112.
40. Baxter D. C., Thompson W. B. Jetstream Formation Through Inelastic Collisions. In: Physical Studies of Minor Planets, T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 319—326.
41. Beer R., Farmer C. B., Norton R. H., Martonchik J. V., Barnes T. G. Jupiter: Observation of Deuterated Methane in the Atmosphere. Science, 1972, 175, 1360—1361.
42. Beer R., Taylor F. W. The Abundance of CH₃D and the D/H Ratio in Jupiter. Astrophys. J., 1973, 179, 309—327.
43. Belton M. J. S., Spinrad H. H₂ Pressure-Induced Lines in the Spectra of the Major Planets. Astrophys. J., 1973, 183, 363—372.
44. Benvenuti P. Dust Emission Structure in Comets with Type II Tails. Astrophys. Space Sci., 1974, 27, 203—209.
45. Berge G. L. Circular Polarization of Jupiter's Decimeter Radiation. Astrophys. J., 1965, 142, 1688—1692.
46. Berge G. L. An Interferometric Study of Jupiter's Decimeter Radio Emission. Astrophys. J., 1966, 146, 767—798.
47. Berge G. L. Some Recent Observations and Interpretations of the Jupiter Decimeter Emission. In: Proceedings of the Jupiter Radiation Belt Workshop. Jet Propulsion Lab. Pasadena, Cal., July 1971.
48. Berge G. L., Muhleman D. O. High Angular Resolution Observations of Saturn at 21.4 cm Wavelength. Astrophys. J., 1973, 185, 373—381.
49. Berge G. L., Muhleman D. O. The Brightness Temperature of Callisto at 3.71 cm Wavelength. Paper Presented at AAS, Div. Planet. Sci. Palo Alto, Cal., April 1974.
50. Berge G. L., Read R. B. The Microwave Emission of Saturn. Astrophys. J., 1968, 152, 755—764.
51. Bergh C. de, Vion M., Combes M., Lecacheux J. New Infrared Spectra of the Jovian Planets from 12000 to 3000 cm⁻¹ by Fourier Transform Spectroscopy. Astron. and Astrophys., 1973, 28, 457—466.

52. *Bergstrahl J. T.* Methane Absorption in the Atmosphere of Saturn: Rotational Temperature and Abundance from the $3 \nu_3$ Band. *Icarus*, 1973, 18, 605—611.
53. *Bergstrahl J. T.* Methane Absorption in the Jovian Atmosphere. I. The Lorentz Half-Width in the $3 \nu_3$ Band at $1.1 \mu\text{m}$. *Icarus*, 1973, 19, 499—506.
54. *Bergstrahl J. T., Margolis J. S.* Recomputation of the Absorption Strengths of the Methane $3 \nu_3$ J-Manifolds at 9050 cm^{-1} . *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1971, 11, 1285—1287.
55. *Bergstrahl J. T., Young J. W.* Spectroscopic Evidence of Variability in Saturn's Atmosphere. Preprint.
56. *Bertaux J. L., Blamont J. E., Festou M.* Interpretation of Hydrogen Lyman-Alpha Observations of Comets Bennett and Encke. *Astron. and Astrophys.*, 1973, 25, 415—430.
57. *Biermann L.* Comet Tails and Solar Corpuscular Radiation. *Z. Astrophys.*, 1951, 29, 274—286.
58. *Biermann L., Brosowski B., Schmidt H. V.* The Interaction of the Solar Wind with a Comet. *Solar Phys.*, 1967, 1, 254—284.
59. *Biermann L., Trefftz E.* On the Mechanisms of Ionization and Excitation in Cometary Atmospheres. *Z. Astrophys.*, 1964, 59, 1—28.
60. *Bigg E. K.* Influence of the Satellite Io on Jupiter's Decametric Emission. *Nature*, 1964, 203, 1008—1010.
61. *Binder A. B.* Spectrophotometry of the $1.5 \mu\text{m}$ Window of Jupiter. *Astron. J.*, 1972, 77, 93—99.
62. *Binder A. B., Cruikshank D. P.* Evidence of an Atmosphere on Io. *Icarus*, 1964, 3, 299—305.
63. *Binder A. B., McCarthy D. W.* The Infrared Spectral Albedo of Uranus. *Astrophys. J.*, 1972, 171, L1—L3.
64. *Binder A. B., McCarthy D. W. Jr.* IR Spectrophotometry of Jupiter and Saturn. *Astron. J.*, 1973, 78, 939—950.
65. *Bishop E. V., De Marcus W. C.* Thermal Histories of Jupiter Models. *Icarus*, 1970, 12, 317—330.
66. *Blanco C., Catalano S.* Photoelectric Observations of Saturn Satellites Rhea and Titan. *Astron. and Astrophys.*, 1971, 14, 43—47.
67. *Bobrov M. S.* Physical Properties of Saturn's Rings. In: *Surface and Interiors of Planets and Satellites*, chapter 7. A. Dollfus (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1970.
68. *Bobrovnikoff N. T.* Comets. In: *Astrophysics. A Topical Symposium*. J. A. Hynek (Ed.). N. Y., McGraw-Hill, 1951, p. 302—356.
69. *Branson N. J. B. A.* High Resolution Radio Observations of the Planet Jupiter. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1968, 139, 155—162.
70. *Brice N. M., Ioannidis G. A.* The Magnetosphere of Jupiter and Earth. *Icarus*, 1970, 13, 173—183.
71. *Briggs F. H.* Radio Emission from Ceres. *Astrophys. J.*, 1973, 184, 637—639.
72. *Briggs F. H.* The Microwave Properties of Saturn's Rings. *Astrophys. J.*, 1974, 189, 367—378.
73. *Brinkmann R. T.* Jovian Satellite — Satellite Eclipses and Occultations. *Icarus*, 1973, 19, 15—29.
74. *Brouwer D., Clemence G. M.* Methods of Celestial Mechanics. N. Y., Acad. Press, 1961.
75. *Brown R. A.* Optical Line Emission from Io. *Proc. IAU Sympos. N 65*. Torun, Poland, Sept. 1973 (in press).
76. *Brown R. A., Chaffee F. H. Jr.* High-Resolution Spectra of Sodium Emission From Io. *Astrophys. J.*, 1974, 187, L125—L126.
77. *Burns J. A.* Jupiter's Decametric Radio Emission and the Radiation Belts of Its Galilean Satellites. *Science*, 1967, 159, 971—972.
78. *Caldwell I., Larach D. R., Danielson R. E.* The Continuum Albedo of Titan. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1973, 5, 305.
79. *Cameron A. G. W.* Formation of the Outer Planets. *Space Sci. Rev.*, 1973, 14, 383—391.
80. *Cameron A. G. W.* Abundances of the Elements in the Solar System. *Space Sci. Rev.*, 1973, 15, 121—146.
81. *Cameron A. G. W.* Accumulation Processes in the Primitive Solar Nebula. *Icarus*, 1973, 18, 407—450.
82. *Capone L. A., Prasad S. S.* Jovian Ionospheric Models. *Icarus*, 1973, 20, 200—212.
83. *Carlson R. W., Bhattacharyya J. C., Smith B. A., Johnson T. V., Hidayat B., Smith S. A., Taylor G. E., O'Leary B., Brinkmann R. T.* An Atmosphere on Ganymede from It's Occultation of SAO 186800 on 7 June 1972. *Science*, 1973, 182, 53—55.
84. *Carr T. D.* Jupiter's Magnetospheric Rotation Period. *Astrophys. Letters*, 1971, 7, 157—162.
85. *Carr T. D., Gulikis S.* The Magnetosphere of Jupiter. *Annual Rev. Astron. and Astrophys.*, 1969, 7, 577—618.
86. *Carr T. D., Smith A. G., Donovan F. F., Register H. I.* The Twelve-Year Periodicities of the Decametric Radiation from Jupiter. *Radio Sci.*, 1970, 5, N 2, 495—503.
87. *Chadha M. S., Flores J. J., Lawless J. G., Ponnamperuma C.* Organic Synthesis in a Simulated Jovian Atmosphere. II. *Icarus*, 1974, 15, 39—44.
88. *Chang D. B., Davis J., Jr.* Synchrotron Radiation as the Source of Jupiter's Polarized Decimeter Radiation. *Astrophys. J.*, 1962, 136, 567—531.
89. *Chapman C. R.* Jupiter's Zonal Winds; Variation with Latitude. *J. Atmos. Sci.*, 1969, 26, 986—990.
90. *Chapman C. R., McCord T. B., Johnson T. V.* Asteroid Spectral Reflectivities. *Astron. J.*, 1973, 78, 126—140.
91. *Chapman C. R., McCord T. B., Pieters C.* Minor Planets and Related Objects. X. Spectrophotometric Study of the Composition of (1685) Toro. *Astron. J.*, 1973, 78, 502—505.
92. *Chapman C. R., Morrison D.* The Minor Planets: Sizes and Mineralogy. *Sky and Telescope*, 1974, 47, 92—95.
93. *Chapman C. R., Salisbury J. W.* Comparisons of Meteorite and Asteroid Spectral Reflectivities. *Icarus*, 1973, 19, 507—522.
94. *Chase S. C., Ruiz R. D., Munch G., Neugebauer G., Schroeder M., Trafton L. M.* Pioneer 10 Infrared Radiometer Experiment: Preliminary Results. *Science*, 1974, 183, 315—317.
95. *Code A. D., Houck T. E., Lillie C. F.* Comet Tago-Sato-Kosaka (1969g). *IAU Circ.*, 1970, N 2201.
96. *Cohen C. J., Hubbard E. C.* Libration of the Close Approaches of Pluto to Neptune. *Astron. J.*, 1965, 70, 10—13.
97. *Conseil L., Leblanc Y., Antonini G., Quemada D.* The Effect of the Solar Wind Velocity on the Jovian Decametric Emission. *Astrophys. Letters*, 1971, 8, 133—137.
98. *Cook A. F., Franklin F. A.* Rediscussion of Maxwell's Adams Prize Essay on the Stability of Saturn's Rings. *Astron. J.*, 1964, 69, 173—200.
99. *Cook A. F., Franklin F. A.* Rediscussion of Maxwell's Adams Prize Essay on the Stability of Saturn's Rings. II. *Astron. J.*, 1966, 71, 10—19.

100. Cook A. F., Franklin F. A. An Explanation of the Light Curve of Iapetus. *Icarus*, 1970, 13, 282—291.
101. Cook A. F., Franklin F. A., Palluconi F. D. Saturn's Rings — A Survey. *Icarus*, 1973, 18, 317—337.
102. Coupinot G. The Rings of Saturn in 1969. Morphological and Photometric Studies. II. Deconvolution of the Raw Photometric Curves. *Icarus*, 1973, 19, 212—223.
103. Cruikshank D. P. A Search for Ammonia in the Atmosphere of Saturn. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1971, 3, 282.
104. Cruikshank D. P., Binder A. B. Minor Constituents in the Atmosphere of Jupiter. *Astrophys. Space Sci.*, 1969, 3, 347—356.
105. Danielson R. E. The Infrared Spectrum of Jupiter. *Astrophys. J.*, 1966, 143, 949—960.
106. Danielson R. E. The Structure of the Uranus Atmosphere. *AAS Div. Planet. Sci., 5th Annual Meet. Palo Alto, Apr. 1974*.
107. Danielson R. E., Caldwell J. J., Larach D. R. An Inversion in the Atmosphere of Titan. *Icarus*, 1973, 20, 437—443.
108. Danielson R. E., Tomasko M. G., Savage B. D. High-Resolution Imagery of Uranus Obtained by Stratoscope II. *Astrophys. J.*, 1972, 178, 887—900.
109. Danielsson L. The Profile of a Jetstream. In: *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 353—362.
110. Danks T., Arpigny C. Relative Band Intensities in the Red and Violet Systems of CN in Comets. *Astron. and Astrophys.*, 1973, 29, 347—356.
111. Davies R. D., Williams D. Observations of the Continuum Emission from Venus, Mars, Jupiter, and Saturn at 21.2 cm Wavelength. *Planet. Space Sci.*, 1966, 14, 15—31.
112. Delsemme A. H. Review of Cometary Science. In: *Proceedings of the Cometary Sci. Working Group*. D. L. Roberts (Ed.). Chicago. IITRI, 1971.
113. Delsemme A. H. Gas and Dust in Comets. *Space Sci. Rev.*, 1973, 15, 89—101.
114. Delsemme A. H. Origin of the Short-Period Comets. *Astron. and Astrophys.*, 1973, 29, 377—381.
115. Delsemme A. H., Miller D. C. Physico-Chemical Phenomena in Comets. II. Gas Adsorptions in the Snows of the Nucleus. *Planet. Space Sci.*, 1970, 18, 717—730.
116. Delsemme A. H., Miller D. C. Physico-Chemical Phenomena in Comets. III. The Continuum of Comet Burnham (1960 II). *Planet. Space Sci.*, 1971, 19, 1229—1257.
117. Delsemme A. H., Miller D. C. Physico-Chemical Phenomena in Comets. IV. The C₂ Emission of Comet Burnham (1960 II). *Planet. Space Sci.*, 1971, 19, 1259—1274.
118. Delsemme A. H., Rud D. A. Albedos and Cross-Sections for the Nuclei of Comets 1969 IX, 1970 II and 1971 I. *Astron. and Astrophys.*, 1973, 28, 1—6.
119. Desch M. D., Carr T. D. Decametric and Hectometric Observations of Jupiter from the RAE-1 Satellite, *AAS Div. Planet. Sci. 5th Annual Meet. Palo Alto, Apr. 2—5, 1974*.
120. Dickel J. R., Degioanni J. J., Goodman G. C. The Microwave Spectrum of Jupiter. *Radio Sci.*, 1970, 5, 517—527.
121. Dollfus A. Visual and Photographic Studies of Planets at the Pic du Midi. In: *Planets and Satellites. The Solar System, v. III*. G. P. Kuiper and B. M. Middlehurst (Eds.). Chicago, Univ. Chicago, 1961.
122. Dollfus A. Movements in the Atmosphere of Saturn in 1960. *Coordinated Observations by the International Astronomical Union. Icarus*, 2, 109—114.
123. Dollfus A. Saturn X (Janus). *IAU Circ. Feb. 1, 1967, N 1995*.
124. Dollfus A. Diameters of the Planets and Satellites. In: *Surfaces and Interiors of Planets and Satellites*, chapter 2. A. Dollfus (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1970.
125. Dollfus A. New Optical Measurements of the Diameters of Jupiter, Saturn, Uranus, and Neptune. *Icarus*, 1970, 12, 101—117.
126. Dollfus A. Diameter Measurements of Asteroids. In: *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 25—31.
127. Dollfus A. Physical Studies of Asteroids by Polarization of the Light. In: *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 95—116.
128. Donn B. The Characteristics of Distant Comets. *Ann. Astrophys.*, 1962, 25, 319—323.
129. Douglas J. N., Smith H. C. Interplanetary Scintillation in Jovian Decametric Radiation. *Astrophys. J.*, 1967, 148, 885—903.
130. Drake F. D., Hvatum H. Non-Thermal Microwave Radiation from Jupiter. *Astron. J.*, 1959, 64, 329—330.
131. Dulk G. A. Characteristics of Jupiter's Decametric Radio Source Measured with Arc-Second Resolution. *Astrophys. J.*, 1970, 159, 671—684.
132. Dulk G. A., Clark T. A. Almost Continuous Radio Emission from Jupiter at 8.9 and 10 MHz. *Astrophys. J.*, 1966, 145, 945—948.
133. Duncombe R. L., Klepczynski W. J., Seidelmann P. K. The Masses of the Planets, Satellites, and Asteroids. *Fundam. Cosmic Phys.*, 1973, 1, 119—165.
134. Dunham D. Motions of the Satellites of Uranus. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1971, 3, 415.
135. Dunham T., Jr. Spectroscopic Observations of the Planets at Mount Wilson. In: *The Atmospheres of the Earth and Planets*. Revised ed., G. P. Kuiper (Ed.). Chicago. Univ. Chicago, 1952.
136. Dunlap J. L. Laboratory Work on the Shapes of Asteroids. In: *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 147—154.
137. Ellis G. R. A. The Decametric Radio Emissions of Jupiter. *Radio Sci.*, 1965, 69D, 1513—1530.
138. Encrenaz T., Owen T. New Observations of the Hydrogen Quadrupole Lines on Saturn and Uranus. *Astron. and Astrophys.*, 1973, 28, 119—124.
139. Everhart E. The Origin of Short-Period Comets. *Astrophys. Letters*, 1972, 10, 131—135.
140. Everhart E. Examination of Several Ideas of Comet Origins. *Astron. J.*, 1973, 78, 329—337.
141. Feibelman W. A. Concerning the 'D' Ring of Saturn. *Nature*, 1967, 214, 793—794.
142. Field G. B. The Source of Radiation from Jupiter at Decimeter Wavelengths. *J. Geophys. Res.*, 1959, 64, 1169—1177.
143. Field G. B. The Source of Radiation from Jupiter at Decimeter Wavelengths. II. Cyclotron Radiation. *J. Geophys. Res.*, 1960, 65, 1661—1671.
144. Field G. B. The Source of Radiation from Jupiter at Decimeter Wavelengths. Pt 3. Time Dependence of Cyclotron Radiation. *J. Geophys. Res.*, 1961, 66, 1395—1406.

145. Field G. B. Proceedings of the Caltech-JPL Lunar and Planet. Conf. Jet Propulsion Lab. Pasadena, Cal., June 15, 1966.
146. Fink U., Dekkers N. H., Larson H. P. Infrared Spectra of the Galilean Satellites of Jupiter. *Astrophys. J.*, 1973, 179, L155—L159.
147. Fix J. D., Neff J. S., Kelsey L. A. Spectrophotometry of Pluto. *Astron. J.*, 1970, 75, 895—896.
148. Flasar F. M. Gravitational Energy Sources in Jupiter. *Astrophys. J.*, 1973, 186, 1097—1106.
149. Focas J. H. Activity in Jupiter's Atmospheric Belts between 1904 and 1963. *Icarus*, 1971, 15, 56—57.
150. Focas J. H., Dollfus A. Optical Properties and Thickness of the Rings of Saturn Observed on Edge in 1966. *Astron. and Astrophys.*, 1969, 2, 251—265.
151. Fountain J. W., Coffeen D. L., Dose L. R., Gehrels T., Swindell W., Tomasko M. G. Jupiter's Clouds: Equatorial Plumes and Other Cloud Forms in the Pioneer 10 Images. *Science*, 1974, 184, 1279—1281.
152. Fox K., Ozier I. The Importance of Methane to Pressure-Induced Absorption in the Atmospheres of the Outer Planets. *Astrophys. J.*, 1971, 166, L95—L100.
153. Fox K., Owen T., Mantz A. W., Rao K. N. A Tentative Identification of $^{13}\text{CH}_4$ and an Estimate of $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ in the Atmosphere of Jupiter. *Astrophys. J.*, 1972, 176, L81—L84.
154. Franklin F. A., Colombo G., Cook A. F. A Dynamical Model for the Radial Structure of Saturn's Rings. II. *Icarus*, 1974, 15, 80—92.
155. Franz O. G., Millis R. L. UVB Photometry of Enceladus, Tethys, and Dione. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1973, 5, 304.
156. Franz O. G., Millis R. L. A Search for Post-Eclipse Brightening of Io with an Area-Scanning Photometer. AAS Div. Planet. Sci. 5th Annual Meet. Palo Alto, Apr. 1974.
157. Freeman K. C., Lynga G. Data for Neptune from Occultation Observations. *Astrophys. J.*, 1970, 160, 767—780.
158. Galkin L. S., Bugaenko L. A., Bugaenko O. I., Morozhenko A. V. The Spectrum of Uranus in the Region 4800—7500 Å. In: *Planetary Atmospheres*. IAU Sympos. N 40. C. Sagan, T. C. Owen and H. J. Smith (Eds.). Dordrecht, Holland, Reidel, 1971, p. 392—393.
159. Gehrels T. The Transparency of the Jovian Polar Zones. *Icarus*, 1969, 10, 410—411.
160. Gehrels T. Physical Parameters of Asteroids and Interrelations with Comets. In: *From Plasma to Planet*. A. Elvius (Ed.). Stockholm, Almqvist and Wiksell, 1972, p. 169—178.
161. Gehrels T., Gill J. R., Haughey J. W. Introduction. In: *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. XIII—XXVII.
162. Gehrels T., Herman B. M., Owen T. Wavelength Dependence of Polarization. XIV. Atmosphere of Jupiter. *Astron. J.*, 1969, 74, 190—199.
163. Gerard E. Long-Term Variations of the Decimeter Radiation of Jupiter. *Radio Sci.*, 1970, 5, 513—516.
164. Gierasch P. J. Jupiter's Cloud Bands. *Icarus*, 1973, 19, 482—494.
165. Gille J. C., Lee T. The Spectrum and Transmission of Ammonia under Jovian Conditions. *J. Atmos. Sci.*, 1969, 26, 932—940.
166. Gillett F. C., Forrest W. J. The 7.5— to 13.5 Micron Spectrum of Saturn. *Astrophys. J.*, 1974, 187, L37—L39.
167. Gillett F. C., Forrest W. J., Merrill K. M. 8—13 Micron Observations of Titan. *Astrophys. J.*, 1973, 184, L93—L95.
168. Gillett F. C., Low F. J., Stein W. A. The 2.8—14 Micron Spectrum of Jupiter. *Astrophys. J.*, 1969, 157, 925—934.
169. Gillett F. C., Merrill K. M., Stein W. A. Albedo and Thermal Emission of Jovian Satellites I—IV. *Astrophys. Letters*, 1970, 6, 247—249.
170. Gillett F. C., Westphal J. A. Observations of 7.9 Micron Limb Brightening on Jupiter. *Astrophys. J.*, 1973, 179, L153—L154.
171. Giver L. P., Spinrad H. Spectra of Saturn and Uranus. *Icarus*, 1966, 5, 586—589.
172. Gledhill J. A. Magnetosphere of Jupiter. *Nature*, 1967, 214, 155.
173. Goldreich P. An Explanation of the Frequent Occurrence of Commensurable Mean Motions in the Solar System. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1965, 130, 159—181.
174. Goldstein R. M., Morris G. A. Radar Observations of the Rings of Saturn. *Icarus*, 1973, 20, 260—262.
175. Golitsyn G. S. A Similarity Approach to the General Circulation of Planetary Atmospheres. *Icarus*, 1970, 13, 1—24.
176. Gorgolewski S. Possible Detection of Thermal Radio Emission at 3.5 mm from Callisto. *Astrophys. Letters*, 1970, 7, 37.
177. Graboske H. C., Jr., Pollack J. B., Grossman A. S., Olness R. J. The Structure and Evolution of Jupiter: The Fluid Contraction Stage. Lawrence Livermore Lab. Preprint, UCRL-74860, 1973.
178. Graboske H. C., Jr., Olness R. J., Grossman A. S. Thermodynamics of Dense Hydrogen-Helium Fluids. Lawrence Livermore Lab. Preprint, UCRL-74859, 1973.
179. Greenstein J. The Spectrum of Comet Humason (1961e). *Astrophys. J.*, 1962, 136, 688—690.
180. Grossman A. S., Graboske H. C., Jr. Evolution of Low-Mass Stars. III. Effects of Nonideal Thermodynamic Properties During the Pre-Main-Sequence Contraction. *Astrophys. J.*, 1971, 164, 475—490.
181. Guerin P. The New Ring of Saturn. *Sky and Telescope*, 1970, 40, 88.
182. Guerin P. The Rings of Saturn in 1969. Morphological and Photometric Studies. I. Obtaining and Analysis of the Photographs. *Icarus*, 1973, 19, 202—211.
183. Gulkis S. Lunar Occultation Observations of Jupiter at 74 cm and 128 cm. *Radio Sci.*, 1970, 5, 505—511.
184. Gulkis S. Radio Emission from the Major Planets — The Thermal Component. *Advances Astronaut. Sci.*, 1971, N 291, 203—222.
185. Gulkis S., Carr T. D. Radio Rotation Period of Jupiter. *Science*, 1966, 154, 257—259.
186. Gulkis S., Gary B., Klein M., Stelzried C. Observations of Jupiter at 13 cm Wavelength During 1969 and 1971. *Icarus*, 1973, 18, 181—191.
187. Gulkis S., Klein M. J., Poynter R. L. Jupiter's Microwave Spectrum — Implications for the Upper Atmosphere. IAU Sympos. «Exploration of the Solar System». Torun, Poland, 1974, p. 273—280.
188. Gulkis S., McDonough T. R., Craft H. The Microwave Spectrum of Saturn. *Icarus*, 1969, 10, 421—427.

189. *Gulkis S., Poynter R.* Thermal Radio Emission from Jupiter and Saturn. *Phys. Earth Planet. Interiors*, 1972, 6, 36—43.
190. *Gurnett D. A.* Sheath Effects and Related Charged-Particle Acceleration by Jupiter's Satellite Io. *Astrophys. J.*, 1972, 175, N 2, 525—534.
191. *Hall C. F.* Pioneer 10. *Science*, 1974, 183, 301—302.
192. *Hall J. S., Riley L. A.* Polarization Measurements of Jupiter and Saturn. *J. Atmos. Sci.*, 1969, 26, 920—923.
193. *Halliday I.* Comments on the Mean Density of Pluto. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1969, 81, 285—287.
194. *Halliday I. et al.* An Upper Limit for the Diameter of Pluto. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1966, 78, 113—124.
195. *Haines E. L. (Ed.)*. Selenodesy and Lunar Dynamics. Lunar Scientific Model. Sect. 1, Doc. 900—278. Jet Propulsion Lab. Pasadena, Cal., 1971.
196. *Hansen D. L.* Ten Micron Observations of Io, Europa, and Ganymede. *Icarus*, 1973, 18, 237—246.
197. *Hansen D. L.* 12-Micron Emission Features of the Galilean Satellites and Ceres. *Astrophys. J.*, 1974, 188, L31—L33.
198. *Harper D. A., Jr., Low F. J., Rieke G. H., Armstrong K. R.* Observations of Planets, Nebulae, and Galaxies at 350 Microns. *Astrophys. J.*, 1972, 177, L21—L25.
199. *Harris D. L.* Photometry and Colorimetry of Planets and Satellites. In: *Planets and Satellites, The Solar System*, v. III. G. P. Kuiper, and B. M. Middlehurst (Eds). Chicago, Univ. Chicago, 1961.
200. *Harrison H., Schoen R. I.* Evaporation of Ice in Space: Saturn's Rings. *Science*, 1967, 157, 1175—1176.
201. *Hart M. H.* A Possible Atmosphere for Pluto. *Icarus*, 1974, 21, 242—247.
202. *Hartmann W. K., Hartmann A. C.* Asteroid Collisions and Evolution of Asteroidal Mass Distribution and Meteoritic Flux. *Icarus*, 1968, 8, 361—381.
203. *Herget P.* The Work at the Minor Planet Center. In: *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 9—12.
204. *Hertz H. G.* The Mass of Vesta. *Science*, 1968, 160, 299—300.
205. *Herzberg G.* Laboratory Absorption Spectra Obtained With Long Paths. In: *The Atmospheres of the Earth and Planets*. Revised ed. G. P. Kuiper (Ed.). Chicago, Univ. Chicago, 1952.
206. *Hess S. L.* Variations in Atmospheric Absorption over the Disks of Jupiter and Saturn. *Astrophys. J.*, 1953, 118, 151—160.
207. *Hide R.* Origin of Jupiter's Great Red Spot. *Nature*, 1961, 190, 895—896.
208. *Hide R.* On the Hydrodynamics of Jupiter's Atmosphere. *Mem. Soc. roy. sci. Liège*, ser. 5, 1963, 7, 481—505.
209. *Hide R.* Dynamics of the Atmospheres of the Major Planets with an Appendix on the Viscous Boundary Layer at the Rigid Bounding Surface of an Electrical-Conducting Rotating Fluid in the Presence of a Magnetic Field. *J. Atmos. Sci.*, 1969, 26, 841—853.
210. *Hide R.* Motions in Planetary Atmospheres: A Review. *Meteorol. Mag.*, 1971, 100, 268—276.
211. *Hide R.* On Geostrophic Motion of a Non-Homogeneous Fluid. *J. Fluid Mech.*, 1971, 49, 745—751.
212. *Hide R.* Jupiter and Saturn. *Proc. Roy. Soc. London A*, 1974, 336, 63—84.
213. *Hide R., Ibbetson A.* An Experimental Study of «Taylor Columns». *Icarus*, 1966, 5, 279—290.
214. *Ho Peng Yoke.* Ancient and Mediaeval Observations of Comets and Novae in Chinese Sources. In: *Vistas in Astronomy*, v. 5. A. Beer (Ed.). Oxford, Pergamon Press, 1962, p. 127—225.
215. *Hopkins N. B., Irvine W. M.* Variations in the Color of Jupiter. In: *Planetary Atmospheres*. IAU Sympos. N 40. C. Sagan, T. C. Owen and H. J. Smith (Eds.). Dordrecht, Holland, Reidel, 1971.
216. *Houten C. J. van.* Descriptive Survey of Families, Trojans, and Jetstreams. In: *Physical Studies of Minor Planets and Related Objects*. V. The Density of Trojans Near the Preceding Lagrangian Point. *Astron. J.*, 1970, 75, 659—662.
217. *Houten C. J. van, Houten-Groeneveld I. van, Gehrels T.* Minor Planets and Related Objects. V. The Density of Trojans Near the Preceding Lagrangian Point. *Astron. J.*, 1970, 75, 659—662.
218. *Houten C. J. van, Houten-Groeneveld I. van, Herget P., Gehrels T.* The Palomar-Leiden Survey of Faint Minor Planets. *Astron. and Astrophys. Suppl.*, 1970, 2, 339—448.
219. *Hubbard W. B.* Thermal Models of Jupiter and Saturn. *Astrophys. J.*, 1969, 155, 333—344.
220. *Hubbard W. B.* Structure of Jupiter: Chemical Composition, Contraction, and Rotation. *Astrophys. J.*, 1970, 162, 687—697.
221. *Hubbard W. B.* Observational Constraint on the Structure of Hydrogen Planets. *Astrophys. J.*, 1973, 183, L35—L38.
222. *Hubbard W. B.* The Significance of Atmospheric Measurements for Interior Models of the Major Planets. *Space Sci. Rev.*, 1973, 14, 424—432.
223. *Hubbard W. B., Smoluchowski R.* Structure of Jupiter and Saturn. *Space Sci. Rev.*, 1973, 14, 599—662.
224. *Hubbard W. B., Van Flandern T. C.* The Occultation of Beta Scorpii by Jupiter and Io. III. Astrometry. *Astron. J.*, 1972, 77, 65—74.
225. *Hunt G. E.* Interpretation of Hydrogen Quadrupole and Methane Observations of Jupiter and the Radiative Properties of the Visible Clouds. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1973, 161, 347—362.
226. *Hunt G. E., Margolis J. S.* Formation of Spectral Lines in Planetary Atmospheres. V. Collision Narrowed Profiles of Quadrupole Lines in Hydrogen Atmospheres. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1973, 13, 417—426.
227. *Hunt D. M.* The Escape of H₂ from Titan. *J. Atmos. Sci.*, 1973, 30, 726—732.
228. *Hunt D. M., Munch G.* The Helium Abundance of Jupiter. *Space Sci. Rev.*, 1973, 14, 433—443.
229. *Inge J. L.* Short-Term Jovian Rotation Profiles, 1970—1972. *Icarus*, 1973, 20, 1—6.
230. International Astronomical Union: IAU Information Bull., 1962, N 8.
231. *Ioannidis G. A., Brice N. M.* Plasma Densities in the Jovian Magnetosphere: Plasma Slingshot or Maxwell Demon? *Icarus*, 1971, 14, 360—373.
232. *Ip W.-H., Mehra R.* Resonances and Librations of Some Apollo and Amor Asteroids with the Earth. *Astron. J.*, 1973, 78, 142—147.
233. *Irvine W. M., Lane A. P.* Monochromatic Albedos for the Disk of Saturn. *Icarus*, 1971, 15, 18—26.

234. Irvine W. M., Lane A. P. Photometric Properties of Saturn's Rings. *Icarus*, 1973, 18, 171—176.
235. Irvine W. M., Simon T., Menzel D. H., Charon J., Leconte G., Griboval P., Young A. T. Multicolor Photoelectric Photometry of the Bright Planets. II. Observations from Le Houga Observatory. *Astron. J.*, 1968, 73, 251—264.
236. Irvine W. M., Simon T., Menzel D. H., Pikoos C., Young A. T. Multicolor Photoelectric Photometry of the Brighter Planets. III. Observations from Boyden Observatory. *Astron. J.*, 1968, 73, 807—823.
237. Jackson W. M., Clark T., Donn B. Comet Bradfield (1974b). *IAU Circ.*, 1974, N 2674.
238. James T. C. Calculations of Collision Narrowing of the Quadrupole Lines in Molecular Hydrogen. *J. Opt. Soc. America*, 1969, 59, 1602—1606.
239. Janssen M. A. Short Wavelength Radio Observations of Saturn's Rings. Proceedings of the Saturn Ring Workshop. Pasadena, Cal., Jet Propulsion Lab., 1974.
240. Jenkins E. B. Far-Ultraviolet Spectroscopy of Jupiter. *Icarus*, 1969, 10, 379—385.
241. Johnson H. L. The Infrared Spectra of Jupiter and Saturn at 1.2—4.2 Microns. *Astrophys. J.*, 1970, 159, L1—L5.
242. Johnson T. V. Galilean Satellites: Narrowband Photometry 0.30—1.10 Microns. *Icarus*, 1971, 14, 94—111.
243. Johnson T. V., Matson D. L. Spectrophotometry of (43) Ariadne: A Possible Chondritic Composition. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1973, 5, 308.
244. Judge D. L., Carlson R. W. Pioneer 10 Observations of the Ultraviolet Glow in the Vicinity of Jupiter. *Science*, 1974, 183, 317—318.
245. Kazimirschak-Polonskaya E. I. The Major Planets as Powerful Transformers of Cometary Orbits. In: *The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets*. G. A. Chebotarev, E. I. Kazimirschak-Polonskaya and B. G. Marsden (Eds.). Dordrecht, Holland, Reidel, 1972.
246. Keay C. S. L., Law F. J., Rieke G. H., Minton R. B. High-Resolution Maps of Jupiter at Five Microns. *Astrophys. J.*, 1973, 183, 1063—1073.
247. Kelsey L. A., Fix J. D. Polarimetry of Pluto. *Astrophys. J.*, 1973, 184, 633—636.
248. Kemp J. C., Swedlund J. B., Murphy R. E., Wolstencroft R. D. Circularly Polarized Visible Light from Jupiter. *Nature*, 1971, 231, 169—170.
249. Kemp J. C., Wolstencroft R. D. Elliptical Polarization by Surface-Layer Scattering. *Nature*, 1971, 231, 170—171.
250. Kemp J. C., Wolstencroft R. D., Swedlund J. B. Circular Polarization: Jupiter and Other Planets. *Nature*, 1971, 232, 165—168.
251. Khare B. N., Sagan C. Red Clouds in Reducing Atmospheres. *Icarus*, 1973, 20, 311—321.
252. Kieffer H. H., Smythe W. D. Frost Spectra: Comparison with Jupiter's Satellites. *Icarus*, 1974, 21, 506—512.
253. Kiess C. C., Corliss C. H., Kiess H. K. High Dispersion Spectra of Jupiter. *Astrophys. J.*, 1960, 132, 221—231.
254. Klein M. J., Gulkis S., Stelzreid C. Jupiter: New Evidence of Long Term Variations of Its Decimeter Flux Density. *Astrophys. J.*, 1972, 176, L85—L88.
255. Kliore A., Catn D. L., Fjeldbo G., Seidel B. L. The Atmospheres of Io and Jupiter Measured by the Pioneer 10 Radio Occultation Experiment. 17th Meet. COSPAR, Paper N II—VII. 1.4. San Paulo, Brazil, June 1974.
256. Komesaroff M. M., McCulloch P. M. The Radio Rotation Period of Jupiter. *Astrophys. Letters*, 1971, 1, 39—41.
257. Komesaroff M. J., Morris D., Roberts J. A. Circular Polarization of Jupiter's Decimetric Emission and the Jovian Magnetic Field Strength. *Astrophys. Letters*, 1970, 7, 31—36.
258. Kovalevsky J. Determination of the Masses of the Planets and Satellites. In: *Surfaces and Interiors of Planets and Satellites*, chapter 1. A. Dollfus (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1970.
259. Kovalevsky J., Link F. Diameter, Flattening and Optical Properties of the Upper Atmosphere of Neptune as Derived from the Occultation of the Star BD—17° 4388. *Astron. and Astrophys.*, 1969, 2, 398—412.
260. Krauss J. D. Planetary and Solar Radio Emission at 11 Meters Wavelength. *Proc. IRE*, 1958, 46, 266—274.
261. Kresák L. Orbital Selection Effects in the Palomar-Leiden Asteroid Survey. In: *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 197—210.
262. Kresák L. Short-Period Comets at Large Heliocentric Distances. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, 1973, 24, 264—283.
263. Kuiper G. P. Titan: A Satellite with an Atmosphere. *Astrophys. J.*, 1944, 100, 378—383.
264. Kuiper G. P. On the Origin of Asteroids. *Astron. J.*, 1950, 55, 164.
265. Kuiper G. P. The Diameter of Pluto. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1950, 62, 133—137.
266. Kuiper G. P. Planetary Atmospheres and Their Origins. In: *The Atmospheres of the Earth and Planets*. Revised ed. G. P. Kuiper (Ed.). Chicago, Univ. Chicago, 1952.
267. Kuiper G. P. Note on the Origin of the Asteroids. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 1953, 39, 1159—1161.
268. Kuiper G. P. On the Origins of the Satellites and the Trojans. In: *Vistas in Astronomy*, v. 2. A. Beer (Ed.). N. Y., Pergamon Press, 1956.
269. Kuiper G. P. Further Studies on the Origin of Pluto. *Astrophys. J.*, 1957, 125, 287—289.
270. Kuiper G. P. Lunar and Planetary Laboratory Studies of Jupiter—I. Sky and Telescope, 1972, 43, 4—8.
271. Kuiper G. P. Lunar and Planetary Laboratory Studies of Jupiter—II. Sky and Telescope, 1972, 43, 75—81.
272. Kuiper G. On the Origin of the Solar System. I. *Celestial Mech.*, 1974, 9, 321—348.
273. Kuiper G. P., Fujita Y., Gehrels T., Groeneveld I., Kent J., Van Biesbroeck G., Houten C. J. van. Survey of Asteroids. *Astrophys. J. Suppl.*, 1958, № 111, 289—428.
274. Kuzmin A. D., Naumov A. P., Smirova T. V. Estimate of Ammonia Concentration in Subcloud Atmospheres of Saturn from Radio-Astronomy Measurements. *Solar System Res.*, 1972, 6, 13—18.
275. Kuzmin A. D., Losovskii B. Ya. Measurements of 8.2 mm Radio Emission from Saturn and Estimates of the Rings' Optical Thickness. *Solar System Res.*, 1971, 5, 78—81.
276. Kuzmin A. D., Losovskii B. Ya. On the Radio Emission of Callisto. *Icarus*, 1973, 18, 222—223.
277. Lebofsky L. A., Johnson T. V., McCord T. B. Saturn's Rings: Spectral Reflectivity and Compositional Implications. *Icarus*, 1970, 13, 226—230.
278. Lee T. Spectral Albedos of the Galilean Satellites. *Commun. Lunar Planet. Lab.*, 1971, 9, 179—180.

279. *Levin B. J.* On the Bredikhin's Classification of Cometary Tails and the Nature of the Type II Tails. Mem. Soc. roy. sci. Liège, Collect. in 8°, ser. 5, 1966, 12, 323—327.
280. *Levin B. Yu.* Some Remarks on the Liberation of Gases from Cometary Nuclei. In: The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets. G. A. Chebotarev, E. I. Kazimirschak-Polonskaya and B. G. Marsden (Eds.). Dordrecht, Holland, Reidel, 1972.
281. *Lewis J. S.* The Clouds of Jupiter and the NH_3 — H_2O and NH_3 — H_2S Systems. *Icarus*, 1969, 10, 365—378.
282. *Lewis J. S.* Observability of Spectroscopically Active Compounds in the Atmosphere of Jupiter. *Icarus*, 1969, 10, 393—409.
283. *Lewis J. S.* Satellites of the Outer Planets: Their Physical and Chemical Nature. *Icarus*, 1971, 15, 174—185.
284. *Lewis J. S.* Chemistry of the Outer Solar System. *Space Sci. Rev.*, 1973, 14, 401—441.
285. *Lewis J. S.* The Chemistry of the Solar System. *Sci. American*, 1974, 230 (3), 51—65.
286. *Lewis J. S., Prinn R. G.* Jupiter's Clouds: Structure and Composition. *Science*, 1970, 169, 472—473.
287. *Ley W.* Watchers of the Skies. N. Y., Viking, 1963.
288. *Low F. J.* The Infrared Brightness Temperature of Uranus. *Astrophys. J.*, 1966, 146, 326—328.
289. *Low F. J.* Observations of Venus, Jupiter, and Saturn at 2.20 μ . *Astron. J.*, 1966, 71, 391.
290. *Low F. J., Davidson A. W.* The Thermal Emission of Jupiter and Saturn. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1969, 1, 200.
291. *Low F. J., Rieke G. H.* Infrared Photometry of Titan. *Astrophys. J.*, 1974, 190, L143—L145.
292. *Low F. J., Rieke G. H., Armstrong K. R.* Ground-Based Observations at 34 Microns. *Astrophys. J.*, 1973, 183, L105—L109.
293. *Lutz B. L.* Molecular Hydrogen on Uranus. Observation of the 3—0 Quadrupole Band. *Astrophys. J.*, 1973, 182, 989—998.
294. *Lutz B. L., Ramsay D. A.* New Observations on the Kuiper Bands of Uranus. *Astrophys. J.*, 1972, 176, 521—524.
295. *Lyttleton R. A.* On the Possible Results of an Encounter of Pluto with the Neptunian System. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1936, 97, 108—115.
296. *Lyttleton R. A.* The Comets and Their Origin. London, Cambridge, 1953.
297. *Lyttleton R. A.* On the Distribution of Major-Axes of Long-Period Comets. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1968, 139, 225—230.
298. *Lyttleton R. A.* Does a Continuous Solid Nucleus Exist in Comets? *Astrophys. Space Sci.*, 1972, 15, 175—184.
299. *Maillard J. P., Combes M., Encenaz Th., Lecauchez J.* New Infrared Spectra of the Jovian Planets from 12000 to 4000 cm^{-1} . I. Study of Jupiter in the 3 ν_3 CH_4 Band. *Astron. and Astrophys.*, 1973, 25, 219—232.
300. *Makalkin A. B.* The Structure of Models of Neptune. *Solar System Res.*, 1973, 6, 153—157.
301. *Malaise D. J.* Collisional Effects in Cometary Atmospheres. Pt I. Model Atmospheres and Synthetic Spectra. *Astron. and Astrophys.*, 1970, 5, 209—227.
302. *Margolis J. S.* Studies of Methane Absorption in the Jovian Atmosphere. III. The Reflecting-Layer Model. *Astrophys. J.*, 1971, 167, 553—558.
303. *Margolis J. S., Fox K.* Infrared Absorption Spectrum of CH_4 at 9050 cm^{-1} . *J. Chem. Phys.*, 1968, 49, 2451—2452.
304. *Margolis J. S., Fox K.* Studies of Methane Absorption in the Jovian Atmosphere. I. Rotational Temperature from the 3 ν_3 Band. *Astrophys. J.*, 1969, 157, 935—943.
305. *Margolis J. S., Hunt G. E.* On the Level of H_2 Quadrupole Absorption in the Jovian Atmosphere. *Icarus*, 1973, 18, 593—598.
306. *Marsden B. G.* On the Relationship between Comets and Minor Planets. *Astron. J.*, 1970, 75, 206—217.
307. *Marsden B. G.* Evolution of Comets into Asteroids? In: Physical Studies of Minor Planets. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 413—421.
308. *Marsden B. G.* Catalogue of Cometary Orbits. Cambridge, Mass., Smithsonian Astrophys. Observ., 1972.
309. *Marsden B. G.* The Recovery of Apollo. *Sky and Telescope*, 1973, 46, 155—158.
310. *Marsden B. G., Sekanina Z.* On the Distribution of «Original» Orbits of Comets of Large Perihelion Distance. *Astron. J.*, 1973, 78, 1118—1124.
311. *Marsden B. G., Sekanina Z., Yeomans D. K.* Comets and Nongravitational Forces. V. *Astron. J.*, 1973, 78, 241—225.
312. *Marshall L., Libby W. F.* Stimulation of Jupiter's Radio Emission by Io. *Nature*, 1967, 214, 126—128.
313. *Martin T. Z., Cruikshank D. P., Pilcher C. B.* Ammonia in the Atmosphere of Saturn. AAS Div. Planet. Sci. 5th Annual Meet. Palo Alto, Apr. 1974.
314. *Mason H. P.* The Abundance of Ammonia in the Atmosphere of Jupiter. *Astrophys. Space Sci.*, 1970, 7, 424—436.
315. *Matson D. L., Johnson T. V., Fanale F. P.* Sodium D-Line Emission from Io: Sputtering and Resonant Scattering Hypothesis. *Astrophys. J.*, in Aug. 15, 1974 (in press).
316. *Maxworthy T. A.* Review of Jovian Atmospheric Dynamics. *Planet. Space Sci.*, 1973, 21, 623—641.
317. *Mayer C. H., McCullough T. P., Sloanaker R. M.* Observations of Mars and Jupiter at a Wavelength of 3.5 μ . *Astrophys. J.*, 1958, 127, 11—16.
318. *McBride J. D. P., Nicholls R. W.* The Vibration-Rotation Spectrum of Ammonia Gas. I. *J. Phys. B. Atomic. Mol. Phys.*, 1972, 5, 408—417.
319. *McBride J. D. P., Nicholls R. W.* The Vibration-Rotation Spectrum of Ammonia Gas. II. A Rotational Analysis of the 6450 Å Band. *Canad. J. Phys.*, 1972, 50, 93—102.
320. *McCord T. B., Johnson T. V., Elias J. H.* Saturn and Its Satellites: Narrow-Band Spectrophotometry (0.3—1.1 μ). *Astrophys. J.*, 1971, 165, 413—424.
321. *McCulloch P. M., Komesaroff M. M.* Location of the Jovian Magnetic Dipole. *Icarus*, 1973, 19, 83—86.
322. *McDonough T. R., Brice N. M.* A New Kind of Ring Around Saturn? *Nature*, 1973, 243, 513.
323. *McGovern W. E., Burk S. D.* Upper Atmospheric Thermal Structure of Jupiter with Convective Heat Transfer. *J. Atmos. Sci.*, 1972, 29, 179—189.
324. *Melbourne W. G., Mulholland J. G., Sjogren W. L., Sturms F. M., Jr.* Constants and Related Information for Aerodynamic Calculations. Techn. Rept. 32-1306. Pasadena, Jet Propulsion Lab., 1968.

325. *Melrose D. B.* Rotational Effects on the Distribution of Thermal Plasma in the Magnetosphere of Jupiter. *Planet. Space Sci.*, 1967, 15, 381—393.
326. *Mendis D. A., Asford W. I.* Satellites and Magnetospheres of the Outer Planets. Univ. Cal., San Diego, 1973, Preprint.
327. *Millis R. L.* UVB Photometry of Iapetus. *Icarus*, 1973, 18, 247—252.
328. *Millis R. L., Thompson D. T., Harris B. J., Birch P., Sefton R.* A Search for Post-Eclipse Brightening of Io with Multiple-Aperture Photometers. AAS Div. Planet. Sci. 5th Annual Meet. Palo Alto, Apr. 1974.
329. *Molton P. M., Ponnamperna C.* Organic Synthesis in a Simulated Jovian Atmosphere. III. Synthesis of Aminonitriles. *Icarus*, 1974, 21, 166—174.
330. *Moore J. H.* Spectroscopic Observations of the Rotation of Saturn. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1939, 51, 274—281.
331. *Moore J. H., Menzel D. H.* Preliminary Results of Spectrographic Observations for Rotation of Neptune. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1928, 40, 234—238.
332. *Moore J. H., Menzel D. H.* The Rotation of Uranus. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1930, 42, 330—335.
333. *Moroz V. I., Cruikshank D. P.* Distribution of Ammonia on Jupiter. *J. Atmos. Sci.*, 1969, 26, 865—869.
334. *Morozhenko A. V., Yanovitskii E. G.* The Optical Properties of Venus and the Jovian Planets. I. The Atmosphere of Jupiter According to Polarimetric Observations. *Icarus*, 1973, 18, 583—592.
335. *Morrison D.* Determination of Radii of Satellites and Asteroids from Radiometry and Photometry. *Icarus*, 1973, 19, 1—14.
336. *Morrison D., Cruikshank D. P.* Temperatures of Uranus and Neptune at 24 Microns. *Astrophys. J.*, 1973, 179, 329—331.
337. *Morrison D., Cruikshank D. P.* Thermal Properties of the Galilean Satellites. *Icarus*, 1973, 18, 224—236.
338. *Morrison D., Cruikshank D. P.* Physical Properties of the Natural Satellites. *Space Sci. Rev.*, 1974, 15, 641—739.
339. *Munch G., Spinrad H.* On the Spectrum of Saturn. *Mém. Soc. roy. sci. Liège, ser. 5*, 1963, 7, 541—542.
340. *Munch G., Younkln R. L.* Molecular Absorptions and Color Distributions Over Jupiter's Disk. *Astron. J.*, 1964, 69, 553.
341. *Murphy R. E.* Temperatures of Saturn's Rings. *Astrophys. J.*, 1973, 181, L87—L90.
342. *Murphy R. E., Cruikshank D. P., Morrison D.* Radii, Albedos, and 20-Micron Brightness Temperatures of Iapetus and Rhea. *Astrophys. J.*, 1972, 177, L93—L96.
343. *Napier W. McD., Dodd R. J.* On the Origin of the Asteroids. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1974, 166, 469—489.
344. *Nautical Almanac Office.* Explanatory Supplement to the Ephemeris. London, Her Majesty's Stationary Office, 1961.
345. *Neff J. S., Lane W. A., Fix J. D.* An Investigation of the Rotational Period of the Planet Pluto. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1974, 86, 225—230.
346. *Newburn R. L., Jr., Culkis S. A.* Survey of the Outer Planets Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune, Pluto and Their Satellites. *Space Sci. Rev.*, 1973, 14, 179—271.
347. *Nezhinskij E. M.* On the Stability of the Oort Cloud. In: *The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets*. G. A. Chebotarev, E. I. Kazimirkhak-Polonskaya and B. G. Marsden (Eds.). Dordrecht, Holland, Reidel, 1972.
348. *O'Dell C. R.* A New Model for Cometary Nuclei. *Icarus*, 1973, 19, 137—146.
349. *Ohring G.* The Temperature and Ammonia Profiles in the Jovian Atmosphere from Inversion of the Jovian Emission Spectrum. *Astrophys. J.*, 1973, 184, 1027—1040.
350. *O'Leary B., Van Flandern T. C.* Io's Triaxial Figure. *Icarus*, 1972, 17, 209—215.
351. *Oort J. H.* Empirical Data on the Origin of Comets. In: *The Moon, Meteorites, and Comets, The Solar System, v. IV*. B. M. Middlehurst, G. P. Kuiper (Eds.). Chicago, Univ. Chicago, 1963.
352. *Opik E. J.* Jupiter: Chemical Composition, Structure, and Origin of a Giant Planet. *Icarus*, 1962, 1, 200—257.
353. *Osterbrock D. E.* A Study of Two Comet Tails. *Astrophys. J.*, 1958, 128, 95—105.
354. *Owen T.* Comparisons of Laboratory and Planetary Spectra. III. The Spectrum of Jupiter from 7750 to 8800 Å. *Astrophys. J.*, 1965, 142, 782—786.
355. *Owen T.* An Identification of the 6800 Å Methane Band in the Spectrum of Uranus and a Determination of Atmospheric Temperature. *Astrophys. J.*, 1966, 146, 611—613.
356. *Owen T.* Comparisons of Laboratory and Planetary Spectra. IV. The Identification of the 7500 Å Bands in the Spectra of Uranus and Neptune. *Icarus*, 1967, 6, 108—113.
357. *Owen T.* The Spectra of Jupiter and Saturn in the Photographic Infrared. *Icarus*, 1969, 10, 355—364.
358. *Owen T., Lutz B. L., Porco C. C., Woodman J. H.* On the Identification of the 6420 Å Absorption Feature in the Spectra of Uranus and Neptune. *Astrophys. J.*, 1974, 189, 379—381.
359. *Owen T., Mason H. P.* New Studies of Jupiter's Atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1969, 26, 870—873.
360. *Owen T., Westphal J. A.* The Clouds of Jupiter: Observational Characteristics. *Icarus*, 1972, 16, 392—396.
361. *Owen T., Woodman J. H.* On the Atmospheric Temperature of Jupiter Derived from the 3 ν_3 Methane Band. *Astrophys. J.*, 1968, 154, L21—L23.
362. *Palluconi F. D.* The Planet Saturn (1970). NASA Space Vehicle Design Criteria (Environment), NASA SP-8091. Washington, NASA, 1972.
363. *Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A., Gorgolewski S.* The Brightness Temperatures of Ganymede and Callisto at 2.8 cm Wavelength. *Astron. and Astrophys.*, 1974 (in press).
364. *Peek B. M.* The Planet Jupiter. London, Faber and Faber, 1958.
365. *Pettengill G. H., Hagfors T.* Comments on Radar Scattering from Saturn's Rings. *Icarus*, 1974, 21, 188—190.
366. *Pilcher C. B., Chapman C. R., Lebofsky L. A., Kieffer H. H.* Saturn Rings: Identification of Water Frost. *Science*, 1970, 167, 1372—1373.
367. *Pilcher C. B., McCord T. B.* Narrow-Band Photometry of the Bands of Jupiter. *Astrophys. J.*, 1971, 165, 195—201.
368. *Pilcher C. B., Ridgway S. T., McCord T. B.* Galilean Satellites: Identification of Water Frost. *Science*, 1972, 178, 1087—1089.

369. Pollack J. B. Greenhouse Models of the Atmosphere of Titan. *Icarus*, 1973, 19, 43—58.
370. Pollack J. B., Reynolds R. T. Implications of Jupiter's Early Contraction History for the Composition of the Galilean Satellites. *Icarus*, 1974, 21, 248—253.
371. Pollack J. B., Summer A., Baldwin B. Estimates of the Size of the Particles in the Rings of Saturn. *Icarus*, 1973, 20, 263—278.
372. Porter J. G. The Satellites of the Planets. *Brit. Astron. Assoc. J.*, 1960, 70, 33—59.
373. Porter W. S. The Constitutions of Uranus and Neptune. *Astron. J.*, 1961, 66, 243—245.
374. Potter A. E., Del Duca B. Lifetime in Space of Possible Parent Molecules of Cometary Radicals. *Icarus*, 1964, 3, 103—108.
375. Preston G. W. The Spectrum of Comet Ikeya-Seki (1965f). *Astrophys. J.*, 1967, 147, 718—742.
376. Price M. J. The Scattering Mean Free Path in the Uranian Atmosphere. *Icarus*, 1973, 20, 455—464.
377. Prinn R. G. UV Radiative Transfer and Photolysis in Jupiter's Atmosphere. *Icarus*, 1970, 13, 424—436.
378. Prinn R. G., Lewis J. S. Uranus Atmosphere: Structure and Composition. *Astrophys. J.*, 1973, 179, 333—342.
379. Prinz R. The Atmospheric Activity of the Planet Jupiter. Pt I. From 1964 to 1968 in Yellow Light. *Icarus*, 1971, 15, 68—73.
380. Prinz R. The Atmospheric Activity of the Planet Jupiter. Pt II. Short-Term Variations in Five Spectral Ranges. *Icarus*, 1971, 15, 74—79.
381. Rabe E. On the Origin of Pluto and the Masses of the Protoplanets. *Astrophys. J.*, 1957, 125, 290—295.
382. Rabe E. Further Studies on the Orbital Development of Pluto. *Astrophys. J.*, 1957, 126, 240—244.
383. Ramsey W. H. On the Constitutions of Uranus and Neptune. *Planet Space Sci.*, 1967, 15, 1609—1623.
384. Rather I., Ade P., Clegg P. Brightness Temperature Measurements of Saturn, Jupiter, Mars, and Venus at 1 mm Wavelength. To be published.
385. Reese E. J. Jupiter's Red Spot in 1968—1969. *Icarus*, 1970, 12, 249—257.
386. Reese E. J. Summary of Jovian Latitude and Rotation-Period Observations from 1898 to 1970. *Dept. Astron. Rept. TN-71-36*. Las Cruces, N. Mex. State Univ., 1971.
387. Reese E. J. Jupiter: Its Red Spot and Other Features in 1969—1970. *Icarus*, 1971, 14, 343—354.
388. Reese E. J. Recent Photographic Measurements of Saturn. *Icarus*, 1971, 15, 466—479.
389. Reese E. J. Jupiter: Its Red Spot and Disturbances in 1970—71. *Icarus*, 1972, 17, 57—72.
390. Reese E. J., Smith B. A. Evidence of Vorticity in the Great Red Spot of Jupiter. *Icarus*, 1968, 9, 474—486.
391. Reese E. J., Solberg H. G., Jr. Recent Measures of the Latitude and Longitude of Jupiter's Red Spot. TN-557-65-7. Las Cruces, N. Mex. State Univ., 1965.
392. Register H. I. Decameter-wavelength Radio Observations of the Planet Jupiter, 1957—1968. Ph. D. Thesis. Gainesville, Univ. Florida, 1968.
393. Reynolds R. T., Summers A. L. Models of Uranus and Neptune. *J. Geophys. Res.*, 1965, 70, 199—208.
394. Richtler N. B. The Nature of Comets. London, Methuen, 1963.
395. Ridgway S. T. Jupiter: Identification of Ethane and Acetylene. *Astrophys. J.*, 1974, 187, L41—L43.
396. Ridgway S. T. The Infrared Spectrum of Jupiter. AAS Div. Planet Sci. 5th Annual Meet. Palo Alto, Apr. 1974.
397. Roberts J. A., Ekers R. D. The Position of Jupiter's Van Allen Belt. *Icarus*, 1966, 5, 149—153.
398. Robey D. H. A Theory on the Nature and Origin of Comets with Implications for Space Mission Planning. Annual Meet. Amer. Astronaut. Soc., Anaheim, June, 1970.
399. Roemer E. Comet Notes. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1962, 74, 537—539.
400. Roemer E. The Dimensions of Cometary Nuclei. *Mém. Soc. roy. sci. Liège, Collect in 8°, ser. 5*, 1966, 12, 23—28.
401. Roemer E. Comet Notes. *Mercury*, 1973, 2 (4), 19—21.
402. Rottman G. J., Moos H. W., Freer C. S. The Far-Ultraviolet Spectrum of Jupiter. *Astrophys. J.*, 1973, 184, L89—L92.
403. Russell H. M., Dugan R. S., Stewart J. Q. *Astronomy*, v. 1. Revised ed. Boston, Mass., Ginn and Co., 1945.
404. Safronov V. S. Ejection of Bodies from the Solar System in the Course of the Accumulation of the Giant Planets and the Formation of the Cometary Cloud. In: *The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets*. G. A. Chebotarev, E. I. Kazimirchak-Polonskaya and B. G. Marsden (Eds.). Dordrecht, Holland, Reidel, 1972.
405. Sagan C. On the Nature of the Jovian Red Spot. *Mém. Soc. roy. sci. Liège, ser. 5*, 1963, 7, 506—515.
406. Sagan C. A Truth Table Analysis of Models of Jupiter's Great Red Spot. *Comments Astrophys. Space Phys.*, 1971, 3, 65—72.
407. Sagan C. The Solar System Beyond Mars: An Exobiological Survey. *Space Sci. Rev.*, 1971, 11, 827—866.
408. Sagan C., Khare B. N. Experimental Jovian Photochemistry: Initial Results. *Astrophys. J.*, 1971, 168, 563—659.
409. Sagan C., Veverka J., Wasserman L., Elliot J., Liller W. Jovian Atmosphere: Structure and Composition between the Turbopause and the Mesopause. *Science*, 1974, 184, 901—903.
410. Salpeter E. E. On Convection and Gravitational Layering in Jupiter and in Stars of Low Mass. *Astrophys. J.*, 1973, 181, L83—L86.
411. Savage B. D., Caldwell J. J. Ultraviolet Photometry from the Orbiting Astronomical Observatory. XIII. The Albedos of Jupiter, Uranus, and Neptune. *Astrophys. J.*, 1974, 187, 197—208.
412. Savage B. D., Danielson R. E. Models of the Atmosphere of Jupiter. In: *Infrared Astronomy*. P. J. Brancazio and A. G. W. Cameron (Eds.). N. Y., Gordon and Breach, 1968, p. 211—244.
413. Schatten K. H., Ness N. F. The Magnetic-Field Geometry of Jupiter and Its Relation to Io—Modulated Jovian Decametric Radio Emission. *Astrophys. J.*, 1971, 165, 621—632.
414. Schubart J. Asteroid Masses and Densities. In: *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 33—39.
415. Schubart J. The Masses of the First Two Asteroids. *Astron. and Astrophys.*, 1974, 30, 289—292.
416. Seaquist E. R. Circular Polarization of Jupiter at 9.26 cm. *Nature*, 1969, 224, 1011—1012.

417. Seidelmann P. K., Klepczynski W. J., Duncombe R. L., Jackson E. S. Determination of the Mass of Pluto. *Astron. J.*, 1971, 76, 488—492.
418. Sekanina Z. Dynamical and Evolutionary Aspects of Gradual Deactivation and Disintegration of Short-Period Comets. *Astron. J.*, 1969, 74, 1223—1234.
419. Sekanina Z. Secular Decrease in the Absolute Brightness of the Comet Encke. In: *Astrometry and Astrophysics*, N 4. Physics of Comets. V. P. Konopleva (Ed.). Washington, NASA, 1970, p. 43—62.
420. Sekanina Z. Existence of Icy Comet Tails at Large Distances from the Sun. *Astrophys. Letters*, 1973, 14, 175—180.
421. Sherman J. C. The Critical Velocity of Gas-Plasma Interaction and Its Possible Heterogenic Relevance. In: *From Plasma to Planet*. A. Elvius (Ed.). Stockholm, Almqvist and Wiksell, 1972.
422. Sherrill W. M. Polarization Measurements of the Decimeter Emission from Jupiter. *Astrophys. J.*, 1965, 142, 1171—1185.
423. Shimizu M. The Upper Atmosphere of Jupiter. *Icarus*, 1971, 14, 273—281.
424. Simpson J. A., Hamilton D., Lentz G., McKibben R. B., Mogro-Campero A., Perkins M., Pyle K. R., Tuzzolino A. J., O'Gallagher J. J. Protons and Electrons in Jupiter's Magnetic Field: Results from the University of Chicago Experiment on Pioneer 10. *Science*, 1974, 183, 306—309.
425. Simpson J. A., Hamilton D. C., McKibben R. B., Mogro-Campero A., Pyle K. R., Tuzzolino A. J. The Protons and Electrons Trapped in the Jovian Dipole Magnetic Field Region and Their Interaction with Io. *J. Geophys. Res.*, 1974 (in press).
426. Sinton W. M. Physical Researches on the Brighter Planets. Final Rept. AFCRL-64-926. Bedford, Mass., Air Force Cambridge Res. Lab., 1964.
427. Sinton W. M. Limb and Polar Brightening of Uranus at 8870 Å. *Astrophys. J.*, 1972, 176, L131—L133.
428. Sky and Telescope. A Tenth Satellite of Saturn? *Sky and Telescope*, 1967, 33, 71.
429. Slattery W. L., Hubbard W. B. Statistical Mechanics of Light Elements at High Pressure. III. Molecular Hydrogen. *Astrophys. J.*, 1973, 181, 1031—1038.
430. Smith B. A., Smith S. A. Upper Limits for an Atmosphere on Io. *Icarus*, 1972, 17, 218—222.
431. Smith E. J., Davis L., Jr., Jones D. E., Colburn D. S., Coleman P. H., Jr., Dyal P., Sonett C. P. Magnetic Field of Jupiter and Its Interaction with the Solar Wind. *Science*, 1974, 183, 305—306.
432. Smith E. J., Davis L., Jr., Jones D. E., Coleman P. J., Jr., Colburn D. S., Dyal P., Sonett C. P., Frandsen A. M. A. The Planetary Magnetic Field and Magnetosphere of Jupiter: Pioneer 10. *J. Geophys. Res.*, 1974 (in press).
433. Smoluchowski R. Internal Structure and Energy Emission of Jupiter. *Nature*, 1967, 215, 691—695.
434. Smoluchowski R. Jupiter's Convection and Its Red Spot. *Science*, 1970, 168, 1340—1342.
435. Smoluchowski R. Dynamics of the Jovian Interior. *Astrophys. J.*, 1973, 185, L95—L99.
436. Smoluchowski R. The Interior Structure of Jupiter (Consequences of Pioneer 10 Data).—USA—USSR Conf. Cosmochem. Moon and Planets. Moscow, June 1974.
437. Snyder L. E., Buhl D., Huebner W. F. Detection of HCN in Comet Kohoutek (1973f). *AAS. Div. Planet. Sci. 5th Annual Meet.* Palo Alto, Apr. 1974.
438. Solberg H. G., Jr. Jupiter's Red Spot in 1965—1966. *Icarus*, 1968, 8, 82—89.
439. Solberg H. G., Jr. Jupiter's Red Spot in 1966—1967. *Icarus*, 1968, 9, 212—216.
440. Solberg H. G., Jr. Jupiter's Red Spot in 1967—1968. *Icarus*, 1969, 10, 412—416.
441. Solberg H. G., Jr. A Three-Month Oscillation in the Longitude of Jupiter's Red Spot. *Planet. Space Sci.*, 1969, 17, 1573—1580.
442. Spinrad H. Pressure-Induced Dipole Lines of Molecular Hydrogen in the Spectra of Uranus and Neptune. *Astrophys. J.*, 1963, 138, 1242—1245.
443. Spinrad H. Spectroscopic Research on the Major Planets. *Appl. Opt.*, 1964, 3, 181—186.
444. Spinrad H. Lack of a Noticeable Methane Atmosphere on Triton. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1969, 81, 895—896.
445. Spinrad H., Smith H. E., Leibert J. Comet Kohoutek (1973f). *IAU Circ.*, 1973, N 2591.
446. Stannard D. The Radio Astronomy of Jupiter. Neil Brice Mem. Sympos. Frascati, Italy, May 28—June 1, 1974.
447. Stansberry K. G., White R. S. Jupiter's Radiation Belt. *J. Geophys. Res.*, 1974, 79, 2331—2342.
448. Stone P. H. The Symmetric Baroclinic Instability of an Equatorial Current. *Geophys. Fluid Dynamics*, 1971, 2, 147—164.
449. Stone P. H. A Simplified Radiative-Dynamical Model for the Static Stability of Rotating Atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, 1972, 29, 405—418.
450. Stone P. H. The Dynamics of the Atmospheres of the Major Planets. *Space Sci. Rev.*, 1973, 14, 444—459.
451. Stone P. H., Baker D. H., Jr. Concerning the Existence of Taylor-Columns in Atmospheres. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1968, 94, 576—580.
452. Streett W. B. Phase Equilibria in Molecular Hydrogen-Helium Mixtures at High Pressures. *Astrophys. J.*, 1973, 186, 1107—1125.
453. Streett W. B., Ringermacher H. I., Veronis G. On the Structure and Motions of Jupiter's Red Spot. *Icarus*, 1971, 14, 349—342.
454. Strobel D. F., Smith G. R. On the Temperature of the Jovian Thermosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1973, 30, 718—725.
455. Swings P. Cometary Spectra. *Quant. J. Roy. Astron. Soc.*, 1965, 6, 28—89.
456. Swings P., Haser L. Atlas of Representative Cometary Spectra. Louvain, Univ. Liege, 1956.
457. Taylor D. J. Spectrophotometry of Jupiter's 3400—10000 Å Spectrum and a Bolometric Albedo for Jupiter. *Icarus*, 1965, 4, 362—373.
458. Taylor F. Methods and Approximations for the Computation of Transmission Profiles in the ν_4 Band of Methane in the Atmosphere of Jupiter. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1972, 12, 1151—1156.
459. Taylor F. W. Temperature Sounding Experiments for the Jovian Planets. *J. Atmos. Sci.*, 1972, 29, 950—958.
460. Taylor G. E. The Determination of the Diameter of Io from Its Occultation of β Scorpii C on May 14, 1971. *Icarus*, 1972, 17, 202—208.
461. Taylor R. C. Photometric Observations and Reduction of Lightcurves of Asteroids. In: *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 117—131.
462. Teifel V. G. Molecular Absorption and the Pos-

- sible Structure of the Cloud Layers of Jupiter and Saturn. *J. Atmos. Sci.*, 1969, 26, 854—859.
463. *Teifel V. G., Usoltzeva L. A., Kharitonova G. A.* The Spectral Characteristics and Probable Structure of the Cloud Layer of Saturn. In: *Planetary Atmospheres*, IAU Sympos. N 40, C. Sagan, T. C. Owen and H. J. Smith (Eds.). Dordrecht, Holland, Reidel, 1971, p. 375—383.
 464. *Texereau J.* Observing Saturn's Edgewise Rings. October, 1966. *Sky and Telescope*, 1967, 33, 226.
 465. *Thorne K. S.* Dependence of Jupiter's Decimeter Radiation on the Electron Distribution in Its Van Allen Belts. *Radio Sci.*, 1965, 69D, 1557—1560.
 466. *Tombaugh C. W.* The Trans-Neptunian Planet Search. In: *Planets and Satellites. The Solar System*, v. III. G. P. Kuiper and B. M. Middlehurst (Eds.). Chicago, Univ. Chicago, 1961, p. 12—30.
 467. *Trafton L. M.* Model Atmospheres of the Major Planets. *Astrophys. J.*, 1967, 147, 765—781.
 468. *Trafton L. M.* Photometric Observations of Saturn's 1.1 μ CH₄ Band. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1971, 3, 282.
 469. *Trafton L. M.* A Semiempirical Model for the Mean Transmission of a Molecular Band and Application to the 10 μ and 16 μ Bands of NH₃. *Icarus*, 1971, 15, 27—38.
 470. *Trafton L.* On the Methane Opacity for Uranus and Neptune. *Astrophys. J.*, 1972, 172, L417—L420.
 471. *Trafton L.* On the Possible Detection of H₂ in Titan's Atmosphere. *Astrophys. J.*, 1972, 175, 285—293.
 472. *Trafton L.* The Bulk Composition of Titan's Atmosphere. *Astrophys. J.*, 1972, 175, 295—306.
 473. *Trafton L.* Saturn: A Study of the 3 ν_3 Methane Band. *Astrophys. J.*, 1973, 182, 615—636.
 474. *Trafton L.* Scanner Observations of the Quadrupole H₂ Lines in the Spectrum of Uranus. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1973, 5, 290—291.
 475. *Trafton L.* Neptune: Observations of the H₂ Quadrupole Lines in the (4—0) Band. *Proc. IAU Sympos. N 65*. Torun, Poland, Sept. 1973.
 476. *Trafton L.* Neptune's Internal Heat Source: An Explanation in Terms of the Dissipation of Triton's Orbit. *AAS Div. Planet. Sci. 5th Annual Meet.* Palo Alto, Apr. 1974.
 477. *Trafton L.* Titan: Unidentified Strong Absorptions in the Photometric Infrared. *Icarus*, 1974, 21, 175—187.
 478. *Trafton L. M., Münch G.* The Structure of the Atmospheres of the Major Planets. *J. Atmos. Sci.*, 1969, 26, 813—825.
 479. *Trafton L. M., Stone P. H.* Radiative-Dynamical Equilibrium States for Jupiter. *Astrophys. J.*, 1974, 188, 649—655.
 480. *Trafton L., Parkinson T., Macy W., Jr.* The Spatial Extent of Sodium Emission Around Io. *Astrophys. J.*, 1974, 190, L85—L89.
 481. *Traub W. A., Carleton N. P.* Observations of Spatial and Temporal Variations of the Jovian H₂ Quadrupole Lines. *AAS Div. Planet. Sci. 5th Annual Meet.* Palo Alto, Apr. 1974.
 482. *Truelsen J.* Collisional Focusing of Particles in Space Causing Jetstreams. In: *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 327—335.
 483. *Truelsen J.* Formation of Comets in Meteor Streams. In: *The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets*. G. A. Chebotarev, E. I. Kazimichak-Polonskaya and B. G. Marsden (Eds.). Dordrecht, Holland, Reidel, 1972.
 484. *Truelsen J.* Numerical Simulation of Jetstreams. II. The Two-Dimensional Case. *Astrophys. Space Sci.*, 1972, 18, 3—20.
 485. *Ulich B. L.* Absolute Brightness Temperature Measurements at 2.1 mm Wavelength. *Icarus*, 1974, 21, 254—261.
 486. *Ulich B. L., Conklin E. K.* Detection of Methyl Cyanide in Comet Kohoutek. *Nature*, 1974, 248, 124—122.
 487. *Van Allen J. A., Baker D. N., Randall B. A., Sentman D. D.* The Magnetosphere of Jupiter as Observed with Pioneer 10. Pt I. Instrument and Principal Findings. *J. Geophys. Res.*, 1974 (in press).
 488. *Van Allen J. A., Baker D. N., Randall B. A., Thomsen M. F., Sentman D. D., Flindt H. R.* Energetic Electrons in the Magnetosphere of Jupiter. *Science*, 1974, 183, 309—311.
 489. *Vesely C. D.* Summary on Orientations of Rotation Axes. In: *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971.
 490. *Veverka J.* Polarization Measurements of the Galilean Satellites of Jupiter. *Icarus*, 1971, 14, 355—359.
 491. *Veverka J.* Titan: Polarimetric Evidence for an Optically Thick Atmosphere. *Icarus*, 1973, 18, 657—660.
 492. *Veverka J., Noland M.* Asteroid Reflectivities from Polarization Curves: Calibration of the «Slope-Albedo» Relationship. *Icarus*, 1973, 19, 230—239.
 493. *Veverka J., Wasserman L., Sagan C.* On the Upper Atmosphere of Neptune. *Astrophys. J.*, 1974, 189, 569—575.
 494. *Vsekhsvyatskij S. K.* The Origin and Evolution of the Comets and Other Small Bodies in the Solar System. In: *The Motion. Evolution of Orbits and Origin of Comets*. G. A. Chebotarev, E. I. Kazimichak-Polonskaya, and B. G. Marsden (Eds.). Dordrecht, Holland, Reidel, 1972.
 495. *Walker M. F., Hardie R.* A Photometric Determination of the Rotational Period of Pluto. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1955, 67, 224—231.
 496. *Walker R. G.* Infrared Photometry of Stars and Planets, Ph. D. Thesis. Cambridge, Harvard Univ., 1966.
 497. *Wallace L., Caldwell J. J., Savage B. D.* Ultraviolet Photometry from the Orbiting Astronomical Observatory. III. Observations of Venus, Mars, Jupiter, and Saturn Longward of 2000 Å. *Astrophys. J.*, 1972, 172, 755—769.
 498. *Wallace L., Prather M., Belton J. S.* The Thermal Structure of the Atmosphere of Jupiter. *AAS Div. Planet. Sci. 5th Annual Meet.* Palo Alto, Apr. 1974.
 499. *Wallis M. K.* The Physics of Cometary Plasmas. *Planet. Space Sci.*, 1967, 15, 1407—1418.
 500. *Wamsteker W.* The Wavelength Dependence of the Albedos of Uranus and Neptune from 0.3 to 1.1 Micron. *Astrophys. J.*, 1973, 184, 1007—1016.
 501. *Warwick J. W.* The Position and Sign of Jupiter's Magnetic Moment. *Astrophys. J.*, 1963, 137, 1317—1318.
 502. *Warwick J. W.* Radio Emission from Jupiter. *Annual. Rev. Astron. and Astrophys.*, 1964, 2, 1—22.
 503. *Warwick J. W.* Radiophysics of Jupiter. *Space Sci. Rev.*, 1967, 6, 841—891.
 504. *Warwick J. W.* Particles and Fields Near Jupiter. *NASA Rept.*, 1970, N CR-1685.

505. Wasserman L., Veverka J. On the Reduction of Occultation Light Curves. *Icarus*, 1973, 20, 322—345.
506. Watson K., Murray B. C., Brown H. The Stability of Volatiles in the Solar System. *Icarus*, 1983, 1, 317—327.
507. Weidenschilling S. J., Lewis J. S. Atmospheric and Cloud Structures of the Jovian Planets. *Icarus*, 1973, 20, 465—476.
508. Westphal J. A. Observations of Jupiter's Cloud Structure Near 8.5 μ . In: Planetary Atmospheres. IAU Sympos. N 40. C. Sagan, T. C. Owen, and H. J. Smith (Eds.), 1971, p. 359—362.
509. Westphal J. A., Matthews K., Terrile R. J. Five Micron Pictures of Jupiter. *Astrophys. J.*, 1974, 188, L111—L112.
510. Wetherill G. W. Collisions in the Asteroid Belt. *J. Geophys. Res.*, 1967, 72, 2429—2444.
511. Wetherill G. W. Cometary Versus Astroidal Origin of Chondritic Meteorites. In: Physical Studies of Minor Planets. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 447—460.
512. Whipple F. L. On the Structure of the Cometary Nucleus. In: The Moon, Meteorites, and Comets, The Solar System, v. IV. B. M. Middlehurst and G. P. Kuiper (Eds.). Chicago, Univ. Chicago, 1963, p. 639—664.
513. Whipple F. L. The Origin of Comets. In: The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets. G. A. Chebotarev, E. I. Kazimirschak-Polonskaya and B. G. Marsden (Eds.). Dordrecht, Holland, Reidel, 1972.
514. Whitaker E., Greenberg R. Eccentricity and Inclination of Miranda's Orbit. *Commun. Lunar Planet. Lab.*, 1973, 10, 70—80.
515. Whiteoak J. B., Gardner F. F., Morris D. Jovian Linear Polarization at 6 cm Wavelength. *Astrophys. Letters*, 1969, 3, 81—84.
516. Wildey R. L. Hot Shadows of Jupiter. *Science*, 1965, 147, 1035—1036.
517. Wildey R. L., Murray B. C., Westphal J. A. Thermal Infrared Emission of the Jovian Disk. *J. Geophys. Res.*, 1965, 70, 3711—3719.
518. Wilkins G. A., Sinclair A. T. The Dynamics of the Planets and Their Satellites. *Proc. Roy. Soc. London A*, 1974, 336, 85—104.
519. Williams J. G. Proper Elements, Families, and Belt Boundaries. In: Physical Studies of Minor Planets. T. Gehrels (Ed.). Washington, NASA, 1971, p. 177—181.
520. Williams J. G. Meteorites from the Asteroid Belt? *EOS*, 1973, 54, 233.
521. Williams J. G., Benson G. S. Resonances in the Neptune-Pluto System. *Astron. J.*, 1971, 76, 167—177.
522. Witkowski J. M. On the Origin of Comets. *Solar System Res.*, 1971, 5, 66—71.
523. Witkowski J. M. On the Problem of the Origin of Comets. In: The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets. G. A. Chebotarev, E. I. Kazimirschak-Polonskaya, and B. G. Marsden (Eds.). Dordrecht, Holland, Reidel, 1972, p. 419—425.
524. Woeller F., Ponnampuruma C. Organic Synthesis in a Simulated Jovian Atmosphere. *Icarus*, 1969, 10, 386—392.
525. Wrixon G. T., Welch W. J. The Millimeter Wave Spectrum of Saturn. *Icarus*, 1970, 13, 163—172.
526. Wrixon G. T., Welch W. J., Thornton D. D. The Spectrum of Jupiter at Millimeter Wavelengths. *Astrophys. J.*, 1971, 169, 171—183.
527. Wurm K. The Substructure in the Heads of Comets with Type I and Type II Tails. *Astrophys. Space Sci.*, 1974, 27, 211—216.
528. Yabushita S. Stability Analysis of Saturn's Rings with Differential Rotation. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1966, 133, 247—263.
529. Yerbury M. J., Condon J. J., Jauncey D. L. Observations of Saturn at a Wavelength of 49.5 cm. *Icarus*, 1971, 15, 459—465.
530. Young A. T., Irvine W. M. Multicolor Photoelectric Photometry of the Brighter Planets. I. Program and Procedure. *Astron. J.*, 1967, 72, 945—950.
531. Younkin R. L. Spectrophotometry of the Moon, Mars, and Uranus. Ph. D. Thesis. Los Angeles, Univ. Cal., 1970.
532. Younkin R. L. The Albedo of Titan. *Icarus*, 1974, 21, 219—229.
533. Younkin R. L., Münch G. Spectrophotometry of Uranus from 3300 to 11000 Å. *Astron. J.*, 1967, 72, 328—329.
534. Zabriskie F. R., Solomon W. A., Hagan J. P. Low-Frequency Observations of Jupiter. *Astron. J.*, 1965, 70, 151.
535. Zapolsky H. S., Salpeter E. E. The Mass-Radius Relation for Cold Spheres of Low Mass. *Astrophys. J.*, 1969, 158, 809—813.
536. Zellner B. On the Nature of Iapetus. *Astrophys. J.*, 1972, 174, L107—L109.
537. Zellner B. The Polarization of Titan. *Icarus*, 1973, 18, 661—664.
538. Zimmerman P. D., Wetherill G. W. Asteroidal Source of Meteorites. *Science*, 1973, 182, 51—53.

Часть III
ПРОБЛЕМЫ
ЭКЗОБИОЛОГИИ



Юпитер

Видны большое Красное пятно, тень спутника Ио и облачная структура Юпитера. Фотография получена в 07.02 мирового времени с борта «Пионера-10» на расстоянии около 2 500 000 км от планеты (фото 73-H-1164, НАСА США)

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А. А. ИМШЕНЕЦКИЙ

Институт микробиологии АН СССР,
Москва, СССР

Обособление новых научных дисциплин начинается с возникновения новых направлений в экспериментальных исследованиях. Так произошло и с космической биологией, в задачу которой входит изучение действия экстремальных факторов на живые существа, оценка различных методов обнаружения внеземной жизни и выяснение наиболее результативных методов стерилизации космических объектов. Естественно, что возникновение новой научной дисциплины невозможно без предварительного обобщения всех ранее полученных данных, имеющих прямое отношение к этой дисциплине. Что касается действия большинства экстремальных факторов, имеющих в свободном космосе и на планетах, то в распоряжении исследователей было большое научное наследство, которое предоставили им экология, биофизика, биохимия и микробиология.

После систематизации этих данных стало очевидным, что по ряду физических факторов, имеющих в космосе, существует обширная литература. Это касается действия низких и высоких температур, ионизирующей и ультрафиолетовой радиации, действия различных газов, вибрации, высушивания, ускорений и т. д. В то же время космическая биология должна была начать исследование физических факторов космического полета и пространства, не изученных ранее.

При этом следует учитывать, что некоторые экстремальные факторы не могут быть полностью воспроизведены в лабораторных условиях, например невесомость и вакуум, достигающий в космосе 10^{-16} мм рт. ст.; однако это не помешало получению интересных результатов при их изучении.

Изучение ультразвука, действия различных химических, в том числе поверхностно-активных, веществ, концентрации водородных ионов не представляет специального интереса для космической биологии.

Основными объектами исследования стали микроорганизмы, что объясняется несколькими причинами. Повсеместное распространение микроорганизмов говорит об их исключительной приспособляемости к самым различным экологическим нишам. Другая причина заключается в необычайно высокой устойчивости микроорганизмов к действию экстремальных факторов. И, наконец, подавляющее большинство методов обнаружения внеземной жизни основано на поисках микроорганизмов в грунте планет, для размножения которых на планету вместе с биологической станцией должна быть доставлена питательная среда. Поэтому при изучении действия экстремальных факторов излюбленным объектом стали микроорганизмы. Это, однако, не означает, что не проводятся исследования различных других объектов, в том числе высших растений и низших животных.

Для изучения действия экстремальных факторов существует несколько возможностей: исследования в лаборатории, в открытом космосе, на поверхности планет или их спутников и, наконец, внутри летящего космического аппарата. В последнем случае стенки летящего космического объекта защищают изучаемые живые существа от действия некоторых экстремальных факторов открытого космического пространства. В то же время в этих условиях может быть изучено влияние невесомости и вибрации.

Несмотря на обширную литературу, посвященную действию экстремальных факторов на живые существа, обобщение этих данных сопряжено с большими трудностями, что связано со значительным расхождением результатов, полученных при описании устойчивости живых объектов к определенному внешнему фактору. Приемлемыми могут считаться лишь данные, установленные неоднократно несколькими исследователями. Результаты, отличающиеся от последних, могут быть упо-

мянуты, но как не получившие пока подтверждения.

В этом обзоре после рассмотрения границ биосферы и характеристики экстремальных факторов будет последовательно рассмотрено действие отдельных физических и химических факторов на живые организмы.

Автор считает своим долгом отметить большой вклад Л. К. Лозина-Лозинского, Э. И. Заара (СССР) и Д. У. Дженкинса, С. М. Зигеля и К. Е. Зобея (США), подготовивших обзоры по национальным материалам для настоящей главы, и выразить благодарность всем коллегам, в тесном сотрудничестве с которыми он проводил свою работу.

ГРАНИЦЫ БИОСФЕРЫ

Понятие о биосфере было бы неполным, если бы в характеристику биосферы не входило определение ее границ. Последние определяются способностью живых существ переносить сильное воздействие различных физических и химических факторов. Некоторые из этих факторов не представляют интереса для космической биологии, другие имеют непосредственное отношение.

Многие экстремальные факторы действуют на Земле на различные живые существа. Поэтому экология микроорганизмов, растений и животных дает ценные сведения для космической биологии. Учение о биосфере, созданное В. И. Вернадским, относит к биосфере Земли совокупность всех организмов плюс абиотическую среду их существования [4].

Это неразрывное, но полное противоречий единство, в котором изменяются как сами организмы, так и внешние условия их существования. Экология давно пришла к выводу, что наиболее устойчивыми к экстремальным воздействиям являются низшие формы жизни: бактерии, актиномицеты, микроскопические грибы, некоторые водоросли и простейшие.

Перейдем к рассмотрению границ биосферы. Распределение жизни по вертикали изучено мало. Верхняя граница биосферы не установлена, так как взятие проб в стратосфере с помощью стратостатов было произведено без соблюдения необходимых технических предосторожностей и при взятии пробы на большой высоте в нее попадали почвенные микроорганизмы с поверхности стратостата, оболочка которого лежала на земле при наполнении его газом. Исключения составляют

исследования, проведенные уже давно с помощью стратостата «Эксплорер-II». В этом случае взятие проб было осуществлено в стерильных условиях. На высоте 20 км были обнаружены споросные бактерии и микроскопические грибы, но в небольшом количестве.

Эти опыты свидетельствуют о том, что в условиях стратосферы микроорганизмы могут сохранять жизнеспособность, несмотря на низкую температуру, действие ультрафиолетовых лучей и ионизирующей радиации. Никаких данных о возможности микроорганизмов подниматься на большую высоту пока нет.

В связи с обнаружением микроорганизмов на больших высотах, необходимо указать на некоторые изменения во взглядах относительно возможности транспортировки микроорганизмов в космосе [56]. Хорошо известные формы микроорганизмов обладают слишком большим весом, чтобы передвигаться в условиях стратосферы или в свободном космосе под влиянием давления света.

В связи с этим внимание биологов привлекло открытие микроорганизмов, в жизненном цикле которых имелись формы, невидимые в оптический микроскоп. Это, в частности, касается микоплазм и вирусов. Возможность переноса столь легких частиц в космосе может по-видимому иметь место. Однако очень длительное действие экстремальных факторов в космосе делает выживаемость при таком перемещении мелких микроорганизмов маловероятной. На современном этапе развития науки вновь стала обсуждаться теория панспермии, которая, однако, полностью не объясняет происхождение жизни. В связи с достижениями в исследованиях по химической эволюции в космосе и успехами в области химического синтеза происхождение жизни перестало быть только философской проблемой, а приобрело характер стройной теории.

Что касается нижней границы биосферы, то она тоже определена недостаточно точно. Живые микроорганизмы неоднократно обнаруживались в грунте океанов, образцы которого были взяты на глубине 11 км, где давление составляет 1100 кг/см². Пурпурные серобактерии были найдены в нефтяных водах, вытекающих с большой глубины [26, 36].

Другие виды обнаружены в кернах, полученных с глубины 4 км. Данные о наличии живых микроорганизмов в зонах вечной мерзлоты или каменной соли пока не подтвердились.

С наибольшей полнотой изучена жизнь, протекающая при высоких и низких температурах. Можно считать твердо установленным, что в гейзерах и горячих источниках существуют живые микроорганизмы, размножающиеся при температуре 75—90° С. Действие низких и высоких температур на живые существа более подробно рассмотрено ниже.

В морской биологии впервые было установлено, что некоторые бактерии, обитающие в морях, могут прекрасно размножаться при давлении 400 атм. Такие баротолерантные микроорганизмы были подвергнуты специальному изучению. Несколько парадоксальным следует считать тот факт, что баротолерантные бактерии были обнаружены также в почве, находящейся в цветочных горшках и оранжереях.

Современная экология микроорганизмов располагает обширными сведениями о жизни микробов при очень низком и очень высоком значении pH. Бактерии и грибы, образующие различные органические кислоты, естественно, довольно устойчивы к ним. Здесь мы наблюдаем одновременно устойчивость как к специфическому действию кислот, так и к низкому pH. Однако низкие pH, образованные легко диссоциирующими минеральными кислотами, гораздо лучше переносятся микроорганизмами. Так, *Thiobacillus thioarans* и другие виды *Thiobacillus*, окисляя различные восстановленные соединения серы с образованием серной кислоты, размножаются при pH 1,0, а некоторые из них — при pH 0,5. Эти микроорганизмы обнаруживаются в отвалах руд, содержащих сульфиды, а также в кучах добытой серы. С другой стороны, существуют содовые озера, в которых обитают различные прокариоты и эукариоты. Такие озера существуют в Азии, Африке, и pH воды достигает в них 8,0—9,0. В промышленных условиях создаются еще более щелочные реакции, в частности в кожевенной промышленности в жидкости, находящейся в зольниках и имеющей pH 11,0, размножается устойчивая к этой реакции форма *Bacillus mesentericus*.

Газовый состав на Земле варьирует в довольно широких пределах. На дне морей и океанов свободного кислорода немного, и, несмотря на это, там наблюдается активная жизнь. Так, на дне океана на глубине 10 000 м помимо микроорганизмов были обнаружены: *Polychaeta*, *Isopoda*, *Bivalvia*, *Holothurioidea* и др.

Это следует иметь в виду, когда рассматривают вопрос о существовании жизни на

планетах, почти не содержащих кислорода. С меньшей уверенностью можно говорить о наличии анаэробных бактерий в различных слоях почвы. В этом случае возможно потребление кислорода аэробными почвенными микроорганизмами, что приводит к созданию анаэробных условий. Содержание различных газов в атмосфере или в воде водоемов сопровождается размножением представителей специальных физиологических групп микроорганизмов, потребляющих эти газы. Это относится к бактериям, окисляющим водород, метан, сероводород, окись углерода, к бактериям, потребляющим угольную кислоту, азот и т. д.

Таким образом, состав атмосферы или характер газов, растворенных в воде, только в исключительных случаях приводит к полному отсутствию жизни, например в мертвой сероводородной зоне в Черном море.

Ионизирующая радиация в природных условиях не оказывает губительного действия на микроорганизмы, так как имеющиеся дозы недостаточно высоки. В противоположность этому стерилизующее действие ультрафиолетовых лучей резко выражено. Действие различных видов радиации на живые организмы описано в главе «Ионизирующие излучения» (т. II, книга вторая).

Выше уже говорилось о том, что самые различные биологические ниши населены микроорганизмами и что крайние границы биосферы заняты ими. Однако в понятие о биосфере входит активное взаимодействие между организмами и условиями их существования. Низшие и высшие растения играют исключительную роль в круговороте химических элементов на Земле. Участие растительных организмов в разрушении горных пород, в почвообразовательных процессах уже давно привлекало внимание натуралистов. Меньше интереса было проявлено ими к изменению экологических условий, возникших в результате жизнедеятельности живых существ, в частности микроорганизмов. Так образование микроорганизмами сероводородных зон в морях в результате восстановления сульфатов делает эти зоны совершенно лишенными жизни; значительное выделение водорода и метана из грунта пресных водоемов определяет характер микробиоценоза, обитающего в этих местах. Некоторые продукты жизнедеятельности играют роль «средств защиты»; в частности, это относится к молочной кислоте, некоторым выделяемым в окружающую среду пигментам, антибиотикам и токсинам. Эти вещества, угнетая другие виды, способствуют

росту и развитию микроорганизмов, образующих их.

Таким образом, адаптация живых существ к различным условиям жизни и активное изменение этих условий — основной принцип формирования биосферы.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ

В задачу космической биологии входит изучение экстремальных факторов, которые действуют на планетах, в свободном космосе или в летающих космических объектах. Некоторые из этих факторов уже давно изучались биофизикой или экологией. Это относится к действию высоких и низких температур, ионизирующей и ультрафиолетовой радиации, к магнитному полю, давлению, реакции среды, а также к действию различных химических веществ. Некоторые факторы начали изучаться недавно, только после обособления космической биологии как науки. К ним принадлежат, например, невесомость и некоторые другие.

Подавляющее большинство экстремальных факторов может быть воспроизведено в лабораторных условиях с помощью соответствующей аппаратуры, которая бывает настолько совершенной, что исследователь способен, например, подвергнуть изучаемые объекты действию ультрафиолетовых лучей в дозе, получаемой клеткой в открытом космосе. Так обстоит со многими другими экстремальными воздействиями. В то же время следует отметить, что некоторые факторы не могут быть воспроизведены в лабораторных условиях.

Следует признать, что любой физический или химический фактор может стать экстремальным. Все зависит от его энергии, дозы, продолжительности действия и способа применения. Достаточно указать, что высокое давление, созданное такими инертными газами, как аргон или азот, приводит к гибели бактерий, находящихся в жидкости. Экспериментатор может изучать не только действие каждого из факторов в отдельности, но и их комбинацию. Это очень важно потому, что один фактор может влиять на чувствительность к другому фактору. Так, повышение давления снижает чувствительность к высокой температуре. Предварительная потеря влаги делает клетку устойчивой к ряду внешних воздействий. При изучении взаимодействия различных факторов выясняется, что одни из них приводят к синергизму, другие обладают антагонистическим или защитным

действием и, наконец, возможны случаи, когда один фактор не влияет на активность другого.

Комплексное действие нескольких факторов может быть воспроизведено в специальных климатологических станциях, в которых имитируются условия определенной планеты или открытого космоса. Наиболее часто живые объекты исследовались с помощью прибора «Искусственный Марс», условия жизни в котором соответствуют марсианским. Существуют также установки, воспроизводящие физические условия космического пространства и Луны.

Число экстремальных факторов, представляющих интерес для космической биологии, значительно меньше, чем количество факторов, изучаемых экологией и биофизикой. Так, для космической биологии представляет интерес действие вакуума, низкой температуры, перепадов температур, невесомости, вибраций, ускорений, действия больших доз ионизирующей и ультрафиолетовой радиации, низкое содержание влаги в субстрате, действие газов. В то же время влияние токсических веществ, различных солей, высокого осмотического давления и некоторых других факторов для космической биологии, как правило, не представляет большого интереса. Не исключена, конечно, возможность, что это зависит от неполноты наших знаний о характере грунта и атмосферы планет. Вполне вероятно, что первые более или менее детальные химические анализы грунта и атмосферы планет приведут к необходимости изучать физиологическое действие различных химических соединений и новых факторов.

При биологических исследованиях, проводимых с помощью спутников или космических кораблей, биологические объекты подвергаются действию комплекса факторов, в который входят невесомость, ускорение, вибрация и ионизирующая радиация. Исследователь сталкивается с совместным действием ряда факторов, и все попытки расчленить этот комплекс на отдельные элементы пока не увенчались успехом. Одна из главных причин заключается в том, что в условиях эксперимента на Земле нельзя воспроизвести невесомость и изучить ее взаимодействие с другими факторами полета. Было бы неправильным считать, что в этом направлении не проводится интересных исследований, выясняющих физиологический эффект вибрации, влияние невесомости на результаты действия ионизирующей радиации и т. д. Однако все эти исследования не позволяют осуществить

необходимый классический анализ каждого из действующих в полете факторов и воссоздать необходимый синтез, заключающийся в объединении всех существующих факторов полета, действующих на биологические объекты.

При определении действия фактора устанавливают три физиологические точки: минимум, оптимум и максимум. Обычно при этом недооценивается тот факт, что во время действия фактора определенной интенсивности изучаемый объект способен размножаться, но при повторных воздействиях этого же фактора в той же дозе биологический объект постепенно погибает. В качестве примера можно привести отношение культур микроорганизмов к повышенной температуре. Они могут вырасти однократно при относительно высокой температуре, но после пересевов при этой температуре погибают. Таким образом, при определении максимальной и минимальной физиологической точки необходимо многократное воздействие для того, чтобы установить, что организм действительно может существовать в данных условиях. Изучая экстремальные факторы, устанавливают их действие на жизнеспособность (выживаемость), на рост и размножение, а также на изменчивость, т. е. на частоту образования мутаций.

Определение влияния любого экстремального фактора на рост, развитие, размножение и т. п. не представляет трудности. Гораздо сложнее установить дозу фактора, вызывающего гибель клетки. Последняя может быть инактивирована и не дать роста в обычно применяемых условиях, но, изменяя условия, можно добиться реактивации и размножения клетки. Споры, подвергавшиеся действию высокой температуры, на одних питательных средах совершенно не прорастут, а на других часть спор будет прорастать. Сказанное полностью относится к фотореактивации, возможной после действия ультрафиолетовых лучей, и к другим факторам.

Накоплен большой экспериментальный материал, говорящий о том, что различные экстремальные факторы по-разному действуют на перечисленные выше функции живого организма. Так, очень низкие температуры исключают размножение микроорганизмов, но в сочетании с дополнительным обезвоживанием клеток удлиняют срок их существования. Действие любого фактора зависит от его специфичности, дозы (количества энергии) и продолжительности действия. Как правило, быстрые смены условий существования губитель-

но действуют на живые организмы. При медленном понижении температуры некоторые виды бактерий растут при -5° , в то же время быстрое понижение температуры с $+30^{\circ}$ до 0° может быть губительным для отдельных видов бактерий. В одинаковой мере это относится к быстрому повышению давления, чередующемуся с условиями, соответствующими атмосферному давлению. Однако у большинства микроорганизмов высушивание клеток при низкой температуре не приводит к гибели всей популяции, и на этом основана лиофилизация культур, применяемая для их хранения. Количество клеток, гибнущих при лиофилизации, сильно варьирует у различных видов микроорганизмов: у *Staphylococcus aureus* — 11,9%, у *Pseudomonas fluorescens* — 41,0%, а у *Saccharomyces carlsbergensis* — 92,0%.

В подавляющем большинстве случаев изучаемые биологические объекты подвергаются действию комплекса факторов. Это касается всех экспериментов, проведенных с космическими кораблями или спутниками. Именно поэтому так необходимы лабораторные исследования, в которых изучается действие одного какого-либо фактора. Однако эти исследования не всегда могут разрешить вопроса о взаимодействии различных факторов, одновременно влияющих на живой объект. Здесь могут быть нейтрализация одного фактора другим, усиление действия, изменение механизма его действия и т. д.

В задачу космической биологии входит сравнительное изучение действия одного и того же фактора как на менее, так и на более сложно организованные живые существа. Этот эволюционный подход позволяет не только констатировать различную чувствительность разных объектов, но открывает возможность сравнительного изучения механизма действия экстремальных факторов. Так, анаэробные организмы не реагируют на действие ингибиторов окислительного фосфорилирования. Яды, действующие на нервную систему или кроветворные органы животных, часто не оказывают угнетающего действия на микроорганизмы.

Изучение действия экстремальных факторов дает результаты, ценные во многих отношениях.

Во-первых, эти данные оказываются полезными для космической медицины, основная задача которой сводится к созданию условий, обеспечивающих безопасность как полета, так и пребывания космонавтов на планетах и на спутниках.

Во-вторых, эти исследования позволяют изучить действие на земные существа тех экстремальных факторов и их комбинаций, которые имеются на других планетах, а этим облегчаются поиски внеземной жизни.

В-третьих, интенсивность действия экстремальных факторов, наблюдаемая в космосе и на планетах, определяет их способность стерилизовать космические объекты и отвечает на вопрос о том, смогут ли земные организмы, занесенные на планету, размножиться на ней.

В-четвертых, исследования в этом направлении обогащают науку новыми данными о действии факторов, которые раньше вообще не изучались. Это касается глубокого вакуума, невесомости, сверхвысоких доз ультрафиолетовых лучей и др.

Изучение действия экстремальных факторов имеет непосредственное отношение к общепрокладической проблеме адаптации живых существ к различным условиям жизни. В большинстве случаев наблюдается возникновение различных биологических рас, различающихся по одному какому-нибудь признаку. В качестве примера можно привести морские и пресноводные формы десульфуризирующих бактерий, относящиеся к одному и тому же виду, или существование мезофильной и термофильной рас *Bac. thuyoides*. Несомненно, что экотип может быть зарождающимся новым видом, так как в дальнейшем он становится резко отличным от исходной формы по ряду других признаков. Что касается механизма адаптации, то у нас нет пока никаких оснований предполагать, что такое приспособление возникает на других планетах иным путем, чем на Земле.

Другая, не менее важная в биологическом отношении проблема связана с временным полным или почти полным прекращением обмена веществ у живых существ, приводящим к состоянию анабиоза. Для космической биологии исключительное значение имеет тот факт, что периодически возникающее состояние анабиоза не сказывается на последующем переходе к активной жизни. Так, колебания от $+20^{\circ}$ до -90°C в течение марсианских суток приводят к кратковременному анабиотическому состоянию, наступающему при пониженной температуре. Однако если судить по опытам с земными организмами, это не отражается на способности живых организмов осуществлять обмен, расти и размножаться при последующем повышении температуры. Очевидно, что кратковременное замирание жизни может быть распространенным явлением. Существует мнение, что семена неко-

торых растений, обладающие плотной герметической оболочкой, могут сохранять жизнеспособность очень длительное время. Однако все попытки обнаружить жизнедеятельность клеток водорослей, находящихся в течение 250 млн. лет в каменной соли, были безуспешными. Также безрезультатными были поиски живых существ в метеоритах. По-видимому, сохранение нормальной структуры белка на протяжении миллионов лет невозможно и этим объясняется отсутствие данных о длительном анабиозе.

Температура

Низкая температура

Для космической биологии действие низких температур представляет особый интерес, так как в свободном космосе и на планетах температура может быть очень низкой (гл. 2—5 наст. тома). Уже давно было экспериментально доказано, что микроорганизмы и семена высших растений сохраняют жизнеспособность при очень низких температурах, существует специальная наука — криобиология, изучающая отношение различных живых существ к низким температурам, механизм их действия и влияние на рост и размножение [35, 57, 58]. Что касается высших растений и животных, обитающих на Земле, то многие из них живут при температурах от -10° до -20° , некоторые виды сохраняют жизнеспособность при более низкой температуре (от -20° до -50°) и сравнительно мало живых существ обитает при температурах ниже -50° . При испытании устойчивости различных организмов обычно пользуются жидкими газами: жидким воздухом, температура которого равна -195° , водородом -250° , гелием от -269° до -271° . Результаты испытания устойчивости разных живых существ приведены в табл. 1.

Эти данные позволяют сделать следующие выводы.

1. Температуры ниже -190° переносят многие бактерии, дрожжи, микроскопические грибы, водоросли, простейшие, черви, насекомые, сперматозоиды человека, высшие растения и др.

2. Особенно устойчивыми оказались различные виды бактерий, так как при абсолютном нуле (-273°) они сохраняли жизнеспособность.

3. Земные микроорганизмы, находящиеся в космосе или на планетах, имеющих очень низкую температуру, не погибали. Следова-

Таблица 1. Сверхнизкие температуры, переносимые различными организмами

Температура, °C	Объект	Автор
—252	Микроскопические грибы, дрожжи, бактерии	MacFadyen, Rowland [123]
—273	Многие виды бактерий	Bélerádek [60]
От —269 до —271	Спores бактерий и грибов — семена вышних растений	Becquerell [57, 58]
—190	<i>Staphylococcus albus</i> , <i>Salmonella typhosa</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Winchester, Murray [160]
—269	Сперматозоиды человека	Jahnel [108]
—269,5	Спирохеты и трипаномы	Jahnel [108]
—197	<i>Treboxia erici</i> (из лишайника)	Misch [125]
—197	Protozoa, <i>Anguillula</i> (угрица)	Hebb [96]
—253	Черная смородина, береза	Туманов и др. [48]
—75	<i>Aerobacter aerogenes</i>	Joung a. oth. [112]
—272	Высушенные коловратки	James [109]
От —195 до —209	<i>Morus lambucis</i> (шелкопряд)	Sakai [140]
—195	<i>Porphyr a yezoensis</i>	Teremoto [155]
—195	<i>Trichinocamus populi</i>	Tanno [153]
—150	<i>Escherichia coli</i>	Nei a. oth. [127]

тельно, в космосе низкая температура не обладает бактерицидным действием и микрофлора, находящаяся на поверхности спутников и космических кораблей, остается жизнеспособной.

Изучение Луны подтвердило последний вывод, так как на Луне были найдены живые земные бактерии, занесенные космическим объектом. Исключительная устойчивость микроорганизмов к сверхнизким температурам общепризнана.

Значительный интерес представляет способность вышних растений переносить такие условия [29]. На рис. 1 изображены кусты черной смородины, выросшие из черенков, которые закачивались при —253° или —195°. Исключительно устойчивыми оказались также культуры клеток злокачественных опухолей. Консервирующая способность низких температур нашла свое отражение в широко распространенном хранении коллекционных культур в жидком азоте, в герметически закрываемых рефрижераторах. Сочетание очень низкой температуры (жидкий гелий) с вакуумом в 10⁻⁷ мм рт. ст. в пробирке, содержащей микроорганизмы, дает особенно благоприятный эффект.

Способность микроорганизмов переносить температуру —273° может считаться доказанной. Однако у нас нет данных, в течение какого срока такая температура может быть переносима живыми объектами. Можно прибегнуть к экстраполяции, исходя из следующих наблюдений. При быстром заморажива-

нии бактерий в снятом молоке и последующем его высушивании при 77—100 мм рт. ст. бактерии спустя 10 лет сохраняли свою жизнеспособность.

Большое влияние на сохранение жизнеспособности оказывает способ замораживания. Однако здесь нет закономерностей, общих для всех биологических объектов. В одних случаях при очень быстром замораживании до очень низких температур сохраняется много жизнеспособных клеток, в других лучшие результаты дает постепенное охлаждение. Некоторые объекты требуют вначале постепенного охлаждения до не очень низких температур, а потом быстрого охлаждения до сверхнизких температур. Что касается быстрого оттаивания, то при нем сохраняется больше живых клеток, чем при медленном. В зависимости от способов замораживания и характера биологического объекта после действия сверхнизких температур сохраняется от 10 до 70% живых клеток. В отличие от однократного замораживания при сверхнизких температурах чередующееся многократное замораживание и оттаивание приводит к гибели большого числа изучаемых объектов. По этой причине был предложен метод стерилизации почвы, имеющий то преимущество, что физико-химические свойства почвы при этом методе меньше изменялись, чем при автоклавировании.

При действии сверхнизких температур происходит дегидратация клеток [35]. Если вода замерзает, образуя кристаллы вне клетки, это создает благоприятные условия для живых



Рис. 1. Кусты черной смородины (*Ribes nigrum* L.), выросшие из черенков, охлаждаемых до -195° или -253° [48]

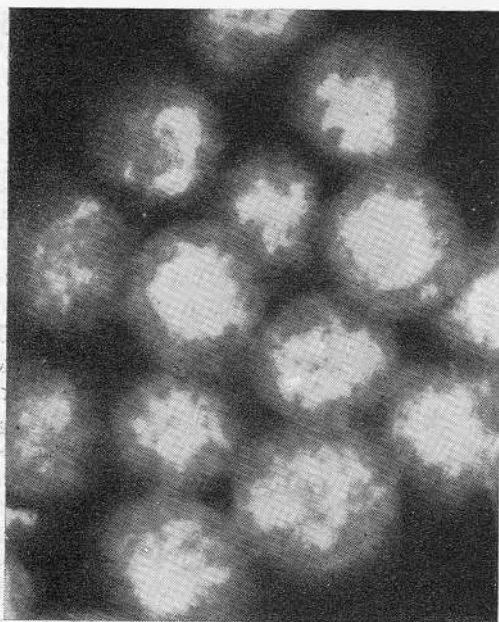


Рис. 2. Рекристаллизация воды в цистах покоя при быстром их охлаждении [35]

организмов, но при замораживании биологических объектов кристаллы могут возникнуть внутри клетки и это приведет к ее гибели. При начале оттаивания или окончании охлаждения живого организма может наблюдаться рекристаллизация, при которой возникает много крупных кристаллов воды внутри клеток (рис. 2). При электронномикроско-

пическом изучении объектов обнаруживаются полости или пустоты, в которых находились кристаллы льда.

Наименьший вред наблюдается при витрификации. В этом случае отдельные кристаллы льда не обнаруживаются, а вся вода застывает, сохраняя аморфное состояние. При очень небольшой относительной поверхности клеток, например у бактерий, обычно наблюдается витрификация, и кристаллы внутри клеток не возникают. Интересен более тонкий механизм действия замораживания. Денатурация протоплазмы приводит к более высокому содержанию солей в клетке, оказывает влияние на пространственное расположение молекул, а также на разрыв водородных мостиков и образование SH или SS-связей. В конечном итоге у белковых комплексов могут возникнуть денатурационные и конформационные изменения.

Внезапное действие низких температур может быть причиной мутационной изменчивости. Такие температурные шоки вызывают, в частности, хорошо изученные мутации у дрожифилы и микроорганизмов.

Жизнь при низких температурах

Способность образовывать большое количество тепла объясняет, почему некоторые гомойотропные животные могут добывать пищу и размножаться при низких температурах, от -20° до -50° . Это относится к пингвинам, белым медведям и др. Высшие же растения и пойкилотермные животные, как правило, не могут жить при очень низких температурах. Способностью же жить и размножаться при температурах от $+5^{\circ}$ до -2° обладают многие морские растительные и животные организмы. Их количество огромно, если мы учтем, что 90% воды Мирового океана имеет эту температуру. Именно из воды Северного Ледовитого океана и вод Антарктики были выделены психрофильные микроорганизмы, растущие при температурах от -6° до -9° . Нивальная (снежная) флора и фауна, обитающая в Гималаях на высоте 6000 м, также способна существовать, не впадая в анабиотическое состояние, при -5° и даже при -17° . Это относится к жуку *Astgobius angustratus*, снежной мухе (*Chiona*), некоторым видам ногохвостки и наукам (*Nypogastra*, *Poistoma*). Красные или оранжевые налеты, покрывающие снег или ледники, образованы скоплениями водоросли *Chlamydomonas nivalis*, красными дрожжами (*Rhodotorula*) и микроскопическими грибами [3, 6]. Эти мик-

роорганизмы также способны размножаться при температурах ниже -5° . Определить способность жить и расти при низких температурах значительно труднее, чем установить устойчивость организма к однократному действию очень низких температур, т. к. любая жидкая или плотная питательная среда при понижении температуры замерзает. Температуру замерзания питательной среды можно понизить, резко повысив в среде содержание солей или сахаров, что может быть использовано при изучении роста галофильных или осмофильных микроорганизмов. Необходимо добавлять, что с понижением температуры значительно падает скорость размножения клеток. О физиологической активности можно также судить по способности клеток перемещаться в жидкой среде. Очень убедительным доказательством может быть также изучение фотосинтеза при низких температурах.

В табл. 2 представлены данные о физиологических процессах, протекающих при низ-

ких температурах. Эти данные позволяют прийти к следующим выводам.

1. Как у хвойных древесных пород, так и у лишайников фотосинтез бесспорно возможен при -20° , а вероятно, и при более низких температурах.

2. Минимальная температура, при которой возможен рост микроорганизмов, достигает -12° . Сообщения в научной литературе о росте при более низких температурах правильнее считать недоказательными. Исключение составляет *Dunaliella salina*, которая как галофильная форма могла находиться в растворе хлористого натрия, охлажденного до -15° .

В литературе имеются также сообщения о том, что красные дрожжи и микроскопические грибы росли, а последние образовывали споры при температуре от -34° до -44° . Эти данные в таблицу не были включены.

Выше описывалась способность высокогорной фауны и флоры быть жизнедеятельной при минусовых температурах. Естественно, что одновременно произошло приспособление к другим экологическим условиям. Эти организмы более устойчивы к действию ультрафиолетовых лучей, низкому атмосферному давлению и к периодической смене температур, наблюдаемой ночью и днем, а также к малой влажности воздуха. В почвах Антарктики также наблюдается низкая влажность, иногда не превышающая 10%. Все перечисленные условия имеют некоторое сходство с условиями, имеющимися на Марсе. Хотя надо признать, что любые условия жизни на Земле менее суровы, чем на Марсе.

Высокая температура

Нет ни одного экологического фактора, к которому бы так исключительно адаптировались живые организмы, как низкие и высокие температуры. Следует, по-видимому, считать доказанным, что жизнь возможна в пределах от -12 до $+80^{\circ}$. Соответственно с этим и летальные высокие температуры сильно варьируют. Рыбы, обитающие в Антарктике, в воде, имеющей температуру $+2^{\circ}$, гибнут в воде при $+6^{\circ}$. Подавляющее большинство неспороносных бактерий теряет жизнеспособность при $+60^{\circ}$ в течение 10 мин. Очень устойчивы к сухой и влажной стерилизации бактерии, образующие споры. Обычно они выдерживают 30 мин. $150-160^{\circ}$ при сухой стерилизации и погибают при 120° после часового автоклавирования. Однако сухой жар при 180° убивает все спороносные бак-

Таблица 2. Физиологические процессы, протекающие при низких температурах у различных организмов

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Организм	Проявление жизнедеятельности	Автор
От -20 до -40	Лишайники, хвойные	Фотосинтез	Jumelle [114]
-24	<i>Oospora lactis</i>	Рост	Berry [61]
$-7,5$	Бактерии на поверхности рыбы	То же	Bedford [59]
$-12,2$	Микроскопические грибы на замороженной малине	»	Beckwith [55]
-12	Бактерии и микроскопические грибы	»	Jensen [111]
$-17,8$	Микроскопические грибы, дрожжи	»	Jensen [111]
-15	<i>Pyramidomas</i> <i>Dunaliella salina</i>	Движение в жидкости	Зернов и др. [15]
-20	Бактерии	Рост и свечение	Record, Taylor [137]
-30	Водоросли	Фотосинтез	James [109]
От -20 до -24	Яйца насекомых	Развитие	Way [159]
От -18 до -20	Микроскопические грибы, <i>Pseudomonas</i> (в фруктовом соке)	Рост	Borgstrom [63]
-18	<i>Aspergillus glaucus</i> «Красные дрожжи»	Рост в глицерине	Borgstrom [63]
-30	Лишайники	Фотосинтез	Siegel [145]

терий. Чем выше температура, тем скорее происходит отмирание всех клеток. Так, споры термофильной *Bac. stearothermophilus* погибают при 120° за 100 мин., а при 188° за одну минуту. Чем выносливее клетки к высушиванию или чем меньше они содержат воды, тем они более термоустойчивы. Может быть именно этим объясняется тот факт, что высушенные коловратки отмирают только при действии 170—200° в течение 5 мин.

Доказать, что все споры бактерий погибли при стерилизации, не так просто. Во-первых, известны случаи, когда после нагревания споры прорастали через 10—15 дней после посева. Во-вторых, в одних средах нагревавшиеся споры прорастают лучше, в других хуже. Большое влияние на количество прорастающих спор оказывает химический состав питательных сред, в особенности присутствие некоторых аминокислот.

Таким образом, доказать стерильность исследуемой пробы нельзя, применяя для посевов только стандартные, неполноценные по своему составу питательные среды. На устойчивость микроорганизмов к высокой температуре влияет много факторов: общее количество клеток, содержащихся в стерилизуемом материале, возраст клеток и стадия их развития, состав питательной среды, на которой выросли микроорганизмы, содержание воды в клетках, гидростатическое давление и др. Вопрос о стерилизующем действии высоких температур более детально рассмотрен в главе 9 настоящего тома.

Термофильные микроорганизмы широко распространены в природе. Они обитают в горячих источниках с различным составом воды, в кучах органического вещества (торф, сено, навоз), в которых резко повышается температура в результате жизнедеятельности этих организмов. Ранее считали, что среди термофилов встречаются главным образом спорообразующие бактерии и актиномицеты. Позднее оказалось, что существуют также термофильные синезеленые водоросли и неспоровые бактерии. Обычно в гейзерах обитают микроорганизмы, которые после выделения чистой культуры растут на питательных средах при температурах, в зависимости от вида, от 60 до 75°. На предметных стеклах, погруженных в воду горячих источников, через 10 дней наблюдались обрастания при 93,5—95,5°, состоявшие из клеток флексибактерий. Обрастания, образованные клетками истинных бактерий, были обнаружены в воде с температурой 85—88°. Следует отметить, что чистые культуры термофилов не

растут в питательных средах при столь высоких температурах. С помощью углекислоты, меченой по углероду, была констатирована ассимиляция углекислоты водородными бактериями, обитающими в гейзере, вода которого имела +73°. Термофильные десульфуризирующие бактерии были изолированы из кернов, взятых на глубине 4000 м, где температура достигала +105°. Эти культуры развивались при +65°.

Способность термофилов размножаться при высоких температурах связана с адаптацией к тем измененным условиям жизни, которые создает высокая температура. В воде горячих источников значительно меньше содержится кислорода, больше растворимость различных веществ, сильнее неблагоприятное действие вредных химических соединений; все биохимические процессы, связанные с жизнедеятельностью, резко ускоряются. Время генерации у спорообразующих термофилов при 70° равно 13—14 мин., а у *Bac. stearothermophilus* 10—11 мин. Соответственно сокращается продолжительность жизни и раньше наступает автолиз клеток. Имеются данные, говорящие о том, что при повышении солености воды или осмотического давления бактерии могут расти при более высокой температуре. Сообщалось также о том, что при давлении, равном 1000 атм, сульфатредуцирующие бактерии могут развиваться при 104°.

Наши сведения о действии высоких температур на живые организмы позволяют прийти к выводу, что при температуре, имеющейся на Венере и равной 450°, жизнь там исключается полностью. Можно высказать предположение, что имеющиеся на Венере в большом количестве облака, состоящие не только из воды и имеющие значительно более низкую температуру, могут содержать одноклеточные микроорганизмы, способные размножаться в этих условиях. Такое предположение маловероятно, но оно не может быть полностью отвергнуто, так как экспериментально было доказано размножение микроорганизмов в тумане, состоящем из мельчайших капелек питательной среды.

Вакуум

Очень низкое давление — типичный космический экстремальный фактор, действие которого на биологические объекты не изучалось ранее, до возникновения космической биологии. Даже совершенные приборы не могут воспроизвести вакуум, имеющийся в космосе. Обычно создают вакуум не выше 10^{-9}

или 10^{-10} мм рт. ст. Не исключена возможность, что опыты с еще более глубоким вакуумом приведут к несколько иным результатам. Однако создаваемый уже на существующих установках вакуум дает представление о характере воздействия. На обычных установках влияние вакуума по техническим причинам обычно сочетается с одновременным действием низких температур от -23 до -35° . На приборах другой конструкции [73] может быть установлена любая температура в пределах от -190 до $+120^{\circ}$. Продолжительность опытов может варьировать от нескольких дней до нескольких лет. Как обычно, вначале изучалось сохранение жизнеспособности после действия вакуума у самых различных микроорганизмов, а также некоторых простейших и вирусов. Затем изучалось влияние вакуума на некоторые физиологические процессы у микроорганизмов, а также на отдельные ферменты. Большинство сведений, полученных в опытах с глубоким вакуумом, приведено в табл. 3. Резюмируя эти данные, можно сделать следующие выводы.

1. Все спорообразующие бактерии сохранили свою жизнеспособность при глубоком вакууме и низкой температуре не только в течение дней, но даже в течение 5 лет. Эти результаты получены в большинстве проведенных исследований; о гибели спор говорится только в двух сообщениях. Споры *Bac. subtilis* устойчивее вегетативных клеток в 10 раз.

2. Неспороносные бактерии менее устойчивы, и их гибель варьировала в пределах от 4,7 до 95%, а у четырех видов дрожжей от 0,64 до 33,9%. В условиях глубокого вакуума и низкой температуры клетки лучше сохраняют жизнеспособность, чем в эксикаторах в лаборатории и поэтому жизнеспособность опытных микроорганизмов может по сравнению с контролем достигать 147%.

3. Довольно неожиданной оказалась высокая устойчивость к вакууму различных водорослей, конидий *Aspergillus* и мицелия грибов (лишенного спор или конидий); имеется только одно сообщение о гибели конидий *Penicillium*. Под влиянием вакуума титр различных бактериофагов уменьшался с $3 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ — $5 \cdot 10^{-7}$, т. е. на 2—4 порядка. Простейшие сохраняли жизнеспособность в течение длительного периода.

4. При повышении температуры до плюсовых количество выживающих микроорганизмов, находящихся в вакууме, резко падает, но даже при 60° споры *Bac. subtilis* и конидии *Asp. niger* сохраняют жизнеспособность.

5. Микроорганизмы, находящиеся в почве пустынь, в значительной мере защищены от действия вакуума, так как в почве, спустя 4—5 лет, сохраняются живыми различные бактерии, грибы, водоросли и простейшие [70]. К этому следует добавить, что клетки, находящиеся в вакууме, становятся более радиочувствительными. Так, при дозе рентгеновских лучей, равной 145 к V, 1 крад/мин в одноклеточном слое клеток *E. coli* при 10^{-5} мм рт. ст. гибнет бактерий больше, чем при 760 мм рт. ст. [145, 146].

В вакууме также сильнее, чем при нормальном давлении, действуют на бактерии и ультрафиолетовые лучи (245 нм), причем после вакуума фотореактивация клеток становится невозможной. По мере увеличения давления тормозится клеточное деление.

Таковы кратко фактические данные о действии глубокого вакуума. К сожалению, нам очень мало известно о механизме его действия, но допустить полное обезвоживание клеток в этих условиях невозможно. Для получения более полных данных необходимо определение связанной воды с помощью ядерно-магнитного резонанса. Описание происходящих при этом цитологических изменений легко было бы сделать, экспериментируя с такой хорошо изученной цитологической моделью, как дрожжевая клетка.

Некоторые данные о действии глубокого вакуума на ферменты, приведенные в табл. 4, говорят о том, что способность окислять глюкозу и этиловый спирт у бактерий после пребывания в вакууме сохраняется. АТФ, содержащаяся в трех видах бактерий и одном виде дрожжей, не инактивируется от большого вакуума. АТФ может выходить из клеток в результате их кипячения или дезинтеграции и в обоих случаях после пребывания в вакууме может быть обнаружена светлячковым методом. У этих же видов активность железопорфириновых белков после действия вакуума снижается на 14—32% (контроль принят за 100%). Устойчивость клеток к глубокому вакууму полностью соответствует тому, что вакуум почти не оказывает инактивирующего действия на трипсин, пероксидазу, цитохром C, АТФ, сравнительно незначительно снижает активность каталазы, рибонуклеазы, α -амилазы и уреазы (табл. 5).

Несмотря на относительную устойчивость одноклеточных организмов к глубокому вакууму, возможность роста в этих условиях не установлена. Теоретически такая возможность, по-видимому, полностью исключается. Мы можем предполагать, что споры бактерий,

Таблица 3. Действие вакуума на микроорганизмы

Организм	Вакуум, мм рт. ст.	Температура, °C	Продолжи- тельность, дни	Результат	Автор
<i>Bac. subtilis</i> , <i>Bac. cereus</i> , <i>Bac. mycoides</i> , <i>Asp. niger</i> , <i>Asp. flavus</i> (лиофилизированные споры бактерий и конидии аспергиллов)	$1 \cdot 10^{-5}$ — $5 \cdot 10^{-7}$	—	2, 4, 7, 16, 32	Все микроорганизмы сохранили жизнеспособность, за исключением <i>Bac. cereus</i> . Последняя погибла после 32-суточного пребывания в вакууме	Prince, Bakanaukas [136]
<i>Bac. subtilis</i> , <i>Mycobacterium smegmatis</i> , <i>Asp. fumigatus</i>	$5,0 \cdot 10^{-9}$ — $3,6 \cdot 10^{-10}$	От +23 до +24	5	Не погибают	Portner, Spiner, Hoffman, Phillips [135]
<i>Bac. subtilis</i> , <i>Asp. niger</i> , <i>Asp. terreus</i> , <i>Penic. citrium</i>	$1 \cdot 10^{-6}$ — $6 \cdot 10^{-9}$	—	10 30 40 45	Через 10 дней погибли только конидии <i>Penic. citrium</i> , а через 30 дней все микроорганизмы	Brueschke, Suezs, Willard [66]
<i>Bac. subtilis</i> var. <i>niger</i>	$1 \cdot 10^{-8}$ — $6 \cdot 10^{-9}$	—	35	Споры остались жизнеспособными	Morelli, Fehner, Stenbridge [126]
<i>Bac. megaterium</i> , <i>Bac. subtilis</i> var. <i>niger</i> , <i>Bac. stearothermophilus</i> , <i>Clostridium sporogenes</i> , <i>Asp. niger</i>	$1 \cdot 10^{-8}$ — $1 \cdot 10^{-10}$	От -190 до +120	4 и 5	При -190° и -110° в вакууме выживают. При +60° резко увеличивается гибель. Сохраняются <i>Bac. subtilis</i> var. <i>niger</i> (40%), <i>Asp. niger</i> (25%)	Davis, Silverman, Goldblith, Keller [73] Davis, Silverman, Keller [74]
<i>Bac. subtilis</i> var. <i>niger</i> , <i>Mycobacterium phlei</i> , <i>Asp. niger</i>	$1 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-10}$	+25	140	Значительное количество микроорганизмов выживало	Geiger, Morelli, Conrow [85, 86]
<i>Bac. megaterium</i> , <i>Sarcina flava</i> , <i>Bac. lini</i> , <i>Bac. subtilis</i> , <i>Bac. mesentericus</i> , <i>Bac. mesentericus</i> var. <i>niger</i> , <i>Bac. mycoides</i> , <i>Bac. simplex</i> , <i>Asp. oryzae</i>	$1 \cdot 10^{-9}$	От -23 до -35	3	Выживаемость зависела от вида и колебалась от 57,5 до 147% *	Имшенецкий, Багров, Лысенко [17]
<i>Sarcina flava</i> , <i>Ps. pyocyanea</i> , <i>Ps. fluorescens</i> , <i>E. coli</i> , <i>Serr. marcescens</i> , <i>Bac. lini</i> , <i>Bac. subtilis</i> , <i>Bac. mesentericus</i> , <i>Bac. mesentericus</i> var. <i>niger</i> , <i>Bac. mycoides</i> , <i>Bac. megaterium</i> , <i>Bac. simplex</i> , <i>Vibrio metchnikovii</i> , <i>Asp. oryzae</i> , <i>Chaetomium globosum</i> , <i>Fomes fomentarius</i> , <i>Coriolus pubescens</i>	$1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-9}$	От -23 до -35	3	Из 17 видов 13 не погибли. Их выживаемость колебалась от 0,34 до 147% * (см. примечание в конце таблицы). Вегетативный мицелий грибов дал рост. Погибли <i>Vibrio metchnikovii</i> , <i>Serr. marcescens</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Imshenetsky, Lysenko [107]
<i>Sacch. vini</i> , <i>Zygosacch. vini</i> , <i>Turolopsis aerea</i> , <i>Candida tropicalis</i> , <i>Rhodotomula rubra</i>	$1 \cdot 10^{-8}$	От -23 до -35	3	Выживаемость в зависимости от вида колебалась от 0,64 до 33,9%	Imshenetsky, Abysov, Voronov, Zhukova, Lysenko [101] [104]
<i>Streptococcus faecalis</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	$1 \cdot 10^{-9}$ — $1 \cdot 10^{-10}$	От +4 до +80	5	По мере повышения температуры количество живых клеток падает. При 40° их было 4—10%	Silverman, Beecher, [148]

* Это объясняется тем, что благодаря вакууму и низкой температуре клетки в опыте лучше сохраняют жизнеспособность, чем в контроле, т. е. в эксикаторе при обычном давлении и комнатной температуре.

способность, чем в контроле, т. е. в эксикаторе при обычном давлении и комнатной температуре.

Таблица 3 (окончание)

Организм	Вакуум, мм рт. ст.	Температура, °C	Продолжи- тельность, дни	Результат	Автор
<i>E. coli</i>	От $1 \cdot 10^{-1}$ до $1 \cdot 10^{-6}$	—		Выживал 1% клеток. Инактивация клеток ультрафиолетовыми и X-лучами в вакууме увеличивается	Bücker, Horneck, Wollenhaupt [68]
<i>E. coli</i>	$2 \cdot 10^{-6}$			При давлении 1 мм рт. ст. и ниже тормозилось клеточное деление и увеличивалась радиочувствительность клеток	Horneck, Bücker, Wollenhaupt [98]
<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Lyngbia aestuarii</i> , <i>Scenedesmus acuminatus</i> , <i>Mastigocladus laminosus</i> , <i>Amorphonostoc punctiforme</i>	$1 \cdot 10^{-8}$ — $1 \cdot 10^{-9}$	От -23 до -35	3	Все водоросли сохранили жизнеспособность	Имшенецкий, Лысенко [19]
Фаги <i>E. coli</i> T2, CgF \times 74, f-2	$1 \cdot 10^{-8}$ — $1 \cdot 10^{-9}$	От -23 до -35	3	Инактивация фагов в вакууме колебалась от $3 \cdot 10^1$ — $1 \cdot 10^9$ до $1 \cdot 10^3$ — $5 \cdot 10^7$	Имшенецкий, А. Лысенко, С. Лысенко [21]
Действию вакуума подвергались почвы пустынь, содержащие аэробные, анаэробные, микроаэрофильные бактерии, грибы, водоросли, простейшие	$1 \cdot 10^{-6}$ — $1 \cdot 10^{-8}$	4, 20, 55	4—5 лет	Через 4—5 лет количество жизнеспособных аэробов и микроаэрофильных бактерий уменьшалось. Количество водорослей уменьшилось с 10^6 до 10^2 на 1 г почвы. Через 4 года простейшие сохранили жизнеспособность, а через 5 лет — погибли	Cameron, Morelli, Congrow [70]
<i>E. coli</i> , <i>Bac. subtilis</i>	$2 \cdot 10^{-7}$ — $5 \cdot 10^{-9}$	80	От 1 до 7 дней От 1 до 3 час.	Вегетативные клетки <i>Bac. subtilis</i> были в 10 раз менее устойчивы, чем споры, выживаемость которых была 23—56%	Horneck, Bücker, Wollenhaupt [98]
<i>E. coli</i>	От $1 \cdot 10^{-1}$ до $1 \cdot 10^{-10}$			Погибло около 95% клеток	Bücker, Horneck, Wollenhaupt, Turcu, Daniels, Reitz, Schwager [69]
<i>Sarcina flava</i> , <i>Bac. megaterium</i> , <i>Asp. terreus</i>	$1 \cdot 10^{-9}$	От +20 до -190	21	Жизнеспособность сохранилась	Имшенецкий, Лысенко, Удовенко, Бутенко [25]
<i>Bac. megaterium</i> , <i>Bac. subtilis</i> , <i>Bac. stearothermophilus</i> , <i>Clostridium sporogenes</i> , <i>Asp. niger</i> . Почвенные актиномицеты	От $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-10}$	От +25 до -190	2—5	Все спорозоносные бактерии выжили. На их выживаемость температура не влияла. Только актиномицеты выдерживали нагревания до 120° в условиях вакуума	Davis, Silverman, Keller [74]

Таблица 4. Действие глубокого вакуума на окислительную способность, устойчивость железопорфириновых ферментов и АТФ микроорганизмов *

Организм	Вакуум, мм рт. ст.	Температура, °С	Окисление глюкозы и спирта	Активность железопорфириновых ферментов, % от контроля		Активность АТФ	Автор
<i>Sarcina flava</i> , Bac. simplex	От $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-10}$	От -23 до -35	Окислительная способность сохранилась. Bac. simplex интенсивнее окисляет глюкозу и этиловый спирт, чем <i>Sarcina flava</i>	—		—	Имшенецкий, Лысенко [20]
<i>Sarcina flava</i> , <i>Serratia marcescens</i> , Bac. simplex, <i>Zygosaccharomyces vini</i>	От $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-9}$	От -23 до -35	—	93	78	—	Имшенецкий, Лысенко, Сотников [23]
				78	70		
				93	68		
				87	68		
<i>Sarcina flava</i> , <i>Serratia marcescens</i> , Bac. simplex, <i>Zygosaccharomyces vini</i> , <i>Candida tropicalis</i>	От $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-9}$	От -23 до -35	—	—		95	Имшенецкий, Лысенко, Сотников [22]
						101	
						100	
						92	
						89	

* Продолжительность опыта 72 часа; активность в контроле принята за 100%.

Таблица 5. Действие глубокого вакуума на кристаллические ферменты, цитохром С и АТФ *

Вакуум, мм рт. ст.	Активность, %								Автор
	амилаза	трипсин	уреаза	рибонуклеаза	каталаза	пероксидаза	цитохром С	АТФ	
От 10^{-8} до 10^{-10}	51	103	65	79	—	—	—	—	Имшенецкий, Комолова, Лысенко, Гамуля [18]
От 10^{-3} до 10^{-9}	—	—	—	—	88	86	98	97	
					69	79	69	97	
					82		65	99	Имшенецкий, Лысенко, Сотников, Гамуля [24]

* Продолжительность опыта 72 часа при температуре от -25° до -35° ; активность в контроле принята за 100%.

находящиеся на микрометеорите и защищенные им от солнечных лучей, могут сохранять жизнеспособность в космосе.

Для космической биологии действие глубокого вакуума представляет исключительный интерес. Тот факт, что различные живые организмы, находящиеся в почве, просуществовали в условиях глубокого вакуума 4—5 лет, позволяет считать, что вакуум не обладает стерилизующим действием. На поверхности Марса или Луны он не может быть причиной быстрой гибели микроорганизмов. Обнаружение на Луне микроорганизмов, занесенных ранее прилетавшим космическим кораблем, это подтверждает. Становится также очевидным, что космический объект, пролетая в космосе, в условиях вакуума сохраняет жизнеспособными микроорганизмы, на-

ходящиеся на его поверхности. Устойчивость к глубокому вакууму делает понятным, почему при сравнительно небольшом уменьшении давления до 4,5—7,6 мбар многие микроорганизмы прекрасно размножаются.

Давление

В впадинах глубоководных впадин Тихого океана обитают разнообразные микроорганизмы, подвергаясь при этом давлению 1100 атм. Учитывая площадь земного шара, занимаемую океанами, и их глубины, нельзя не прийти к выводу, что высокое давление бесспорно является одним из наиболее распространенных экологических факторов, действующих на различные животные и растительные организмы. На протяжении 100 лет изучались

Таблица 6. Устойчивость микроорганизмов к высокому давлению

Организм	Давление, атм.	Продолжительность действия	Результат	Автор
<i>Micrococcus agilis</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Sarcina rosea</i> , <i>Bacterium pyocyaneum</i> , <i>Bact. prodigiosum</i> , <i>Bact. typhi abdominalis</i> , <i>Bact. pseudodiphtheritis</i> , <i>Bact. tuberculosis hominis</i> , <i>Bact. anthracis</i> , <i>Vibrio cholerae</i> , <i>Oidium lactis</i>	3000	От 4 час. до 4 дней	Не погибли	Chlopin, Tamman [71]
<i>Serratia marcescens</i> , <i>Streptococcus lactis</i> , <i>Aerobacter aerogenes</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i>	2040—3060 3400—4220 5780—6800	60 мин. 40 мин. 4 мин.	Все погибли	Hite, Liddings, Weakley [97]
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Sacch. albicans</i>	2040—2380 3674—4080 5780	60 мин. 10 мин. 5 мин.		
<i>Bac. subtilis</i>	3000—12000	14 час.	Не погибли	Larson, Hartzell, Diehl [117]
<i>Bac. subtilis</i>	17600	75 час.	Часть выжила	Basset, Macheboeuf [54]
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	7000	Несколько секунд	Все погибли	Luyet [121]
30 видов бактерий	600	2 дня	Многие выжили	Zobell, Johnson [166]
56 видов бактерий	1000—2000	От минут до нескольких лет	Погибли 33 культуры	Zobell, Oppenheimer [167]
63 вида бактерий	600	4 дня	Погибли 23 культуры	Oppenheimer, Zobell [129]
Глубоководный ил, содержащий микроорганизмы	800		Задержка размножения	Крисс, Бярюзова, Абызов [31]
Спорообразующие бактерии молока	1000	9 мин.	Сохранили жизнеспособность	Timson, Short [156]
Смешанная микрофлора глубоководных илов	400	18 мес., пещеры через 1—2 мес.	Нормальный рост	Чумак, Блохина, Крисс [49]

устойчивость клеток к однократному действию высокого давления и влияние последнего на рост и физиологию различных видов микроорганизмов. Исследования в этой области велись в двух направлениях. Во-первых, в лабораторных условиях изучалось влияние высокого гидростатического давления на различные микроорганизмы. Современные прессы дают возможность изучать давление, равное 20 000 атм. и выше. Второе направление связано с подъемом образцов глубоководного ила со дна океана и выяснением физиологических особенностей микроорганизмов, живущих в иле. Все другие обитающие на суше живые существа, помимо бактерий, микроскопических грибов, актиномицетов и водорослей, быстро погибают при значительном давлении.

Устойчивость микроорганизмов к однократному действию высокого гидростатического давления изучалась неоднократно [30,

160, 162, 163, 164]. Результаты таких экспериментов приведены в табл. 6.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Различные виды микроорганизмов обладают неодинаковой чувствительностью к высокому давлению. Так, дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* при давлении 7000 атм. погибают за несколько секунд, тогда как не все споры *Bac. subtilis* отмирают даже при давлении 17 600 атм. в течение 75 час.

2. Чем выше давление и чем продолжительнее экспозиция, тем сильнее эффект высокого гидростатического давления. Так, при одномоментном действии давления, равного 3750—7500 атм. неспоронные бактерии сохранили жизнеспособность. При удлинении экспозиции до 1½—3 час. давление свыше 3000 атм. уже оказывается для этих же видов смертельным.

3. В табл. 6 в большинстве случаев приве-

дено только максимальное давление, применявшееся в опыте и приводившее к гибели клеток; при более низком давлении (200—400 атм.) наблюдалось только угнетение роста микроорганизмов.

Под влиянием высокого давления в культурах бактерий *E. coli*, *Pseudomonas*, *Serratia maritima* происходило образование длинных нитей, достигающих 200 мк, что можно рассматривать как результат задержки деления клеток. При переходе к обычному давлению наблюдается распад нитей на фрагменты. ДНК находится только на концах нитей, но ее содержание в клетке при атмосферном давлении становится обычным. Что касается вопроса о размерах клеток, то здесь нет единого мнения. По одним данным, величина клеток уменьшается, по другим — увеличивается.

По мере повышения гидростатического давления изменяются различные физиологические особенности микроорганизмов. Вначале прекращается размножение, но у подвижных форм, например *Pseudomonas aeruginosa*, даже после давления в 12 000 атм. активная подвижность сохраняется. У прекративших размножаться клеток сохраняется способность к дыханию в присутствии глюкозы, маннозы, фруктозы, малата, лактата, сукцината или других веществ. Она была утрачена у *Pseudomonas aeruginosa* после давления 800 атм. в течение 30 мин. [107]. Вопрос об установлении предельно переносимого давления довольно сложен. По-видимому, неспороносные бактерии, сохраняющие жизнеспособность после действия 600—1000 атм. в течение 3—4 дней, могут быть отнесены к баротолерантным формам. По сравнению с бактериями водоросли несколько устойчивее. Так, *Chlorella pyrenoidosa* только при 500 атм. начинала размножаться медленнее; несколько менее устойчивым оказался *Hydrodictyon reticulatum*, у которого после 26-часового действия 400 атм. биомасса снижалась на 50%. Интересно, что при длительном давлении, равном 100—200 атм., увеличивается скорость размножения *Chlorella* [151]. При изучении влияния температуры на устойчивость бактерий к высокому давлению не было получено ясной картины. В одних опытах с повышением температуры до 40° количество видов, растущих под давлением 400 атм., значительно уменьшилось, в других случаях наблюдалось, что по мере повышения температуры неблагоприятное действие высокого давления на рост снижается.

Некоторые пищевые продукты изменяют

свои свойства при стерилизации и нагревании. В связи с этим был заявлен ряд патентов, предлагающих производить стерилизацию таких продуктов путем многократного действия высокого давления. Однако в связи с устойчивостью спор и наличием баротолерантных форм эти методы стерилизации не получили распространения.

Повышенное давление может играть роль мутагенного фактора, так как после его действия установлено образование мутаций у хорошо изученного в генетическом отношении гриба *Neurospora crassa* [122]. Имеются сообщения о том, что после однократного воздействия высокого давления головастики *Rana temporaria* становятся более устойчивыми к последующему действию высокого давления.

В земных условиях преобладают микроорганизмы, растущие и размножающиеся при атмосферном или несколько пониженном давлении, если речь идет о видах, обитающих в горах на большой высоте.

В 1952 г. было установлено, что при посеве проб ила, взятого в Филиппинской впадине на глубине 10 000 м, получались различные результаты в зависимости от применявшегося давления. Если посевы находились под давлением 1000 атм., то выросло в 16—100 раз больше бактерий, чем их выросло в той же среде, но при нормальном атмосферном давлении [161]. Таким образом, впервые было доказано существование барофильных бактерий, лучше растущих при высоком давлении. Барофильные бактерии были обнаружены в кишечнике глубоководных животных, в илах, взятых на глубине 7400 м. Было также показано, что глубоководные денитрифицирующие бактерии восстанавливали нитраты при высоком давлении, тогда как денитрификаторы, изолированные из поверхности вод, прекращали восстановление нитратов при 400—600 атм. Аналогичная картина наблюдалась с десульфуризирующими бактериями — они не росли при атмосферном давлении и восстанавливали сульфаты при 1000 атм. За существование барофильных бактерий говорит следующее наблюдение. Изолированная из морской воды культура *Pseudomonas* sp. при 28° и давлении 300—350 атм. накапливала на 30% больше биомассы, чем при нормальном атмосферном давлении [32].

Существует ряд исследований, результаты которых были отрицательны. Так, при аналогичных экспериментах с глубоководными илами, взятыми во впадине Кермадек, баро-

фильные бактерии выделить не удалось, не было их также при посеве илов, извлеченных из Курило-Камчатского желоба. Однако было бы неправильно брать под сомнение существование в глубинных илах барофильных форм.

При изучении физиологии баротолерантных бактерий было установлено, что некоторые из них, сбраживая углеводы при высоком давлении, образуют больше органических кислот и в то же время выделяют меньше углекислоты. Можно предполагать, что при высоком давлении процесс декарбоксилирования угнетается и это связано с образованием большого количества кислот. Как правило, влияние одного физического фактора может повлиять на результаты действия другого фактора. Так, все споры *Bacillus subtilis* при 93,6° и 1 атм. давления погибают в течение 90 мин., тогда как при той же температуре, но давлении 600 атм. выживает 20% спор.

Невесомость

Есть все основания считать, что возникновение жизни на Земле произошло в первичном океане, вода которого содержала органические вещества, возникшие в результате химической эволюции. Обитающие в воде живые существа при переходе к земному образу жизни должны были адаптироваться к более значительному, с биологической точки зрения, воздействию силы тяжести, чем в воде. Это наложило отпечаток на всю эволюцию живых существ, имеющих на Земле. Происходило относительное увеличение веса скелета и костного мозга, а также увеличение количества крови. Сопоставление таких показателей у рыб, амфибий, пресмыкающихся, птиц и млекопитающих полностью это подтверждает [28]. Однако было бы ошибочным считать, что лишь этим ограничились изменения в организме животных и растений, покинувших океан и перешедших к жизни на Земле. Изменению подвергались разнообразные функции, и гравитация стала входить в комплекс условий, необходимых для нормального существования земных организмов. Это подтверждается данными космической медицины, так как при полете космонавтов наблюдаются изменения, вызванные невесомостью. К ним относятся гипокинезия, избыточное выведение кальция, связанное с декальцинацией костной ткани, и др. Пребывание в условиях невесомости, по-видимому, изменяет физиологию организма. И поэтому,

реадаптация к условиям весомости должна происходить постепенно.

Экспериментально воспроизвести на Земле полную невесомость невозможно. Действие же ее в космических кораблях и на спутниках никогда не бывает изолированным. Значительный вклад в изучение невесомости был сделан с помощью клиностата (рис. 3). В горизонтальном клиностате можно воспроизвести условия, позволяющие получить биологические эффекты, близкие к таковым в невесомости [75, 87, 88].

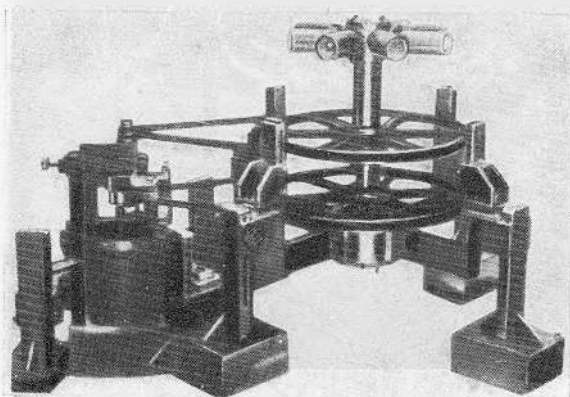


Рис. 3. Клиностат с уменьшенной вибрацией, комбинированный с центрифугой [88]

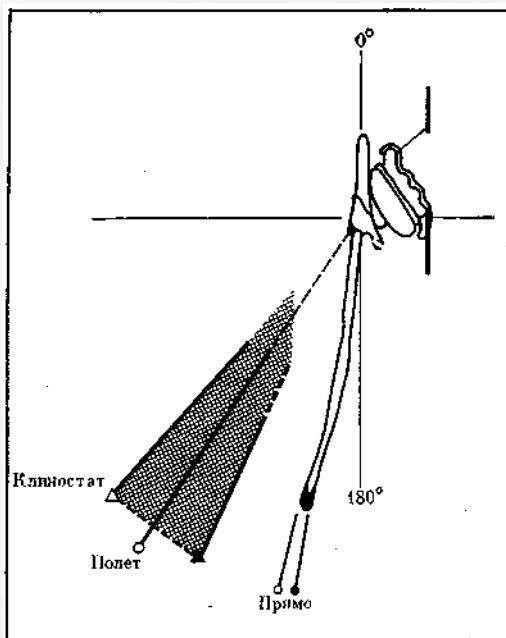


Рис. 4. Влияние полета на «Биосателлите-2» на ориентацию первичных корней [78]

Наиболее хорошо изучен рост молодых одностольных или двудольных растений. В результате вращения в клиностате, а также в невесомости, корень проросшего растения меняет ориентацию, как это изображено на рис. 4. Отклонение от нормального направления роста сохраняется до 5 часов после пре-

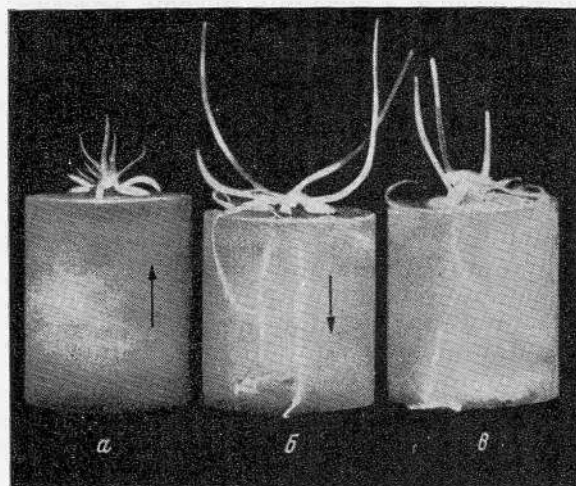


Рис. 5. Проростки и корни овса, выращенные на клиностате с центрифугой [88] (стрелки указывают направление действия ускорения, равно 0,1 g, на семена)

а, б — вращение клиностата со скоростью 2 оборота в минуту;
в — контроль

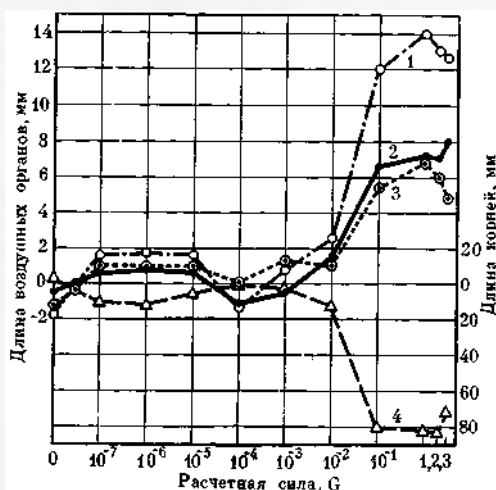


Рис. 6. Ориентация растений, выращиваемых в клиностате при одновременном вращении на центрифуге [88]

1 — проростки; 2 — coleoptили; 3 — мезокотили; 4 — корни

ращения опыта. Увлажненные семена овса помещали в цилиндрические блоки агара, а последние укрепляли на клиностате, совмещенном с центрифугой. При этом удалось показать, что пороговая сила тяжести, достаточная для ориентации растений, равна 10^{-3} g. Растение, выращенное на таком клиностате, изображено на рис. 5. В зависимости от величины центробежной силы эффекты были различными. Величина гравитотропической реакции, определяемая по надземным и подземным частям растений, представлена на рис. 6. Таким образом, некоторые эффекты, которые земное притяжение вызывает у растений, с помощью клиностата могут быть сведены к нулю. В частности у растений не наблюдается столь обычного геотропизма корней.

Сравнительное изучение роста двудольного растения *Capsicum annuum* (перец), находившегося на «Биосателлите-2» и на Земле на клиностате [78], позволило установить, что в обоих случаях условия опыта вызвали эпинастию листьев, причем межаксиальный угол у растения, находившегося на спутнике, уменьшился на $20-60^\circ$. У проростков пшеницы ориентация coleoptили первичного и вторичных корешков, а также цитологические изменения в спутнике и клиностате были сходными, но не одинаковыми [80].

Существовавшая давно и забытая потом теория о том, что внутриклеточные зерна могут играть роль статолитов, обеспечивающих нормальную реакцию на гравитацию, снова получила право на существование. У контрольных растений зерна крахмала находились в нижних частях клеток coleoptили и корешков, тогда как у опытных растений (полет или клиностат) эти зерна располагались беспорядочно.

В противоположность растениям гигантские амёбы (*Pelomyxa cardiensis*) и оплодотворенные икринки лягушки (*Rana pipiens*), находившиеся на «Биосателлите-2», подвергались очень незначительным изменениям. Так же нормально произошло деление оплодотворенных икринок лягушки, бывших в условиях невесомости на космических кораблях «Джемини-8 и 12» [78, 113]. Можно высказывать предположение, что именно водные животные будут менее чувствительны к невесомости, чем обитающие на Земле. Существовавшая в воде, они приспособлены к влиянию силы тяжести в жидкости, и эта особенность эволюционно закреплена.

Измененная весомость может сказаться на результатах действия понижающей радиа-

дии. Так, вторичные корешки проростка бобов (*Vicia faba*), выращенных на клиноватом, подвергались облучению рентгеновскими лучами. Это приводило к сдвигу фаз в клеточном цикле корешков, к увеличению количества микроядер, изменению митотического индекса и к другим нарушениям [87].

Низшие организмы хорошо переносят значительное увеличение силы тяжести. Так, бактерия *E. coli* растет в течение 40 дней при 100 000 g. Действие 400 000 g на яйца аскарид в течение одного часа не сказывается на выходе личинок из яиц. У более сложноорганизованных живых существ (птицы, грызуны) в этих условиях наблюдается уменьшение размера тела и отставание в росте по сравнению с контролем. Если крыс подвергать в течение 4—6 час. ускорению, равному 2 g, и проводить это в течение 2—3 месяцев, то в результате наблюдается падение веса экспериментальных животных, как это видно из рис. 7. Одновременно с этим повышается количество креатинина и общего азота, выводимого с мочой (рис. 8).

Вибрация

При космическом полете наблюдается вибрация, которой могут подвергаться биологические объекты, находящиеся в спутнике или в космическом корабле. Естественно, что интенсивность вибрации колеблется в довольно широких пределах. Цель лабораторных опытов по вибрации заключается в том, чтобы выяснить ее влияние на изучаемый объект и приблизиться к расшифровке суммарного эффекта, которым обладают факторы космического полета. Исследования проводятся на вибростенде, позволяющем варьировать интенсивность вибрации. Обычно стараются воспроизвести вибрацию, сходную с той, которая наблюдается при полете. Были проведены опыты с двигателем Гудмана 8/600 при условиях: частота от 5 до 500 гц, максимальная амплитуда 12,5 мм и максимальная нагрузка, равная 20 кг. Ускорение и амплитуда были постоянными, характер вибрации — синусоидальным. Вибрации подвергались мыши, у которых через 24 часа производилось цитологическое изучение изменений костного мозга. У опытных животных было 9,79% патологических форм митоза, а в контроле только 2,61% [119].

Аналогичные опыты были произведены также с мышами, но в более мягких условиях (частота 70 гц, амплитуда $\pm 0,4$ мм). Мыши заражались клетками карциномы Эрлиха и



Рис. 7. Влияние ускорения на вес крыс (в процентах от веса контрольных животных) [84]

1а — 2g,
1б — 0,8g (животных кормили во время вращения);
2 — 2g (животных не кормили во время вращения)

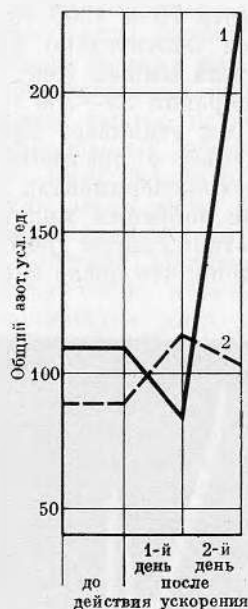


Рис. 8. Увеличение количества азота, выводимого с мочой у крыс, при действии ускорения [84]

Ускорение 10g, 50 мин;

1 — опыт;
2 — контроль



Рис. 9. Динамика веса тела мышей после вибрации (70 гц, 60 мин., 10 ед.) [7]

1 — опыт;
2 — контроль

через 6 дней подвергались вибрации в течение 7—30 мин. Через 24 часа после окончания вибрации астидная жидкость фиксировалась и с помощью флуоресцентной микроскопии подсчитывались общее количество анафаз и патологические анафазы [119]. Последних после 15-минутной вибрации было 42,3%, а в контроле только 13,6%. Есть основание считать, что вибрация вызывает перестройку хромосом у клеток мышей, которая связана со слипанием хромосом, а в дальнейшем с неправильным их расхождением. Вибрация иногда оказывает благоприятное влияние на развитие и обмен веществ у мышей. Так, при частоте 70 и 1500 гц и вибрации в течение часа значительно увеличивается прирост веса тела мышей (рис. 9).

Действие вибрации 35—700 гц с амплитудой 0,4—0,05 мм усиливает эффект облучения, наблюдаемый у лизогенных бактерий. В лабораторных экспериментах доказано, что низкочастотная вибрация индуцирует кроссинговер в клетках самцов дрозофилы. Далее было установлено, что после вибрации повы-

шается активность реакции антиген-антитело, причем этот эффект сходен с действием химических мутагенов или понижающей радиации. Вибрация может оказывать бесспорный и значительный стимулирующий эффект (рис. 10), приводя, в частности, к резкому ускорению роста лука [7].

Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы. Во-первых, вибрация относится к тем динамическим факторам, которые действуют самостоятельно на биологические объекты. Во-вторых, вибрация, входя в комплекс факторов полета, изменяет эффект облучения или других воздействий. Так, рост в невесомости снимает неблагоприятное влияние вибрации [89]. В-третьих, характер изменений, вызываемых вибрацией, в научном отношении мало изучен. Это относится к данным цитологии, физиологии, биофизики и биохимии. Тонкие особенности механизма действия вибрации пока не установлены.

Ультрафиолетовые лучи

Поверхности Земли достигает только часть ультрафиолетовой радиации, так как содержащиеся в атмосфере водяные пары, пыль, а также озон играют экранирующую роль [43]. В воздух микроорганизмы попадают с поверхности Земли, но воздушная микрофлора все время подвергается отбору под влиянием ультрафиолетовых лучей. Наиболее устойчивыми к ним оказываются микроорганизмы, клетки которых содержат пигменты, и поэтому при анализе воздушной микрофлоры вырастает так много колоний бактерий и грибов, окрашенных в желтый, оранжевый, красный, зеленый, коричневый, фиолетовый или черный цвета.

Большинство пигментов относится к каротиноидам, реже к меланинам, обладающим способностью защищать клетки от губительного действия ультрафиолетовых лучей. Полученные у этих культур бесцветные (аппигментные) мутанты оказываются значительно менее устойчивыми к ультрафиолетовой радиации, чем исходные формы. Эти пигменты не выделяются из клетки в окружающую среду. Пигментные бактерии, образующие пигменты (главным образом феназиновые), выделяемые клеткой в жидкую питательную среду, неустойчивы к действию ультрафиолетовых лучей. Экранирующая, защитная роль пигментов подтверждается тем, что в высокогорных и пустынных почвах широко распространены грибы, образующие темные пигменты, а на высоте 4000—5000 м они явля-

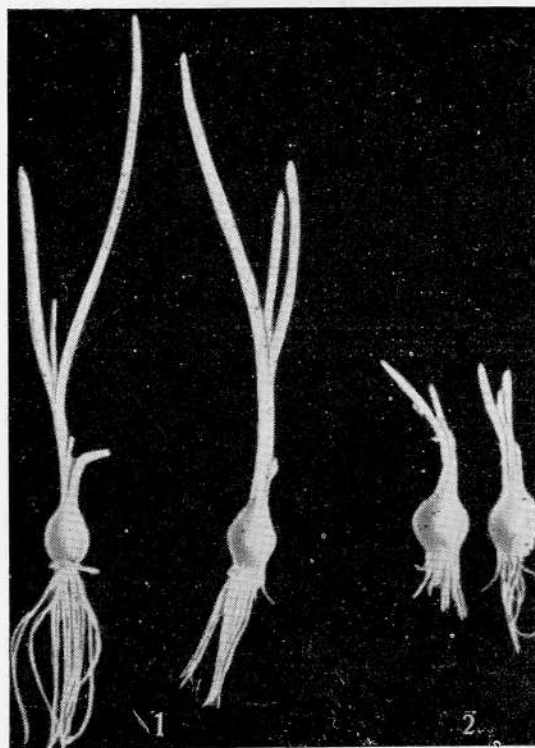


Рис. 10. Влияние вибрации на прорастание лука [7]

1 — опыт;
2 — контроль

ются единственными обитателями почвы. Пигмент защищает клетки от повышенной радиации, поглощая кванты света. Помимо пигментов протопласт клеток микроорганизмов и их клеточные стенки содержат вещества, также обладающие защитным действием. Так, 2%-ный водный раствор полисахарида, синтезируемого *Bacillus mucilaginosus*, полностью защищает клетки от губительного действия лучей.

Действие ультрафиолетовых лучей лучше переносят микроорганизмы, находящиеся в стадии покоя, медленно размножающиеся, кислотоупорные, образующие споры или конидии, содержащие рибонуклеат магния, воска, липиды, а также микроорганизмы в высушенном состоянии [81]. Чувствительность к ультрафиолетовым лучам варьирует у различных, но близких видов. Так, *Paramecium bursaria* в два раза устойчивее, чем *P. caudatum*. В пределах одного рода дрожжей *Rhodotorula* самые устойчивые и самые чувствительные виды отличаются друг от друга в 300 раз. Резистентность может быть экологическим фактором, так как горные штаммы красных дрожжей были устойчивее, чем виды, обитающие в долинах [46]. Устойчивость к ультрафиолетовым лучам можно повысить путем многократных повторных облучений; таким путем через 2 года была получена у *Rhodotorula* значительно более устойчивая форма, чем исходная [45]. В течение ряда лет на *Vibrio marina* действовали лучами с длиной волны, равной 253,4 нм. В результате адаптированная форма переносила $38,5 \cdot 10^3$ эрг/мм², а контрольная только $2,75 \cdot 10^3$ эрг/мм².

Фотореактивация заключается в том, что после действия ультрафиолетовых лучей объекты, подвергнутые влиянию дневного света, восстанавливают в той или иной степени свою жизнеспособность. Ферментные системы, участвующие в фотореактивации, могут осуществлять свое действие даже после облучения живых объектов лучами, не достигающими поверхности Земли. Предварительное действие космической радиации на высшие растения не лишает их способности к фотореактивации после облучения ультрафиолетовыми лучами [50]. Фотореактивация осуществляется видимым светом (4200—5400 Å), но внешние условия влияют на степень фотореактивации; так, например, при температуре ниже оптимальной для данного объекта она протекает лучше. Несомненный интерес представляют также наблюдения, которые доказывают, что при одновременном действии ультрафиолетовых лучей

и дневного света может непосредственно происходить фотореактивация. Так, *Paramecium caudatum* при облучении в течение 16—18 час. дозами 1,5—40 и 120 мквт (2537 Å) замедляет деление и погибает через 25 дней. При таком же облучении, но при одновременном освещении видимым светом (2,8—15 тыс. люкс) деление протекает нормально в течение 42 дней. Способность различных микроорганизмов к фотореактивации сильно варьирует, но у *Streptomyces griseus* фотореактивация повышает выживаемость в 300 раз [43].

Общепризнано, что наиболее бактерицидным действием обладают ультрафиолетовые лучи с длиной волны, равной 2537 Å. В условиях свободного космоса или на поверхности небесных тел, лишенных атмосферы, живые клетки должны быстро погибнуть от действия ультрафиолетовых лучей. Однако экспериментально легко доказать, что ультрафиолетовые лучи легко могут быть задержаны очень тонкими экранами. Так был измельчен каменный метеорит «Кунашак» и из полученного песка после добавления очень небольшого количества клея сделаны конусы очень небольшого размера, с основанием 36 мк и высотой 145 мк. В центральную часть этих конусов во время их приготовления помещались споры *Bacillus megaterium*. Затем эти конусы были подвергнуты дозе ультрафиолетовых лучей, равной той, которую получил бы этот конус, находясь в космосе в течение года, т. е. равной от $2 \cdot 6 \cdot 10^7$ до $7 \cdot 8 \cdot 10^8$ эрг/см² [140].

Следующий посев растертых конусов показал, что все споры сохранили жизнеспособность. Следовало выяснить возможную минимальную толщину экрана. Для этого споры *Bacillus cereus* покрывались пленкой хрома, толщина которой постепенно увеличивалась [103]. Оказалось, что если пленка достигает толщины 800 Å, то споры не погибают от дозы, соответствующей $7,8 \cdot 10^7$ эрг/см². Следовательно, относительно тонкий слой марсианской пыли полностью предохранит живые клетки от действия ультрафиолетовых лучей. Такой вывод подтверждается тем, что различные биологические объекты, поднятые на значительную высоту с помощью ракет, космических кораблей или стратостатов, быстро погибали от действия солнечных лучей, однако достаточно было покрыть их тонкой белковой пленкой, чтобы сохранить их жизнеспособность. Все исследования, проведенные в «Искусственном Марсе», подтвердили, что нахождение микроорганизмов в

самых поверхностных слоях почвы или измельченного минерала лимонита полностью предохраняет их от гибели. Достаточно указать некоторые дозы ультрафиолетовых лучей, применявшиеся в этих опытах: за три недели $33,6 \cdot 10^6$ эрг/см², суммарная доза в других опытах 10^9 эрг/см². Применение 19 дуговых ксеноновых ламп позволило дать дозу, равную 7000 эрг/см²·сек при длине волны от 2000 до 3000 Å. Все это говорит о том, что если в грунте Марса имеются живые организмы, то они защищены от губительного действия ультрафиолетовых лучей.

Освещение на Марсе составляет 0,44 земного. Но на этой планете имеется сдвиг максимума излучения Солнца в коротковолновую область: на Земле 680 нм, а на Марсе 550—565 нм. Лучи такой длины на Земле усиленно поглощаются антоцианами [47]. Именно поэтому у высокогорной растительности усиливается поглощение лучистой энергии в зеленой и близкой к инфракрасной частях спектра. Это в свою очередь связано с усилением синтеза антоцианов.

Ионизирующая радиация

Об устойчивости к ионизирующей радиации и механизме ее действия на теплокровных животных говорится в главе «Ионизирующие излучения» (т. II, книга вторая). Для космической биологии значительный интерес представляет существование низших организмов, устойчивых к ионизирующей радиации. При повышенном уровне естественной радиации в результате адаптации возникают резистентные формы. Так, из воды радиоактивных источников выделяются микроорганизмы, в 3—10 раз более устойчивые к излучению, чем культуры, извлеченные из воды нерадиоактивных источников [27]. Эти изменения наследственны, и их возникновение возможно только при достаточно высокой естественной радиоактивности (например, 194—362 мрад/час). Формы, устойчивые к действию ионизирующей радиации, встречаются также в шахтах, где добываются минералы, содержащие радиоактивные элементы. Практическая деятельность человека сопровождается возникновением условий, в которых имеются высокие дозы ионизирующей радиации. Так, в воде ядерных реакторов обитают формы, развивающиеся при дозах, равных миллионам рад. Появление столь резистентных форм нашло отражение в названии некоторых видов, например *Micrococcus radiodurans*.

Обычно ионизирующая радиация не может быть отнесена к числу факторов, представляющих опасность для биологических объектов, находящихся внутри спутников и космических кораблей [141]. Даже при прохождении через внутренний радиационный пояс Земли или при вспышках на Солнце ионизирующая радиация внутри космических объектов не превышает 30—40 рад.

Существуют две точки зрения на действие различных видов ионизирующей радиации. Согласно одной из них при действии протонов широкого спектра действия 50—630 Мэв или γ -лучей Co^{60} гибель дрожжей будет одинаковой, как это видно на рис. 11, 12. Аналогичные результаты были получены с фагом *E. coli*, культурами тканей животных и человека [132]. Сторонники другой теории считают, что на *Bac. mesentericus* β -частицы действуют слабее, чем γ -лучи, а по другим данным для *E. coli* нейтроны менее губительны, чем рентгеновские лучи. Это подтверждается также тем, что для получения мутаций у *Drosophila* доза нейтронов должна быть в $1\frac{1}{2}$ раза больше, чем доза жестких рентгеновских лучей. Однако существенно, что бактерицидный эффект не прямо пропорционален интенсивности облучения, а зависит от дозы, выраженной в р. Это может быть проиллюстрировано следующими данными о действии рентгеновских лучей на споры *Bac. mesentericus* [116]:

Рентгеновские лучи	Интенсивность, р/мин	МЛД (остается 37% живых клеток, доза в р)
8 Å	$6,24 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^5$
	$6,02 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^6$
	$7,70 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^6$
0,15 Å	65	$5,6 \cdot 10^3$
	209	$5,7 \cdot 10^3$

Таким образом, бактерицидный эффект связан не с интенсивностью радиации, а только с ее дозой, т. е. решающее значение имеет доза, которая была адсорбирована организмом [116]. Изучая эффекты радиации, нередко употребляют термин ОБЭ, т. е. понятие об относительной биологической эффективности, эффективности одного облучения по отношению к другому.

Действуя на одноклеточные организмы ионизирующей радиацией длительное время, можно подвергнуть их влиянию очень высо-

кой суммарной дозы. Так, культура *Ragadesium caudatum* при однократной дозе 10 крэд за 5 месяцев получила 7000 крэд, причем угнетение деления *Ragadesium* не зависело от суммарной дозы, а представляло собой реакцию на непосредственно полученную дозу. Воспроизводимое легко действие α , β -частиц, λ -лучей и нейтронов не дает ответа на действие спектра протонов с диапазоном 15—200 Мэв, которые захватываются геомагнитным полем [154].

Непосредственного подъема незащищенных биологических объектов на необходимую высоту не производилось. Однако вполне реально изучение действия компонентов, состоящих из тяжелых ионов [124]. На высоте 30 км у черных мышей и кроликов появились полосы белой шерсти, соответствующие следу, оставшемуся после действия тяжелых ионов. При гистологическом исследовании белых полос не найдено меланина, меланоцит и отмечено исчезновение глубоких волосных фолликулов.

Естественно, что на устойчивость к ионизирующей радиации оказывает влияние целый ряд факторов. Покоящиеся стадии, особенно споры бактерий, значительно устойчивее, чем вегетативные клетки, и именно это является одной из причин, мешающих применению ионизирующей радиации для стерилизации космических объектов. Довольно устойчивы клетки водорослей; так, летальным эффектом для *Microcoleus*, *Phormidium*, *Synechococcus* обладают γ -лучи в дозе $2,45 \cdot 10^6$ рад. Наблюдения, говорящие о том, что непигментные формы *Gliocladium fimbriatum* более чувствительны к γ -лучам, чем все пигментные темноокрашенные штаммы гриба, трудно объяснимы, так как речь идет об ионизирующей радиации [37].

Культуры микроорганизмов, находящиеся в экспоненциальной фазе роста, более чувствительны к облучению, чем в лаг-фазе, стационарной фазе или фазе замедления роста. Условия, в которых находились организмы до, во время или после облучения, оказывают большое влияние на результаты. В условиях, приводящих к уменьшению молекулярного кислорода при облучении рентгеновскими лучами, резистентность организма возрастает. Имеется много наблюдений, доказывающих, что облучение при низких температурах уменьшает губительное действие ионизирующей радиации. Дрожжи более устойчивы при -33° , слабее действие γ -лучей на споры *Phycomyces nitens* и клетки *Bacillus paratyphii* при -192° . Чувствительность спор *Bac.*

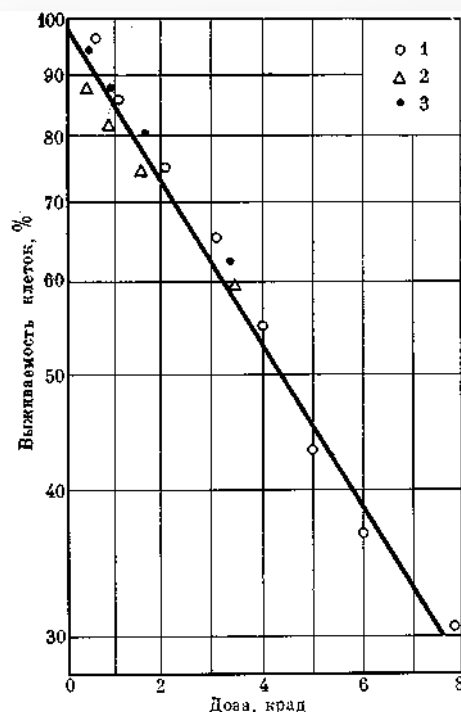


Рис. 11. Действие на гаплоидные дрожжи протонов

1 — 240 Мэв;
2 — 510 Мэв;
3 — γ -лучей Co^{60}

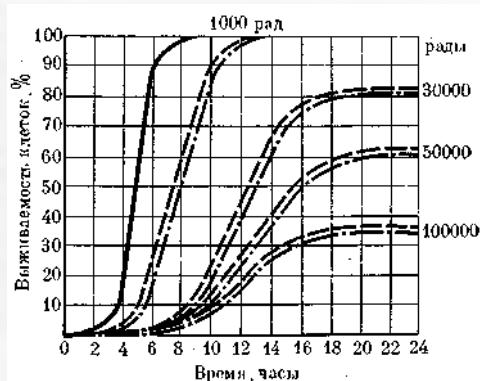


Рис. 12. Задерживающее действие на митозы у дрожжей протонов 630 Мэв и γ -лучей [132]

megaterium уменьшается по мере снижения температуры от $+37^\circ$ до -195° . Известны и другие исследования, в которых было установлено защитное действие глубокого охлаждения на радиоустойчивость семян различных растений, спор низших грибов, дрожжей, бактерий и некоторых тканевых культур.

В заморозном состоянии перемещения ионов и радикалов уменьшаются, и в связи

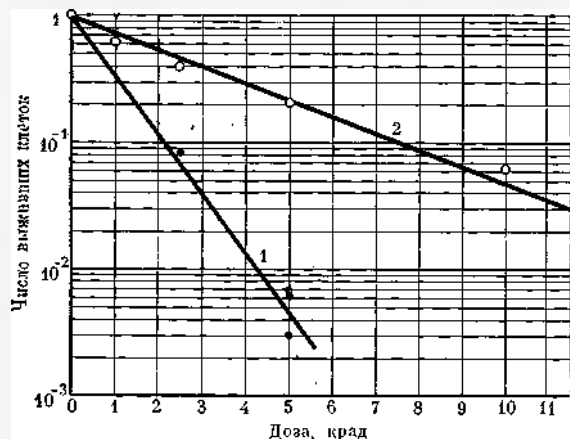


Рис. 13. Увеличение числа клеток, погибающих от рентгеновских лучей [67a]

1 — опыт при 10^{-5} мм рт. ст.;

2 — контроль при 760 мм рт. ст.

с этим радиорезистентность бактерий возрастает в 9 раз по сравнению с устойчивостью бактерий, находящихся при той же температуре, но в жидкой среде. В данном случае идет речь о температуре, при которой происходит переход воды в лед. Влияние внешних условий на радиорезистентность может быть проиллюстрировано тем, что *E. coli* устойчивее к ионизирующей радиации в анаэробных условиях в 3 раза (рис. 13), в присутствии цистеина в 2,5 раза, при замораживании клеток на воздухе в 3—6 раз и при замораживании, производимом в отсутствие кислорода, — в 10—12 раз. Высушенные клетки организмов менее чувствительны к радиации, чем содержащие обычное количество воды. Повышение чувствительности в аэробных условиях связано с характером возникающих радикалов: $H^+ + O_2 \rightarrow H_2O$. Вода же — основной источник вредных радикалов и окислительных соединений $H_2O \rightarrow H^+ + HO^-$, $2H_2O \rightarrow H_2O_2 + H_2$.

На все низшие организмы ряд веществ оказывает защитное действие, если эти вещества применяются до или во время облучения. К ним относятся тиолы, спирты, гликоли и ряд других органических соединений, обладающих радиопротекторным действием. Последние иногда применяют, чтобы доказать, что наблюдаемое в космическом объекте уменьшение числа мутаций зависит от радиации. Употребление этих веществ снимает эффект. Любой физический фактор, действующий на живые существа, обитающие на Земле, входит в число тех факторов, к которым организмы адаптировались в процессе

эволюции. В связи с этим интересно, что *Paramecium caudatum* и *Par. aurelia*, защищенные полностью от действия лучей, начинают размножаться медленнее, и нормальный рост наблюдается лишь при дозе 700 мр/год. Ионизирующая радиация оказывала на эти же объекты стимулирующее действие, и при дозе Co^{60} 600—39 000 мр/год наблюдалось ускорение роста культуры.

Ионизация при действии рентгеновских лучей происходит при 10 000—150 000 эв, т. е. при значительно больших величинах, чем ионизация, наблюдаемая при действии ультрафиолетовых лучей. Большие дозы ионизирующей радиации вызывают различные множественные изменения: окисление, разрыв водородных связей, полимеризацию и т. д. Все это приводит к нарушению синтеза нуклеиновых кислот, инаktivации ферментов, образованию токсических веществ, летальным мутациям и т. д. Продолжительность «жизни» образующихся радикалов невелика, но они могут выйти из зоны облучения и прореагировать с нуклеиновыми кислотами или белками.

Говоря о бактерицидном действии излучения, еще раз отметим, что оно обусловлено не интенсивностью радиации, а только количеством рад, адсорбированных организмом. Если при однократном облучении будет сразу поражена жизненно важная молекула, то для организма, уже имеющего невосстановимые поражения, вся последующая радиация клетки не будет иметь биологического эффекта. Для гибели бактериальной клетки необходимо некоторое время после начала облучения; за это время происходит реализация повреждающего действия ионизирующей радиации.

Оживленную дискуссию в радиобиологии вызвала теория мишени. Существуют аргументы за и против этой теории. Рассмотрим ее в связи с действием ионизирующей радиации на низшие организмы. Естественно, что размеры микроорганизмов позволяют проникать излучению в любую часть клетки. Возможность получить в результате случайного попадания смертельную дозу облучения одинакова у всех частей клетки. Следовательно, количество погибающих клеток должно быть прямо пропорционально количеству клеток, адсорбировавших кванты энергии. В действительности же количество погибших клеток всегда меньше, чем радиация, адсорбированная микроорганизмами. Это побудило ввести понятие о чувствительной зоне бактерий.

Такая зона существует в той части клетки, где адсорбированные кванты вызывают смерть, и эта часть равна 5% общего объема микроорганизма. Зная размеры мишени для различного характера излучений и объем чувствительной зоны, можно, поделив второе на первое, получить общее число чувствительных мишеней у бактерий. Гибель бактерий от действия ионизирующей радиации напоминает реакции первого порядка.

Однако против теории мишени может быть выдвинуто несколько возражений. Во-первых, кривая отмирания не носит экспоненциального характера, и характер кривой легко варьирует. Во-вторых, между кривой гибели и полученной дозой нет прямой зависимости, о чем уже говорилось выше. В-третьих, содержимое клетки неоднородно и воздействия излучения на жизненно важные молекулы неминуемо заканчиваются смертью клетки. В качестве примера локализации таких молекул можно указать на 250 генов, имеющих в клетке *E. coli*. Наряду с этим возможно лучевое поражение скопления липидов, которое не приведет к гибели микроорганизма. В-четвертых, при облучении диплоидов и полиплоидов все аллели гена должны быть инактивированы до наступления смерти, а это невозможно, так как по теории мишени изменения возникают в одной молекуле. В-пятых, при теории мишени становится необходимой связь между кривой образования мутаций и кривой гибели клеток. Между тем кривая возникновения мутаций может, достигнув определенного уровня, не повышаться, а отмирание клеток будет все возрастать. Теория мишени сильно стимулировала исследования в области экспериментальной радиобиологии, которые дали много ценных результатов.

Магнитное поле

Результаты, полученные при изучении физиологического действия магнитного поля, несколько противоречивы. Магнитное поле на Земле равно 0,5 э. Искусственно создаваемые магнитные поля могут быть равны 167 000 э и выше. При изучении действия магнитного поля, соответствующего 140 000 э, в течение двух часов у плодовой мушки *Drosophila melanogaster* и гриба *Neurospora crassa* мутанты не возникли. Светящиеся бактерии *Photobacterium fischeri* не изменяли интенсивности свечения. Однако яйца морского ежа после такого воздействия развивались медленнее, чем в контроле. Действие

магнитного поля (100 000 э) не вызывало у белых мышей патологической реакции, а у *Chlorella pyrenoides* не изменялись ни фотосинтез, ни дыхание. Однако слабое магнитное поле влияло на физиологию высших растений [40]. Низкочастотные магнитные поля (3—5 гц, 500—2000 э) вызывают патологические изменения у крыс [8].

По-видимому, большое значение имеет также продолжительность экспозиции. Так, при действии 14 000 э на бактерии в течение 24 час. происходило подавление их роста. После 28-дневной экспозиции при 5900 э молодые мыши теряли в весе, а некоторые самцы погибали. Чем выше организация исследуемого объекта, тем легче возникают изменения. Так, у человека уже 35 э вызывает легкую зубную боль и неприятный привкус во рту. Как бы ни было низко магнитное поле на Земле, оно входит в число привычных, постоянно действующих факторов на все живое. В связи с этим интересно отметить, что создание условий, в которых отсутствует действие магнитного поля, может приводить к нарушению нормального физиологического состояния экспериментальных животных. Однако этот вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

Высушивание клеток и биология ксерофитов

Клетки могут терять воду от различных причин. Так, дегидратация наблюдается при глубоком вакууме, очень низких температурах или при обычном высушивании, которое происходит при нормальном давлении и невысокой температуре, но в сухой атмосфере. Ниже будет рассмотрена только последняя возможность. Длительное сохранение жизнеспособности при значительной потере влаги у животных неизвестно. Высшие растения, например *Myrothamnus flabellifolia*, могут высухать до воздушно сухого состояния и длительное время сохранять способность к росту [5]. Синезеленые водоросли в высушенном состоянии оставались живыми в течение семи лет. Семена растений в этих условиях могут долго оставаться живыми. Всхожесть зерен пшеницы после их пребывания в течение 2000—3000 лет в погребениях в Египте в дальнейшем не отмечалась. Правда, иногда считают, что семена лотоса (*Nelumbo nucifera*), имеющие очень плотный и герметически закрытый экзокарпус, прорастали после пребывания в могильниках Азии в течение тысячи лет [115].

Вполне достоверна жизнеспособность микроорганизмов, изолированных из частиц почвы, приставших к корням растений, хранящихся 200—300 лет в гербариях. Это типичные почвенные микроорганизмы, и они перенесли длительное высушивание. Еще более убедительны посевы, сделанные из культур спорообразующих бактерий, сохранявшихся в течение 100—110 лет в коллекциях культур микроорганизмов и давших рост. Наиболее устойчивыми являются споры бактерий, а из неспоровых бактерий виды, содержащие воск и липиды (микобактерии, актиномицеты) или обладающие слизистой капсулой, например *Azotobacter*. Вопрос о том, содержат ли высушенные клетки некоторое количество связанной воды, остается открытым, так как только недавно стали применять ядерно-магнитный резонанс для обнаружения оставшейся воды. Микробиология как сравнительно молодая наука не располагает результатами специальных исследований, посвященных сохранению жизнеспособности клеток, длительное время находящихся в высушенном состоянии. Биохимия белков и нуклеиновых кислот также пока не может дать ответа на вопрос о том, в течение какого срока они будут обладать свойствами, которые необходимы для сохранения жизнеспособности клетки, пребывающей длительное время в анабиотическом состоянии. Попытки обнаружить живые микроорганизмы в каменной соли, возраст которой достигал 250 млн. лет, а также в метеоритах были безуспешными [1, 16, 62]. Однако накоплен очень большой опыт по сохранению жизнеспособности у клеток различных микроорганизмов, высушенных в вакууме при низкой температуре (лиофилизации). Это, конечно, не доказывает, что при очень длительном хранении клеток в лиофилизированном состоянии не произойдет денатурации или нарушения структуры белка.

Ни одно живое существо без поступления в него воды не может жить, расти и размножаться. Учитывая площадь земного шара, занятую океанами и морями, для очень многих растений и животных вопрос о недостатке воды возникнуть не может. Совершенно иная картина наблюдается на суше, где имеются пустыни. Вода в почве может быть физически связанной, т. е. удерживаемой почвенными частицами. Такая вода окружает частицы пленкой, состоящей из нескольких слоев молекул воды, которые настолько прочно связаны, что вода приобретает новые свойства: не проводит электрический ток, не замер-

зает при -78° и др. Максимальное количество воды, которое может находиться в физически связанном состоянии, обозначается максимальной гигроскопичностью. Менее прочно связанная с частицами почвы вода переходит в свободное состояние. Термодинамическая активная вода раствора (A_w) может быть выражена как отношение давления раствора (P_s) и давления пара чистой воды (P_w): $A_w = P_s/P_w$.

Определение A_w позволяет установить доступность определенного субстрата для различных микроорганизмов. Для большинства известных бактерий A_w лежит между 0,90 и 0,99, для галофильных бактерий A_w соответствует 0,75.

Все живые существа, способные размножаться при более низких значениях A_w , чем 0,75, относят к ксерофитам [116]. Так, следует привести следующие величины A_w . У *Aspergillus glaucus* рост происходит при $A_w = 0,70$, у *Saccharomyces rouxi* — 0,62, у грибов, выделенных с поверхности слив, — 0,60, у *Xenopsylla cheopis* — 0,5, у *Pleurococcus vulgaris* — 0,48, у *Lepisma domestica* — 0,45. Следует отметить, что употребляемый иногда термин «ксерофил» необоснован: как высшие, так и низшие растения лучше развиваются при значительном увлажнении субстрата. Ранее к «ксерофилам» относили растения, растущие в почве, имеющей относительную влажность 85—90%. Величина A_w дает более точную характеристику, чем относительная влажность почвы. Определяя отношение организмов к влажности, широко пользуются понятием максимальной гигроскопичности; однако при этом надо учитывать, что она меняется в зависимости от состава почвы, и поэтому желательно указывать содержание воды в весовых процентах. Так, максимальная гигроскопичность песчаных почв — 1%, суглинка — 3—5%, богатых гумусом черноземов — 10% [14].

В некоторых образцах песчаной почвы пустыни Сахары вода полностью отсутствовала, а в других ее содержание колебалось в пределах 0,8—1,8%. В районе Ин-Салаха за 4 года выпал 1 мм осадков. Во всей Центральной Сахаре сумма годовых осадков составляет 16 мм. Между тем, как будет указано ниже, в песках Сахары обнаружены самые различные микроорганизмы. По-видимому, это связано с дневными колебаниями температуры, которая в тени составляет 36° , а на солнце 50° . При понижении температуры паровая вода воздуха конденсируется и выпадает в капельно-жидком состоянии.

Таким путем почва Сахары может дополнительно получить 60—100 мм осадков в год. Вполне вероятно, что еще большие дневные колебания температуры на Марсе, достигающие 120°, могут приводить к аналогичным результатам. Из почв, хранящихся с влажностью, близкой к максимальной гигроскопичности, обычно выделяются грибы и актиномицеты [41]. Среди бактерий ксерофиты встречаются значительно реже. В песках Туркмении, влажность которых от 0,1% до 2,7%, была обнаружена жизнедеятельная микрофлора [14]. При закапывании стекол по методу Холодного-Росси в почву, влажность которой была 2,5%, через 7 дней на стеклах был виден мицелий гриба [9]. Если в эксикатор, на дно которого налита 10%-ная H_2SO_4 , поместить над кислотой предметные стекла, на поверхности которых имелись мелкие частицы почвы, то через 10—60 дней при 18—20° на стеклах наблюдается рост гиф грибов и мицелия актиномицетов при следующих условиях:

Почва	Максимальная гигроскопическая влажность, весовые %	Опытная влажность, весовые %
Светло-каштановая суглинистая	4,29	2,6; 3,6; 4,9
Солончаковый солонец	10,2	5,7; 3,1; 8,5
Темноцветная огородная	9,1	5,1; 6,9; 8,0

При микроскопии стекол видны тонкие гифы мицелия грибов; в частности, был обнаружен рост *Penicillium* и *Fusarium*. Для роста гиф нужно меньше воды, чем для образования конидий или спорангиев. Если ксерофитные грибы хорошо растут при 80—85% максимальной гигроскопичности, то для роста актиномицетов нужны более влажные условия. Образование небольших скоплений бактерий происходит при 4,43—6,20%, а в солончаковом солонце при 10,51—11,20% влажности. При низких значениях A_w скорость роста уменьшается и развитие организма замедляется.

Данные о том, что бактерии не могут быть так ксерофитны, как грибы и актиномицеты, побудили провести систематические поиски бактерий, обитающих в песчаных почвах пустыни Каракумы и Нубийской пустыни, таких форм, которые росли бы при очень низкой влажности субстрата. Среди многих изолированных штаммов оказались ксеро-

фитные виды [34, 105] *Micococcus oligonitrophilus*, *Mycobacterium rubrum*, *Mycobacterium smegmatis*. Маленькие пробирки, содержавшие смесь измельченного минерала лимонита и 2% огородной земли, помещались на дно большой пробирки, в которую был налит насыщенный раствор K_2SO_4 . В измельченный лимонит вносили клетки *Bacillus megaterium* и *Micococcus ruber*, затем большие пробирки вакуумировались и запаивались. Влажность измельченного лимонита в присутствии раствора K_2SO_4 равнялась максимальной гигроскопичности, что соответствовало 3,8% влажности. Высевы в начале и в конце опытов доказали, что в почвах пустынь существуют ксерофитные бактерии, растущие при столь низкой влажности [106]. Ранее считали, что бактерии могут развиваться только при более высокой влажности. Методика проведенных опытов более подробно изложена при описании исследований, проведенных в «Искусственном Марсе».

Из сказанного выше становится очевидным, что ксерофитные микроорганизмы должны обладать двумя физиологическими особенностями. Во-первых, они должны развивать такое внутриклеточное осмотическое давление, которое могло бы преодолеть силы, удерживающие воду на поверхности почвенных частиц. Уже давно известно, что экологическая ниша определяет осмотическое давление клетки. Так, у бактерий, обитающих на севере в подзолистых почвах, оно не превышает 4 атм., тогда как в южных районах оно равняется нескольким десяткам атмосфер. Среди галофильных микроорганизмов, обладающих повышенным осмотическим давлением, можно найти галофильную форму *Bac. megaterium*. Другие обитающие в почве штаммы этого вида не растут на средах с солью. При экспериментальной проверке оказалось, что галофильная форма *Bac. megaterium* одновременно является ксерофитом. Довольно подробно изучено осмотическое давление у осмофильных дрожжей, развивающихся в меде, варенье и т. д.

Вопрос о ксерофитности галофильных и осмофильных микроорганизмов пока не изучен. Однако не следует забывать, что при галофилии микроорганизмы адаптируются не только к высокой концентрации солей, но и к их специфическому действию. Подавляющее большинство галофилов развивается, как это видно из табл. 7, на среде с 50% глюкозы, и их осмофильность этим подтверждается; однако некоторые виды роста не дали. Вторая физиологическая особенность

Таблица 7. Рост галофильных и галотолерантных бактерий на питательной среде с предельной концентрацией хлористого натрия и на среде с глюкозой * [106]

Культура	Питательная среда с NaCl, %	Питательная среда с 50%-ной глюкозой
<i>Micrococcus aurantiacus</i>	30	+
<i>Micrococcus aurantiacus</i>	25	+
<i>Micrococcus tetragenus</i>	20	+
<i>Micrococcus tetragenus</i>	25	+
<i>Micrococcus corrallinus</i>	20	+
<i>Mycococcus ruber</i>	20	+
<i>Mycobacterium smegmatis</i>	20	—
<i>Pseudomonas sinuosa</i>	15	+
<i>Bact. album</i>	15	+
<i>Pseudobact. maris</i>	20	—
<i>Bac. aegypticus</i>	20	+
<i>Bac. amarificans</i>	20	+
<i>Bac. brevis</i>	25	+
<i>Bac. megaterium</i> — галотолерантный вариант	20—25	+
<i>Bac. pseudococcus</i>	20—25	—

* Культуры были выделены из залива Кара-Богаз-Гол О. Е. Тимук.

ксерофитных микроорганизмов заключается в том, что у них возник приспособительный механизм, задерживающий воду в клетке.

Так, у дрожжей *Cryptococcus albidus*, изолированных из сухих пустынных почв, при высушивании клеток сохраняется довольно много воды, присутствие которой было установлено с помощью ядерно-магнитного резонанса. При высушивании клетка становится непроницаемой для «задержанной» в ней воды. Различные химические методы обработки клеток не позволяют ее извлечь. Эта непроницаемость клеточной стенки или клеточного содержимого связана с уплотнением структуры белков и изменением их конформации, которые возникают в процессе высушивания [2].

Образование микробиоценозов в песчаных почвах пустынь возможно только благодаря существованию микроорганизмов, синтезирующих органическое вещество путем фотосинтеза. В песках Сахары в большом количестве были обнаружены микроскопические водоросли, способные размножаться в течение сравнительно короткого периода и обладающие способностью длительно находиться в анабиотическом состоянии. Обычно во-

доросли развиваются в поверхностных слоях почвы и среди них встречаются различные виды *Chlorella*, а также *Dictyosoccus coccintha*, а из синезеленых *Phormidium*, *Microcystis* и др. В меньшей степени в первичном синтезе органического вещества в пустыне участвуют хемоавтотрофные бактерии. Необычайно разнообразна гетеротрофная микрофлора, и в песках Сахары было обнаружено 38 видов грибов, главным образом *Aspergillus* и *Penicillium*, и ряд видов актиномицетов. В менее сухих почвах были найдены самые различные бактерии, в том числе нитрифицирующие, азотфиксирующие, разлагающие мочевину, денитрифицирующие, разлагающие целлюлозу, и др. Большинство из них относится к аэробам; анаэробов было меньше [9, 38, 82, 128]. Таким образом, выражение «безжизненная Сахара» лишено основания. Во всех пустынях, существующих на земном шаре, в почве обитает разнообразная активная и многочисленная микрофлора. В тех же участках, где в пустыне имеются растения, создаются симбиотические отношения между микроорганизмами и растениями. Так, в почве Саудовской Аравии, взятой из ризосферы *Artemisia*, содержится в 1 г несколько миллионов, а вне ризосферы только несколько тысяч клеток микроорганизмов. Условия жизни в пустынях имеют прямое отношение к космической биологии, так как основным фактором, лимитирующим жизнь земных микроорганизмов в условиях, имитирующих марсианские, является малое количество воды.

Действие газов

Действие, оказываемое различными газами на биологические объекты, представляет интерес по ряду причин. Газовый состав атмосферы различных планет варьирует, и это имеет прямое отношение к космической биологии. На Земле ряд газов (кислород, азот, аммиак, метан, водород, сероводород, углекислота, окись углерода, сернистый газ и др.) принимает участие в энергетическом или конструктивном обмене микроорганизмов, и эти процессы играют большую роль в круговороте веществ в природе. Вначале остановимся на некоторых общих положениях.

Некоторые газы обладают настолько сильным ядовитым действием, что убивают все живые организмы. К ним относятся: цианистый водород, сернистый газ, хлор, окись этилена, бромистый метил и др. За последние годы широкое распространение получила газо-

вая стерилизация, применяемая, в частности, при обеззараживании космических объектов. Имеются современные подробные справочники, в которых освещены эти вопросы [102].

Существуют инертные газы, не оказывающие при обычном давлении неблагоприятного действия на биологические объекты. К ним относятся аргон, неон, криптон, гелий, азот. Луи Пастер был первым, кто опроверг существовавшее в его время твердое убеждение, что жизнь без воздуха невозможна. Он не только открыл анаэробные маслянокислые бактерии, но экспериментально доказал, что кислород атмосферы действует на них как яд. В дальнейшем были открыты другие, строго анаэробные бактерии, и их жизнь также была невозможна в присутствии кислорода. Этот газ действует неблагоприятно при повышенном парциальном давлении на многие живые существа. Так, при давлении кислорода 15—44 атм. рост микроорганизмов, находящихся на мясе, подавляется. Наивысшая устойчивость микробов и высших организмов лежит между 2 и 10 атм. давления кислорода или 10—50 атм. воздуха, содержащего 21% кислорода. Чувствительность микроаэрофильных форм микроорганизмов ниже. Устойчивость бактерий к кислороду, содержащемуся в питательных средах в количестве до 35 мг/мл, резко снижается при повышении гидростатического давления [165]. Так, микроорганизмы хорошо растут в питательных средах, подвергающихся действию кислорода при давлении в 3 атм. или 45 атм. давления воздуха. Однако если питательная среда содержит 105 мг/л растворенного в ней кислорода, то в этой среде при гидростатическом давлении, равном 25 атм., бактерии уже не растут. Некоторые культуры через 4 дня при 25° в данных условиях полностью погибают. На другие формы микроорганизмов повышенное содержание кислорода действует угнетающим образом при более низком гидростатическом давлении в 5—10 атм.

Некоторые аэробные живые существа способны использовать следы кислорода, находящегося в атмосфере. Так, простейшие жгутиковые размножались при пропускании над ними азота, содержащего только 0,0005% кислорода [120]. Аэробные микроорганизмы могут потреблять при дыхании низкие концентрации кислорода скорее, чем его содержание в среде восстанавливается в результате диффузии. В частности, *Micococcus candidans* способен размножаться при содержании кислорода в среде, равном 0,001%. Если содер-

жание кислорода восполняется по мере его потребления, то аэробные бактерии могут размножаться в жидких средах, содержащих 0,02 мг/л кислорода, — это наименьшее количество, которое может быть установлено с помощью общезвестного метода Винклера. Приведенные данные говорят о том, что очень незначительное содержание кислорода в атмосфере Марса не может быть причиной, исключающей возможность жизни на этой планете.

Влияние каждого из физических факторов, имеющихся на Марсе, следует рассматривать во взаимодействии с другими факторами. Так, экологи обычно считают, что анаэробизм, или микроаэрофилия, у организмов коррелирует с большей устойчивостью к низкой температуре. облигатные аэробные формы менее резистентны к холоду. Вопрос о биологическом действии атомного и молекулярного кислорода, а также озона в концентрациях, обнаруженных на Марсе, остается открытым.

Исключительно важным является действие углекислоты на биологические объекты. Содержащаяся в земной атмосфере углекислота ассимилируется фотосинтезирующими высшими и низшими растениями, а также хемоавтотрофами. Однако увеличение концентрации углекислоты в атмосфере до известного предела усиливает фотоассимиляцию, и на этом основана подкормка углекислотой высших растений. Микроорганизмы, образующие при брожении CO_2 , например дрожжи, прекрасно размножаются в жидких средах, насыщенных углекислотой. В противоположность этому аэробные микроскопические грибы сильно угнетаются углекислым газом. Предлагались специальные, герметически закрывающиеся контейнеры, в которых хранились ягоды или фрукты в атмосфере углекислоты. Бактерицидное действие CO_2 отчетливо проявляется, если этот газ применяется под давлением в 50 атм. В этом случае *E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhus*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Diplococcus pneumoniae*, *Mycobacterium tuberculosis* и некоторые виды дрожжей в течение нескольких часов полностью погибают. Характер газа имеет большое значение; так клетки *E. coli* полностью сохраняли жизнеспособность, находясь в азоте при давлении в 120 атм., тогда как при том же давлении водорода погибало от 10 до 40% клеток.

Особенно неблагоприятное влияние оказывало быстрое повышение давления. Так, быстрый подъем давления до 160 атм. вызывал гибель до 90% клеток бактерий, находящихся

ся во взвешенном состоянии в воде [83]. Слабее действовали азот и углекислота, более сильный эффект давали окись азота и аргон. Естественно, что угнетающее действие углекислоты может быть только в том случае, если она действует при определенном парциальном давлении. Хотя атмосфера Марса и содержит очень много CO_2 , но на этой планете давление составляет только 4,5—7,5 мбар. Отсюда можно сделать два вывода. Во-первых, несмотря на высокое содержание CO_2 , она не может оказывать неблагоприятного действия на живые объекты. Во-вторых, если на Марсе существуют живые организмы, способные к фото- или хемосинтезу, то оба эти процесса должны отличаться от аналогичных земных процессов в физико-химическом, энергетическом и биохимическом отношении.

С эволюционной точки зрения интересны наблюдения экологов, которые установили, что если определенные микроорганизмы образуют в результате своей жизнедеятельности газы с более или менее ядовитым действием, то эти виды обладают значительно более высокой устойчивостью к действию этих газов и к тем изменениям, которые наступают в среде под их влиянием. Достаточно указать на те концентрации аммиака, которые переносят бактерии, разлагающие мочевину, и связанное с этим высокое значение рН среды, большие количества ядовитого сероводорода, образуемого десульфуризирующими бактериями, и т. д. С другой стороны, бактерии, окисляющие метан, водород, сероводород, окись углерода и иные газы, гораздо более устойчивы к этим газам, чем другие микроорганизмы. Такое повышение резистентности, несомненно, носит приспособительный характер и делает экологическую нишу недоступной для присутствия других микроорганизмов.

ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОВЕДЕННЫЕ НА КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЯХ И СПУТНИКАХ

Количество биологических исследований, проведенных на спутниках и космических кораблях, очень значительно. Их результаты обобщены в статьях обзорного характера [10, 13, 42, 44, 79, 84, 85, 134, 144, 169]. Эти данные легли в основу и тех исследований в области космической медицины, которые обеспечили безопасность полета космонавтов. Независимо от устройства космического корабля или спутника имеющиеся в них усло-

вия сильно отличаются от условий, существующих в космосе. В спутниках не оказывают своего действия вакуум, низкая температура, ультрафиолетовые лучи. Биологические объекты в спутниках подвергаются влиянию невесомости, вибрации, ускорению и сравнительно небольших доз космической радиации. Приходится говорить о суммарном действии факторов космического полета, которые оказывают друг на друга сильнее или слабее выраженное влияние. Для разграничения этих факторов производят опыты на Земле, изучается отдельно влияние ускорения, вибрации и т. д.

Существуют некоторые причины, затрудняющие получение безусловно доказательных и безупречных данных в этих опытах. При полетах наблюдается очень низкая радиация — обычно десятые доли рад [90], а радиобиологи в своих опытах применяют значительно более высокие дозы и работают с объектами, не обладающими необходимой повышенной радиочувствительностью. Поставить на Земле «классические» контроли бывает довольно сложно, случайные перепады температуры могут затруднить сопоставление опытов с контролями. Чувствительность биологических объектов к различным физическим воздействиям зависит от неоднородности материала, применяемого в различных опытах. Много зависит от сорта семян, линий насекомых и т. д. Все это объясняет отсутствие воспроизводимости результатов при повторных испытаниях и большое разнообразие в выводах, к которым приходят различные авторы.

Все биологические исследования, посвященные действию факторов космического полета, можно условно разбить на две группы. К первой относятся опыты, результаты которых повторены неоднократно и их можно отнести к общепризнанным. Вторая группа объединяет эксперименты, данные которых, представляя несомненный интерес, должны быть воспроизведены еще другими исследователями. К первой группе принадлежат исследования с *Chlorella*, у которой выживаемость клеток в полете равнялась 75,0%, а в контроле — 94,6% [157, 158]. Многократно наблюдалась статистически достоверная индукция бактериофага *E. coli* K-12, но прямая зависимость между продолжительностью полета спутника и индукцией фага была не всегда [11, 12, 13, 51, 143, 169]. Известные противолучевые средства β -меркаптопропил-амин и 5-метокситриптамиин снижают уровень фагопродуцирующей активности лизо-

генных бактерий [53]. При полете была обнаружена стимуляция роста у лука *Allium* сера [51]. Это наблюдение интересно тем, что аналогичный эффект был получен в лабораторных условиях в результате действия вибрации. Интересные результаты были получены с сухими семенами *Speris*; условия полета не сказались на всхожести и прорастании семян, но было установлено статистически достоверное повышение числа перестроек хромосом [77].

Пребывание в космосе повысило мутагенную чувствительность, и бывшие в полете, а в дальнейшем обработанные этиленмином семена дали 15,4% хромосомных аберраций, тогда как действие одного этиленамина дало только 6,5%. В опытах с семенами ячменя комбинированное действие факторов полета и этиленамина дало более высокий мутагенный эффект, чем каждый из факторов в отдельности. Применяя очень точные методы регистрации, удалось установить образование мутаций у растений кукурузы [42]. При полетах в спутниках у микроспор *Tradescantia paludosa* наблюдаются нарушения митоза (рис. 14), перестройка хромосом и нарушение ростовых процессов [42, 51, 52, 142]. У проростков пшеницы, моркови, томатов, гороха и др. в клетках первичных корней наблюдалось увеличение числа хромосомных аберраций [76]. Последние были также обнаружены после полета у семян ячменя и сосны [53, 76]. Факторы космического полета увеличивали частоту доминантных леталей и нерасхождение хромосом у дрозофилы [42, 53, 64, 130].

Ко второй группе исследований, посвященных действию факторов космического полета, следует отнести те эксперименты, результаты которых не воспроизводились в каждом полете. Так, хромосомные аберрации у гороха наблюдались в 4 случаях из 14, а у пшеницы — в 3 из 9 [42]. Повышение частоты хромосомных перестроек у проростков семян сосны, бобов, салата, огурцов, пшеницы, горчицы статистически не всегда были достоверны [149]. При полете спутника «Дискавер-17» выжило только 30% спор *Clostridium sporogenes* [42]. Даже если мы учтем, что во время полета была вспышка и космическая радиация возросла до 33 рад, главным образом за счет нейтронов, такой высокий процент гибели резистентных спор трудно объяснить.

В исследованиях с дрозофилой в трех опытах было достоверное увеличение частоты рецессивных леталей, в четырех других

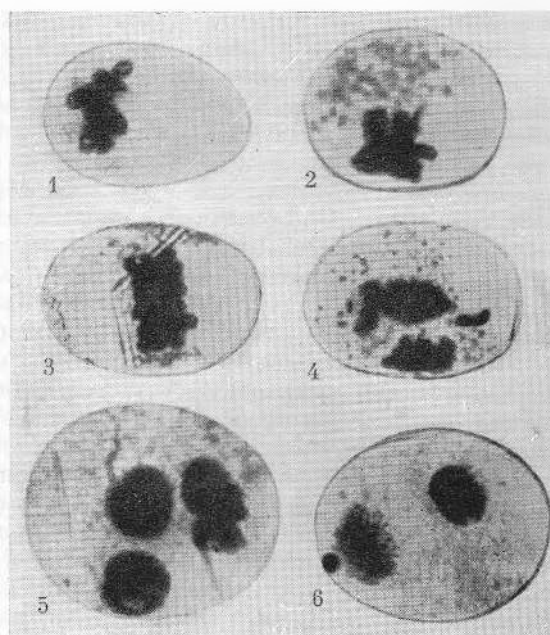


Рис. 14. Последовательность нарушения митоза у микроспор *Tradescantia paludosa* после полета [52]

опытах этого не наблюдалось [42]. Число таких примеров можно было бы значительно увеличить. Для экспериментатора любая невоспроизводимость ранее полученных данных связана с необходимостью указать на причины такого расхождения результатов, а в настоящее время дать такое объяснение невозможно. Повышение мутабельности у *E. coli* не гармонирует с отсутствием такого же эффекта у других видов бактерий, находящихся в полете [42].

Факторы космического полета, как мы видели выше, не могут быть отнесены к сильнодействующим. Этот вывод подтверждается тем, что в ряде случаев полет в космосе не вызывал заметных нарушений в жизнедеятельности биологических объектов. Ни уменьшения выживаемости, ни изменения обмена не было установлено при полете у *E. coli*, *Staphylococcus aureus*, *Clostridium butyricum*; не изменялась также жизнеспособность вирусов гриппа, табачной мозаики, а также частиц фагов Т-2 и 1321. Не было мутаций у гаплоидных, диплоидных дрожжей и *Vac. brevis*; количество аукоотрофных мутаций у бактерий не изменялось [42], а количество пигментных крапчатых или морфологических мутаций у *Drosophila* было одинаковым в опыте и контроле. Не было зарегистриро-

вано генетического эффекта у намоченных, радиочувствительных семян лука, диплоидной и тетраплоидной гречихи; частота хромосомных aberrаций у левкоя фиолетового не повышалась. У традесканции наблюдалось после полета цветение (рис. 15).

Условия полета не оказали существенного воздействия на хромосомы зародыша сухих семян сосны, моркови, пшеницы яровой и озимой, салата и горчицы [42]. Прорастание и развитие семян ряда растений протекало нормально, и содержание в них белка, липидов, крахмала и аминокислот не изменялось. После полета определялась частота рецессивных леталей в хромосомах самцов и самок дрозофилы. Частота мутаций в опыте и контроле была одинаковой. Гибели яиц дрозофилы во время полета не наблюдалось, а эмбриональное развитие яиц *Parascaris equorum* (лошадиной аскариды) после полета было нормальным. Как правило, доминирующих летальных мутаций у *Habrobracon* (наездника) не бывает. После полета клетки культуры HeLa, фибробласты, клетки амниона человека оказались способными к росту и размножению. Исключительную устойчивость проявили кожные лоскуты кролика и человека, так как они сохранили приживае-

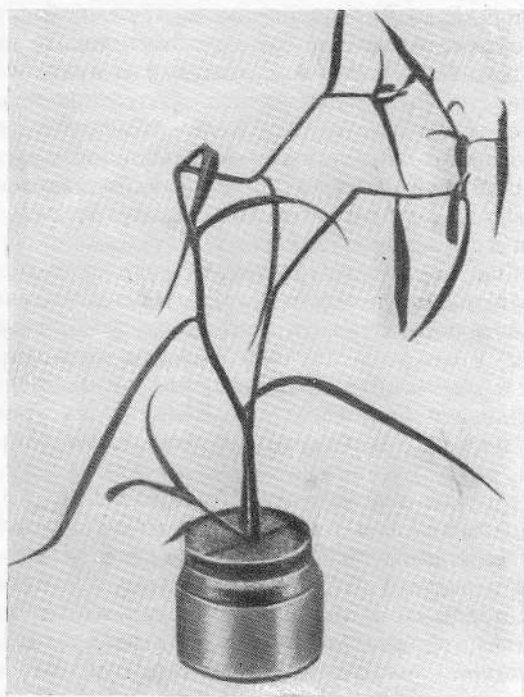


Рис. 15. Традесканция с цветами, распустившимися во время полета [7а]

мость (аутотрансплантацию) после пребывания в космосе. У летавших степных черепах явных патологических изменений не установлено [152].

В некоторых экспериментах факторы космического полета оказывали определенное стимулирующее действие. Так, сухие семена пшеницы, салата, горчицы, ячменя, бобов, гороха, моркови, огурцов, томатов после полета прорастали лучше, чем в контроле. Прорастание луковицы лука репчатого явно ускорялось [7]. Наблюдалась также стимуляция прорастания спор и роста мицелия у актиномицетов [42]. Влияние комплекса факторов полета проявляется в более поздний период, тогда как радиационные повреждения прямо связаны с физиологическими процессами, протекающими в клетках. В связи с этим неоднократно производили облучение изучаемых объектов до, во время или после полета, и это позволило хотя бы частично выяснить взаимодействие, существующее между факторами полета. Удобными для изучения объектами были яйца или личинки насекомых. Куколки мучного хруща *Tribolium confusum* облучались γ -лучами во время полета спутника. По сравнению с контролем (облучение на Земле) число насекомых с аномалией в развитии крыльев увеличилось с 29,9 до 44,8% [67, 150]. Таким образом, факторы полета усиливали изменчивость. Аналогичные опыты были проведены с личинками *Drosophila melanogaster*, и при этом оказалось, что у облученных и находившихся в спутнике личинок разрывы хромосом, часто сопровождающиеся утратой части хромосомы, рецессивные летальные мутации и более раннее развитие наблюдалось более часто, чем у облученных, но оставшихся на Земле личинок. По-видимому, в спутнике невесомость вызывает нерасхождение хромосом и образование хромосомных транслокаций [64].

Во время полета спутника яйца *Habrobracon* подвергались действию радиации, что привело к нерасхождению хромосом и, как следствие, к снижению вылупляемости личинок по сравнению с контролем. У спермы этого насекомого, не облучавшейся, но бывшей в полете, в три раза увеличилось количество рецессивных летальных мутаций. У насекомых, бывших в полете и облучавшихся, резко снизилась активность фермента ксантидегидрогеназы. Интересно, что от вибраций, соответствующих тем, которые наблюдаются при подъеме и спуске космического аппарата, частота мутаций спермы увели-

чилась в три раза по сравнению с контролем [65]. Облучение культуры лейкоцитов (180 рад β -облучение) повлекло к повышению после полета частоты одноударных аберраций, в том числе хромосомных делений. Облучение во время полета давало определенный эффект. Однако в опытах с диплоидными дрожжами *Sacch. ellipsoideus*, гаплоидными *Zygosacch. Baili*, водородными бактериями, семенами салата и гороха было показано, что факторы полета не влияют на результат последующего облучения в дозе до 160 крад [90]. Этот результат противоречит наблюдениям, в которых облучение после полета также давало генетический эффект. Как следовало ожидать, облучение до полета (1—10 крад) приводит к возрастанию у сухих семян салата (*Lactuca sativa*) количества клеток с хромосомными аберрациями и возникновению других радиобиологических эффектов.

Клетки гаплоидной и диплоидной формы дрожжей *Sacch. cerevisiae*, сухих семян *Crepis capillaris*, *Arabidopsis thaliana*, *Chlorella vulgaris* подвергались до полета действию γ -лучей (Cs^{137}), дозы варьировали от 3,0 крад до 30 крад. Факторы космического полета по сравнению с контролем уменьшали выживаемость проростков *Arabidopsis*, уменьшали урожайность *Chlorella*, усиливали мутабельность ее и дрожжей и частоту хромосомных аберраций в клетках меристемы корня *Crepis*. Таким образом, полет усиливал негативный эффект облучения у объектов по всем показателям. Однако в то же время космические факторы не влияют на радиочувствительность изучавшихся объектов в генетическом отношении [77]. Применение в спутниках щитов из алюминия или меди защищает объекты от ионизирующей радиации [154].

Аналогичные исследования были проведены с *Tradescantia*, облучавшейся в спутнике с помощью Sr^{85} . Одни контрольные растения находились в спутнике и были защищены вольфрамовым щитом, другие контрольные растения были на Земле. В итоге оказалось, что размеры клеток, количество соматических мутаций и хромосомных аберраций у опытных и контрольных растений были одинаковыми. Однако было нарушение образования пыльцы, а клетки кончика корня и микроспоры имели нарушение митоза, что, по-видимому, связано с влиянием невесомости на облученный объект [143].

Несмотря на большое число проведенных исследований, четких данных о взаимодействии

факторов космического полета известно мало. По-видимому, основная причина заключается в том, что на Земле воспроизвести невесомость невозможно. В связи с этим интересно сопоставление данных, полученных параллельно на клиностате. В условиях истинной невесомости длина проростков пшеницы увеличивается на 14—17%, количество делящихся клеток снижается на 20—43%, а объем ядра увеличивается на 13—26%. В опытах на клиностате этого не наблюдается [75, 76]. Указанный выше эффект объясняется тем, что в опытах с клиностатом наблюдается только имитация невесомости, а не комплекс факторов, действующих в условиях полета спутника. На космическом корабле невесомость не мешает откладке яиц и развитию дрозофилы, но личинки самцов развивались значительно хуже личинок самок [52]. У клеток *Tradescantia* наблюдалось гораздо чаще нарушение митоза, чем в контроле, что также связывают с невесомостью [52]. Опыты с проростками овса, проведенные на двухосевом клиностате, показали, что при трехдневной экспозиции пороговое ускорение для стебля равнялось $10^{-5}g$ и $10^{-6}g$ для корня.

Значительно меньше исследований было проведено с биологическими объектами, под-

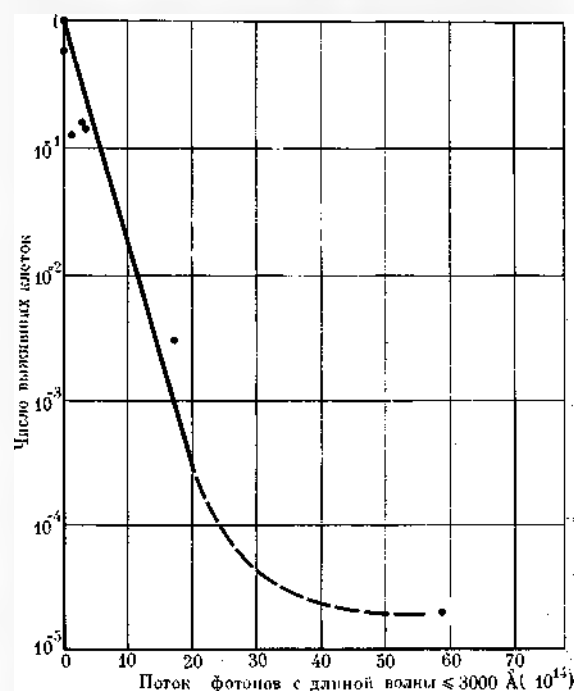


Рис. 16. Действие солнечной радиации на количество T_1 [118]

вергавшимися экстремальным факторам, имеющимся в свободном космосе. Для этого применялись ракеты, стратостаты и спутники, в которых была предусмотрена возможность экспозиции объектов в космосе. После подъема ракеты и пребывания на высоте 150 км в течение 3 мин. жизнеспособность частично сохранялась у спор *Vac. subtilis*, конидий *Penicillium roqueforti*, колифага T_1 , вируса полиомиелита. Основная причина гибели — солнечные лучи, и тонкие экраны из металла (880 Å Au, 1400 Å Al) полностью защищают изучаемые объекты от гибели [99, 101]. В аналогичном опыте с колифагом T_1 (рис. 16) наблюдалось быстрое отмирание, и если контроль принять за единицу, то после кратковременной экспозиции сохранилось $2 \cdot 10^{-3}$ частиц фага [100]. В экспериментах на Земле установлено, что при 1633 Å колифаг T_1 погибает скорее, чем при 2537 Å, т. е. при той длине лучей, которая считается наиболее бактерицидной [118].

Опыты с ракетами и стратостатами показали, что в ионосфере и стратосфере на *E. coli* и *Vac. subtilis* наиболее сильное действие оказывают ультрафиолетовые лучи (200—300 нм), тогда как вакуум и низкая температура такого действия не оказывают. Проникающая радиация имеет сравнительно небольшое значение. После облучения в стратосфере у *E. coli* возможна фотореактивация [133]. Незначительный эффект, наблюдавшийся в приведенных выше опытах, объясняется, по-видимому, кратковременностью эксперимента. Исследования, проведенные на космическом корабле, показали значительно меньшую устойчивость различных биологических объектов. Так 6-часовое действие факторов открытого космоса на бактериальные споры, конидии грибов и фаги привело к тому, что жизнеспособными сохраняются только 10^{-4} . Довольно устойчивыми оказались различные вирусы. Если выживаемость в контроле принять за 1, то выживаемость вируса оспы была 0,2, гриппа PR8 — 1,0, вируса табачной мозаики — 1,0, собачьего гепатита — 1,0, инфекционного бычьего ринотрахеита — следы. Активность фермента лактикодегидрогеназы в этих опытах — 0,2 [95]. Однако в другой серии опытов, проведенных на высоте 300 км и продолжавшихся 16 час. 47 мин, выживаемость конидий *Penicillium roqueforti* составила $3 \cdot 10^{-5}$, а колифага T_1 — $2 \cdot 10^{-6}$ [96]. Естественно, напрашивается вывод о том, что длительное пребывание в космосе для живых организмов, не защищенных от действия солнечных лучей, смертельно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ, СУЩЕСТВУЮЩИХ НА ПЛАНЕТАХ

Создать условия, имеющиеся на других планетах, и изучить жизнеспособность земных существ в этих условиях — задача, которая была разрешена только после возникновения космической биологии как самостоятельной науки. Эти исследования в основном были проведены с приборами, имитирующими условия на Марсе, и они должны были дать ответы на следующие вопросы.

1. Могут ли земные организмы сохранить жизнеспособность в этих условиях?
2. Влияет ли сложность организации живых существ на их устойчивость?
3. Существуют ли организмы, не только не погибающие, но и размножающиеся в этих условиях?
4. Как влияют на земные существа отдельные факторы и какие из них оказывают наиболее неблагоприятное влияние?

Исследования в этом направлении, в частности, должны были выяснить возможность размножения микроорганизмов в марсианских условиях, что в известной мере говорило бы о возможности существования жизни на Марсе.

Одновременно решался вопрос о возможности размножения земных микроорганизмов, попавших с космическими объектами на поверхность Марса. Последнее имеет непосредственное отношение к стерилизации космических объектов.

Описания основных особенностей устройства приборов «Искусственный Марс» в литературе совпадают, что легко объясняется необходимостью воспроизвести в приборе одинаковые физические и физико-химические условия [34, 91, 92, 103]. Конечно, следует оговориться, что по мере получения все новой и новой информации о Марсе с помощью космических объектов, пролетавших мимо Марса или опускавшихся на его поверхность, условия в приборах приходилось изменять.

«Искусственный Марс» представляет собою прибор со стеклянной камерой, в которой создаются марсианские условия. Прибор имеет программирующее устройство, изменяющее параметры условий внутри камеры.

Во-первых, происходят колебания температуры от $+30$ до -60° каждые 12 час., что соответствует половине марсианских суток. Эти колебания не должны быть резкими, они происходят постепенно. Очень удобным по техническим причинам оказалось помещение

исследуемого материала на конец медного стержня, находящегося в стеклянной камере и обладающего большой теплопроводностью.

Во-вторых, в стеклянной камере с помощью насоса создается пониженное давление атмосферы, соответствующее марсианскому.

В-третьих, камера наполняется газовой смесью. В первых опытах она состояла из углекислоты, азота и аргона. Сейчас применяется смесь, состоящая в основном из углекислоты.

В-четвертых, земные организмы, подвергавшиеся действию марсианских условий, облучались ультрафиолетовыми лучами. Для облучения исследуемого материала наиболее целесообразно иметь в стеклянной камере небольшое окошко, сделанное из кварцевого стекла, пропускающего ультрафиолетовые лучи. Иногда общая доза ультрафиолетовых лучей, полученная изучаемыми объектами, за 3 недели достигала $33,6 \cdot 10^8$ эрг/см². Общее представление об устройстве всего аппарата в целом дает схема на рис. 17, а о внешнем виде прибора — рис. 18. В опытах ряда авторов облучение ультрафиолетовыми лучами не производилось.

В исследованиях с «Искусственным Марсом» исключительное значение имеет влажность атмосферы и субстрата, в котором находятся исследуемые объекты. В большинстве случаев исследовались самые различные микроорганизмы, но они находились в различных субстратах: плотной или жидкой питательной среде, на поверхности мембранных фильтров, в почве, измельченном минерале лимоните и т. д.

Если воспроизведение вышеперечисленных четырех условий не представляет трудностей, то поддержание постоянной низкой влажности субстрата было исключительно сложным.

Ниже этот вопрос будет рассмотрен при изложении результатов экспериментальных исследований.

Краткие сведения об условиях и результатах опытов, имеющих в литературе, приведены в табл. 8.

Эти данные позволяют сделать вывод о том, что многие микроорганизмы, в том числе различные бактерии и грибы, сохраняют жизнеспособность после пребывания в приборе «Искусственный Марс». В некоторых опытах их жизнеспособность сохранялась в течение 6—10 месяцев. Подавляющее большинство опытов было проведено при давлениях, значительно более высоких, чем на Марсе.

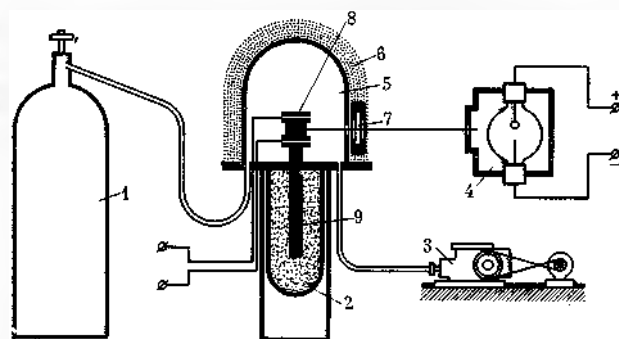


Рис. 17. Схема устройства прибора «Искусственный Марс» [168]

- 1 — баллон с газовой смесью;
- 2 — сосуд с охлаждающей смесью;
- 3 — насос;
- 4 — лампа, дающая ультрафиолетовые лучи;
- 5 — камера для исследуемых объектов;
- 6 — термоизоляционная камера;
- 7 — «окошко» из кварцевого стекла;
- 8 — элемент для нагревания;
- 9 — медный стержень

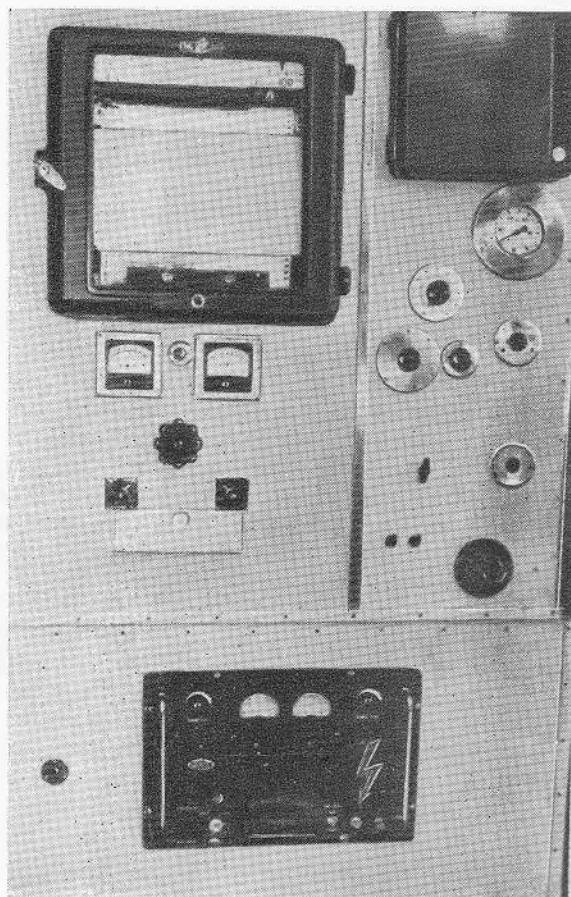


Рис. 18. Внешний вид прибора «Искусственный Марс» [168]

Таблица 8. Выживаемость и рост организмов в условиях, имитирующих марсианские

Организм	Выживаемость, месяцы	Влажность, %	Температура, °C	Давление, мм рт. ст.	N ₂ , %	CO ₂ , %	Субстрат	Автор
<i>Clostridium</i> , <i>Corynebacteria</i> , тонкие короткие палочки	10	1,0 или меньше	От —25 до +25	65	100		Почва	Davis, Fulton [72]
<i>Clostridium tetani</i>	2	1,0	От —60 до +25	85	95	0,3	То же	Hawrylewicz, Ehrlich [92]
<i>Bac. cereus</i>	2	0,5% от веса почвы	От —20 до +25	65	94	2,2	»	Roberts, Wynne [139]
<i>Clostridium botulinum</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i>	10	Лиофилизация	От —25 до +25	65	95	0,5	Лава с почвой	Hawrylewicz, Gowdy, Ehrlich [93]
Анаэробные спорообразующие <i>Clostridium</i>		Низкая	От —60 до +20	76	95	5	Почва	Packer, Scher, Sagan [131]
Анаэробные неспорообразующие бактерии: <i>Pseudomonas</i> , <i>Rhodopseudomonas</i> , <i>Clostridium sporogenes</i>	Рост	8,4	От —25 до +23	65	94	2,0	То же	Roberts, Irvine [138]
Озимая рожь	0,6	Влажно	От —10 до +23	76	98	0,24	»	Sigel, Halern, Ginsmarro, Renwick, Davis [146]
Горох, бобы, лук, рожь, сорго, рис	0,3	Влажно	+25	75	100	0	Бумага	Sigel, Ginsmarro, Letterell [147]
<i>Bacillus subtilis</i> var. <i>globigii</i>	3	0,5 от веса субстрата	От —60 до +25	85	93,8	2,2	Фельзит + лимонит (1:1)	Hagen, Hawrylewicz, Ehrlich [91]
<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus oryzae</i> , <i>Mucor plumbeus</i> , <i>Rhodotorula rubra</i>	6 час.	Очень сухо	От —60 до +25	76	95,5	0,25		Zhukova, Kondratyev [168]
Вегетативные бактериальные клетки	Погибают							
Споры <i>Bac. subtilis</i> , <i>Bac. cereus</i>	Прорастают	7,0		85	93,8	2,2		Hawrylewicz, Hagen, Ehrlich [94]
<i>Bac. subtilis</i> , <i>Bac. cereus</i>	Рост	8,0	От —65 до +25	Парциальное давление кислорода не ниже 15 мм	—	—	—	Hawrylewicz, Hagen, Ehrlich [95]
Неспоронозные бактерии	Рост	В присутствии воды	От —70 до +25	Условия соответствуют марсианским	—	—	—	Joung [112]
Спорообразующие бактерии	Погибают	Отсутствие влаги			—	—	—	
Спорообразующие палочки	0,5 рост	3,0	От —60 до +28	7	40	50	Лимонит с почвой	Imshenetsky, Abyzow, Voronov, Kuzurina, Lysenko, Sotnikov, Fedorova [103]
<i>Micrococcus</i> sp., <i>Bac. aegypticus</i> , <i>Bac. zooglyticus</i> , <i>Mycococcus oligotrophilus</i>	0,5	3,8	От —60 до +28	7	20	80	То же	Кузюрина, Якшина [34]

Таблица 8 (окончание)

Организм	Выживаемость, месяцы	Влажность, %	Температура, °C	Давление, мм рт. ст.	N ₂ , %	CO ₂ , %	Субстрат	Автор
Неспорообразующие бактерии и <i>Mycosoccus oligonitrophilus</i>	0,5 рост	3,0	От -60 до +28	7	20	80	Лимонит	Imshenetsky, Kuzurina, Jakshina [105]
<i>Mycosoccus ruber</i> , <i>Bac. megaterium</i>	3 рост	3,8	От -60 до +28	5,3	20	80	Тонкие сухие пленки агара	Imshenetsky, Kuzurina, Jakshina [106]

В ранее проведенных опытах в атмосфере преобладал азот, тогда как в действительности должно быть очень много углекислоты. Высшие растения переносят влияние марсианских условий только в тех случаях, когда опыт проводился при плюсовой или не очень низкой температуре. Условия, соответствующие марсианским, не пригодны для размножения простейших.

Изучение каждого в отдельности физического фактора или их комбинаций выяснило, что ультрафиолетовые лучи в дозах, действующих на поверхности Марса, являются абсолютно смертельными для всех изучавшихся микроорганизмов. Однако клетки микроорганизмов, покрытые даже очень тонким слоем измельченного грунта, полностью защищены от их действия. В экспериментах микроорганизмы были смешаны с грунтом, поэтому в большинстве опытов облучения исследуемых объектов ультрафиолетовыми лучами не проводилось.

Что касается колебаний температуры, состава атмосферы и пониженных давлений, имеющихся в «Искусственном Марсе», то они не оказывали губительного действия на исследованные микроорганизмы.

Значительно меньше данных имеется о размножении различных земных микроорганизмов в марсианских условиях. Как оказалось, фактором, лимитирующим рост бактерий, всегда является только низкая влажность атмосферы и субстрата. Поэтому опыты, в которых изучаемый объект находился в жидкой или очень влажной среде, представляют меньший интерес, так как такие условия на Марсе маловероятны.

Исследования в этом направлении были сопряжены с методическими трудностями. Если измельченный лимонит, содержащий 2% огородной почвы и клетки бактерий, имел влажность 3,0—3,8%, то при пропускании даже увлажненной атмосферы Марса,

т. е. смеси из углекислоты и азота или аргона, происходило высушивание лимонита. Это побудило поставить в камеру «Искусственного Марса» один бокс с водой, а другой с раствором хлористого калия. В этом случае удавалось сохранить постоянную влажность лимонита, равную максимальной гигроскопической влажности, что соответствовало 3,8%.

Содержащиеся в лимоните клетки неспоросных или споросных бактерий, выделенных из почвы пустыни, размножались при такой небольшой влажности субстрата, как 3,0—3,8%. Это относилось к *Bacillus cylindrosporus*, *Mycosoccus ruber*, *Mycobacterium smegmatis*, *Mycosoccus oligonitrophilus*, галофильному штамму *Bacillus megaterium* (рис. 19, 20, 21, 22).

По-видимому, способность размножаться при очень низких влажностях субстрата является наиболее характерной особенностью марсианских организмов, если они действительно существуют на Марсе. Именно поэтому особенное внимание было уделено почвенным ксерофитным бактериям, размножающимся при очень низкой влажности субстрата. Для этого изучались микроорганизмы, выделенные из почвы пустынь, Арктики.

Наиболее совершенной в методическом отношении явилась следующая методика. На дно пробирки наливался насыщенный раствор сернистого калия. В пробирку помещалась маленькая пробирка, содержащая кусок предметного стекла продолговатой формы. На этом стекле находилась пленка агара, подсушенная после нанесения на нее взвеси клеток микроорганизмов. В дальнейшем воздух в пробирке заменялся «марсианской атмосферой», а затем в пробирке в результате откачивания снижали давление до 7 мм рт. ст. Пробирки запаивались и помещались в термостат при 30° (рис. 23).

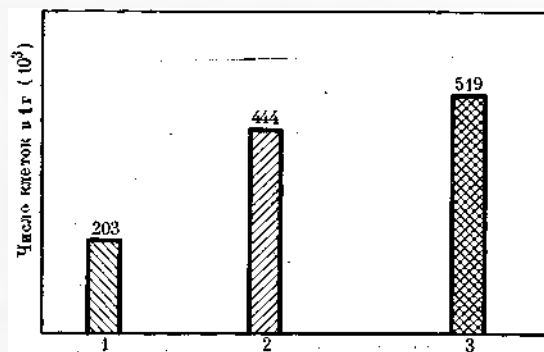


Рис. 19. Размножение *Bac. cylindrosporus* в условиях, имитирующих марсианские; влажность субстрата 3,8% [103]

1 — исходное количество; 2 — в контроле; 3 — в приборе «Марс»

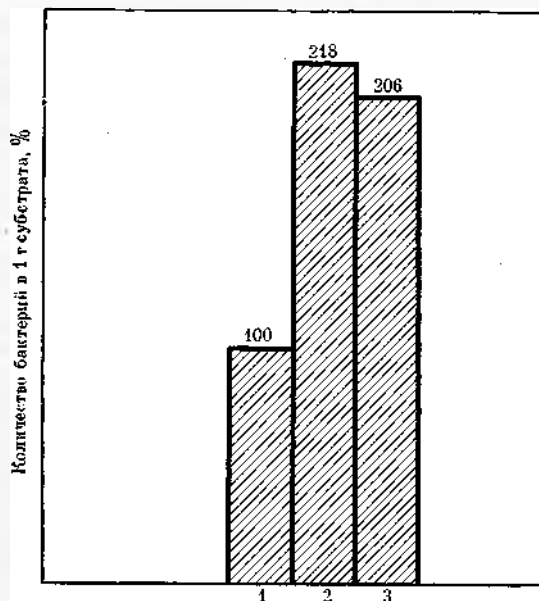


Рис. 20. Размножение пигментных микроорганизмов, изолированных из почвы Антарктиды; влажность субстрата 4%

1 — контроль (исходное количество клеток, внесенное в субстрат);
2 — *Mycosoccus ruber*;
3 — *Mycobact. smegmatis*

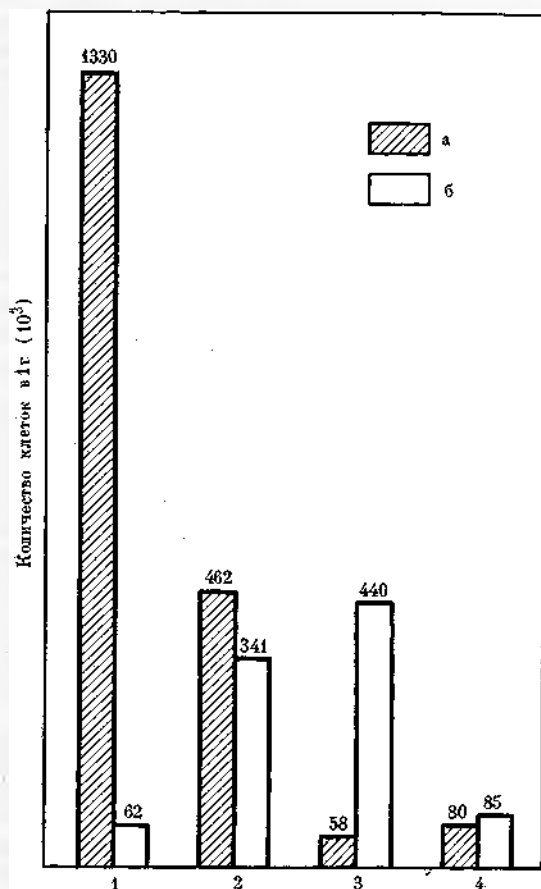


Рис. 21. Размножение бактерий в приборе «Искусственный Марс»; влажность измельченного лимонита 3,8% [105]

а — исходное количество клеток;
б — количество клеток через 14 дней;
1 — *Bac. zooglycicus*;
2 — *Micrococcus* sp.;
3 — *Mycosoccus oligonitrophilus*;
4 — *Bac. aegypticus*

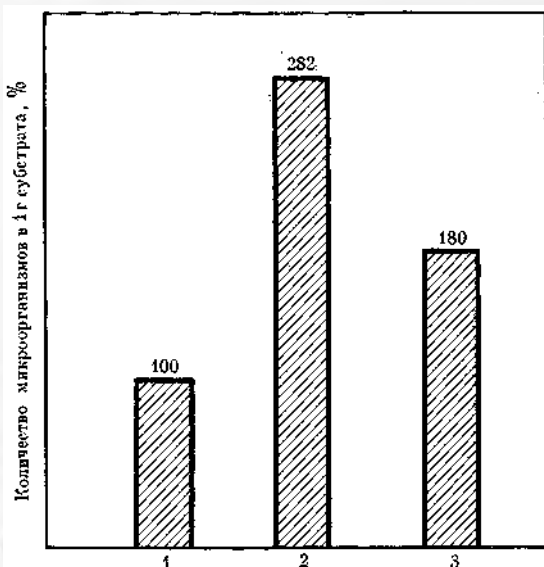


Рис. 22. Размножение галотолерантного штамма *Bac. megaterium* в приборе «Искусственный Марс»

1 — контроль (исходное количество клеток в 1 г субстрата принято за 100%);
2 — посев на смесь: лимонит + фельзит (1:1) + огородная почва (2%);
3 — посев на смесь: лимонит + фельзит (1:1) + торф (2%)

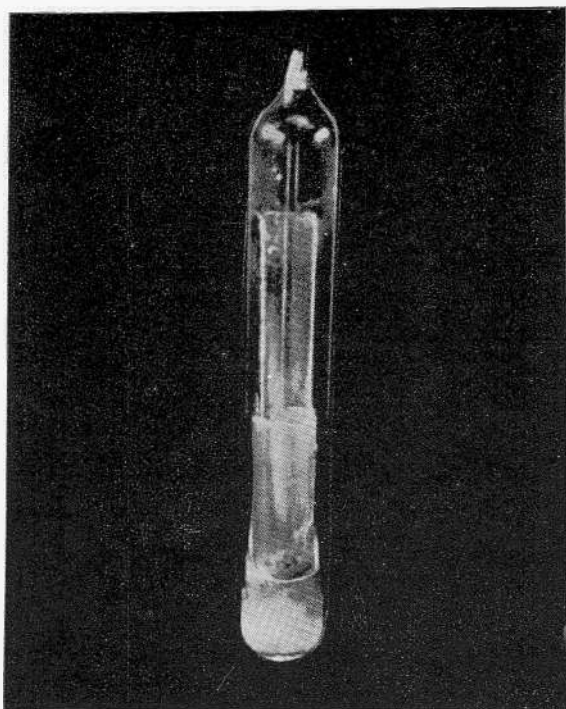


Рис. 23. Рост *Mycosoccus ruber* на агаровой пленке в запаянной пробирке, содержащей 10%-ный раствор K_2SO_4 [106]; влажность пленки 3,8%

Микроскопия и микрофотографирование посеянных вначале клеток микроорганизмов и аналогичные операции, проведенные через несколько дней, доказывали, что в этих условиях бактерии размножаются (рис. 24, 25). Влажность пленки агара не превышала 3,8%, так как такая влажность устанавливается над насыщенным раствором сернокислого калия. Пользуясь той же методикой, вместо стеклянной пластинки в маленькую пробирку можно поместить измельченный лимонит и бактерии, а ее в свою очередь поместить в большую пробирку с насыщенным раствором сернокислого калия. После понижения давления и введения смеси газа пробирка запечатывается. Эти исследования в области космической биологии позволили установить новые факты, представляющие интерес для почвенной микробиологии. Раньше обычно считалось, что даже ксерофитные бактерии могут размножаться только в почве, имеющей более высокую влажность.

На Марсе часты пылевые бури, и поэтому была сконструирована особая камера, в которой имитировались такие бури. Одновременно можно было изменять барометрическое дав-

ление, температуру, газовый состав атмосферы. Клетки *Bac. cereus*, *Bac. subtilis*, *E. coli*, *Serratia marcescens* и *Staph. aureus*, находясь в результате вызванной искусственной бури во взвешенном состоянии с частицами почвы, подвергались действию ультрафиолетовых лучей (2400—2800 Å). Чтобы получить марсианскую дозу, достаточно 55-минутное действие при дозе, равной $2,6 \cdot 10^4$ эрг/сек⁻¹. Быстрая гибель бактерий наблюдается при более высокой дозе 10^5 — 10^6 эрг/см⁻² (рис. 26).

ДЕЙСТВИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ И ПОИСКИ ВНЕЗЕМНОЙ ЖИЗНИ

Данные о том, как относятся земные организмы к экстремальным условиям, очень ценны при обсуждении проблемы существования жизни на других планетах. Эти экстремальные условия неодинаковы на различных планетах, но характер взаимодействия этих условий и организмов должен быть сходен с тем, что наблюдается на Земле. Это связано с общей предпосылкой о том, что при поисках жизни вне Земли нужно исходить из земных представлений о жизни.

Как было изложено выше, ксерофитные земные микроорганизмы размножаются в условиях «Искусственного Марса». Следовательно, экстремальные факторы, имеющиеся на Марсе, не угнетают размножения некоторых земных микроорганизмов. Это позволяет сделать два вывода.

Во-первых, условия на Марсе не настолько неблагоприятны, чтобы с полной категоричностью исключить существование жизни на этой планете.

Во-вторых, не исключена возможность размножения земных микроорганизмов, попавших на Марс с космическими объектами.

Исходя из характера экстремальных факторов, имеющихся на Марсе, можно высказать некоторые предположения о возможной там жизни. Самые поверхностные слои грунта едва ли содержат живые клетки, так как дозы ультрафиолетовых лучей, падающие на Марс, весьма значительны. Возможно возникновение, помимо нам известных (пигменты и др.), новых механизмов резистентности, или же вся жизнь расположена под слоем грунта. Это не может помешать фотосинтезу, так как земные водоросли осуществляют фотосинтез в почве, поверхностные слои которой полностью поглощают ультрафиолетовые лучи. Если фотосинтезирующие организмы и существуют на Марсе, то, по-видимому,

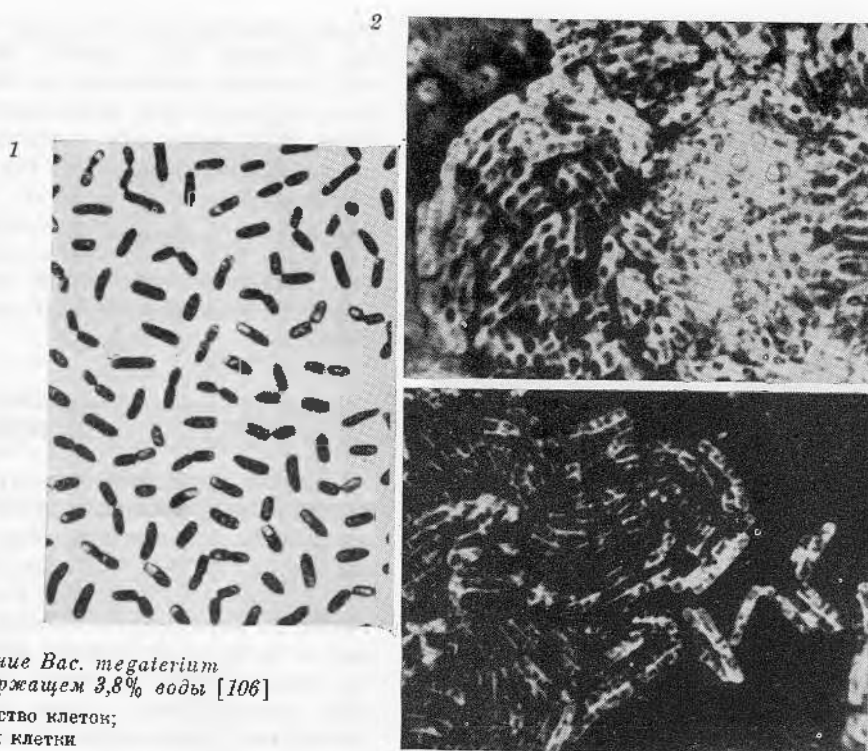


Рис. 24. Размножение *Bac. megaterium* на субстрате, содержащем 3,8% воды [106]

1 — исходное количество клеток;
2 — размножившиеся клетки

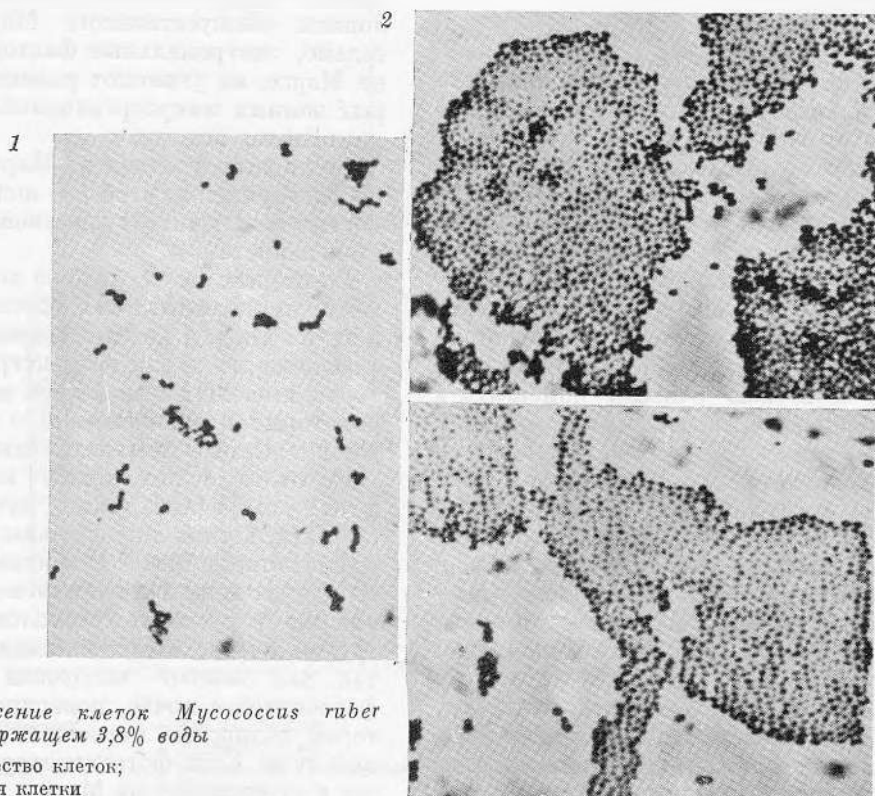


Рис. 25. Размножение клеток *Мусососсис рубер* на субстрате, содержащем 3,8% воды

1 — исходное количество клеток;
2 — размножившиеся клетки

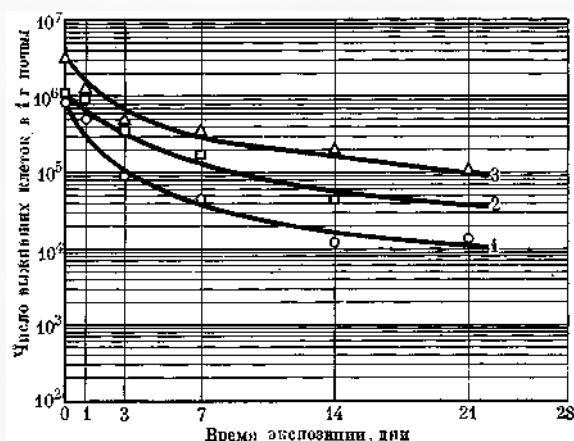


Рис. 26. Выживаемость клеток *Bac. subtilis* в различных условиях при создании облаков пыли [91a]

- 1 — 25°, земная атмосфера 760 мм рт. ст.;
- 2 — замораживание и оттаивание, искусственная марсианская атмосфера, давление 15 мм рт. ст. (действие ультрафиолетовых лучей);
- 3 — замораживание и оттаивание, земная атмосфера 760 мм рт. ст. (действие ультрафиолетовых лучей)

у них фотосинтез протекает без выделения кислорода, как у фотоавтотрофных бактерий.

Следы кислорода в атмосфере могут оказаться достаточными для жизни простейших, но возможно также существование организмов, способных к анаэробному дыханию за счет соединений, содержащих кислород; наряду с этим вполне реально существование анаэробов. Если исходить из устойчивости земных микроорганизмов к ионизирующей радиации, то она не может быть причиной отсутствия жизни на Марсе. В одинаковой мере это относится к пониженному давлению и колебаниям температуры, которые легко переобладаются многими растительными и низшими животными организмами.

К самым неблагоприятным экстремальным воздействиям на Марсе бесспорно относится почти полное отсутствие воды как в атмосфере, так и в грунте. Именно поэтому сейчас начали более глубоко изучать распространение, физиологию и биохимию ксерофитных организмов. Хотя и нет никаких оснований считать, что на Марсе влажность грунта равна 3,8%, т. е. влажность, при которой возможен рост земных ксерофитов, но нельзя полностью исключить возможность периодического увлажнения грунта при падении температуры за счет воды, содержащейся в атмосфере. Основание для такого предположения есть, так как, по-видимому, шапки на полюсах Марса образованы углекислотой, и водой.

Как известно, подавляющее большинство предложенных методов обнаружения внеземной жизни, в частности на Марсе, основано на посеве грунта в питательную среду и регистрации последующего размножения микроорганизмов. В связи с этим возникает вопрос, какие должны быть созданы условия для выращивания марсианской микрофлоры, если последняя существует? Возможны два решения. В первом случае воспроизводятся условия, близкие к Марсу. Посев грунта делают в очень бедную питательную среду. Температура выращивания невысокая (+10°). Атмосфера над частицами грунта состоит из азота и углекислоты. Продолжительность опыта значительная и может достигать 90 дней.

Теоретически создание экологических условий, соответствующих марсианским, казалось бы, можно было бы считать вполне обоснованным. Однако возможен и другой подход, базирующийся на данных земной экологии. Способность микроорганизмов размножаться в условиях, близких к экстремальным, не означает, что они утрачивают возможность расти в более благоприятных условиях. Узкой, очень строгой приспособляемости к определенным условиям жизни у микроорганизмов, как правило, не бывает. Так, нет ксерофитов, не растущих на жидких питательных средах. Стенотермные термофилы растут при 75°, но их рост возможен и при 35°. В одинаковой степени это приложимо и к космофильным, психрофильным и другим микроорганизмам, приспособленным к определенным условиям [39].

Отношение последних к экстремальным условиям позволяет для обнаружения внеземной жизни применять полноценные питательные среды, выдерживать посев при 20—30° в отсутствие марсианской атмосферы [33]. Обоснованность такого метода подтверждается тем, что микроорганизмы, обитающие в почве пустынь, Антарктики, Арктики, хорошо размножаются в этих условиях. Необходимость применения более благоприятных условий для роста обуславливается также тем, что запланированная продолжительность функционирования автоматической биологической станции может быть кратковременной, например 72 часа. Естественно, что в строго марсианских условиях размножение микроорганизмов за этот срок будет очень незначительным, в то время как богатые по своему составу среды и более высокая температура создадут условия для более быстрого размножения микроорганизмов, если они есть на Марсе. Подробнее вопрос о поисках внеземной жизни изложен в главе 8 настоящего тома.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абызов С. С., Заварзин Г. А., Иванов М. В., Сергеев В. И., Широков О. Г. О выживании микроорганизмов в ископаемых калийных солях. Микробиология, 1966, 36, 885.
2. Аксенов С. И. О пределах адаптации жизни к экстремальным условиям. В кн. «Проблемы космической биологии», 19. М., «Наука», 1972, стр. 7.
3. Бабьева И. Л., Голубев В. И. Психрофильные дрожжи в оазисах Антарктиды. Микробиология, 1969, 38, 518.
4. Вернадский В. И. Биосфера. Л. Научное хим. техн. изд-во, 1926.
5. Генкель П. А., Пронина Н. Д. Анабиоз при высушивании у цветкового пойкилоксерофитного растения *Myrothamnus flabellifolia*. Физиол. раст., 1969, 46, 896.
6. Голлербах М. М., Сочава В. Б. Ледники и снежники. В кн. «Растительный покров СССР. II». М., «Наука», 1956, стр. 835.
7. Делоне Н. Л., Антипов В. В., Морозова Е. М., Саксонов П. П., Трусова А. С. Стимуляция роста у некоторых биологических объектов под воздействием вертикальной вибрации. Космич. исслед., 1968, 6, 788.
- 7а. Делоне Н. Л., Трусова А. С., Морозова Е. М., Антипова В. В., Парфенов Г. П. Влияние космического полета на корабле-спутнике «Космос-110» на микроспоры *Tradescantia paludosa*. Космич. исслед., 1968, 6, 299.
8. Друзь В. А., Мадиевский Ю. М. Влияние постоянного магнитного и низкочастотных электромагнитных полей на гидратационную способность переживающих тканей. Биофизика, 1966, 11, 631.
9. Еникеева М. Г. Влажность почвы и деятельность микроорганизмов. Труды Ин-та микробиологии АН СССР, 1952, 2, 130.
10. Жуков-Вережников Н. Н., Антипов В. В., Басевский Р. И., Газенко О. Г. и др. Некоторые итоги медико-биологических исследований на втором и третьем космических кораблях спутниках. В кн. «Проблемы космической биологии», 1. М., Изд-во АН СССР, 1962, 267.
11. Жуков-Вережников Н. Н., Волков М. Н., Майский И. Н., Губерниев М. А. и др. Экспериментально-генетические исследования на лизогенных бактериях при полете ИСЗ «Космос-110». Космич. исслед., 1968, 6, 144.
12. Жуков-Вережников Н. Н., Волков М. Н., Рыбаков Н. И., Майский И. Н. и др. О биологическом действии факторов космического полета на лизогенные бактерии *E. coli* K-12 (λ) и клетки человека в культуре. Космич. исслед., 1971, 9, 292.
13. Жуков-Вережников Н. Н., Майский И. Н., Ядовский В. И., Пехов А. П. и др. Проблемы космической микробиологии и цитологии. В кн. «Проблемы космической биологии». 1. М., Изд-во АН СССР, 1962, стр. 118.
14. Жукова А. И., Козлова В. Х. Жизнеспособность микроорганизмов в пустынных почвах Туркмении. Микробиология, 1966, 35, 503.
15. Зернов С. А., Шмальгаузен О. И. О пределах жизни при отрицательных температурах. Докл. АН СССР, 1944, 44, 84.
16. Имшенецкий А. А., Абызов С. С. Микробиологические исследования метеоритов. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, стр. 157.
17. Имшенецкий А. А., Багров Н. Н., Лысенко С. В. Устойчивость микроорганизмов к глубокому вакууму. Докл. АН СССР, 1964, 154, 1188.
18. Имшенецкий А. А., Комолова Г. С., Лысенко С. В., Гамуля Г. Д. О влиянии глубокого вакуума на активность некоторых ферментов. Докл. АН СССР, 1968, 182, 971.
19. Имшенецкий А. А., Лысенко С. В. Действие глубокого вакуума на микроорганизмы. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, стр. 106.
20. Имшенецкий А. А., Лысенко С. В. Действие глубокого вакуума на окислительные процессы у *Sarcina flava* и *Vac. simplex*. Микробиология, 1970, 39, 480.
21. Имшенецкий А. А., Лысенко А. М., Лысенко С. В. Влияние лиофилизации и глубокого вакуума на бактериофаги кишечной палочки. Микробиология, 1970, 39, 694.
22. Имшенецкий А. А., Лысенко С. В., Сотников Г. Г. Действие глубокого вакуума на устойчивость АТФ у микроорганизмов. Микробиология, 1970, 39, 997.
23. Имшенецкий А. А., Лысенко С. В., Сотников Г. Г. Влияние глубокого вакуума на активность железопорфириновых ферментов у микроорганизмов. Микробиология, 1971, 40, 289.
24. Имшенецкий А. А., Лысенко С. В., Сотников Г. Г., Гамуля Г. Д. Влияние глубокого вакуума на кристаллические ферменты каталазу, пероксидазу, цитохром С и АТФ. Микробиология, 1970, 39, 789.
25. Имшенецкий А. А., Лысенко С. В., Удовенко В. Ф., Бугенко А. М. Длительное воздействие глубокого вакуума на микроорганизмы. Микробиология, 1973, 42, 836.
26. Исаченко Б. Л. Избранные труды, 2. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1951, стр. 213.
27. Киселев П. Н., Кашкин К. П., Болтакс Ю. Б., Витовская Г. А. Приобретение радиорезистентности микробной клеткой при обитании в среде с повышенным уровнем естественной радиации. Микробиология, 1964, 30, 20.
28. Коржнев П. А. Населенный космос. М., «Наука», 1972, стр. 133.
29. Красавцев О. А. Устойчивость закаленных древесных растений к обезвоживанию при низких температурах. Физиол. раст., 1967, 14, 513.
30. Крисс А. Е. Биологическое действие высоких давлений. Усп. микробиол., 1970, 6, 128.
31. Крисс А. Е., Бирюзова В. И., Абызов С. С. Микроорганизмы, размножающиеся при высоких давлениях. Изв. АН СССР, серия биол., 1958, № 6, 677.
32. Крисс А., Коштынюк Н. Метаболизм глюкозы у баротолерантных *Pseudomonas* sp. в условиях высокого давления вне оптимальных температур. Микробиология, 1969, 38, 945.
33. Кузюрина Л. А., Якина В. М. Питательные среды, которые могут быть применены для обнаружения микроорганизмов на Марсе. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, стр. 41.
34. Кузюрина Л. А., Якина В. М. Поведение некоторых почвенных микроорганизмов в каме-

- ре «Искусственный Марс». В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имперский (ред.). М., «Наука», 1970, стр. 118.
35. Лозина-Лозинский Л. К. Очерки по криобиологии. Л., «Наука», 1972.
36. Малышек В. Т., Малияну А. А. Серобактерии в пластовых «розовых» водах Сураханского нефтяного месторождения и их значение в геохимии вод. Докл. АН СССР, 1935, 3, 221.
37. Мирчинк Т. Г., Кашкина Г. Б., Абагуров Ю. Д. Устойчивость темноокрашенных грибов *Stemphylium botryosum* Walle и *Cladosporium* (Fries) к γ -излучению. Микробиология, 1968, 37, 865.
38. Мурзаков Б. Г. Вопросы экологии микрофлоры пустынных почв в связи с проблемами космической микробиологии. Усп. микробиол., 1974, 9, 96.
39. Мурзаков Б. Г. О методах обнаружения внеземной жизни. Усп. микробиол., 1975, 11.
40. Новицкий Ю. Н. Биомagnetизм и жизнь растений. Изв. АН СССР, серия биол., 1967, № 2, 257.
41. Новогрудский Д. М. Почвенная микробиология. Алма-Ата, Изд-во АН Каз. ССР, 1966.
42. Парфенов Г. П. Генетические исследования в космосе. Космич. исслед., 1967, 5, 140.
43. Самойлова К. А. Действие ультрафиолетовой радиации на клетку. Л., «Наука», 1967.
44. Сисакян Н. М. Некоторые проблемы экофизиологии. В кн. «Проблемы космической биологии», 6. М., «Наука», 1967, стр. 5.
45. Солнцева И. О. Результаты длительного облучения *Rhodotorula glutinis* слабыми дозами ультрафиолетового света. Труды Ин-та биол. внутр. вод, 1967, 14, 84.
46. Солнцева И. О. Резистентность горных штаммов дрожжеподобных организмов к ультрафиолетовому облучению. Труды Ин-та биол. внутр. вод, 1967, 14, 91.
47. Станко С. А. Проблема обитаемости Марса и фотосинтез растений. Тез. докл. VI совещ. по пробл. планетол., 1968, 2, 96.
48. Туманов И. И. Морозостойкость плодовых деревьев. Изв. АН СССР, серия биол., 1963, № 3, 459.
49. Чумак М., Блохина Т., Крисс А. Влияние высокого давления на накопление органических кислот при сбраживания глюкозы баротолерантными бактериями. Докл. АН СССР, 1968, 181, 427.
50. Шахов А. А. Влияние космического радиационного режима на жизнедеятельность растений. Журн. общ. биол., 1962, 23, 81.
51. Antipov V. V., Delone N. L., Nikitin M. D., Parfynov G. P., Sazonov P. P. [Антипов В. В., Делоне Н. Л., Никитин М. Д., Парфенов Г. П., Сазонов П. П.] Some Results of Radiobiological Studies Performed on Cosmos-110 Biosatellite. Life Sci. and Space Res., 1969, 7, 207.
52. Antipov V. V., Delone N. L., Parfynov G. P., Vyotsky V. G. [Антипов В. В., Делоне Н. Л., Парфенов Г. П., Высотский В. Г.] Results of Biological Experiments Carried out under Conditions of «Vostok» Flights with the Participation of Cosmonauts A. G. Nikolajev, P. R. Popovich and V. F. Bykovsky. Life Sci. and Space Res., 1965, 3, 245.
53. Antipov V. V., Kozlov V. A., Parfynov G. P., Sazonov P. P. [Антипов В. В., Козлов В. А., Парфенов Г. П., Сазонов П. П.] The Results of Biological Studies Made Onboard the Voskhod 1 and Voskhod 2 Spaceships. Life Sci. and Space Res., 1967, 5, 119.
54. Basset J., Macheboeuf M. A. Études sur les effets biologiques des ultrapressions. Études sur l'immunité: influence des pressions très élevées sur certains antigènes et anticorpos. Compt. rend., 1933, 196, 67.
55. Beckwith T. D. Moulds in Cold Storage. Ice and Refrig., 1936, 90, 159.
56. Becquerell P. La vie terrestre provient-elle d'une autre mode? Bull. Soc. Astron. France, 1924, 38, 393.
57. Becquerell P. La suspension de la vie au-dessous de $1/20^{\circ}$ K absolu par démagnétisation adiabatique de l'alun de fer dans le vide le plus élevé. Copt. rend., 1950, 231, 261.
58. Becquerell P. La suspension de la vie des spores de bactéries et des moisissures desséchées dans la vide vers le zéro absolu. Ses conséquences pour la dissémination et la conservation de la vie dans l'Univers. Comp. rend., 1950, 231, 1392.
59. Bedford R. H. Salts as a Control of Bacterial Decomposition of Halibut. Bull. Biol. Board. Canada, 1932, 29, 1.
60. Bělehrádek J. Temperature and Living Matter. Borntraeger, 1935.
61. Berry J. A. Growth of Yeast Below Zero. Science, 1934, 80, 341.
62. Bien E., Schwartz W. Geomikrobiologische Untersuchungen. VI. Über das Vorkommen konservierter, toter und lebender Bakterienzellen in Salzgesteinen. Z. allg. Mikrobiol., 1965, 5, 185.
63. Borgstrom G. Unsolved Problems in Frozen Food Microbiology. Campbell Low Temperature Microbiol. Sympos., Camden, New Jersey, 1961, 197.
64. Borstel R. C. von, Smith R. H., Whiting A. R. et al. Mutational Responses of Insects in the Biosatellite II Experiment. Life Sci. and Space Res., 1969, 7, 70.
65. Borstel R. C. von, Smith R. H., Whiting A. R., Grosch D. S. Biological Responses of Haplobrachion to Spaceflight. Life Sci. and Space Res., 1970, 8, 6.
66. Brueschke E., Suess R., Willard M. The Viability of Microorganisms in Ultrahigh Vacuum. Planet. Space Sci., 1961, 8, 30.
67. Buckhold B. Biosatellite II — Physiological and Somatic Effects on Insects. Life Sci. and Space Res., 1969, 7, 77.
- 67a. Bucker H., Horneck G. Survival of Microorganisms under Simulated Space Conditions. Life Sci. and Space Res., 1970, 8, 33.
68. Bucker H., Horneck G., Wollenhaupt H. Radiation Sensitivity of *Escherichia coli* in Vacuum. 3rd Internat. Congr. Biophys. Cambridge, Mass., USA, Sept. 1969.
69. Bucker H., Horneck G., Wollenhaupt H., Turcu G., Daniels F. et al. Effects of Simulated Space Vacuum on Bacterial Cells. Abstrs COSPAR, 14th Plenary Meett. 13 June — 2 July. Seattle, Washington, USA, 1971, 269.
70. Cameron R. E., Morelli F. A., Conrow H. P. Survival of Microorganisms in Desert Soil Exposed to Five Years of Continuous Very High Vacuum. JPL Techn. Rept 32-1454. 1970, 1.
71. Chlopin C., Tamman C. Über den Einfluss höherer Drücker auf Mikroorganismen. Z. Hyg. und Infektionskrankh., 1903, 45, 171.
72. Davis I., Fulton J. D. The Reactions of Terrestrial Microorganisms to Simulated Martian Conditions.

- Proc. X Internat. Astronaut. Congr., London, 2. Wien, Springer-Verlag, 1959, p. 778.
73. Davis N. S., Silverman G. J., Goldblith S. A., Keller W. Survival of Spores at Several Temperatures in Ultrahigh Vacuum. *Bacteriol. Proc.*, 1962, 31.
 74. Davis N. S., Silverman G. J., Keller W. H. Combined Effects of Ultrahigh Vacuum and Temperature on the Viability of Some Spores and Soil Organisms. *Appl. Microbiol.*, 1963, 3, 202.
 75. Dedolph R. R. The Influence of Simulated Low Gravity Environments on Growth, Development and Metabolism of Plants. *Life Sci. and Space Res.*, 1967, 5, 217.
 76. Delone N. L., Morozova E. M., Antipov V. V. [Делоне Н. Л., Морозова Е. М., Антипов В. В.]. A Cytological Study of Some Higher Plants Whose Seeds and Bulbs Were on Board Zond 5, 6 and 7 Probes. *Life Sci. and Space Res.*, 1971, 9, 111.
 77. Dubinin N. P., Vaulina E. N., Kosikov K. V., Antikova I. D. et al. [Дубинин Н. П., Ваулина Э. Н., Косиков К. В., Антимова И. Д. и др.]. Space Flight Effects on the Heredity of Higher Plants and Thallophyta. *Abstr. COSPAR*, 15. Plenary Meet., 10–24 May, Madrid, 1972, 264.
 78. Edwards B. F. Weightlessness Experiments on Biosatellite II. *Life Sci. and Space Res.*, 1969, 7, 84.
 79. Edwards B. F. Effect of Weightlessness of Cells and Tissues. *Life Sci. and Space Res.*, 1972, 10, 119.
 80. Edwards B. F., Gray S. W. Cellular Changes in Wheat Seedlings During Orbital Flight. *Life Sci. and Space Res.*, 1971, 9, 113.
 81. Fedorova R. I. [Федорова Р. И.]. Effect of Ultraviolet Radiation on Microorganisms as a Principal Extremal Factor of Space Environment. *Life Sci. and Space Res.*, 1964, 2, 305.
 82. Feher D. Der Wüstenboden als Lebensraum. *Mitt. bot. Inst. ung. Univ. techn. u. wirtsch. Wiss. Sopron (Ungarn)*, 1939, N 10.
 83. Fraser D. Bursting Bacteria by Release of Gas Pressure. *Nature*, 1951, 167, 33.
 84. Gazenko O. G., Gurdjian A. A. [Газенко О. Г., Гурджиян А. А.]. On the Biological Role of Gravity. *Life Sci. and Space Res.*, 1965, 3, 241.
 85. Gazenko O. G., Gurdjian A. A. [Газенко О. Г., Гурджиян А. А.]. Physiological Effects of Gravitation. *Life Sci. and Space Res.*, 1966, 4, 1.
 86. Geiger P. J., Morelli F. A., Conrow H. P. Effects of Ultrahigh Vacuum on Three Types of Microorganisms. Support. Res. and Advanced Development Space Programs Summary, 1963, 4, 109. J.P.L. Pasadena, Cal., Aug. 31.
 87. Gordon S. A., Buess E. M. Radiation-Induced Chromosome Aberrations and Rhythms in Roots of Gravity-Compensated Vicia. *Life Sci. and Space Res.*, 1968, 7, 69.
 88. Gordon S. A., Schen-Miller J. On the Thresholds of Gravitation Force Perception by Plants. *Life Sci. and Space Res.*, 1966, 4, 22.
 89. Gray S. W., Edwards B. F. An Effect of Weightlessness Following Exposure to Vibration. *Life Sci. and Space Res.*, 1970, 8, 25.
 90. Grigoryev I. G., Benevolensky V. P., Druzhinin I. P. et al. [Григорьев Ю. Г., Беневоленский В. П., Дружинин Ю. П.]. Influences on Cosmos 368 Space Flight Condition Radiation Effects in Yeasts. *Life Sci. and Space Res.*, 1972, 10, 113.
 91. Hagen C. A., Hawrylewicz E. J., Ehrlich R. Survival of Microorganisms in a Simulated Martian Environment. *Bacillus subtilis* var. *globigii*. *Appl. Microbiol.*, 1964, 12, 215.
 - 91a. Hagen C. A., Hawrylewicz E. J., Anderson B. T., Cephus M. L. Effect of ultraviolet on the survival of bacteria airborne in simulated Martian dust clouds. *Life Sci. and Space Res.*, 1970, 8, 53.
 92. Hawrylewicz E., Ehrlich R. Symposium on Extraterrestrial Biochemistry and Biology. 128th Meet. Amer. Assoc. Advancement Sci. Denver, Col., Dec. 26–30, 1961.
 93. Hawrylewicz E., Gowdy B., Ehrlich R. Microorganisms under a Simulated Martian Environment. *Nature*, 1962, 193, 497.
 94. Hawrylewicz E. J., Hagen C. A., Ehrlich R. Response of Microorganisms to a Simulated Martian Environment. *Life Sci. and Space Res.*, 1965, 3, 64.
 95. Hawrylewicz E. J., Hagen C. A., Ehrlich R. Survival and Growth of Potential Microbial Contaminants in Severe Environments. *Life Sci. and Space Res.*, 1966, 4, 166.
 96. Hebb (1956). В сводке Jenkins D. W., Siegel S. M., ZoBell C. E. (см. настоящий том, стр. 262).
 97. Hite H., Giddings N. J., Weakley C. E. The Effect of Pressure on Certain Microorganisms Encountered in the Preservation of Fruits and Vegetables. *West Virginia Univ. Agric. Experim. Stat. Bull.*, 1914, 146, 1.
 98. Horneck G., Bückner H., Wollenhaupt H. Survival of Bacterial Spores under Some Simulated Lunar Surface Conditions. *Life Sci. and Space Res.*, 1971, 9, 119.
 99. Hotchin J., Baker F. D., Benson L. Survival of RNA and DNA Viruses in Space of the Gemini XII Satellite. *Life Sci. and Space Res.*, 1969, 7, 67.
 100. Hotchin J., Lorenz P., Hemenway C. L. The Survival of Terrestrial Microorganisms in Space at Orbital Altitude during Gemini Satellite Experiments. *Life Sci. and Space Res.*, 1968, 6, 108.
 101. Hotchin J., Lorenz P., Markusen A., Hemenway C. The Survival of Microorganisms in Space. Further Rocket and Balloon-Borne Exposure Experiments. *Life Sci. and Space Res.*, 1967, 5, 1.
 102. Hugo W. B. (Ed.). *Inhibition and Destruction of the Microbial Cell*. London, Acad. Press, 1971.
 103. Imshenetsky A. A., Abyzov S. S., Voronov G. T., Kuzjurina L. A., Lysenko S. V., Sotnikov G. G., Fedorova R. I. [Имшенецкий А. А., Абызов С. С., Воронов Г. Т., Кузюрина Л. А., Лысенко С. В., Сотников Г. Г., Федорова Р. И.]. Exobiology and the Effect of Physical Factors on Microorganisms. *Life Sci. and Space Res.*, 1967, 5, 250.
 104. Imshenetsky A. A., Abyzov S. S., Voronov G. T., Zhukova A. I., Lysenko S. V. [Имшенецкий А. А., Абызов С. С., Воронов Г. Т., Жукова А. И., Лысенко С. В.]. The Possibility of Life in Outer Space. *Life Sci. and Space Res.*, 1966, 4, 121.
 105. Imshenetsky A. A., Kuzjurina L. A., Jakshina V. M. [Имшенецкий А. А., Кузюрина Л. А., Якшина В. М.]. Multiplication of Certain Soil Microorganisms under Simulated Martian Conditions. *Life Sci. and Space Res.*, 1970, 8, 59.
 106. Imshenetsky A. A., Kuzjurina L. A., Jakshina V. M. [Имшенецкий А. А., Кузюрина Л. А., Якшина В. М.]. Xerophilic Microorganisms Multiplying under Simulated Martian Conditions. *Life Sci. and Space Res.*, 1973, 11, 63.

107. *Imshenetsky A. A., Lysenko S. V.* [Имшенецкий А. А., Лысенко С. В.]. Ultrahigh Vacuum and Microorganisms. Life Sci. and Space Res., 1965, 3, 142.
108. *Jahnel F.* Über das Überleben von Trypanosomen und Rekurrenzspirochaeten nach Abkühlung in flüssigem Helium bis - 269, 5°C d. i. vom absoluten Nullpunkten entfernt. Z. Immunitätsforschung, 1938, 94, 328.
109. *James P. F.* The Limits of Life. J. Brit. Interplanetary Soc., 1955, 14, 265.
110. *James (1965).* В сводке Jenkins D. W., Siegel S. M., ZoBell C. E. (см. настоящий том, стр. 362).
111. *Jensen L. B.* Bacteriology of Ice. Food Res., 1943, 8, 265.
112. *Joung R. S.* Differential Survival of Bacteria under Martian Conditions. Life Sci. and Space Res., 1966, 4, 131.
113. *Joung R. S., Tremor J. W.* Weightlessness and Developing Frog Egg. Life Sci. and Space Res., 1968, 6, 87.
114. *Jumell H.* Sur le degagement d'oxygène par les plantes, aux basses températures. Compt. rend., 1891, 112, 1462.
115. *Keilin D.* The Problem of Anabiosis or Latent Life: History and Current Concept. Proc. Roy. Soc., B, 1959, 150, 149.
116. *Lamanna C., Mallette M. F.* Basic Bacteriology. Baltimore, Williams and Wilkins, 1965.
117. *Larson W. P., Hartzel F. B., Diehl H. S.* The Effect of High Pressures on Bacteria. J. Infect. Diseases, 1918, 22, 271.
118. *Lorenz P. R., Hemenway C. L., Hotchin J.* The Biological Effectiveness of Solar Electromagnetic Radiation in Space. Life Sci. and Space Res., 1968, 6, 100.
119. *Loubiere R., Grognot P., Violette F.* A Note on Changes in Anaphase Induced by Mechanical Vibration. Life Sci. and Space Res., 1966, 4, 221.
120. *Lozina-Lozinsky L. K., Bychenkova V. N., Zaar E. I., Levin V. L., Romyantseva V. M.* [Лозина-Лозинский Л. К., Быченко В. Н., Заар Э. И., Левин В. Л., Румянцева В. М.]. Some Potentialities of Living Organisms under Simulated Martian Conditions. Life Sci. and Space Res., 1971, 9, 159.
121. *Luyet B.* Sur la mécanique de la mort cellulaire par les hautes pressions l'intensité et la durée des pressions léthales pour la levure. Compt. rend., 1937, 204, 1214.
122. *McElroy W. D., Haba G. de la.* Effect of Pressure on Induction of Mutations by Nitrogen Mustard. Science, 1949, 110, 640.
123. *MacFadyen A., Rowland S.* Influence of the Temperature of Liquid Hydrogen on Bacteria. Proc. Roy. Soc., 1900, 66, 488.
124. *Miro L., Deltouz G., Pfister A., Kaiser R., Grandpierre R.* Current Status of French Research on the Biological Effects of Heavy Ions in Cosmic Radiation as Observed in High-Altitude Balloons. Life Sci. and Space Res., 1970, 8, 39.
125. *Mish L. B.* Biological Studies of Symbiosis Between the Alga and Fungus in the Rock Lichen Umbilicaria papulosa. Ph. D. Diss. Harvard Univ. Cambridge, Mass., 1953.
126. *Morelli A., Fehner P., Stembridge H.* Effect of Ultrahigh Vacuum on Bac. subtilis (var. niger). Nature, 1962, 196, 106.
127. *Nei T., Araki T., Matsusaka T.* The Mechanism of Cellular Injury by Freezing in Microorganisms. Proc. Internat. Conf. Low Temperature Sci., Sapporo, 1967, 2, 157.
128. *Opfell J. B., Zebal G. P.* Ecological Patterns of Microorganisms in Desert Soils. Life Sci. and Space Res., 1967, 5, 187.
129. *Oppenheimer C. H., ZoBell C. E.* The Growth and Viability of Sixty-Three Species of Marine Bacteria as Influenced by Hydrostatic Pressure. J. Marine Res., 1952, 11, 10.
130. *Oster I. I.* Genetic Effects Produced by the Space Environment. Life Sci. and Space Res., 1969, 7, 95.
131. *Packer E., Scher S., Sagan C.* Biological Contamination of Mars II. Cold and Aridity as Constraints on the Survival of Terrestrial Microorganisms in Simulated Martian Environments. Icarus, 1963, 2, 293.
132. *Parin V. V., Grigoryev J. G., Kovalev E. E., Ryzhov N. I. et al.* [Парин В. В., Григорьев Ю. Г., Ковалев Е. Е., Рыжов Н. И. и др.]. Characteristics of Biological Effects of Cosmic Radiation Model Investigations. Life Sci. and Space Res., 1969, 7, 160.
133. *Petrus E., Bise K.* Microbiological Studies on the Radiation Environment of Ionosphere and Stratosphere. Life Sci. and Space Res., 1968, 6, 115.
134. *Pittendrigh C. S.* On the Biological Problems to be Attacked with Series of U. S. Satellites in 1966. Life Sci. and Space Res., 1965, 3, 206.
135. *Portner D. M., Spiner D. R., Hoffman R. K., Phillips C. R.* Effect of Ultrahigh Vacuum on Viability of Microorganisms. Science, 1961, 134, 2047.
136. *Prince A. E., Bakanauskas S.* Survival of Microorganisms Spores Exposed to High Vacuum. Appendix I. Techn. Memorandum WCLT TM 58-146. Wright Air Developm. Center, Air Res. and Developm. Command. U. S. Air Force, 1958.
137. *Record B. R., Taylor R.* Some Factors Influencing the Survival of Bacterium coli on Freeze-Drying. J. Gen. Microbiol., 1953, 9, 475.
138. *Roberts T. L., Irvine L. A.* Technical Documentary — USAFSAM, Rept N 63, 1963.
139. *Roberts T. L., Wynne E. S.* Technical Documentary — USAFSAM, Rept N 62—121, 1962.
140. *Sakai A.* Survival of Plant Tissue at Super-Low Temperatures by Rapid Cooling and Rewarming. Proc. Internat. Conf. Low Temperature Sci., Sapporo, 1967, 2, 119.
141. *Savenko I. A., Pisarenko N. F., Shavrin P. I., Nesterov V. E.* [Савенко И. А., Писаренко Н. Ф., Шаврин А. И., Нестеров В. Е.]. Control over Cosmic Radiation Level during Flight of Space Vehicles Vostok 3, Vostok 4, Vostok 5 and Vostok 6. Life Sci. and Space Res., 1965, 3, 23.
142. *Schairer L. A., Sparow A. H., Martimoth K. M.* Radiobiological. Studies of Plants Orbited in Biosatellite II. Life Sci. and Space Res., 1970, 8, 19.
143. *Serres F. J. de.* Effects of Radiation during Space Flight on Microorganisms and Plants on the Biosatellite II and Gemini XI Missions. Life Sci. and Space Res., 1969, 7, 62.
144. *Shen-Miller J.* Reciprocity in Geotropic Response and Acceleration Constraints of the Biosatellites. Life Sci. and Space Res., 1969, 7, 93.
145. *Siegel S.* The General and Comparative Biology of Terrestrial Organisms under Experimental Stress Conditions. 3rd. Ortlly Rept, Nat. Aeronaut. and Space Administration. Washington, D. C. April 1964.

146. Siegel S. M., Halern L. G., Ginsmarro C., Renwick G., Davis G. Martian Biology: The Experimentalists Approach. Nature, 1963, 197, 329.
147. Siegel S., Ginsmarro C., Latterell R. Behaviour of Plants under Extraterrestrial Conditions: Seed Germination in Atmospheres Containing Nitrogen Oxides. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1964, 52, 11.
148. Silverman G. J., Beecher N. Survival of Cocci after Exposure to Ultrahigh Vacuum at Different Temperatures. Appl. Microbiol., 1967, 15, 665.
149. Sisakyan N. M., Gazenko O. G., Antipov V. V. [Сисакян Н. М., Газенко О. Г., Антипов В. В.]. Satellite Biological Experiments — Major Results and Problems. Life Sci. and Space Res., 1965, 3, 185.
150. Slater I., Buckhold B., Silver I., Tobias C. Environmental Studies with the Beetle *Trifolium confusum*. Life Sci. and Space Res., 1970, 8, 5.
151. Sturm G. Die Wirkung hoher hydrostatischer Drücke auf Süßwasser Algen. Arch. Mikrobiol., 1957, 28, 109.
152. Sutulov L. S., Kalkin S. G., Saxonov P. P., Sutulov J. L. et al. [Сутулов Л. С., Кузькин С. Г., Саксонов П. П., Сутулов Ю. А. и др.]. Post-Flight Histological Analysis of Turtles Aboard Zond 7. Life Sci. and Space Res., 1971, 9, 125.
153. Tanno K. Freezing Injury in Fat-Body Cells of Poplar Sawfly. Proc. Internat. Conf. Low Temperature Sci., Sapporo, 1967, 2, 245.
154. Thede A. L., Radke G. E. Correlation of Dose Rate and Spectral Measurements in the Inner van Allen Belt. Life Sci. and Space Res., 1968, 6, 59.
155. Teremoto I. Frost Resistance in Algal Cells. Proc. Internat. Conf. Low Temperature Sci., Sapporo, 1967, 2, 191.
156. Timson W. J., Short A. J. Resistance of Microorganisms to Hydrostatic Pressure. Biotechn. and Bioengng, 1965, 7, 139.
157. Vaulina E. N., Anikeeva I. D. [Ваулина Е. Н., Аникеева И. Д.]. The Influence of Spaceflight on *Chlorella*. Life Sci. and Space Res., 1970, 8, 72.
158. Vaulina E. N., Anikeeva I. D., Gubareva I. G., Strauch G. A. [Ваулина Е. Н., Аникеева И. Д., Губарева И. Г., Штраух Г. А.]. Survival and Mutability of *Chlorella* aboard the Zond Vehicles. Life Sci. and Space Res., 1971, 9, 105.
159. Way M. I. The Effects of Freezing Temperatures on the Developing Egg of *Leptohylemyia coarctata* Fall. (Diptera, Muscidae) with Special Reference to Diapause Development. J. Inst. Physiol., 1960, 4, 92.
160. Winchester C., Murray T. I. Effect of Liquid Air Temperature on Bacteria. Proc. Soc. Exp. Biol. and Med., 1936, 35, 165.
161. ZoBell C. E. Bacterial Life at the Bottom of the Philippine Trench. Science, 1952, 115, 507.
162. ZoBell C. E. Hydrostatic Pressure as a Factor Affecting the Activities of Marine Microbes. In: Recent Research in the Fields of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry. Tokyo, Maruzen Co., 1964, 83.
163. ZoBell C. E., Cobett A. B. Growth, Reproduction and Death Rates of *Escherichia coli* at Increased Hydrostatic Pressures. J. Bacteriol., 1962, 84, 1228.
164. ZoBell C. E., Cobett A. B. Filament Formation by *Escherichia coli* at Increased Hydrostatic Pressures. J. Bacteriol., 1964, 87, 710.
165. ZoBell C. E., Hittle L. L. Some Effects of Hyperbaric Oxygenation on Bacteria at Increased Hydrostatic Pressures. Canad. J. Microbiol., 1967, 13, 1311.
166. ZoBell C. E., Johnson F. H. The Influence of Hydrostatic Pressure on the Growth and Viability of Terrestrial and Marine Bacteria. J. Bacteriol., 1949, 57, 179.
167. ZoBell C. E., Oppenheimer C. H. Some Effects of Hydrostatic Pressure on the Multiplication and Morphology of Marine Bacteria. J. Bacteriol., 1950, 60, 771.
168. Zhukova A. I., Kondratyev I. I. [Жукова А. И., Кондратьев И. И.]. On Artificial Martian Conditions Reproduced for Microbiological Research. Life Sci. and Space Res., 1965, 3, 120.
169. Zhukov-Verezhnikov N. N., Volkov M. N., Maisky I. N., Rybakov N. I. et al. [Жуков-Вережников Н. Н., Волков М. Н., Майский И. Н., Рыбаков Н. И.]. Experiments with Microorganisms and Human Cell Cultures in the Zond 5 and Zond 7 Flights. Life Sci. and Space Res., 1971, 9, 99.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ЭКЗОБИОЛОГИИ

А. И. ОПАРИН

Институт биохимии им. А. Н. Баха АН СССР,
Москва, СССР

НЕРАЗРЫВНАЯ СВЯЗ ЭКЗОБИОЛОГИИ С ПРОБЛЕМОЙ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЖИЗНИ

Мы живем в мире, который непрерывно изменяется, эволюционирует. Этот процесс эволюционного развития имеет поступательный характер и приводит к возникновению все более сложных, многообразных и богаче дифференцированных форм реальной действительности. Вместе с тем он не может происходить одновременно и одинаково повсюду. В разных пунктах Вселенной, на различных объектах нашего звездного мира эволюционное развитие осуществляется разными путями и разными темпами. Поэтому в схеме мы должны представлять его себе не как какую-то единую прямую линию, а скорее как целый пучок различных путей, отдельные ответвления которых могут приводить к очень сложным и совершенным формам организации и движения материи.

О многих из этих форм мы пока еще ничего не знаем, а в ряде случаев даже и не подозреваем об их существовании. Но не следует любую из этих форм уже заранее рассматривать как особую категорию жизни только из-за ее сложности или совершенства. Жизнь является результатом далеко не всех многочисленных ветвей развития материи. Ей свойственны свои специфические качества и пути возникновения и совершенствования.

В настоящее время мы знаем только нашу земную жизнь, и от нее мы должны исходить в наших суждениях о других возможных формах биологической организации. Поэтому Земля и происходившие на ней события должны в большой степени служить нам моделью для более широких суждений о жизни во Вселенной.

До тех пор пока считалось, что возникновение жизни на Земле являлось какой-то редчайшей «счастливой случайностью», не было

оснований для суждения о жизни вне нашей планеты, кроме разве мало удовлетворяющих наш ум подсчетов степени вероятности такого «невероятного» события. Однако сейчас мы имеем все основания видеть в возникновении нашей жизни не «счастливую случайность», а вполне закономерное явление, неотъемлемую составную часть общего эволюционного развития нашей планеты.

Поиски жизни вне Земли являются, таким образом, лишь частью стоящего перед наукой более общего вопроса о возникновении жизни во Вселенной. Изучение зарождения жизни на Земле представляет собой исследование лишь одного примера события, которое должно было происходить в мире бесчисленное число раз. Поэтому выяснение вопроса о том, как появилась жизнь на Земле, безусловно должно представить убедительные доводы в пользу теории о существовании жизни и на других объектах Вселенной.

Если в начале нашего века проблема происхождения жизни почти полностью игнорировалась представителями научного мира, то сейчас она привлекает к себе широкие круги исследователей разных стран и специалистов. Поэтому научная литература по этой проблеме выросла до очень больших размеров.

Мы считаем целесообразным указать здесь прежде всего те монографии и тематические сборники, которые содержат обобщенные данные и обширные сводки современной литературы по интересующему нас вопросу¹.

Монографии [3, 44, 70, 71, 73, 174, 207, 368, 399, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 502, 544, 545]. Сборники [43, 72, 74, 203, 246, 264, 370, 411, 461, 500, 560, 571].

Специфическим путем, по которому шло возникновение нашей земной жизни, явилось эволюционное развитие углеродистых соеди-

¹ Литература дана до 1972 г. включительно.

нений (органических веществ). Нередко в научной, а особенно в популярной литературе высказывается предположение, что на других объектах нашего звездного мира жизнь могла возникать и на основе соединений других элементов (кремния, германия и пр.). Конечно, никто и никогда фактически не наблюдал даже признаков существования таких форм жизни, и указанное предположение носит лишь очень общий, чисто-умозрительный характер, но и в такой форме оно встречает солидные теоретические возражения.

Необходимо иметь в виду, что квантовая химия, позволяющая понять специфическую электронную структуру молекул [98, 522, 523, 638], отнюдь не говорит в пользу возможности существования неуглеродной формы жизни. Все важнейшие жизненные функции невозможны без наличия конъюгированных или резонансных молекулярных систем, богатых π -электронами с характерным для них явлением делокализации электронов [519, 520]. Но ни один другой элемент не может в этом отношении заменить углерод. В частности, и близкий к нему по положению в таблице Менделеева кремний, несмотря на обилие его на земной поверхности, не смог послужить основой для структурных компонентов жизни [31, 241, 637]. Это можно было бы предвидеть и теоретически, согласно современным концепциям квантовой химии, на основании изучения электронной делокализации, которая свойственна только соединениям углерода и отсутствует у соединений кремния [54, 521].

Поэтому как в приведенных выше сводных работах, так и в данном обзоре все внимание сосредоточивается на эволюционном развитии углеродистых соединений, приведшем на Земле к возникновению жизни.

Автор считает своим долгом отметить большой вклад Р. М. Леммона и Дж. С. Пименталя (США), подготовивших обзор по национальным материалам и выразить благодарность всем коллегам, в тесном сотрудничестве с которыми была подготовлена эта глава.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ИСХОДНЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Современные астрономические данные выявляют удивительную взаимосвязанность всей галактической системы как одного целого. Эволюция Вселенной представляется нам в настоящее время единым процессом развития, в котором каждый последующий этап неразрывно связан с предыдущим и может быть

понят только в свете его изучения. За исходный пункт этой эволюции, длившейся многие миллиарды лет, условно можно принять процесс нуклеосинтеза, т. е. процесс образования атомных ядер всех известных нам элементов. При этом эволюцию нуклеосинтеза обычно ставят в параллель с процессом эволюционного развития звезд [196, 261, 262, 277, 322, 599]. Теперь стало ясным, что в нашей звездной системе непрерывно происходил и теперь происходит процесс звездообразования [118, 152, 296, 568].

Условно принимается, что наша Галактика состоит из пяти различных типов звездного населения [66]. К первому, наиболее древнему типу относятся звезды, возраст которых близок к возрасту самой Галактики в целом [260, 349, 351]. Он лежит в пределах от 12 до 20 млрд. лет. Наше Солнце принадлежит к более молодым звездам третьего поколения. Его возраст исчисляется в 5 млрд. лет, т. е. оно возникло тогда, когда наша Галактика уже давно сформировалась [190]. В нашей Галактике имеются и еще более молодые звездные населения. К ним относятся, в частности, звезды, расположенные непосредственно вблизи спиральных ветвей Галактики [146, 197].

По составу элементов звезды первого поколения отличаются гораздо большим преобладанием водорода над металлами, чем это наблюдается у более молодых звезд. Это наглядно показывает, что первоначальная среда, из которой образовались звезды первого поколения, почти исключительно состояла из водорода, который и теперь является преобладающим в космосе элементом (на его долю приходится 98% всего числа атомов Вселенной [261, 607]).

В противоположность этому звезды более поздних поколений (в частности, и наше Солнце) сформировались уже из смеси легких и тяжелых элементов, которые могли возникнуть гораздо позднее начала формирования Галактики [352, 657].

Согласно современным данным, возможны два пути нуклеосинтеза: стабильный, который связан с механизмом звездного лучеиспускания в стабильных звездах, и нестабильный, связанный со вспышками сверхновых звезд [208, 210, 598, 600].

Нуклеосинтез легких элементов носит экзоэргический характер. Энергия, освобождающаяся в результате нуклеосинтеза, и обеспечивает звездное лучеиспускание. Так как электростатическое отталкивание при объединении водородных ядер относительно невели-

ко, переход водорода в гелий может происходить при температуре порядка миллиона градусов. Он возможен уже в сокращающейся газовой сфере, состоящей из одного только водорода, и может начинаться сразу же после того, как эта сфера достигнет указанной температуры вследствие своего сжатия и освобождения гравитационной энергии.

В противоположность этому для возникновения наиболее тяжелых элементов необходима температура порядка нескольких миллиардов градусов, отсутствующая в недрах стабильных звезд и возникающая только при вспышке сверхновых. Углерод не требовал для своего нуклеосинтеза вспышек сверхновых звезд, а возникал еще задолго до образования тяжелых элементов в стабильном процессе звездного лучеиспускания. Углеродно-азотная реакция является наряду с протон-протоновым превращением основным термоядерным источником энергии звезд.

Водород, гелий, углерод, азот и кислород составляют группу нуклеогенетически связанных между собой элементов. Водород является самым изначальным химическим элементом во Вселенной. Из него образуются все другие элементы. Ядерное слияние водорода в результате действия протон-протонового цикла приводило к образованию гелия уже в начале звездной эволюции. Углеродно-азотный цикл в процессе «сжигания» гелия и захвата α -частиц ведет к образованию углерода, азота и кислорода в соответственно более развитых светилах, особенно в так называемых углеродных звездах [196, 197]. Поэтому углерод, как и другие легкие элементы (H, He, N, O), наиболее широко распространен во Вселенной. Его удалось обнаружить сравнительно давно при изучении спектров всех классов звезд, в том числе и их наиболее древних поколений [376]. В атмосферах звезд, обладающих наиболее высокой температурой поверхности, углерод находится в ионизированном или нейтральном атомном состоянии [324, 496], но уже начиная со звезд типа A в их спектрах выявляются γ -полосы, указывающие на возникновение здесь радикалов первичных углеродных соединений — углеводородов (метин, CH) [640]. В спектрах звезд последующих типов углеводородные полосы выявляются все с большей и большей отчетливостью по мере уменьшения температуры звездной поверхности и достигают максимальной отчетливости в спектрах M, N и R. Наряду с этим указанные спектры обнаруживают наличие в атмосфере звезд также соединений углерода с азотом

(CN) и так называемых свановских полос, обусловленных молекулами, состоящими из двух атомов углерода (C_2) [130, 555], а также трех атомов углерода (C_3) и радикала метилена (CH_2) [331].

Образование воды, молекулярных водорода, азота и кислорода, а также следующих шести двухатомных соединений: C_2 , CN, CO, CH, NH и OH [146] — является неизбежным следствием взаимодействия углерода с порожденными им азотом и кислородом в исключительно богатых водородом звездных атмосферах.

Таким образом, в атмосферах относительно холодных звезд [146, 332], в том числе и Солнца [140], водород, углерод, азот и кислород существуют главным образом как атомы и как гомо- и гетеронуклеарные двухатомные комбинации. Трехатомные молекулы H_2O , C_2 и C_2H в относительно большом количестве находятся в атмосферах углеродных звезд, которые, как предполагается, являлись источниками межзвездных углеродных зерен или графитовых частиц [353].

Вардия [632] на основании своих расчетов и ряда теоретических соображений предполагал для карликовых звезд наличие в них HCN, HCO, CH_4 и NH_3 . Однако ни одно из этих соединений еще не было здесь фактически обнаружено.

Итак, звезды различных поколений должны рассматриваться как первоначальное место синтеза исходных углеродистых соединений — предшественников органических веществ.

Звезды находятся в постоянном взаимодействии с окружающим их межзвездным пространством. Эта межзвездная среда далеко не однородна. В ней наблюдаются турбулентные процессы, местные нагревы под влиянием ионизации газа. Вспышки сверхновых звезд производят ударные волны, причем плотность газа в подобной волне повышается на несколько порядков величин. Это может иметь большое значение для образования гравитационно связанных сгущений и последующего формирования звезд [121].

Если на пути ударной волны, характеризующей распространение ионизационного фронта, оказывается газопылевое облако большой плотности, то оно сжимается под давлением горячего газа и превращается в плотное темное образование — глобулу, зародыш звезды, которое может затем за весьма короткое время еще более сжаться в результате гравитационного коллапса и превратиться в самосветящееся тело. Большое количество

подобных глобул, обычно связанных с туманностями, уже известно в настоящее время [122].

Наглядным примером этого представляется образование волокон в созвездии Лебедя. При исследованиях различных фотографий этой области, произведенных с интервалом 50 лет, обнаружено, что эти волокна, включающие некоторое количество звездных цепочек, разбегаются со значительной скоростью от некоторого общего центра, проявляющего себя как источник радиоизлучений. Такого рода явление интерпретируется Фесенковым как доказательство вспышки сверхновой звезды в прошлом в данном пункте Галактики [120]. Много аналогичных волокон в различных областях неба было сфотографировано Шайном и Газе [131].

Быстро развивающиеся сгущения, в которых уже за несколько лет проявляются заметные изменения, встречаются и в области туманности Ориона, где и в настоящее время происходит интенсивное звездообразование [172, 326]. В спектре этой туманности обнаружены узкие межзвездные полосы поглощения CH , CN^+ , CN и ряд других молекулярных полос. Кроме того, в этих сгущениях рассеяны твердые частицы размером в доли микрона. Состав этих частиц неизвестен, но по спектральным характеристикам они отождествляются с графитом и даже с алмазом [556, 634].

Таким образом, в нашей Галактике непрерывно происходит процесс формирования звезд из межзвездной материи [118, 152, 296, 568]. Наряду с этим, звезды постоянно отдают часть своего вещества в окружающую среду, обогащая ее, в частности, углеродистыми соединениями, и вместе с тем они создают в космическом пространстве благоприятные условия для синтеза различных органических веществ, излучая космические лучи в плазменные облака, содержащие ионизированные атомы различных элементов.

Например, Солнце создает так называемый солнечный ветер, срывающий верхние слои его атмосферы с очень интенсивной радиацией и при очень большой скорости. Эти слои составляют газовую компоненту солнечной короны, в которой, однако, содержатся и твердые частицы различного происхождения [256].

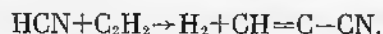
Красные гиганты типа N в громадных масштабах генерируют тончайшие углеродные частицы, которые непрерывно выталкиваются в пространство радиационным давлением и входят как главный компонент в состав космических облаков [235].

Общая масса этих частиц не превышает 1% газового состава межзвездной среды. Однако они ответственны за очень значительную световую абсорбцию, определяющую общий вид Млечного Пути. Эти частицы могут порождать молекулярные системы, так как они сильно иррадированы космическими лучами и эманациями звезд [128, 353, 445].

Поэтому не удивительно, что наблюдения в диапазоне радиоволн различных областей межзвездного пространства дают информацию о наличии в них разнообразных органических соединений [163, 181, 232, 240, 332, 527, 578].

Термодинамические данные указывают, что при наличии водорода углерод восстанавливается до метана, азот — до аммиака и кислород — до воды [430]. Действительно, недавние радиоастрономические наблюдения выявили в межзвездном пространстве наличие аммиака [213] и паров воды [214, 585]. В различных районах Млечного Пути была обнаружена монокись углерода (CO) [356, 650]. Наличие молекулярного водорода в межзвездном пространстве было предсказано еще до его фактического обнаружения [377]. HCN также наблюдался в эмиссии Млечного Пути [191, 586]. Первой органической молекулой, обнаруженной в космическом пространстве, был формальдегид [486, 587, 665]. Район его обнаружения считается пылевым, и предполагалось, что наличие этого органического вещества является следствием частичной защиты молекул от ультрафиолетового света. Более же вероятно, что оно связано с увеличением скорости образования формальдегида.

Несомненно, что в межзвездных пылевых облаках должны происходить сложные химические процессы, причем предполагается, что в межзвездной пыли большие частицы углерода захватывают другие атомы (H , N и O) и образуют все более сложные органические молекулы [190]. Одной из таких молекул, обнаруженной в межзвездном пространстве, является молекула цианоацетилена [620, 621]. Образование этой молекулы, состоящей из пяти атомов трех различных элементов, не может быть объяснено простыми газофазными реакциями, в результате которых могут синтезироваться двухатомные молекулы. Цианоацетилен мог образоваться в реакции HCN с ацетиленом:



Ходсон [337] предлагает возможную в этих условиях реакцию образования пиррола из ненасыщенной четырехуглеродной цепи и аммиака. Взаимодействие пиррола с фор-

мальдегидом могло бы явиться механизмом для образования порфиринов в плазменных реакциях [340]. Есть указания и на наличие в межзвездном пространстве других полимерных органических веществ, которые трактуются одними авторами [358, 359, 360] как порфирины, а другими как полиароматические углеводороды [231, 233, 326, 639]. Большую информацию об углеродистых соединениях межзвездной материи дают нам исследования комет. Хотя до сих пор нет вполне ясного представления о механизме их происхождения, не подлежит сомнению, что подобные неустойчивые небольшие тела не могли зародиться внутри солнечной системы.

Сгущения аналогичного состава, очевидно, возникают повсеместно в космосе из типичного межзвездного материала. По своему химическому составу кометы в основном отражают состав изначальной солнечной небулы [387]. Они содержат большое количество углеродистых соединений и поэтому могут рассматриваться как космические модели абиотического синтеза биохимически важных [467, 468] соединений.

Ядро комет рассматривается как дискретная масса твердых частиц, которые могли образоваться из типичного межзвездного материала при температуре порядка $10\text{--}100^\circ\text{K}$ [644, 646].

При приближении комет к Солнцу на расстояние меньше чем 3 а.е. можно наблюдать их спектр, обнаруживающий флуоресцентно-эмиссионные полосы, соответствующие следующим молекулам и радикалам: CN, CH, CN_2 , C_2 , C_3 , NH, NH_2 и OH, а также ион-радикалам CH^+ , OH^+ , CO^+ , N_2 и CO_2^+ [172, 404, 533, 612, 613, 655].

Предполагается, что эти соединения существуют в ядрах комет в одной из следующих форм:

замороженные свободные радикалы [234, 285],

«лед» — вода, аммиак и метан [644, 646], clathrate-type гидраты [427].

Четвертая, очень вероятная форма состоит в том, что так называемые родительские соединения, входящие во внутренние части комет, должны быть более сложными органическими соединениями, как, например, HCN, NH_2 , H_2O , CO, C_2N_2 , CH_4 , C_2H_2 и другие углеводороды [313, 332, 347, 612].

Значение этих кометных веществ для формирования биохимических соединений на предпланетной и планетной стадиях формирования Земли особенно подчеркивает Оро [467, 468, 471].

Кометы и сейчас могут до некоторой степени «подкармливать» Землю органическими веществами. Конечно, в этом отношении их роль была более значительной в прошлом, когда населенность околосолнечного кометного облака была много больше. Но и при современном обилии комет можно ожидать, что в течение своей истории Земля сталкивалась с кометами не менее 100 раз и при этом получала от них различные органические соединения [470].

Итак, атмосферы звезд, скопления газопылевой материи, кометные сгустки и межзвездное пространство содержат в себе обильное количество углерода и его соединений — органических веществ. Уже только одни эти вещества вполне могли бы обеспечить всю химическую эволюцию на пути формирования живых существ, подобно тому как это происходило у нас на Земле [397]. Указанные органические вещества могут возникать, существовать и эволюционировать в очень широком температурном интервале от 3000°K , что характерно для атмосфер углеродных звезд [146, 497, 613], до $1,8^\circ\text{K}$ в пылевых облаках [190]. Однако вряд ли эта эволюция могла приводить к возникновению жизни. Обязательным условием для этого являлось образование планетных систем.

Небесные тела достаточно большой массы вроде звезд могут быть образованы почти целиком из чистого водорода. Но совершенно немислимо существование тел размером с нашу Землю, состоящих только из одного этого элемента, так как масса этих тел недостаточна для того, чтобы удержать его от рассеивания в мировом пространстве.

Отсюда можно заключить, что в первые миллиарды лет существования нашей Галактики, когда тяжелые элементы еще не успели в ней образоваться в достаточном количестве, планетные системы, аналогичные нашей, не могли существовать, а следовательно, не могла существовать и жизнь, возникшая в процессе эволюции этих планет. Далее можно сделать вывод, что распространение жизни во Вселенной ограничивается только пределами звездных населений достаточно поздних типов.

Однако не следует думать, что наша солнечная система является чем-то экстраординарным. Аналогичных систем в нашей Галактике должно существовать великое множество. Конечно, далеко не все планеты той или иной системы могут быть обиталищами жизни. Для этого они должны удовлетворять ряду условий по своим размерам, химическому со-

ставу, удаленности от центрального светила, температуре, освещенности и т. д.

Эти условия, по-видимому, могут иметь место лишь на одной или двух планетах данной системы. Шепли [576], учитывая их, считал, что во Вселенной существует 10^8 мест, подходящих для возникновения и существования жизни. Однако Хуанг увеличивает эту цифру до 10^{18} [354]. Расчеты Брауна показывают, что множество видимых звезд может иметь планетные системы с одной или двумя планетами в зоне возможного существования жизни. Даже если допустить, что на условия спонтанного возникновения жизни накладываются еще более строгие ограничения, чем мы думали до сих пор, то и тогда возникновение жизни могло произойти в нашей Галактике, по расчетам Брауна, по меньшей мере 10 млрд. раз [187].

ЭВОЛЮЦИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Пути образования солнечной системы и механизм этого процесса еще не могут считаться вполне выясненными в настоящее время. Но уже со времен Рессела [543] считается, что в основе формирования Солнца и окружающих его планет лежит процесс объединения диффузных частиц космической материи [224, 278, 299, 350, 384, 599, 605, 623, 624, 643, 654].

Согласно этим представлениям, исходным образованием для формирования солнечной системы явилось облако газопылевой материи, обладавшее размером, соизмеримым с масштабом современной планетной системы, температурой порядка 50°K и слабым магнитным полем. Оно содержало примерно 1000 водородных атомов на 1 см^3 , значительно меньшее количество гелия и других инертных элементов, совместно с водородом образующих газовую компоненту облака. Здесь же мог находиться метан, который сохраняется в газообразном состоянии при сравнительно низких температурах [163].

Остальные элементы таблицы Менделеева входили главным образом в состав пыли. Их содержание составляло лишь тысячные или еще меньшие доли процента от общей массы газопылевого облака. Газопылевое облако было гравитационно неустойчивым, характеризовалось известной турбулентностью и некоторой центральной конденсацией, что в конечном итоге и привело к его полному разрушению. При этом, когда масса центрального тела стремительно нарастала, оно быст-

ро уплотнялось и, разогреваясь за счет гравитационной энергии, а затем и за счет водородно-гелиевой реакции, превратилось в наше светило; остаток вещества, не вошедший в состав Солнца, сформировался в дискоидальное облако, давшее начало образованию «протопланет» [132, 144, 209, 385, 401, 628, 630, 645, 647].

Такой путь формирования Солнца привел к тому, что его атомный состав находится в прямом соответствии с составом породившей его газопылевой небулы. Водород составляет здесь главную массу, за ним идет гелий, затем кислород, азот и углерод, тогда как последующие, более тяжелые элементы представлены тысячными, десятитысячными и меньшими долями процента [288, 415, 576].

Согласно мнению Броуна [185], все вещества, входящие в исходную газопылевую солнечную небулу, можно подразделить на следующие три группы. К так называемой газовой группе относятся водород, гелий и благородные газы, которые сохраняют свое газообразное состояние при температурах, близких к абсолютному нулю. Далее нужно назвать группу «льда», куда входили соединения, образованные из углерода, азота, кислорода и водорода, такие, как вода, аммиак и метан (последний мог быть частично отнесен и к первой группе). Наконец, группу, условно называемую «земельной», составляли соединения кремния, магния, железа и прочих более тяжелых элементов. Для Солнца соотношение относительной массы этих групп можно приблизительно выразить следующим образом. Если земельную группу принять за единицу, то веществ группы льда будет содержаться в 4—7 раз, а газовой группы — в 300—600 раз больше [185, 188, 606].

Иные соотношения создавались в протопланетном дискоидальном облаке [626, 627, 647]. Его температура в большой степени зависела, с одной стороны, от все нарастающей солнечной радиации, а с другой — от потери облаком тепла путем лучеиспускания в межзвездное пространство. Поэтому температура облака сильно различалась на периферии и в центральных областях газопылевого диска. Это обстоятельство и должно было определить характер распределения в диске протопланетного материала [186].

Ближе к периферии, там, где происходило интенсивное охлаждение, вещества группы «льда» с большой скоростью конденсировались, «намерзали» на «земельные» частицы, образуя так называемые кометозималии. В районе орбиты Юпитера и дальше к пери-

ферии газ, пыль и кометозималии быстро объединялись в большие планеты, определяя тем самым их химический состав [647].

Иначе должны были развиваться процессы планетообразования в более близких к Солнцу областях дискоидального облака, в районе формирования планет земного типа. Здесь газовая компонента облака почти целиком была утрачена, «лед» сохранился лишь частично, и основным явился материал «земельной» группы. Аккумуляция состоящих из этого материала частиц пыли приводила к образованию планетозималий — мелких тел, включавших все нелетучие вещества первичного пылевого облака — силикаты и их гидраты, металлы (в частности, железо), их окислы, сульфиды, карбиды и частички самородного углерода, а также некоторое количество компонентов группы «льда» — воды в форме гидратов аммонийных солей и органических веществ (углеводородов). Дальнейшее объединение планетозималий и привело к формированию планет земного типа, а также астероидов [65, 344, 581, 606, 629].

Возникшие таким образом планеты уже различались между собой по тому исходному материалу, из которого они были образованы, и это различие усугублялось далее тем, что каждая из них имела свою последующую сложную историю, прежде чем стать такой, какой мы наблюдаем ее сейчас [528, 547]. В частности, это решающим образом сказывалось и на эволюции присутствующих планетам углеродистых соединений.

Юпитер в своей очень глубокой и турбулентной атмосфере содержит большие количества аммиака, метана, водорода, а возможно, и водяного пара [142, 463, 597, 648, 649]. Наличие в атмосфере этой планеты указанных веществ позволило высказать предположение, что Юпитер может служить естественной моделью для изучения эволюции органических веществ [546], тем более что в пределах его обширного облачного слоя должна находиться зона, где преобладают относительно мягкие температурные условия [423]. Широко развернувшиеся за последнее время лабораторные опыты, имитирующие возможные для Юпитера условия, показали, что в соответствующих газовых смесях под влиянием электрических разрядов и ультрафиолетового света образуются сложные и полимерные органические вещества [499, 513, 557, 651]. Однако Левис и Принн [402] в опубликованной сводной статье приходят к заключению, что нельзя переносить результаты этих лабораторных опытов непосред-

ственно на современную атмосферу Юпитера и что реально существующие на этой планете условия противоречат возможности сохранения органических веществ и тем более возникновению жизни.

Сходные с Юпитером условия, по-видимому, существуют на Сатурне и на других больших планетах, но следует принять во внимание, что по мере увеличения их расстояния от Солнца уменьшается и поток падающей на них солнечной радиации [320, 383, 433, 539, 547].

Иной состав и иные пути эволюции углеродистых соединений свойственны планетам земного типа. Меркурий является наименее изученной планетой. Он представляет собой голую скалу, лишенную атмосферы и, таким образом, открытую для всего спектра солнечной радиации. Его обращенная к Солнцу поверхность нагрета до 350°C , а противоположная охлаждена до -170°C . Эти условия не только противоречат возникновению здесь жизни, но и ставят под сомнение какую-либо далеко идущую эволюцию углеродистых соединений, сдуваемых солнечным ветром [141, 169, 230, 348].

В противоположность Меркурию Венера имеет очень обширную атмосферу, сверху закрытую плотным облачным слоем, который мешает непосредственному телескопическому изучению этой планеты. Только радиоастрономические исследования позволили до некоторой степени познать состав атмосферы и температуру на Венере [51, 64, 182, 361, 462, 494, 595].

Однако основная информация о Венере была получена от советских автоматических станций типа «Венера». При этом было установлено, что атмосферное давление на поверхности планеты равно ~ 90 атм. В основном атмосфера Венеры на 93—97% состоит из CO_2 . В ней меньше чем 0,4% кислорода, небольшое количество паров воды и 2—5% азота и других инертных газов. Установленная ранее астрофизическими измерениями высокая температура поверхности планеты [548] была подтверждена и уточнена данными автоматических станций. Она составляет около $400\text{—}530^{\circ}\text{C}$ ¹. При переходе к более высоким слоям атмосферы температура постепенно снижается, достигая минусовых величин. Полученные данные говорят о том, что хотя Венера сформировалась из того же планетозимального материала, что и Земля, имеет примерно тот же размер и находится на орби-

¹ Более точные данные о планетах см. в гл. 4 наст. тома. — *Прим. ред.*

те, расположенной рядом с землей, она не может служить естественной моделью для изучения путей эволюции нашей планеты (см., однако [438]). По мнению Фесенкова, Венера, будучи первоначально холодным телом, не подвергалась внутреннему расслоению. Поэтому в противоположность тому, что имело место на Земле, долгоживущие радиоактивные элементы остались в ней распределенными более или менее равномерно во всей массе, обусловив ее постепенное разогревание, которое продолжается до сих пор [119].

Более перспективным в указанном отношении является Марс [503, 662]. Он уже давно привлекал к себе внимание человека именно с точки зрения возможности возникновения и существования на нем жизни. Поэтому научная литература по Марсу исключительно обширна [286]. Однако очень многие из прежних предположений, например биологическую причину сезонных изменений как результат бурного летнего развития растительности на поверхности Марса, пришлось в той или иной мере отвергнуть.

В противоположность этому другие данные наблюдательной астрономии и радиоастрономии нашли свое подтверждение и существенное дополнение в результате исследований американских автоматических аппаратов «Маринер-4», «Маринер-6» и «Маринер-7», а также вывода на орбиту искусственных спутников Марса — советских автоматических станций «Марс-2» и «Марс-3».

Суммируя имеющиеся данные [93, 115, 162, 168, 212, 286, 328, 372, 398, 422, 646, 549, 584], можно следующим образом охарактеризовать планету Марс. Основным в атмосфере Марса является углекислый газ (CO_2), содержание которого составляет от 50 до 100% [168, 374]. Количество азота не превышает 5% [223], отмечаются очень небольшие количества воды [484, 619] и CO [362]. Теоретически вероятно наличие аргона в количествах, сравнимых с CO_2 , однако данных наблюдения не имеется.

Атмосфера Марса сильно разрежена [327, 371, 373, 522], средняя температура на планете у основания атмосферы примерно 200—210° К. Летом на экваторе температура днем может повышаться до +30° С, но в ту же ночь снижаться до —70° или —80° С. Ультрафиолетовая радиация Солнца с длиной волны 1900 Å достигает поверхности Марса, если его атмосфера не затуманена песчаными бурями. Поверхностный слой этой планеты образован песчанопылевым покровом, содержащим значительное количество лимонита.

Внешний вид Марса во многом напоминает Луну. В основном это пустыня, лишенная воды, со значительными возвышенностями и низинами, вся покрытая кратерами различного размера, возраста и происхождения. В ряде случаев эти кратеры имеют более пологие склоны, чем на Луне, что указывает на разрушение их ветрами и большими температурными перепадами. Полюсы Марса покрыты белыми шапками, состоящими из твердой CO_2 с водно-ледяной подстилкой [328, 446]. Летом происходит их таяние, связанное с распространяющимся к экватору потемнением так называемых морей. Малое количество воды, полная проницаемость атмосферы для коротковолнового ультрафиолетового излучения и низкие температуры с их большими перепадами создавали бы очень тяжелые условия для жизни земных организмов, однако эти условия не исключают полностью возможности существования жизни на Марсе.

Некоторые авторы высказывают предположения, что Марс в течение своей планетной истории претерпел существенные изменения. В начальные периоды он был более сходен с Землей, и возникновение здесь жизни могло происходить теми же путями, что и на нашей планете. А раз возникнув, организмы постепенно адаптировались бы к становившимся все более суровым условиям марсианской поверхности [577, 626].

Наиболее значительную информацию о том материале, из которого сформировалась Земля и, в частности, о тех исходных углеродистых соединениях, эволюция которых на нашей планете привела к возникновению жизни, дают нам широко развернувшиеся за последнее время исследования метеоритов. Это обусловлено, во-первых, тем, что метеориты до последнего времени являлись единственными внеземными объектами, которые могут быть подвергнуты непосредственному химическому и минералогическому анализу, и, во-вторых, тем, что, как это теперь стало ясным, их состав должен быть очень близким к составу планетозималий, послуживших исходным материалом для образования планет земного типа. Мы имеем обширные сводки современных работ по метеоритам, насчитывающие сотни статей и книг [11, 147, 148, 370, 439].

Проблема происхождения метеоритов еще не может считаться полностью разрешенной. Но с большой долей вероятности принимается, что они образовались в нашей солнечной системе, в зоне астероидов, которые, по видимому, и являются для них «материнскими телами». Время их образования близко ко

времени образования солнечной системы. В основном все метеориты можно разделить на две группы — железные и каменные. Предполагается, что первые возникли из центральной, а вторые из периферийной части «родительских тел». Все они содержат то или иное количество углерода и его соединений [45, 416].

В железных метеоритах углерод содержится в самородной форме или в виде соединения с металлами — [когенит — $(\text{FeNiCo})_3\text{C}$]. Каменные метеориты в среднем содержат около 1% углерода. Особенно богаты углеродом углистые хондриты, в которых содержание этого элемента может достигать почти 5%; значительная часть углерода в этих метеоритах находится в виде органических веществ [9, 18, 319]. Содержание последних в углистых хондритах достигает 7%, причем примерно одна десятая их растворима в органических растворителях. Это так называемые битуминообразные вещества — сложная смесь соединений, в основном углеводородов [8]. Стадер [603], Кваша [45] и Оро [450, 482] исследовали углеводороды углистых хондритов с помощью комбинированного газового хроматографа — масс-спектрометра. Они показали, что распределение углеводородов в углистых хондритах несколько сходно с их распределением в древних осадочных породах, а также в продуктах abiогенного синтеза в каталитических реакциях Фишера-Тропша. Во всех углистых хондритах, которые исследовал Оро, в небольшом количестве обнаружены изопреноидные углеводороды, в частности пристан, фитан и норпристан, которые одно время считались индикаторами биогенного происхождения этих соединений [207]. Однако Вдовыкин [11] и Оро [475] на примере метеорита Грозная, показали, что здесь эти вещества имеют abiогенную природу и не являются результатом контаминирования в земных условиях. В модельном эксперименте они могут быть образованы и путем неорганического синтеза [441].

Наряду с углеводородами в углистых хондритах обнаружены и другие органические вещества [8, 12, 23, 59, 315, 316, 319, 321, 393, 449, 450, 473, 601, 602, 660], в частности ароматические и жирные кислоты, серо- и хлорсодержащие органические вещества (тиофены и алкилхлориды), углеводы, азотистые циклические соединения (пурины и триазины), порфирины [338] и аминокислоты [363]. Обнаружение аминокислот вызвало особенно острую дискуссию в литературе, так как их источником в метеоритах легко могли быть

вещества, занесенные с Земли, в частности следы пальцев экспериментатора. В ряде случаев аминокислотный состав метеоритных аминокислот соответствовал составу следов пальцев [301, 582]. За последние годы появились работы, в которых доказано внеземное происхождение аминокислот. В этом отношении особенно показательны результаты анализов Мурчисоновского метеорита, недавно упавшего в Австралии и сразу подвергнутого анализу. В нем наряду с преобладающим количеством обычно встречающихся в хондритах аминокислот — глицина, аланина, глютаминовой кислоты и пролина — было найдено еще небольшое содержание 2-метилаланина и саркозина, которые не входят в состав земных белков, но возникают при abiогенных синтезах. Дальнейшие исследования этого метеорита показали наличие еще 12 небелковых аминокислот, которые могли возникнуть только в самом метеорите или, точнее, еще до его образования при воздействии солнечной радиации на изначальную космическую пыль [390, 391].

Все найденные в метеоритах аминокислоты оптически неактивны, за исключением тех случаев, когда они были занесены земными загрязнениями. Имеется и ряд других признаков, отличающих метеоритную органику от веществ древнейших отложений Земли. Возраст метеоритных веществ исчисляется примерно в 4,5 млрд. лет [417], следовательно, они на 1 млрд. лет старше, чем углеводородные соединения, найденные на Земле.

В начале 60-х годов Клаус и др. [216, 443] описали на основании морфологического сходства люминесцирующие в ультрафиолетовых лучах микровключения углистых хондритов как остатки космических микроорганизмов, из которых будто бы и могли образоваться органические вещества в метеоритах. Однако сейчас можно считать достаточно хорошо установленным [10, 257], что так называемые организованные элементы углистых хондритов, морфологически иногда очень сходные с остатками микробов, представляют собой в одних случаях частицы минерального происхождения или комочки углестого вещества, а в других — результаты земной контаминации. Стадер и соавторы [603] показали, что почти все углеводородные соединения, идентифицированные в углистых хондритах, могут быть получены в реакции Фишера-Тропша из смеси CO , H_2 и NH_3 в присутствии пыли железистых метеоритов, содержащих каталитически активные элементы Co , Fe и Ni .

В этих же условиях синтезируется ряд органических соединений, представляющих большой биологический интерес и обнаруженных в метеоритах. При этом удалось идентифицировать *n*-алканы, изо-, антиизо- и диметил-алканы, аденин, гуанин, ксантин, глицин, аланин, аспарагиновую кислоту, глутаминовую кислоту, тирозин, гистидин, пирроловые полимеры и другие органические соединения [315]. Очень важно, что в полученных таким образом веществах обнаружено изотопное соотношение по углероду того же знака и той же величины, какое наблюдается в углеродистых соединениях метеоритов. Эти данные свидетельствуют о том, что органические вещества в метеоритах могли возникать в каталитических реакциях превращения окиси углерода, водорода и аммиака в солнечной небуле [393].

Итак, органические вещества углистых хондритов отличаются от биогенных органических веществ горных пород своим углеродно-изотопным составом, отсутствием оптической активности, различным характером соотношения отдельных составляющих их соединений, наличием хлора и рядом других особенностей [633]. Все это указывает на их абиогенный характер, на то, что они образовались во время агломерации исходного для метеоритов вещества.

Вторым после метеоритов неземным объектом, подвергшимся непосредственному химическому и минералогическому изучению, явились образцы лунного грунта, доставленного американскими космонавтами на «Аполлоне-11» и «Аполлоне-12» и советской автоматической станцией «Луна-16» [22, 59, 211, 244, 388, 575, 594, 653].

Возраст образцов лунной пыли с Моря Спокойствия лежит в пределах от 3,7 до 4,6 млрд. лет. В этом отношении лунные образцы занимают место между старейшими образцами горных пород Земли и метеоритным материалом. Таким образом, лунные органические вещества, если бы они были найдены, представляли бы особый интерес, так как относились бы к тому периоду времени, который до этого был совершенно не исследован. Их природа могла бы иметь абиотический характер [664] (абиогенное образование на самой Луне или их занос с падающими на лунную поверхность метеоритами) или же они возникли в результате жизнедеятельности существующих или существовавших на Луне организмов [281].

К сожалению, анализы лунного материала дали в этом отношении несколько разочаро-

ывающие результаты. Общее содержание углерода в лунной пыли не так уж мало. В среднем оно выражается 150 ч. н. млн. [249, 364, 434]. В земных породах эта величина приблизительно равна 200 ч. н. млн. [418]. Однако на долю органических веществ в лунной пыли приходится менее чем 2 ч. н. млн. Здесь, согласно данным ряда авторов [280, 389, 483], не удалось обнаружить ни сахаров, ни нуклеиновых кислот, ни жирных кислот, ни аминокислот, хотя Фокс и его сотрудники в противоположность этому указывают, что ими при помощи очень чувствительного аминокислотного анализатора установлено наличие в образцах, взятых экипажами «Аполлона-11» и «Аполлона-12» из траншей, минимального количества аминокислот (20—70 ч. н. млрд. частей лунного грунта). Здесь главным образом можно предполагать глицин, аланин и др. [272, 308]. Аналогичное указание делают также Наги и сотрудники [442]. В лунной пыли («Аполлон-11») были также обнаружены следы порфиринов, но, как оказалось, они не принадлежали Луне, а были синтезированы в ракетных газах [339, 340].

Обнаруженные в лунной пыли при кислотном гидролизе углеводороды могли генерироваться из карбидов, которые являются важными компонентами углеродистого комплекса поверхности Луны [150].

Никаких микроструктур, свидетельствующих о наличии на Луне организмов, живущих в настоящее время или живших в прошлом, не было обнаружено [158, 562]. Изотопная композиция лунного углерода очень своеобразна. Лунный углерод, по-видимому, является смесью углерода местного происхождения, метеоритов и солнечного ветра [393]. Ненормально высокое содержание ^{13}C в лунной пыли не может быть приписано карбонатной фазе из-за того, что количество карбонатов, если они вообще здесь имеются, исключительно мало.

На основании химического и изотопного состава современный углерод на Луне, по-видимому, не ведет свое начало от углистых хондритов, которые непрерывно падали на лунную поверхность в течение миллиардов лет. Возможно, что лунные карбиды произошли от содержащих эти вещества железных метеоритов. Однако минералогические исследования выявляют очень малые включения никель-железного метеоритного материала [365].

То обстоятельство, что углерод на Луне представлен не гетероатомными соединениями с водородом, а в основном карбидами, окислами и элементарным углеродом, а так-

же его высокое обогащение ^{13}C дают основание предполагать, что он имел на лунной поверхности свою уникальную историю. Органические вещества первоначального материала и углистых хондритов, попадавших на Луну, разлагались под влиянием солнечного ветра на ничем не защищенной лунной поверхности и не удерживались нашим естественным спутником — Луной, на которой сохранились лишь более устойчивые и тяжелые соединения углерода.

Итак, все приведенные выше факты говорят о том, что как межзвездное пространство, так и облака газопылевой материи весьма богаты углеродом и органическими веществами. Эти вещества имелись и в протопланетной дискоидальной солнечной небуле. Но в тех районах небулы, где господствовали более высокие температуры, ее газовые компоненты — водород, гелий и другие благородные элементы — должны были в значительной своей части улететь в периферийные районы небулы. Такая же судьба должна была постигнуть и метан. Еще Суэс [604] и Браун [184] указывали на то, что содержание благородных газов на Земле весьма снижено по сравнению с содержанием их в космосе. Обилие их было сильно «истощено» в результате улетучивания из той части протопланетного облака, в которой формировалась Земля. Это улетучивание происходило еще до того, как Земля сформировалась как планета, в условиях очень низкого гравитационного поля.

Согласно мнению Юри [625], становится понятным, почему содержание неона на нашей планете «истощено» в значительно большей степени, чем более тяжелого ксенона. Но если бы «истощение» протекало всецело путем фракционирования по массе, т. е. имело место улетучивание из гравитационного поля по молекулярному весу, то метан должен был бы «истощаться» в такой же степени, как и неон; фактически же углерод сохраняется на Земле в гораздо большей доле. Это указывает на то, что он удерживался при формировании нашей планеты не в виде метана, а в виде более тяжелых химических соединений, в частности органических веществ, синтезировавшихся в условиях межзвездной среды в протопланетной небуле. Эти космические (по своему происхождению) органические вещества вошли в состав планетозималий, послуживших материалом для образования планет земного типа и астероидов. Каждая из планет, возникших таким образом из сходного материала, имела в дальнейшем свою, присутствующую только ей одной, длинную и сложную

термическую историю, в течение которой исходные органические вещества эволюционировали специфическим для каждой данной планеты образом, что и определило современный состав ее углеродистых соединений.

Термическая история астероидов вследствие их малого веса была более сжатой, чем у планет, и поэтому возникающие при их дроблении метеориты, по-видимому, сохраняли в определенной степени свой первоначальный состав и структуру.

Космические исследования в известной степени информируют нас о тех абиогенных углеродистых соединениях, которые явились исходными для дальнейшей эволюции земной органики на пути к возникновению жизни. Однако этого еще недостаточно для того, чтобы познать эти пути. К их познанию мы можем приблизиться, с одной стороны, изучая современную геохимию углеродистых соединений, а с другой — моделируя поведение органических веществ в тех условиях, которые могли иметь место на Земле в начальные периоды ее существования.

ЭВОЛЮЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НА ЗЕМЛЕ

В настоящее время образование и начальные стадии эволюции Земли как планеты изучаются в самых широких масштабах как с геологической, так и геохимической точек зрения [2, 13, 14, 20, 21, 60, 163, 181, 243, 255, 545, 622, 624, 629, 630]. Тем не менее этот этап эволюции остается еще недостаточно познанным и в ряде вопросов вызывает большие разногласия.

Согласно широко распространенным в настоящее время представлениям, наша планета сформировалась путем аккумуляции холодных твердых тел с различным содержанием железа и силикатов, но, в основном, лишенных таких свободных газов и летучих соединений, как молекулярный водород, легкие инертные элементы и метан. Они были потеряны еще тем районом газопылевой небулы, в котором происходило формирование Земли. Лишь небольшое количество этих газов могло сохраниться в составе уже сформировавшейся Земли в той мере, в какой они были адсорбированы твердыми компонентами небулы. Они могли образовать первичную атмосферу Земли, однако эта атмосфера не могла быть долговечной, так как составляющие ее газы все еще не могли удерживаться земным притяжением. Потеряв их, Земля приобрела в целом современную массу и тот состав, кото-

рый характерен для нее в настоящее время и который близок к среднему составу метеоритов.

Оставшаяся компактная масса Земли продолжала эволюционировать благодаря внутренней энергии. При этом произошло разделение этой массы на ядро, мантию и кору. Механизм такого рода дифференциации, очень характерный именно для нашей планеты, все еще остается далеко не ясным. Чаще всего для его объяснения выдвигается гипотеза вторичного расплавления нашей планеты за счет начального гравитационного тепла и радиогенного разогрева. Однако для полного расплавления Земли таким путем потребовалось бы время порядка нескольких миллиардов лет, а фактически дифференциация осуществилась в пределах несравненно более короткого срока. Предполагается, что важную роль в полном или скорее частичном расплавлении Земли сыграли «короткоживущие» и ныне «вымершие» изотопы, такие, как ^{40}Be , ^{26}Al , ^{129}I , ^{244}Pu и др.

Во всяком случае, весь дальнейший ход эволюции нашей планеты определялся ее термической историей. При формировании планеты основным источником ее внутреннего тепла являлись гравитационная энергия, выделявшаяся при агломерации и сжатии земного вещества, и энергия, образовавшаяся при распаде радиоактивных элементов, которые не распределялись по всей массе Земли, а в основном перемещались к ее периферии. Наиболее важным рубежом в развитии Земли явилось образование на ее поверхности коры, атмосферы и гидросферы. Как известно, современная земная кора состоит из гранитной и базальтовой оболочек. Кору подстилает так называемая мантия, характеризующаяся бедными силицием ультраосновными породами (дунитами).

Виноградов [15] на основании своих опытов по зонной плавке вещества каменных метеоритов пришел к убеждению, что дуниты мантии являются остатками от выплавления первоначального вещества Земли, по своему составу аналогичного составу хондритов. Выплавление из толщи мантии легких базальтовых пород под влиянием радиогенного тепла должно было сопровождаться выделением различных паров и газов вследствие их испарения по мере повышения температуры или вследствие их образования в твердых земных оболочках при совершавшихся здесь радиоактивных, радиохимических и химических процессах. Поэтому образование водной и газовой оболочек Земли (ее гидросферы и атмосферы)

было с самого начала тесно связано с процессами, происходившими в литосфере.

Количество воды на земной поверхности в первые периоды существования нашей планеты было невелико [541, 623]. Основная масса воды, образовавшей Мировой океан, появилась лишь в самом начале архейской эры, уже после формирования земной коры. Она образовывалась постепенно при формировании литосферы из силикатных гидратов или вообще из связанной конституционной воды земных недр [19, 69, 540].

При этом воды в архее существенно отличались по своему химическому составу от современных. В них были растворены выделяемые вулканами кислые газообразные продукты — HCl , HF , борная кислота, H_2S , CO_2 , SiH_4 и другие углеводороды. Поэтому они обладали кислой реакцией. Лишь к середине архей состав воды древних океанов стал приближаться к современному. Кислоты нейтрализовались, подвергаясь воздействию силикатов осадочных отложений и карбонатов K , Na , Ca и Mg [114] (см., однако, [542, 580]).

Несмотря на то, что Земля при своем формировании лишилась свободного, молекулярного водорода, она должна была сохранить этот элемент в форме разнообразных соединений, которые придавали восстановительный характер как самой литосфере, так и возникавшей на ее основе вторичной атмосфере. Характерный для современной атмосферы молекулярный кислород здесь практически отсутствовал [218, 344]. Только очень небольшое его количество могло возникать при фотолизе паров коротковолновыми ультрафиолетовыми лучами [312]. Однако даже в этом случае кислород не мог накапливаться в атмосфере в значительных количествах, так как он очень быстро и полно поглощался ненасыщенными им горными породами [396].

Мы и в настоящее время можем наблюдать такого рода процесс поглощения O_2 . Так, например, выбрасываемые на земную поверхность при современных вулканических извержениях лавовые массы обычно бывают очень богаты закисью металлов. Поэтому лавы и базальты окрашены в черный и зеленый цвета, тогда как возникающие из них осадочные образования (красные или желтые пески и глины) богаты окисной формой железа. Таким образом, даже при обилии в современной атмосфере свободного кислорода он окисляет только самую поверхностную пленку земной коры, и, как указывал еще Гольдшмидт, если бы сейчас не происходило постоянного биогенного образования этого газа, он исчез бы

из нашей атмосферы в самое непродолжительное время, поглощенный горными породами [290].

Следовательно, до образования биогенного кислорода [4, 16] вторичная атмосфера была лишена свободного кислорода и имела восстановительный характер. Это может быть констатировано на основании прямых геологических данных, полученных при изучении докембрийских отложений.

Рутген [544] делит время существования нашей планеты на два основных периода — актуалистический (подобный современному) и доактуалистический — период, предшествовавший ему. В эти периоды геологические процессы, происходившие на земной поверхности, глубоко различались между собой. Так, например, в современный актуалистический период при наличии богатой свободным кислородом атмосферы главную роль в выветривании основных горных пород играют химические процессы. Транспортируются и отлагаются уже подвергавшиеся окислению минералы. Если, наоборот, атмосфера носила восстановительный характер (как это предполагается для доактуалистического периода), минералы основных горных пород перерабатывались только физически и откладывались в химически неизменном виде. Ряд изученных в этом отношении отложений, возраст которых превышает 2 млрд. лет, убедительно свидетельствует об их образовании в условиях отсутствия свободного кислорода [344, 366, 400, 526, 527].

Некоторое представление о возможном обогащении древней атмосферы Земли CO_2 и CO дают нам исследования газов, выделяемых современными вулканами и фумаролами. В этих выделениях углерод представлен в основном в своей окисленной форме, а метан составляет лишь небольшую примесь [67, 110, 111]. Источником этих веществ могли бы явиться рассеянный в базальтах графит, а также органические вещества космического происхождения. Окисление углерода могло идти за счет H_2O . При этом возникали CO_2 , CO , CH_4 и H_2 — газы, нередко обнаруживаемые и в пустотах изверженных горных пород. При высоких температурах равновесие сдвигалось в сторону CH_4 , а при более низких — в сторону CO_2 . В результате этих процессов древние вулканы выбрасывали как CH_4 , так и CO_2 и CO . Метан и окись углерода переходили главным образом в газовую оболочку, а CO_2 распределялся между атмосферой и водой [17, 19]. Однако значительная часть растворенной в воде океана уголекислоты

взаимодействовала с силикатами и переходила в осадки в виде карбонатов в противоположность тому, что могло бы происходить в атмосфере Марса, лишенного открытых водных пространств.

Подводя итог, можно прийти к заключению, что Земля уже с самого начала своего образования была обогащена как самородным и карбидным углеродом, так и космическими органическими веществами, в ряде случаев весьма сложными и высокомолекулярными.

Как отмечали еще Миллер и Юри [68], указанные органические вещества при гравитационном и радиогенном разогреве Земли должны были в той или иной мере подвергаться пиролизу, а возникавшая при этом равновесная смесь (CH_4 , CO_2 , CO , N_2 , NH_3 , H_2O и H_2) возгонялась на земную поверхность и служила материалом для вторичного синтеза органических соединений под воздействием лучистой энергии и других энергетических факторов. Однако сейчас становится очевидным, что уже в самих недрах земной коры происходил (видимо, и сейчас происходит) не только распад, но и синтез органических веществ хотя бы в результате реакции Фишера-Тропша [315, 393] и других аналогичных абиотических процессов [237].

Познание всей совокупности этих сложных абиогенных органо-химических превращений, происходивших когда-то на Земле, чрезвычайно затруднено тем, что уже возникшая жизнь пышно развилась на поверхности нашей планеты и образовала здесь зону жизни — биосферу. В пределах этой зоны мы теперь уже не можем непосредственно в природных условиях наблюдать предбиологическую химическую эволюцию органических веществ. С возникновением и дальнейшим развитием жизни произошло резкое изменение условий на земной поверхности, исключаяющее всякую возможность длительной эволюции органических веществ теми путями, какими эта эволюция совершалась в абиотическую эпоху существования Земли. Если бы в настоящее время каким-то образом даже и возникли абиогенные органические вещества, они немедленно были бы уничтожены, съедены микроорганизмами, повсеместно населяющими почву, воду и воздух, на что указывал еще Ч. Дарвин [225] в одном из своих писем.

Как ни парадоксально это звучит, но главной причиной того, что жизнь сейчас не возникает на Земле, является то, что она уже возникла [451] (см., однако, [369]). То обстоятельство, что жизнь имела свое развитие уже в течение многих и многих сотен мил-

лионов лет, исключает возможность изучения в чистом виде абиогенных синтезов в природных условиях не только в пределах биосферы, но и в древнейших отложениях земной коры. Здесь скапливаются органические вещества биогенного происхождения, возникшие в результате жизнедеятельности организмов — процесса исключительно мощного и совершавшегося в гораздо более быстрых темпах, чем абиогенные синтезы.

Основная трудность состоит в том, что мы не располагаем химическими методами, которые позволили бы нам надежно различать биогенную и абиогенную органику. Всего несколько лет назад обнаружение порфиринов или иных сложных органических соединений не только на Земле, но и на любом космическом объекте уже считалось убедительным доказательством наличия здесь жизни. Так, например, еще в 1966 г. Юри писал по поводу обнаруженных в углистых метеоритах органических веществ: «По-видимому, безопасно сказать, что если бы подобного рода материалы были обнаружены на Земле, никто бы не задавался вопросом их биологического происхождения» [631].

Однако в настоящее время это положение коренным образом изменилось. Мы не можем сейчас назвать ни одного обнаруживаемого нами в древнейших отложениях Земли органического соединения, которое само по себе могло бы служить надежным индикатором своего биотического или абиотического происхождения. В частности, это относится и к изопреноидам, например к пристану или фитану, которые Кальвин [205] одно время рассматривал как такого рода индикаторы. Но оказалось, что эти вещества могут синтезироваться абиогенным путем [166].

Конечно, чем древнее исследуемые породы, тем результаты абиотических процессов должны были бы выявляться отчетливее. Так, например, Робинзон, изучая образцы нефти, полученной из различных месторождений, обратил внимание на то, что сырая нефть более древнего происхождения содержит вещества, очень далеко отстоящие от биохимических соединений, но легко возникающие абиогенным путем [535, 536]. Однако это положение еще далеко не всем представляется в достаточной степени убедительным, и именно отсутствие надежных химических критериев биогенного или абиогенного происхождения природных органических веществ обуславливает острые споры между сторонниками минерального и биологического происхождения нефти [6, 7, 57, 58, 96, 97, 245, 323, 614].

Конечно, ни одна, ни другая, крайняя в этом отношении, точка зрения не может считаться приемлемой. Понятно, что вошедшие в состав осадочных пород синтезированные организмами органические вещества, претерпев ряд изменений в процессе геохимического распада и вторичного синтеза, дают начало образованию источников нефти. Но нельзя отрицать и того, что в сложных условиях земной коры происходили (да и сейчас происходят) многочисленные абиогенные синтезы, основанные на минеральных, каталитических процессах, исходным сырьем для которых являлись и являются как неорганические формы углерода, так и продукты распада современной и древней органики.

По мере развития жизни биогенные процессы приобретали все больший и больший удельный вес в синтезе органических веществ, но в более древние периоды существования Земли, особенно до возникновения жизни, абиогенные процессы имели монопольное значение и только позже они были заслонены биосинтезом. Поэтому с точки зрения вопроса о происхождении жизни особый интерес представляют именно те случаи образования органических веществ в основных горных породах, которые можно рассматривать как примеры неорганического синтеза. Обширная сводка работ по геохимии органических веществ дана в [246]. Поэтому здесь целесообразно лишь дополнить ее ссылками на указанные выше предполагаемые неорганические синтезы. Отдельные конкретные находки такого рода описаны в научной литературе в очень большом количестве, поэтому приходится ограничиваться здесь только сводками.

В статье Кропоткина и Шахварстовой [55] даны описания нефтепроявлений в основных породах (Советский Союз, Куба, Мексика, Калифорния, Южная Америка, Турция, Новая Каледония, Франция, Австралия). В обзорных работах [123, 125] привлечены данные о распространении углеродистых веществ в различных образованиях земной коры, включая магматические породы, пегматиты и гидротермальные жилы. Далее можно привести наиболее крупные монографии по изучению углеводородных газов и битумов в породах Хибинского щелочного массива, по изучению включений органических веществ в минералы, углеродистых соединений в породах кристаллических щитов и кристаллического фундамента плит и т. д. [42, 56, 91, 92, 124, 126]. Большой интерес представляют углеводороды асфальта озера Тринидад и формации Маунт-

Соррел, имеющие, по-видимому, не биологическое происхождение [508, 509].

В большинстве случаев авторы этих монографий рассматривают такого рода находки как доказательство абиогенного происхождения обнаруженных органических соединений, но так как нет надежных химических признаков той или иной природы найденных веществ, эти заключения делаются только на основе геологических соображений и в некоторых случаях могут быть истолкованы иначе.

С точки зрения решения проблемы возникновения жизни на Земле весьма заманчивы попытки проследить последовательные стадии химической эволюции и ее переход в биологическую форму организации на той же основе, на какой палеонтологи изучают дарвиновскую эволюцию жизни, на основе исследования все более упрощающихся форм органических образований, сохранившихся во всех более древних зонах земной коры. Основная цель всех относящихся сюда работ состоит в том, чтобы сомкнуть все более усложняющиеся химические образования с наиболее примитивными формами жизни.

Однако и на этом пути мы встречаемся со значительными трудностями. С одной стороны, они заключаются в том, что чем дальше в своих палеонтологических исследованиях мы уходим в глубь времен, тем все более примитивные по своему морфологическому строению образования мы обнаруживаем. Вместе с тем мы знаем, что многие коллоидные вещества, не имеющие никакого отношения к жизни, легко могут в искусственных и естественных условиях образовывать структуры, внешне очень сходные с микроорганизмами. Примером этому могут служить «искусственные клетки» Эррера [329, 330]. Этот автор смешивал растворы сульфогангидратов и формальдегида и затем фиксировал полученные таким образом коллоиды спиртом. При этом образовывались осадки, микроскопические препараты которых даже опытными цитологами признавались за фиксированные микроорганизмы, принадлежащие к различным классам живых существ.

Поэтому при обнаружении древнейших структурных образований необходимо быть очень осторожными в определении того, являются ли они остатками примитивных организмов или артефактами, возникавшими из тех или иных органических или неорганических коллоидных смесей. С другой стороны, обнаруживая даже в древнейших отложениях земной коры те или иные органические вещества (как это отмечалось выше), никогда

с полной уверенностью нельзя сказать, возникли ли они абиогенно или являются продуктами жизнедеятельности когда-то обитавших здесь организмов.

Обширные сводки, посвященные древнейшим ископаемым, имеются в ряде работ [25, 26, 159, 207, 219, 368, 545, 563].

Сохранившиеся с начала кембрия окаменевшие остатки животных и растений позволяют нам ясно представить себе непрерывно совершавшийся в течение 550 млн. лет необратимый процесс последовательного развития органического мира.

Еще недавно считалось, что начало палеонтологической летописи датируется кембрием, что остатки организмов, населявших Землю более полумиллиарда лет назад, не сохранились до нашего времени, так как включавшие их горные породы подвергались глубокому изменению и метаморфозу, полностью уничтожившему все биологические структуры.

Однако за последнее время удалось установить, что во многих пунктах Земли, например в Южной Австралии и Африке, на таких платформах, как Русская, Сибирская и Китайская, ниже слоев с наиболее древними кембрийскими комплексами располагаются тесно связанные с ними толщи, содержащие более древние ископаемые остатки. Их исследование показало, что поздняя докембрийская жизнь являлась прямым предшественником кембрия. Обнаруженные здесь ископаемые указывают на существование в то время довольно богатой не только флоры, но и фауны, представленной уже сравнительно высокоразвитыми одноклеточными и многоклеточными организмами. В частности, в отложениях, возраст которых определяется в 650 млн. лет, в Южной Австралии были обнаружены отпечатки и окаменелости вымерших родов медуз, мягких кораллов, плоских червей и других неизвестных сейчас форм животных [282, 284, 289]. В докембрии на территориях СССР и Китая Вологдиным были найдены самые примитивные иглы кремневых губок, отпечатки червей и т. д. [25].

Однако в более глубоких слоях (возраста 800—1000 млн. лет) животные остатки уже отсутствуют, а растительный мир в противоположность этому представлен многочисленными фрагментами и скоплениями разнообразных водорослей и спорами каких-то примитивных растений [157, 282].

Все предшествовавшие периоды протерозоя были, по-видимому, временем господства бактерий и водорослей. Главнейшими из них являлись так называемые строматолитообра-

зователи. Строматолиты — это своеобразные известковые образования, построенные в виде относительно правильных куполов, состоящих как бы из ряда вложенных один в другой конусов. Они являются продуктами жизнедеятельности древнейших фотосинтезирующих организмов, в основном синезеленых водорослей [24, 46, 283, 311, 550].

Можно думать, что ранние строматолитообразователи играли существенную роль в постепенном обогащении земной атмосферы кислородом. Однако в начальные периоды их существования образуемый ими кислород не обязательно переходил в атмосферу, а мог целиком поглощаться находившимися в строматолитах хемосинтетиками (железобактериями), которые состояли в симбиозе с синезелеными водорослями. В результате сезонного колебания развития тех и других создавалась слоистая структура строматолитов, где известняк чередуется с гидроокисью железа [27].

Найденные в Сахаре отложения секретированного организмами известняка классифицируются как начало строматолитов. Их возраст — около 1,5 млрд. лет [175, 293].

Сходные со строматолитами образования были обнаружены в доломитовых сериях Южной Родезии [408]. Их возраст определяется в 2,7 млрд. лет [448]. Какие-либо реальные остатки организмов здесь не обнаружены. Заключение о том, что указанные образования были сформированы водорослями, основывается лишь на их некотором внешнем сходстве со строматолитами. Однако вполне возможно, что продуценты известковой секреции Южной Родезии не имели определенной морфологической структуры, а представляли собой лишь массы абиогенного коллоидного материала или предшествовавших жизни пробионтов.

Наиболее представительное скопление ископаемых остатков подлинных организмов докембрия обнаружено в слоях черного сланца, залегающего вблизи основания железорудных отложений Ганфлинта в районе озера Онтарио [157, 161, 217, 221, 618]. Их возраст определяется в 1,9 млрд. лет [355]. Здесь обнаружены многочисленные одноклеточные и нитчатые формы (как разветвленные, так и неразветвленные), которые очень напоминают современные синезеленые водоросли, многочисленные сферические образования, напоминающие споры, а также остатки организмов, не имеющих сходства с современными живыми существами. Электронно-микроскопически при помощи метода реплик обнару-

жены также образования, похожие на бактерии, в частности на современных железобактерий [564].

К весьма древним богатым углеродом осадочным формациям относится формация Соуден (штат Миннесота, США). Ее возраст — около 2,7 млрд. лет [151]. Здесь в шариках серого колчедана обнаружены структуры, которые можно принять за остатки водорослей или бактерий. Но нельзя быть уверенным в том, что это не просто структуры какого-то абиогенного коллоидного материала [220].

Еще более древние (3100 млн. лет) находки были обнаружены в осадках Фиг-Три (Трансвааль). Хотя здесь какие-либо ископаемые формы очень скудны, все же некоторые из них, выявленные поодиночке на репликах, напоминают современные наиболее мелкие бактерии [160]. Баргхоорн [160] дал им название *Eobacterium isolatum*. Однако нет уверенности, что эти образования являются истинными ископаемыми, а не артефактами, и поэтому Руттен [545] предлагает более осторожно называть их «организованными элементами». Еще в большей степени это сомнение относится к углеродистым структурам, найденным в отложениях Онфервахт (примерный возраст 3700 млн. лет) [248, 444].

Весь изложенный материал по развитию жизни до начала кембрия показывает, что это развитие осуществлялось по тому же принципу (от простого к сложному), что и в более поздние, хорошо изученные палеонтологами эпохи.

Во время позднего предкембрия жизнь была представлена разнообразными многоклеточными существами, не только растениями, но и животными; в более раннюю эпоху протерозоя строматолитообразователей — синезелеными водорослями и бактериями. В эпоху Ганфлинта разнообразными представителями этих организмов были не только одноклеточные, но и нитчатые формы. Однако в начале архея, по-видимому, существовали только одноклеточные. А еще более древние находки — «организованные элементы», может быть, представляли собой пробионты или даже скопления абиогенного коллоидного материала.

Таким образом, мы уже очень близко подходим к началу жизни, к переходу предшествовавшей химической эволюции в биологическую.

Поэтому представляется очень заманчивым сомкнуть эти основанные только на морфологических данных исследования с химическим изучением, с так называемой «молекулярной палеонтологией».

Такого рода исследования в области молекулярной палеонтологии начались сравнительно недавно, но уже сейчас в научной литературе имеется большое число работ, в которых как упоминавшиеся выше наиболее древние отложения, так и многие другие образования более позднего происхождения подвергались детальному химическому анализу с целью установления внутримолекулярной структуры находившихся в них органических веществ, а также их количественных взаимоотношений. При этом анализу подвергались многие классы органических соединений: углеводы, жиры, аминокислоты, но особое внимание было обращено на углеводороды как на наиболее длительно сохраняющиеся во времени вещества. Здесь можно перечислить лишь главнейшие из этих работ [100, 101, 102, 139, 157, 167, 170, 180, 198—200, 206, 242, 245, 275, 300, 310, 341, 342, 357, 421, 481, 495, 515, 558, 574].

Особенно обширную сводку работ по молекулярной палеонтологии углеводородов дает в своей книге Кальвин [44, 207]. В ней приведены результаты анализов, произведенных с помощью газовой хроматографии и масс-спектрологии большого числа углеводородов, извлеченных как из сравнительно молодых объектов (нефть Сан-Хоакин — 30 млн. лет и сланцы Грин-Ривер — 60 млн. лет), так и из древних пород Нансач (1000 млн.), Ганфлинт (1900 млн.), Соуден (2700 млн.), Фиг-Три (3100 млн.) и отложений Ояфервахт (3700 млн. лет).

Здесь были найдены разнообразные соединения, относящиеся к нормальным углеводородам, изоалканам, антиизоалканам, циклогексидалканам, изопреноидам и полициклическим изопреноидам.

Особое внимание было обращено на изопреноиды фитан (C_{19}) и пристан (C_{20}). Одно время они рассматривались как вещества исключительно биологического происхождения, как, например, так называемые биологические маркеры. Однако сейчас стало известно, что эти изопреноиды могут возникать и в абиогенных реакциях и даже на космических объектах. Вообще, в настоящее время мы не знаем таких углеводородных соединений, которые сами по себе, по своему молекулярному строению могли бы надежно свидетельствовать о своем биогенном происхождении.

Поэтому Кальвин для того, чтобы выяснить биогенную или абиогенную природу углеводородных смесей, выделенных из объектов различного геологического возраста, использует следующий принцип: для современных

живых существ характерно то, что они синтезируют органические вещества строго избирательно. Из множества термодинамически возможных изомеров в процессе биологического обмена синтезируются лишь очень немногие, что определяется специфичностью действия ферментов. Поэтому при анализе углеводородных смесей, полученных из заведомо биологических объектов, получаются газовые хроматограммы с ярко выраженными индивидуальными острыми пиками, соответствующими тому или иному определенному соединению. В противоположность этому при неорганическом синтезе можно ожидать неспецифического образования всех возможных изомеров, и поэтому газовая хроматограмма такой сложной смеси должна иметь вид сплошной кривой, характерной для статического распределения углеводородов.

Такая хроматограмма действительно получается для смеси углеводородов, возникающих при растворении карбидов в соляной кислоте [343] или при искровом разряде в метане. Аналогичная сплошная хроматограмма характерна и для природных абиогенных углеводородов озера Тринидад и формации Маунт-Соррел [508, 509]. Поэтому можно было бы считать, что специфичность углеводородов, найденных в древних породах, достаточно убедительно свидетельствует об их биологическом происхождении [421]. Однако общая фракция алканов, полученных при реакции Фишера-Тропша, т. е. абиогенным путем, тоже дает газовую хроматограмму с ярко выраженными дискретными пиками углеводородов и с этой точки зрения может быть распценена как биогенная.

Кальвин, получив данные о составе и свойствах углеводородных смесей, выделенных из сравнительно молодых отложений (Сан-Хоакин и Грин-Ривер) явно биогенного происхождения, принимает эти данные за эталон биологического образования и для более древних образований. В частности, к такого рода индикаторам биогенной природы относятся, по его мнению, дискретный характер хроматограммы, преобладание *n*-алканов с нечетным числом углеводородных атомов, взаимоотношение циклических и открытых изопреноидных цепей, наличие пристана и фитана.

Для сланцев Нансач и Ганфлинт это сходство с более молодыми породами совершенно очевидно. Несколько сложнее дело обстоит со сланцами Соуден; сланец Фиг-Три не обнаружил никакого преобладания «нечетных» углеводородов над «четными». Кроме того, Оро и Нунер обнаружили здесь наличие изо-

преноида C_{17} , который отсутствует в более молодых осадках биологического происхождения, что имеет свои биохимические основания; наоборот, в реакции Фишера-Тропша этот углеводород образуется [480]. Последнее вызывает некоторое сомнение в биологическом происхождении углеводородов Фиг-Три, хотя обнаружение здесь оптически активных аминокислот говорит за биогенную природу этих отложений [392]. Наконец, отложения Онфервахт дают сравнительно выровненную сплошную хроматограмму для полученных из них экстрактов насыщенных углеводородов, как это характерно для абиогенных синтезированных веществ [409].

При подведении итогов всем изложенным исследованиям в области молекулярной палеонтологии, к сожалению, приходится все же прийти к заключению, что они при всей своей большой значимости еще не могут дать ясную картину молекулярной эволюции, того последовательного хода усложнения органических веществ, который совершался в наиболее ранние периоды существования Земли и который в конечном итоге привел к возникновению тех древнейших организмов, остатки которых мы обнаруживаем в настоящее время в глубоких отложениях земной коры. Решению этой задачи могут способствовать модельные опыты, раскрывающие те химические потенциалы, которыми обладают органические вещества разных степеней сложности, а также возможную реализацию этих потенциалов в условиях, близких к тем, которые существовали на примитивной Земле.

МОДЕЛЬНЫЕ ОПЫТЫ ПО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЮ АБИОГЕННЫХ СИНТЕЗОВ НА ПРИМИТИВНОЙ ЗЕМЛЕ

В настоящее время широко развернулись работы по лабораторным абиогенным синтезам органических веществ, приводящим к последовательному усложнению этих веществ и, таким образом, моделирующим те процессы, которые могли лежать в основе химической эволюции, предшествовавшей появлению жизни на Земле.

Сводки этих работ содержатся в многочисленных опубликованных за последнее время монографиях, сборниках и обзорных статьях [89, 133, 203, 207, 264, 368, 370, 399, 411, 461, 500, 512, 571].

Прежде всего эти работы характеризуют те химические и термодинамические потенциалы, которыми обладают углеродистые соединения

от самых примитивных их представителей до наиболее сложных полимеров. Мы убеждены в том, что эти потенциалы остаются неизменными как в прошлое, так и в настоящее время.

Конечно, в разных условиях они реализовались по-разному. Поэтому в модельных опытах обычно стремятся до известной степени воспроизвести те условия, которые мы можем предполагать существовавшими на примитивной Земле. Однако абиогенные синтезы биологически важных веществ могли протекать в очень широких пределах этих условий, в особенности на первых стадиях химической эволюции. Так, например, α -аминокислоты образуются в весьма различных газовых смесях, при участии самых различных источников энергии и даже на различных космических объектах.

Но чем дальше шла эволюция по пути усложнения органических соединений, тем влияние внешних условий оказывалось все более значительным, и в различных локальных областях земной поверхности эта эволюция уже протекала по-разному.

В основном можно уже сейчас перечислить те общие условия, которые всегда следует принимать во внимание при попытках воспроизвести в модельных опытах абиогенные синтезы первичных органических веществ на поверхности еще безжизненной Земли.

Исходные углеродистые соединения. Из всего предшествующего изложения с полной ясностью вытекает, что Земля уже при самом своем формировании получила значительный запас возникших еще в космосе абиогенных органических веществ различной степени сложности. Конечно, какая-то часть их подвергалась пиролизу в процессе разогревания земных недр; газообразные продукты этого пиролиза возгонялись на поверхность Земли и вошли в состав вторичной (доактуалистической) атмосферы нашей планеты [68], а частично и ее гидросферы. В основном это были CH_4 , CO_2 , CO , N_2 , NH_3 , H_2O и H_2 . Эти газы в той или иной комбинации и служат главным образом исходным материалом для модельных абиогенных синтезов. В меньших размерах изучаются процессы, протекающие в водной среде. Эти исследования чаще касаются уже более сложных органических соединений, возникавших на основе первичных абиогенных синтезов. Еще слабее воспроизведены возможные абиогенные синтезы, которые могли иметь место в земной коре в результате совершавшихся здесь каталитических реакций, например реакции Фишера-Тропша [317, 656].

Восстановительные условия на поверхности доактуалистической Земли. Приведенные выше геологические данные [544] показывают, что длительное время земная атмосфера была лишена свободного кислорода. С этим согласуется и то обстоятельство, что в основе энергетического обмена всех современных живых существ лежат анаэробные процессы, а звенья кислородного дыхания у аэробов лишь надстраиваются на эти процессы [183, 412, 452].

Среди всех природных систем только живая материя отличается тем, что, несмотря на претерпеваемые ею очень существенные превращения, она сохраняет, путем записи в своей организации, наибольшее количество информации, отражающей ее историю [129]. Анализ современной организации жизни убедительно показывает нам, что она зародилась в анаэробных условиях.

Источники необходимой для синтезов энергии. Взаимодействие органических веществ могло происходить в доактуалистических условиях Земли даже спонтанно, за счет собственной потенциальной энергии или в сопряженных реакциях. В особенности это вероятно в условиях земной коры при повышенной температуре и при наличии соответствующих катализаторов [176, 237]. Однако важную роль в органо-химических синтезах того времени должны были играть и внешние источники энергии. Это в первую очередь коротковолновые ультрафиолетовые лучи, которые из-за отсутствия в атмосфере того времени озонового экрана достигали земной поверхности [36, 82, 298, 430, 507, 616]. Далее радиоактивные излучения ряда элементов и особенно ^{40}K , которым была очень богата примитивная земная кора [611], должны были являться в достаточной степени важными источниками энергии для абиогенных синтезов. Воздействуя на смесь примитивных газов электронами, обладающими очень высокой энергией, и таким образом имитируя радиацию ^{40}K , некоторые авторы осуществляли синтез многих биологически важных веществ [205, 279, 485, 505]. Большую роль в указанном отношении могла играть также радиация урана и тория для синтезов как в земной коре, так и в гидросфере [440, 512].

Энергия электрических разрядов в земной атмосфере, хоть она относительно невелика, использовалась до сего времени в наиболее широком масштабе для абиогенных синтезов. Это определялось тем, что данный вид энергии впервые был использован в основополагающих опытах Миллера [424] и затем в раз-

ных вариациях повторен многими другими авторами [82, 137, 297, 334, 469].

Образование биологически важных соединений наблюдается и при простом нагревании исходных газов и растворов [303, 305, 306, 407, 466, 477, 479]. Несомненно, что такого рода локальное разогревание имело место в условиях примитивной Земли в широком масштабе, а до известной степени оно сохранилось и теперь в вулканической деятельности и гидротермальных явлениях.

К этим основным источникам энергии можно еще добавить ударную волну в газе, возникающую при падении метеоритов [294, 336], и ультразвуковые волны, возникающие в водной среде [112, 134, 135, 136].

Ясно, что под влиянием всех перечисленных воздействий должен происходить не только синтез, но и распад органических веществ. При этом если подсчитать то термодинамическое равновесие, которое устанавливается в конечном счете, то оно будет не в пользу синтеза. Так, например, такого рода подсчеты для поверхностного слоя океанических вод, подвергающихся длительному воздействию коротковолнового ультрафиолетового света, приводят к убеждению, что при наступлении термодинамического равновесия здесь могут сохраниться лишь ничтожные количества органических веществ [579].

Однако в природных условиях на поверхности Земли никогда фактически не могло наступать термодинамическое равновесие, так как происходило непрерывное перемещение синтезированных в одном месте веществ в другие условия. В частности, например, в условиях гидросферы эти вещества легко уходили от разлагающего действия коротковолновых лучей, перемещаясь в более глубокие слои воды, адсорбируясь на частицах грунта и т. д. [458].

Поэтому неперенным условием модельных опытов является вывод синтезируемых веществ из зоны реакции и накопление их в другом месте. Это условие соблюдается и в приборе Миллера [424], и при синтезе протеиноидов Фоксом [265], и при модельных опытах Янга и Поннамперумы и т. д. [662].

Абиогенный синтез биомономеров

При соблюдении указанных условий было синтезировано в лабораторных опытах большое число разнообразных органических веществ: сахаров, жиров, органических спиртов, альдегидов, кислот и ряда гетероциклических соединений. Но особое внимание было

обращено на образование биомономеров, т. е. тех молекул, которые являются составными частями биологически важных полимеров — белков и нуклеиновых кислот. Сюда относятся аминокислоты, пуриновые и пиримидиновые основания, нуклеозиды и нуклеотиды.

Аминокислоты. Аминокислоты синтезируются из примитивных газов более легко, чем какие-либо другие биомомеры. В особенности это относится к α -аминокислотам, которые образуются в значительно больших количествах, чем β -соединения (например, β -аланин) [305, 407, 424—426]. Еще в меньшем количестве синтезируются аминокислоты, не входящие в состав белков, о которых упоминалось в связи с австралийским метеоритом [390, 391].

В литературе предложено несколько химических путей абиогенного образования аминокислот; в частности, Миллер [424—436] предложил цианогидриновый механизм, который подтверждается наличием альдегидов и HCl в продуктах его реакции. Поннамперума и Веллер [514] указывают на α -аминонитрил в качестве промежуточного продукта реакции. Санчес и др. [551] допускают, что важную роль здесь играет цианоацетилен. В то же время другие авторы подчеркивают ведущую роль олигомеров HCl [438, 303, 419, 420].

Можно указать на следующие, еще не названные эксперименты по моделированию абиогенного синтеза в смеси газов CH_4 , NH_3 , H_2O и H_2 , в некоторых случаях без H_2 или с добавкой CO , CO_2 и N_2 , C_2H_4 (вместо CH_4) или H_2S . При этом были синтезированы следующие аминокислоты: цистеин, серин, треонин, α -аминомасляная кислота, N-метилглицин (саркозин), аспарагин, аспарагиновая кислота, глицин, аланин, β -аланин, глутаминовая кислота, валин, лейцин, изолейцин, аллоизолейцин, лизин, фенилаланин, тирозин [37, 84, 215, 298, 471, 493].

Кроме того, имеются работы, в которых синтез аминокислот был осуществлен в водной среде с использованием других видов соединений (например, HCHO , HCN , NH_4Cl , NH_4NO_3 , формамид, параформальдегид, малоновая кислота и мочевины, N-ацетилглицин и т. д.) [50, 83, 94, 107, 108, 154, 238, 263, 314, 333, 490, 530].

Компоненты нуклеиновых кислот. Достижения в синтезе пуринов и пиримидинов менее значительны, чем успехи, полученные в синтезе аминокислот. В эксперименте, имитирующем примитивную земную атмосферу,

Поннамперума и др. обнаружили аденин после облучения смеси CH_4 , NH_3 , H_2O и H_2 электронным пучком [505].

Никакие другие пуриновые или пиримидиновые основания в этих условиях не синтезируются. Интересно сопоставить это обстоятельство с тем преимущественным положением, которое аденин занимает во всех биологических системах. Молекулярно-орбитальные подсчеты показывают, что из всех нуклеиновых оснований аденин имеет наибольшую резонансную энергию [523], что несомненно обуславливает наибольшую вероятность его абиогенного синтеза.

О синтезе аденина впервые было доложено Оро [466]. Эта работа более подробно была изложена в последующих публикациях [477, 478] и подтверждена Левом с соавторами [407]. Синтез был осуществлен при умеренном нагревании (от 30 до 100° C) смеси цианистого водорода, аммиака и воды. Оро и другие авторы изучили механизм этой реакции и показали, что конденсация происходит через аминомалонитрил (тример HCN) и диаминомалеонитрил или 4-амино-5-цианомимдазол (тетрамер HCN) [254, 477, 553, 554].

Аденин, как и другой пурин — гуанин, был синтезирован при облучении ультрафиолетовым светом разбавленного раствора HCN [498]. Оба эти пурина являются продуктами реакции 4-амино-5-цианомимдазола с HCN или цианогена в водном растворе [552, 553], что подчеркивает большое значение HCN в первичных абиогенных синтезах. Из трех пиримидинов — цитозина, урацила и тимина — два первых были получены в модельных опытах, до некоторой степени имитирующих примитивные земные условия. Урацил был синтезирован при нагревании до 130° C яблочной кислоты, мочевины и полифосфорной кислоты [271]. Оро указывает на образование урацила при нагревании мочевины с акрилонитрилом [471]. Санчес и др. обнаружили образование цитозина при нагревании цианоацетилена в водном растворе KCN [551]. В ряде этих синтезов были обнаружены и другие основания, которые в норме не входят в состав нуклеиновых кислот — гипоксантин, диаминопурин и ксантин [552]. Углеводные компоненты нуклеотидов — рибоза и 2-дезоксирибоза — были синтезированы рядом авторов в условиях, аналогичных примитивным [274, 414, 474]. Объединение нуклеотидных компонентов в водной среде удалось осуществить Поннамперуме и др. при использовании этилметафосфата. Синтезы ве-

лись в водных растворах аденина, аденозина, адениловой кислоты, рибозы и этилметафосфата. Смеси освещались ультрафиолетовым светом с длиной волны 2537 Å при 40° С. При этом было установлено превращение аденина в аденозин, аденозина в АМФ, АМФ в АДФ и, наконец, АДФ в АТФ [504, 506, 511]. Еще более перспективные результаты были получены при использовании ионизирующей радиации [498].

В литературе имеются и другие указания на модельные опыты по синтезу разнообразных нуклеозидов и нуклеотидов [165, 635, 658]. В связи с той большой ролью, которую играют полифосфаты в модельных опытах, здесь нужно указать на следующие работы [155, 386, 428, 429, 501, 525, 566, 567, 570, 571].

Другие мономерные вещества. Возможность абиогенного синтеза других биологически значимых соединений продемонстрирована в модельных опытах в гораздо меньшем масштабе, чем это сделано для аминокислот и нуклеиновых компонентов. Здесь можно указать на синтез жирных кислот [145, 279, 593], имидазольных гетероциклов [109], изопреноидов [441] и порфиринов [53, 253, 340, 380, 615]. Эти последние привлекают к себе большое внимание исследователей, поскольку они играют важную роль в синтезе хлорофилла и цитохромов.

При всех абиогенных синтезах в модельных опытах образуются оптически неактивные (рацемические) смеси органических веществ. В противоположность этому биогенно образованные соединения всегда оптически активны [28]. На это уже давно (со времен Пастера) было обращено внимание. В настоящее время асимметрические синтезы осуществлены в лабораторных условиях при воздействии циркулярно поляризованного ультрафиолетового света [382] и на поверхности несимметрических кристаллов кварца [116, 117, 173].

Однако Уолд [636, 638] и Тцурута [617] высказывают сомнение в том, что любой из указанных абиогенных факторов может создать условия для возникновения устойчивой асимметрии. По их мнению, это могло произойти не при синтезе мономеров, а в процессе формирования структур более высокого порядка, в частности, например, при отборе формирующихся α -спиралей белков и полипептидов.

Проблема асимметрии в настоящее время широко изучается Клабуновским [47—49] и другими авторами [1, 304, 534].

Абиогенный синтез биополимеров

Следующим за образованием мономеров шагом эволюции на пути к возникновению жизни являлось их объединение в полимеры, в частности в соединения, аналогичные белкам и нуклеиновым кислотам, играющим исключительно важную роль в организации живых существ [164, 247].

В ряде современных модельных опытов это объединение осуществляется путем дегидратационной конденсации, причем используется два метода, направленные на проверку возможности такой конденсации в условиях примитивной Земли.

Первый метод заключается в использовании высоких температур в соответствующих безводных условиях; второй — в поисках соединений, свободная энергия которых, а также сродство к воде могли бы способствовать осуществлению дегидратационной конденсации аминокислот или мононуклеотидов даже в разведенных водных растворах. В основном наше внимание будет сосредоточено на модельных абиогенных синтезах полипептидов и полинуклеотидов, хотя имеются аналогичные эксперименты и по синтезу полигликозидов, меланина и т. д. [177]. Обширные сводки по абиогенному синтезу биополимеров имеются в монографиях Кальвина [207] и Кеньо-на и Стейнмана [368].

Полипептиды и белковоподобные вещества. Фокс и др. имитируя вулканические условия, подвергали смесь 18 аминокислот нагреванию при 170° С на куске лавы в течение 6 час. Для того чтобы расплавить смесь до обугливания, бралось избыточное количество дикарбоновых аминокислот. В других случаях нагревание осуществлялось в присутствии полифосфатов, что позволяло снизить температуру до 100° С [270, 273, 307]. При таком температурном воздействии образуется полимер янтарного цвета с молекулярным весом в несколько тысяч (от 5000 до 10 000), содержащий все взятые в опыт типичные для белка аминокислоты, потерявшие, однако, свою оптическую активность. Этот полимер Фокс назвал «протеиноидом» за его сходство с белками по ряду признаков.

При дальнейших исследованиях были выявлены два очень интересных свойства протеиноидов: во-первых, что они обладают известной внутримолекулярной упорядоченностью, повторяющейся последовательностью аминокислотных остатков (на чем мы остановимся подробнее при дальнейшем изложении), и, во-вторых, имеют хотя и слабую, но вполне обнаруживаемую экспериментально

энзиматическую активность (катализ гидролиза, декарбоксилирования, аминирования и дезаминирования [127, 266, 267]).

Из многочисленных работ по синтезу полипептидов в водной среде следует назвать следующие: поликонденсацию глицина при его нагревании в водном растворе аммония [476], при γ -облучении N-ацетилглицина [238], при термальной обработке растворов цианистого аммония [407], при нагревании смеси HCN, NH₃ [375, 420], при полимеризации аминокетонитрила [1, 143, 302, 531], цианамида [510, 559, 591] и дицианамида [295, 367, 589, 590, 592].

Чрезвычайно важным при синтезе полипептидов и белковоподобных соединений является та последовательность, с которой аминокислотные остатки связываются между собой в полипептидной цепи. При современном биологическом синтезе белков эта характерная для каждого индивидуального белка последовательность (первичная структура) определяется нуклеиновым кодом, но, как указывалось выше, уже при термальном синтезе Фокса, в отсутствие нуклеиновых кислот создавался некоторый постоянный порядок соседствования аминокислот [268, 307]. Штейнман [588] присоединял первую в ряду аминокислоту к гранулам высокомолекулярного полимера (хлорметилированного полистирола) и таким образом получал смолу с присоединенной к ней одной аминокислотой. Затем он исследовал относительную эффективность присоединения к ней ряда других аминокислот с защищенной аминогруппой. Экспериментально определяя выходы различных дипептидов, Штейнман сопоставлял эти результаты с частотой аминокислотных пар, определенных по «Атласу белковых структур» [226, 227, 575], в современных белках и обнаружил значительное совпадение. Кальвин [44] пишет по этому поводу следующее: «Есть известные основания полагать, что механизм, определяющий последовательность аминокислот в полипептидах, даже и теперь включает какой-то компонент, для которого наличие кодовой системы первоначально не было обязательным». Затем он дает модель системы воспроизведения полипептида без матрицы, на основании контроля со стороны растущего конца [617]. Интересно сопоставить эти высказывания с замечательным синтезом циклопептида (грамицидина C), осуществленного Липманом в отсутствие нуклеинового кода [405, 406].

Нуклеиновые кислоты. Замечательными работами Корнберга и др. показана возмож-

ность синтеза нуклеиновых кислот *in vitro* [291, 378]. Однако этот синтез может проходить только при наличии соответствующего специфического фермента и поэтому не может служить моделью для абиогенных процессов на примитивной Земле.

Некоторая вероятность такого рода синтеза была впервые намечена Шраммом [567] в его работах с полифосфорным эфиром. В дальнейшем было показано, что цитидинфосфат может конденсироваться в олигонуклеотиды с помощью полифосфорной кислоты [572]. В модельных опытах, более приближающихся к условиям первичной Земли, была показана способность карбодимида индуцировать образование ди- и тринуклеотидов из смеси нуклеозидов и нуклеотидов в разведенных водных растворах [436, 608—610].

Итак, широко развернувшиеся в настоящее время модельные опыты по абиогенному синтезу органических веществ в условиях, имитирующих примордиальные земные условия, позволяют с известной долей вероятности представить себе последовательный ход химической эволюции от простейших углеродистых соединений к высокополимерным веществам, из которых образовались те «организованные элементы» или примитивные организмы, остатки которых мы обнаруживаем в отложениях земной коры.

На этом этапе развития материи и произошел на нашей планете переход от химической эволюции к биологической, когда из гомогенного раствора органических веществ обособились индивидуальные целостные системы — живые организмы.

Мы можем составить себе представление об этом переходе путем сопоставления современных данных сравнительной биохимии [258] с лабораторными модельными опытами.

МОДЕЛЬНЫЕ ОПЫТЫ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ОТКРЫТЫМИ СИСТЕМАМИ

Жизнь на Земле представлена в настоящее время разнообразными организмами — индивидуальными целостными системами, обладающими определенной сложной структурой и обменом веществ, определенным порядком взаимосогласованных биохимических реакций. Понятно, что такого рода сложные системы не могли внезапно возникнуть в простом, более или менее гомогенном водном растворе гидросферы, в так называемом «первичном бульоне». Им должны были предшествовать какие-то гораздо более простые

образования, постепенно приобретающие в процессе эволюции все новые и новые черты организации, свойственной только живому миру [458].

Это, во-первых, характерная для всех живых существ способность противодействовать нарастанию энтропии.

Во-вторых, это так называемая целесообразность организации живых тел, их приспособленность к существованию в данных условиях внешней среды, а также приспособленность всех частей организма молекул, клеточных органоидов и органов организма к выполняемым ими в жизненном процессе функциям.

Наконец, в-третьих, это особая, весьма совершенная форма сохранения и передачи информации, основанная на внутримолекулярной организации высокополимерных соединений.

С первого взгляда кажется, что способность живых организмов противодействовать нарастанию энтропии противоречит второму закону термодинамики [171]. Однако сейчас мы знаем, что это противоречие является только кажущимся. Еще Шредингер [565] очень образно, хотя и не вполне точно, разрешал его доводом о том, что живой организм как бы «питается» «отрицательной энтропией» за счет внешней среды. При этом местное уменьшение энтропии, возникающее в отдельно рассматриваемом живом объекте, компенсируется возрастанием энтропии в окружающей среде. В действительности в организмах дело обстоит значительно сложнее. Но для осуществления даже такой упрощенной схемы необходимо существование комплекса — организм и среда, т. е. (в самой примитивной форме) образование в гомогенном растворе каких-то фазовых отношений [62, 86, 87, 99].

Возникновение многофазности, выделение из исходного однородного раствора индивидуальных систем, обособившихся от окружающей среды определенной поверхностью раздела, чрезвычайно распространено в природе и постоянно встречается при наших лабораторных опытах. Нет сомнения, что такого рода выделение в грандиозных масштабах неоднократно происходило и на поверхности безжизненной Земли, причем в различных участках гидросферы с их различным химическим составом и природными условиями образовывались бесчисленные по своему разнообразию индивидуальные системы; в общем, конечно, глубоко отличные от современных живых существ [204].

Мы можем не только представить себе, но и воспроизвести в лабораторных опытах многочисленные модели такого рода фазово обособленных систем. Приведем некоторые примеры. Несколько лет назад Гольдейкр [287] описал процесс образования на поверхности современных природных водоемов маленьких замкнутых пузырьков, заключенных в белково-липидную оболочку. Они возникают просто под влиянием ветра из находящейся на поверхности воды белково-липидной пленки, образовавшейся из продуктов распада тел современных организмов [33]. По существу, это просто обособленные участки воды, отделенные от окружающей среды определенной поверхностью раздела. Однако уже и в таких очень простых системах потенциально создаются условия для их взаимодействия с внешней средой [32, 34, 156, 488, 489]. Другой пример: Фокс растворял в горячей воде протеиноиды, полученные им при нагревании смеси аминокислот, и, охлаждая затем этот раствор, обнаружил в нем образование многочисленных микроскопических сферул в 2—7 мк в диаметре, которые он назвал «микросферами». Эти протеиноидные микросферы обладают электронномикроскопической структурой, в частности двойной мембраной, и обнаруживают ряд интересных с биологической точки зрения свойств [265, 268, 661].

В течение ряда лет индийский ученый Бахадур наблюдал синтез полимерных веществ на солнечном свете. При этом в его опытах в стерильных условиях образовывались изолировавшиеся из окружающего раствора сферические тельца, которые обладали внешней формой, внутренней структурой и рядом других свойств, сближающих их, по мнению автора, с живыми существами. Поэтому Бахадур назвал их «джейвану», что в переводе с санскритского означает «частицы жизни» [153, 154].

Часто при работе с такими искусственными самонезависимыми из раствора системами особое внимание обращают на их внешнее морфологическое сходство с живыми объектами. Решение вопроса о противодействии нарастанию энтропии фазово обособленных систем в том, чтобы они взаимодействовали с окружающей средой — по типу открытых систем, термодинамика которых принципиально отличается от классической термодинамики.

Термодинамика и кинетика открытых систем в настоящее время хорошо разработаны [85, 202, 437, 491, 516, 517, 518].

В замкнутых системах (на которых в основном разрабатывалась классическая термодинамика) в химическое взаимодействие могут вступать только заключенные в системе вещества. Постоянство свойств системы во времени характеризуется равновесным состоянием, при котором скорость реакции, идущей в одном направлении, равна скорости обратной реакции. Термодинамическим критерием этого равновесия является минимальное значение свободной энергии системы и максимальное значение ее энтропии (иными словами, переход ее в наиболее вероятное из всех возможных состояний). Самопроизвольно совершающиеся в замкнутой системе процессы не могут переводить энтропию в менее вероятное состояние, т. е. они могут лишь сохранять энтропию системы постоянной или увеличивать ее в зависимости от того, имеем ли мы дело с обратимыми или необратимыми процессами. Когда энтропия в системе нарастает, равновесие отсутствует и, наоборот, при наступлении равновесия скорость прироста энтропии равна нулю.

В противоположность этому в открытой системе непрерывно происходит поступление веществ из внешней среды в ограниченную от нее тем или иным путем систему и удаление из системы возникающих в ней химических соединений обратно в среду. Поэтому постоянство свойств такой открытой системы во времени характеризуется не термодинамическим равновесием (как это наблюдается в замкнутых системах), а наступлением стационарного состояния, при котором наблюдается постоянство скорости химических изменений и диффузии веществ в системе. Термодинамическое равновесие и стационарное состояние сходны между собой в том отношении, что как в том, так и в другом случаях система сохраняет во времени свои свойства постоянными, но коренное отличие заключается в том, что при равновесии вообще не происходит изменения свободной энергии ($dF=0$), а при стационарном состоянии оно совершается непрерывно, но с постоянной скоростью ($dF=\text{const}$).

Таким образом, стационарное состояние поддерживается постоянным не потому, что свободная энергия находится в минимуме (как это имеет место, например, при образовании кристалла), а вследствие того, что система непрерывно получает свободную энергию из внешней среды в количестве, компенсирующем ее уменьшение в системе.

Весьма сложной и своеобразной является также и кинетика процессов, совершающихся

в открытых системах, что имеет особенно важное значение при изучении живых объектов — химически открытых систем, где, например, внесение катализатора изменяет не только скорость реакций, но и стационарные концентрации компонентов системы (гидродинамическая модель [201], химические модели [88, 228, 335, 491]).

Из сказанного следует, что для решения вопроса о воспроизведении систем, обладающих способностью противодействовать нарастанию энтропии, важно, чтобы используемые для этого модели наиболее легко из статического состояния переходили в стационарное, поточное состояние, свойственное открытым системам [459]. Наиболее перспективными (но, конечно, далеко не единственными возможными) моделями в этом отношении могут служить коацерватные капли, полученные в начале 30-х годов Бунгенберг-де-Йонгом и в дальнейшем подробно изучаемые им и его школой [178, 179, 192—195].

В своих исходных опытах Бунгенберг-де-Йонг смешивал разбавленные водные растворы желатины и гуммиарабика и наблюдал, что при известных, довольно обычных в природе условиях температуры и кислотности из этого раствора фазово обособляются видимые под оптическим микроскопом капли, в которых сосредоточиваются молекулы обоих полимеров, тогда как окружающий раствор оказывается почти полностью лишенным их.

В последующих исследованиях многочисленных авторов было показано, что коацерватные капли могут образовываться из весьма разнообразных веществ, особенно из органических полимеров и липоидов.

Евреинова в своей книге [39], где обобщена большая литература по данному вопросу, приводит около 200 примеров коацерватных систем, образованных из разнообразных белков, нуклеиновых кислот, полигликозидов, фосфатидов, хлорофилла и т. д. В образовании коацерватов основное значение имеет степень полимеризации взятых для этого веществ, поэтому коацерваты можно получить не только из естественных биохимических соединений, но и их искусственных полимеров, например полиаденина и полилипина [77, 78]. Объем капель сильно колеблется в зависимости от взятых компонентов и условий коацервации (от 0,05 до 500 мкм). Концентрация полимеров в каплях во многие десятки и сотни раз превосходит их концентрацию в исходных растворах. Исследование капель в интерференционном, ультрафиоле-

товом и электронном микроскопах обнаруживает в них некоторую структуру и ясно выраженную внешнюю границу раздела — поверхностную пленку [38, 40, 81, 250—252]. Коацерватные капли обладают способностью избирательно адсорбировать и концентрировать в себе различные вещества окружающего раствора (красители, аминокислоты, мононуклеотиды и т. д.) [41].

Коллоидно-химическое изучение клеточной протоплазмы показывает, что она и ряд ее структур находятся в коацерватном состоянии, лежащем между золями и гелями [61, 103, 403, 410].

Путем включения в коацерватные капли различных катализаторов (в частности, энзимов) в них можно вызвать ряд разнообразных реакций (оксидо-редукцию, полимеризацию, фотохимические превращения и т. д.), совершающихся за счет веществ, поступающих из внешней среды. Эти реакции приводят к тому, что вещества внешней среды, подвергаясь тем или иным химическим изменениям, или накапливаются в каплях в виде полимеров, или разрушаются (освобождая заключенную в них энергию), а продукты их распада вновь выделяются во внешнюю среду. Таким образом создается непрерывный поток веществ через капли, имитирующий в элементарной форме биологический обмен веществ. Капли, взаимодействуя с внешней средой по типу открытых систем, приобретают динамическую устойчивость, способность к длительному существованию, а при определенных условиях они даже увеличиваются в объеме и весе, что можно непосредственно наблюдать под микроскопом и устанавливать путем химического анализа (в частности, это наблюдалось при синтезе амилазы в белково-гликозидных коацерватах или полиаденина в белково-нуклеиновых каплях) [75—77, 80, 88, 90, 105, 106, 459].

При работе с коацерватными каплями, в которых осуществляется несколько комбинаций реакций, можно убедиться, что чем совершеннее сочетание включенных в капли катализаторов, тем капли скорее растут. Так, например, сравнивая кривые роста двух поразному организованных сортов капель в одной и той же среде, можно видеть, что более совершенные капли растут по круто восходящей кривой, тогда как менее совершенные угнетаются, а затем совсем останавливаются в росте [5, 79].

В этих опытах удается, таким образом, продемонстрировать зачатки новой закономерности — предбиологического естественно-

го отбора возникавших когда-то на земной поверхности предшественников жизни, «пробионтов». Только на основе этой новой закономерности могло возникнуть второе из указанных выше характерных свойств жизни — целесообразность ее организации, приспособленность живой целостной системы к условиям существования и приспособленность ее частей к выполняемым ими в жизненном процессе функциям.

В научной литературе мы и сейчас встречаемся с широко распространенным представлением, согласно которому для исходного образования живых систем было необходимо, чтобы в водном растворе земной гидросферы первоначально (еще на молекулярном уровне) возникли внутренне организованные и целесообразно построенные нуклеиновые кислоты и белковые вещества. Самосборка их молекул будто бы и привела к образованию первичных организмов, наподобие того как машина монтируется из заранее изготовленных деталей [431, 432].

Конечно, такого рода представление является отголоском прежних механистических взглядов, уподобляющих организм механизму. Приспособленность деталей машины к выполняемой ею работе обуславливается тем, что эти детали изготавливаются согласно заранее предусмотренному плану или чертежу.

Иными словами такая целесообразность работы машины обуславливается творческой волей интеллекта, создавшего эту машину. В отношении возникающих живых существ мы не можем признать предсуществования какого-то «плана творения». Вместе с тем возникает вопрос, как могли образоваться полимеры, внутримолекулярное строение которых приспособлено к осуществлению таких функций, которые они будут нести в будущем. В сформировавшихся из них целостных живых системах эта приспособленность могла возникнуть только в результате естественного отбора, которому подвергались не отдельные молекулы «первичного бульона» [435], а только целостные фазово обособленные открытые системы, способные преодолевать нарастание энтропии на основе их взаимодействия с внешней средой.

Модельные опыты с коацерватными каплями показывают, что такие индивидуальные системы могут возникать и из хаотически или однородно построенных полимеров [78]. В некоторых случаях эти полимеры могут даже обладать теми или иными, например каталитическими, функциями [267] или способностью к репликации. Но «целесообраз-

ность» этих функций могла сформироваться только в подвергавшихся отбору целостных системах. Именно в этих системах (а не просто в «первичном бульоне») из множества возможных вариантов полимерных структур отбирались те, которые были наиболее приспособлены к выполнению функций, важных для сохранения и наиболее быстрого роста данных систем в данных условиях внешней среды, а затем и для закрепления свойств этих систем в процессе их разрастания и дробления [460].

Эволюционное развитие пробионтов, о котором мы можем судить, основываясь главным образом на данных сравнительной биохимии, прежде всего касалось их каталитического аппарата как важнейшего фактора организации обмена веществ, основанного на соотношении скоростей составляющих его реакций.

Конечно, на разбираемой нами стадии эволюции доступными для пробионтов катализаторами могли служить только находившиеся в «первичном бульоне» неорганические соли и органические вещества, каталитическая активность которых очень невелика. Однако при их определенном взаимном сочетании эта активность может быть повышена во многие сотни и тысячи раз [394, 395].

Можно представить себе колоссальное число различных атомных группировок и их сочетаний, которые в той или иной мере обладали способностью катализировать необходимые для существования пробионтов реакции. Но в результате того, что естественный отбор все время отметал менее совершенные комплексы, уничтожая те пробионты, которые были ими наделены, до нас дошли только очень немногие, наиболее совершенные из них — широко известные в биохимии коэнзимы. Их число сравнительно невелико, но они являются чрезвычайно универсальными катализаторами для всех без исключения живых существ, что указывает на их очень раннее формирование в процессе возникновения и эволюции жизни. Необходимое постоянство концентрации коэнзимов в разрастающихся пробионтах могло легко поддерживаться даже путем простого поступления этих соединений (или образующих их компонентов) из внешней среды (наподобие современных витаминов, играющих также роль коэнзимов). Однако в дальнейшем должна была выработаться способность пробионтов образовывать эти катализаторы в процессе собственного обмена веществ [345, 346]. Лишь значительно позд-

нее решающую роль в указанном отношении стали играть белки — энзимы, каталитическая активность которых тесно связана с их внутримолекулярной организацией, прежде всего с их первичной структурой, закономерным расположением аминокислотных остатков в их полимерной цепи [229, 236, 455, 492, 583].

Как указывалось выше, уже при простом термальном получении белковоподобных полимеров (протейноидов) их первичная структура может обладать известным порядком в расположении аминокислотных остатков, и вместе с тем протейноиды проявляют известную каталитическую активность [239, 269, 309, 379, 538].

Возможность такого рода абиогенного синтеза полипептидов с упорядоченной цепью аминокислотных остатков в отсутствие нуклеинового кода подтверждается работами Липмана [406] по нерибосомальному синтезу грамицидина и тироцидина, а также Штейнмана [588] по синтезу пептидов, в которых определенные аминокислотные остатки соседствуют между собой с той же степенью частоты, как и в современных белках [227].

Указывая на возможность закрепленного повторения такого рода синтезов, репликацией на основе контроля со стороны растущего конца, Кальвин [207] выдвигает даже предположение, что современная система кодирования аминокислот в какой-то мере ведет свое начало от той древней системы синтеза полипептидов, при которой растущая аминокислотная последовательность сама себя определяла.

Следовательно, мы можем теоретически представить себе существование даже чисто белковых эволюционирующих систем.

Характерная для современных энзимов приспособленность их внутримолекулярного строения к выполняемым ими каталитическим функциям возникала здесь на основании предбиологического отбора не отдельных белковых молекул, а целостных систем. В такого рода системах могли возникать многочисленные и разнообразные комбинации аминокислотных остатков, определяющие те или иные их функции. Но система получала преимущество для своего существования в данных условиях внешней среды только в том случае, если возникавшие в ней белковые структуры создавали ускорение тех реакций, которые в гармоническом сочетании с другими происходившими в системе процессами были выгодны для целого, обуславливали выживание и разрастание данной системы.

В противоположном случае система уничтожалась естественным отбором.

Таким образом, можно понять, как на данной стадии эволюции возникла та «целесообразность» организации живых систем, которая была обозначена как второе характерное для жизни свойство.

Однако способность к передаче наследственной информации находилась еще лишь в зачаточном состоянии, так как указанная выше непосредственная репликация белков была еще очень несовершенной, легко нарушалась.

В современных организмах синтез энзимных белков осуществляется чрезвычайно сложным и совершенным механизмом, при помощи которого аминокислоты последовательно нанизываются на полипептидную цепь в том именно порядке, какого требует специфическое, строго закономерное сочетание мононуклеотидных остатков в молекулах ДНК и РНК.

Конечно, такого рода механизм мог возникнуть только в процессе длительной эволюции пробионтов и образовавшихся затем из них живых систем [532].

Первым звеном этой эволюции являлось абиогенное образование полинуклеотидов, принципиальная возможность которого была показана на примере ряда модельных синтезов [567, 608]. При этом возникали гораздо более примитивные по своему внутримолекулярному строению полимеры, чем те, которые существуют сейчас. Они так же, как и полипептиды, должны были эволюционировать. Но при рассмотрении этой эволюции нужно принять во внимание следующие обстоятельства.

1. Полинуклеотиды обладают ярко выраженной способностью к прямой или комплементарной репликации, а следовательно, и к сравнительно точной повторяемости самовоспроизведения определенной внутримолекулярной организации [641].

2. Полинуклеотиды в противоположность полипептидам не обладают каталитической активностью, которая позволяла бы им непосредственно участвовать в организации метаболизма пробионтов или иных исходных систем. Они осуществляют это только через посредство белков.

Оргель [464] в своей статье, посвященной эволюции нуклеиновых кислот, ставит перед собой два вопроса:

1) возможность репликации полинуклеотидов без энзимов,

2) эволюция полинуклеотидов без белков.

Если по первому вопросу современные модельные опыты дают положительный ответ [465], то гораздо сложнее дело обстоит со второй проблемой, с возможностью направленной к возникновению жизни эволюцией полинуклеотидов в отсутствие белков. Декларируемый Оргелем «естественный отбор без функции» внутренне противоречив, так как естественный отбор может равняться только на определенные функции. Обладая способностью к весьма совершенной репликации (хотя только в присутствии белков-энзимов), находящиеся просто в водном растворе нуклеиновые кислоты сами по себе могли лишь накапливаться в определенных локальных пунктах земной поверхности в форме эволюционно неподвижных органических залежей.

Вместе с тем чрезвычайно выгодным в эволюционном отношении являлось сочетание белков с их каталитическими функциями и нуклеиновых кислот с их совершенной способностью к репликации. Уже при простом смешивании еще внутримолекулярно плохо организованных полипептидов и полинуклеотидов (еще не несущих никакой генетической информации) происходит (в модельных опытах) объединение этих веществ в фазово обособленные образования. В условиях примитивной Земли в такого рода образованиях и должны были происходить взаимодействие первоначально независимых белковых и нуклеиновых систем и последовательная эволюция «генетического кода», определившего в дальнейшем сохранение и совершенную передачу наследственной информации.

Крик в своей статье [222], обобщающей большой литературный материал, ставит перед собой вопрос о двух возможных путях возникновения современного нуклеинового кода.

1. Возник ли этот код просто на основании чисто стереохимических отношений между триплетами оснований (кодонами) и аминокислотами. В этом случае его современная универсальность обуславливается чисто химическими причинами, и он принципиально не может быть иным.

2. Или код первоначально был более примитивным и совершенствовался в процессе своей эволюции уже на основе естественного отбора, т. е. с привлечением биологической закономерности. Тогда он является в настоящее время универсальным не в силу того, что иного кода вообще не может существовать по чисто химическим причинам, а «потому, что в настоящее время любое его измене-

ние было бы смертельным или сильно противоборочным» [222].

Ряд фактов и соображений говорит за второе решение вопроса, и Крик дает возможную картину последовательной эволюции кода, которая, по нашему мнению, могла осуществляться только в подверженных естественному отбору целостных системах, образованных из примитивных полипептидов и полинуклеотидов, но способных усовершенствовать свою организацию на основе предбиологического отбора самих систем, а не отдельных молекул.

Так, на определенной, сравнительно позд-

ней стадии эволюции пробионтов эти системы поднялись на новую, небывалую ранее высоту точного самовоспроизведения, которая так характерна для всех современных живых существ [292, 652].

На этой основе происходило их дальнейшее усовершенствование как в отношении организации обмена веществ, так и внутриклеточной структуры. Мы можем судить об этом на основании сравнительных биохимических и цитологических данных [29, 30, 35, 52, 70, 95, 113, 207, 227, 259, 276, 368, 380, 381, 412, 413, 454, 487, 560, 575, 642].

ЛИТЕРАТУРА

1. Акабори Ш. Асимметрическое гидрирование карбонильных соединений. В кн. «Происхождение предбиологических систем». А. И. Опарин (ред.). М., «Мир», 1966, стр. 135.
2. Баранов В. И. Термическая история Земли. В кн. «Возникновение жизни во Вселенной». А. Г. Масевич (ред.). М., Изд-во АН СССР, 1963, стр. 39.
3. Бернал Д. Возникновение жизни. М., «Мир», 1969.
4. Бойченко Е. А., Удельнова Т., Юферова С. Геохимия, 1969, № 11, 1392.
5. Васильева Н. В., Балаевская Т., Гоголашвили Л., Серебровская К. Биохимия, 1969, 4, 795.
6. Вассоевич Н. Б. Генетическая природа нефти в свете данных органической геохимии. В кн. «Генезис нефти и газа». М., «Наука», 1968.
7. Вассоевич Н. Б. Природа, 1971, № 3, 58.
8. Вдовыкин Г. Геохимия, 1962, № 2, 134.
9. Вдовыкин Г. П. Геохимия, 1964, № 4, 299.
10. Вдовыкин Г. П. Геохимия, 1964, № 7, 678.
11. Вдовыкин Г. П. Углеродистое вещество материалов. М., «Наука», 1967.
12. Вдовыкин Г. П. Метеориты и жизнь. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, 135.
13. Вернадский В. И. Очерки геохимии. М., Горгеонефтеиздат, 1934.
14. Виноградов А. П. Химическая эволюция Земли. М., Изд-во АН СССР, 1959.
15. Виноградов А. П. Геохимия, 1961, № 4, 3.
16. Виноградов А. П. Изотопы кислорода и фотосинтез. М., Изд-во АН СССР, 1962.
17. Виноградов А. П. Газовый режим Земли. В кн. «Химия земной коры», 2. М., Наука, 1964, 5.
18. Виноградов А. П. Геохимия, 1965, № 11.
19. Виноградов А. П. Введение в геохимию океана. М., «Наука», 1967.
20. Виноградов А. П. Химия планет. В кн. «Наука и человечество». М., «Наука», 1968, 214.
21. Виноградов А. П. Вестн. МГУ. Геология, 1969, № 4, 3.
22. Виноградов А. П. Природа, 1971, № 3, 8.
23. Виноградов А. П., Вдовыкин Г. П. Геохимия, 1964, № 9, 843.
24. Вологдин А. Природа, 1955, № 9, 39.
25. Вологдин А. Палеонтология и поиски полезных ископаемых. М., «Знание», 1960.
26. Вологдин А. Древнейшие водоросли СССР. М., Изд-во АН СССР, 1962.
27. Вологдин А. Земля и жизнь. М., Изд-во АН СССР, 1963.
28. Гаузе В. Асимметрия протоплазмы. М., Изд-во АН СССР, 1940.
29. Гельман Н. С. Усп. совр. биол., 1967, 64, 379.
30. Гельман Н. С., Лукьянова М. А., Островский Д. Н. Мембраны бактерий и дыхательная цепь. М., «Наука», 1972.
31. Горюхи Н. Изучение космоса и происхождение жизни. В кн. «Проблемы эволюционной и технической биохимии». В. Л. Кротович (ред.). М., «Наука», 1964, 12.
32. Деборин Г. А. Белково-липидные пленки как прототип биологических мембран. Автореф. докт. дисс. М., 1967.
33. Деборин Г. А., Баранова В. Исследование искусственных липовителлиновых пленок. В кн. «Проблемы эволюционной и технической биохимии». В. Л. Кротович (ред.). М., «Наука», 1964, 147.
34. Деборин Г. А., Баранова В., Жукова И. Докл. АН СССР, 1966, 166, 231.
35. Деборин Г. А., Тюрина И., Торховская Т., Опарин А. Журн. эволюцион. биохимии и физиол., 1965, 1, № 6, 550.
36. Додонова Н. Я., Сидорова А. Биофизика, 1961, 6, 149.
37. Додонова Н. Я., Сидорова А. Биофизика, 1962, 7, 31.
38. Евреинова Т. Н. Докл. АН СССР, 1961, 141, 1224.
39. Евреинова Т. Н. Концентрирование веществ и действие ферментов в коацерватах. М., «Наука», 1966.
40. Евреинова Т. Н., Кузнецова А. Биофизика, 1961, 6, 288.
41. Евреинова Т. Н., Погостова А., Чуканова Т., Ларионова Т. Научные докл. Высшей школы, 1962, № 1, 159.
42. Икорский С. В. Органическое вещество в минералах изверженных горных пород на примере Хибинского щелочного массива. Л., «Наука», 1967.
43. Имшенецкий А. А. (ред.). Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения. М., «Наука», 1970.
44. Кальвин М. Химическая эволюция. Перевод с англ. под ред. А. И. Опариной. М., «Мир», 1971.
45. Кваша Л. В кн. «Возникновение жизни во Вселенной». А. Г. Масевич (ред.). М., Изд-во АН СССР, 1963.
46. Келлер Б. Природа, 1959, № 9, 9.

47. Клабуновский Е. И. Асимметрический синтез. М., Госхимиздат, 1960.
48. Клабуновский Е. И. Усп. совр. биол., 1963, 55, 373.
49. Клабуновский Е. И. Стереоспецифический катализ. М., «Наука», 1968.
50. Колодийченко М. Украинский биохимич. журнал, 1964, 36, 216.
51. Котельников В. А., Дубровин В. М., Морозов В. А., Петров Г. М., Ржига О. Н., Трунова З. Г., Шаховский А. М. Радиотехн. и электроника, 1962, 7, № 11, 1860.
52. Красновский А. А. О развитии способа действия фотокаталитической системы организмов. В кн. «Возникновение жизни на Земле». А. И. Опарин (ред.). М., Изд-во АН СССР, 1959, 604.
53. Красновский А. А., Умрихина А. Докл. АН СССР, 1964, 155, 691.
54. Крепс Е. М. Эволюционная биохимия и физиология, 1971, 7, № 1, 110.
55. Кропоткин П. Н., Шахарстова К. Твердые битумы, нефть и горючие газы в интрузиях гипербазитов, в траппах и вулканических трубках. В кн. «Проблемы миграция нефти и формирование нефтяных и газовых скоплений». Л., Гостоптехиздат, 1959, 161.
56. Кудрявцев Н. А. Нефть, газ и твердые битумы в изверженных и метаморфических породах. Труды ВНИГРИ, 1959, вып. 142.
57. Кудрявцев Н. А. Состояние вопроса о генезисе нефти на 1966 год. В кн. «Генезис нефти и газа». М., «Недра», 1967, 262.
58. Кудрявцев Н. А. Природа, 1971, № 3, 70.
59. Левин Б. Ю. Природа, 1971, № 12, 2.
60. Левин Б. Ю., Массе С. Изв. АН СССР, серия геофиз., 1960.
61. Либл В., Халонька И., Малек И. Изучение протолита комплексных коацерватов и флокулятов. В кн. «Проблемы эволюционной и технической биохимии». В. Л. Кретович (ред.). М., «Наука», 1964, 131.
62. Маркина З. Н., Чиппикова А., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур. М., «Наука», 1966.
63. Маров М. Я. Природа, 1971, № 4, 18.
64. Мартынов Д. Я. Вестник Московского университета. Физика. Астрономия, 1961, № 5, 23.
65. Мартынов Д. Я. Последние данные о физических условиях на планетах земного типа. В кн. «Возникновение жизни во Вселенной». А. Г. Мавсевич (ред.). М., Изд-во АН СССР, 1963, 56.
66. Мартынов Д. Я. Курс общей астрофизики. М., Физматгиз, 1965.
67. Мархинин Е. К. Роль вулканизма в формировании земной коры. М., «Наука», 1967.
68. Миллер С., Юри Г. Внеземные источники органических соединений и возникновение жизни. В кн. «Проблемы эволюционной и технической биохимии». В. Л. Кретович (ред.). М., «Наука», 1964, 357.
69. Муратов М. В. Ранние эры в истории Земли. Природа, 1971, № 11, 16.
70. Опарин А. И. Возникновение жизни на Земле. Изд. 3. М., Изд-во АН СССР, 1957.
71. Опарин А. И. Возникновение и начальное развитие жизни. М., «Медицина», 1966.
72. Опарин А. И. (ред.). Происхождение предбиологических систем. М., «Мир», 1966.
73. Опарин А. И. Жизнь, ее природа, происхождение и развитие. Изд. 2. М., «Наука», 1968.
74. Опарин А. И. (ред.). Труды международного симпозиума 15—24 августа 1957 г. «Возникновение жизни на Земле». М., Изд-во АН СССР, 1959.
75. Опарин А. И., Евреимова Т. Н., Ларионова Т., Давыдова И. Докл. АН СССР, 1962, 143, 980.
76. Опарин А. И., Серебровская К. Б., Ауэрман Т. Синтез полиадениловой кислоты в коацервате. Докл. V Международного биохимического конгресса. М., Изд-во АН СССР, 1961.
77. Опарин А. И., Серебровская К. Б. Докл. АН СССР, 1963, 148, 943.
78. Опарин А. И., Серебровская К. Б., Васильева Н., Балаевская Т. Докл. АН СССР, 1964, 154, 471.
79. Опарин А. И., Серебровская К. Б., Васильева Н. Докл. АН СССР, 1968, 181, 744.
80. Опарин А. И., Серебровская К. Б., Панцхава С. Докл. АН СССР, 1963, 151, 235.
81. Опарин А. И., Стоянова И., Серебровская К. Б., Некрасова Т. Докл. АН СССР, 1963, 150, 684.
82. Павловская Т. Е., Пасынский А. Г. Первичное образование аминокислот в ультрафиолетовых лучах и электрическом разряде. В кн. «Возникновение жизни на Земле». А. И. Опарин (ред.). М., Изд-во АН СССР, 1959, 161.
83. Павловская Т. Е., Пасынский А. Г., Грабенникова А. Докл. АН СССР, 1960, 135, 743.
84. Павловская Т. Е., Пасынский А. Г., Сидоров В., Лавыженская А. Доббиологический синтез биохимически важных соединений. В кн. «Абиогенез и начальные стадии эволюции жизни». М., «Наука», 1968, 41.
85. Пасынский А. Г. Усп. совр. биол., 1957, 43, 263.
86. Пасынский А. Г. Коллоидная химия. М., «Высшая школа», 1959.
87. Пасынский А. Г. Биофизическая химия. Изд. 2. М., «Высшая школа», 1968.
88. Пасынский А. Г., Блохина В. Биохимия, 1956, 21, 826.
89. Пасынский А. Г., Павловская Т. Е. Усп. химии, 1964, 33, 1198.
90. Пасынский А. Г., Слободская В. Докл. АН СССР, 1963, 153, 473.
91. Петерсилье Н. А. Геология и геохимия природных газов и дисперсных битумов некоторых геологических формаций Кольского полуострова. М., «Наука», 1964.
92. Петерсилье Н. А., Павлова М., Малашкина В., Петерсилье М. Органическое вещество в изверженных и метаморфических горных породах. В кн. «Генезис нефти и газа». М., «Недра», 1967, 342.
93. Петров Г., Мороз В. Обсерватории исследуют «красную» планету. «Правда», 26 декабря 1971 г.
94. Писканен Р. А., Павловская Т. Е., Сидоров В., Шарпаты В. Изв. АН СССР, серия биол., 1971, № 2, 238.
95. Поглазов Б. Ф. Сборка биологических структур. М., «Наука», 1970.
96. Порфирьев В. Б. О природе нефти. В кн. «Проблема происхождения нефти и газа в условиях формирования их залежей». М., Гостоптехиздат, 1960, 26.
97. Порфирьев В. Б. Современное состояние проблемы нефтеобразования. В кн. «Генезис нефти и газа». М., «Недра», 1967, 292.
98. Пульман Б., Пульман А. Квантовая биохимия. М., «Мир», 1965.
99. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика. М., 1958.
100. Сергисенко И. З., Бобылева М., Егоров И., Фокин В. Докл. АН СССР, 1970, 190, № 3, 725.

101. *Сергиенко И. З., Вологдин А., Егоров Н., Бобылева М.* Открытие аминокислот и углеводов в породах докембрия. Тезисы доклада Второго Всесоюзного семинара «Органические вещества современных и ископаемых осадков». МГУ, 1970, 70.
102. *Сергиенко И. З., Сидоренко С., Бобылева М., Егоров И. А.* Докл. АН СССР, 1974, 215, № 2, 474.
103. *Серебровская К. Б.* Коацерваты и протоплазма. М., «Наука», 1971.
104. *Серебровская К. Б., Васильева Н.* Докл. АН СССР, 1964, 155, 212.
105. *Серебровская К. Б., Евстигнеев В. Б., Гаврилова В. А., Опарин А. И.* Биофизика, 1962, 7, 34.
106. *Серебровская К. Б., Лозовая Г., Балаевская Т.* Журн. эволюцион. биохимии и физиол., 1966, 2, 302.
107. *Сидоров В. С.* Докл. АН СССР, 1965, 164, 692.
108. *Сидоров В. С.* Пути абиогенного образования некоторых аминокислот и гетероциклических соединений. Автореф. канд. дисс. Петрозаводск, 1965.
109. *Сидоров В. С., Павловская Т. Е., Пасынский А. Г.* Журн. эволюцион. биохимии и физиол., 1966, 2, 294.
110. *Соколов В. А.* Эволюция атмосферы Земли. В кн. «Возникновение жизни на земле». А. И. Опарин (ред.). М., Изд-во АН СССР, 1959, 59.
111. *Соколов В. А.* Геохимия газов и земной атмосферы. М., «Недра», 1966.
112. *Сокольская А. В., Эльпинер И. Е.* Синтез аминокислот под действием ультразвуковых волн. Докл. V Международного биохимического конгресса. 1. М., Изд-во АН СССР, 1961, 121.
113. *Спирин А. С., Гаврилова Л. П.* Рибосома. М., «Наука», 1971.
114. *Страхов Н. М.* Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М., Госгеолтехиздат, 1969.
115. *Сурков Ю.* Открытая тайны Вселенной. «Правда», 18 декабря 1971 г.
116. *Терентьев А. П., Клабуновский Е.* Уч. зап. МГУ, 1951, 151, 145.
117. *Терентьев А. П., Клабуновский Е.* Роль дисимметрии и возникновение живого вещества. В кн. «Возникновение жизни на Земле». А. И. Опарин (ред.). М., Изд-во АН СССР, 1959, стр. 99.
118. *Фесенков В. Г.* Единство и взаимосвязанность галактической системы как условие возникновения жизни на планетах. В кн. «Возникновение жизни во Вселенной». А. Г. Масевич (ред.). М., Изд-во АН СССР, 1963, 77.
119. *Фесенков В. Г.* Космические условия возможности жизни во Вселенной. В кн. «Проблемы эволюционной и технической биохимии». В. Л. Кротович (ред.). М., изд-во «Наука», 1964, 5.
120. *Фесенков В. Г.* Природа, 1964, № 10, 2.
121. *Фесенков В. Г.* Условия жизни во Вселенной. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, 7.
122. *Фесенков В. Г., Рожковский Д.* Атлас газово-пылевых туманностей. М., «Наука», 1953.
123. *Флоровская В. Н.* Абиогенные углеводородные вещества земной коры. Ташкент, «ФАН», 1969, 5.
124. *Флоровская В. Н., Зезина Р., Овчинникова Л., Пиковский Ю., Теплицкая Т.* Диагностика органических веществ в горных породах и минералах магматического и гидротермического происхождения. М., «Наука», 1968.
125. *Флоровская В. Н., Зезин Р., Овчинникова Л., Пиковский Ю., Теплицкая Т.* Труды МОИП, отд. геологии, 10, 1969, 110.
126. *Флоровская В. Н., Теплицкая Т., Зезин Р., Овчинникова Л.* Докл. АН СССР, 1965, 163, 450.
127. *Фокс С.* Журн. эволюцион. биохимии и физиол., 1970, 4, № 2, 131.
128. *Хойл Ф.* Галактика, ядра и квазары. М., «Мир», 1968.
129. *Цукеркендл Э., Полинг Л.* Молекулы как документы процесса эволюции. В кн. «Проблемы эволюционной и технической биохимии». В. Л. Кротович (ред.). М., «Наука», 1964, стр. 54.
130. *Шайн Г., Газе В.* Докл. АН СССР, 68, 1949, 661.
131. *Шайн Г. А., Газе В. Ф.* Атлас диффузных газовых туманностей. М., Изд-во АН СССР, 1952.
132. *Шауман Э. В.* кн.: Вопросы космогонии. М., Изд-во АН СССР, 1954, 3, 227.
133. *Эльпинер И. Е.* Природа, 1968, № 11, 64.
134. *Эльпинер И., Сокольская А. В.* Докл. АН СССР, 1968, 119, 1180.
135. *Эльпинер И. Е., Сокольская А., Брагинская Ф.* Журн. эволюцион. биохимии и физиол., 1968, 4, 317.
136. *Эльпинер И. Е., Сокольская А., Колочева А.* Докл. АН СССР, 1968, 181, 737.
137. *Abelson P. H.* Paleobiocchemistry. Carnegie Inst. Wash. Yearbook, 1955/56, N. 53, 171.
138. *Abelson P. H.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1966, 55, 1365.
139. *Abelson P. H., Parker P.* Carnegie Inst. Wash. Yearbook, 1962, 61, 181—184.
140. *Abetti G.* The Sun. London, Macmillan Co., 1957, N. 4.
141. *Adams W., Danham T.* Publ. Astron. Soc. Pacif., 1932, 44, 380.
142. *Adel A., Slipper V.* Phys. Rev., 1934, 46, 902.
143. *Akabori S.* In: The Origin of Life on Earth. A. U. Oparin (Eds.). N. Y., Pergamon Press, 1959, 189.
144. *Alfvén H.* Astrophys. J., 1966.
145. *Allen W. V., Ponnampertuma C.* Currents Mod. Biol., 1967, 1, 24.
146. *Aller L.* The Abundance of the Elements. N. Y., Intersci. Publishers, 1961.
147. *Anders E.* Proc. Conf. Origin. Solar System. R. Jastrow (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1963.
148. *Anders E.* Ann. Rev. Astron. and Astrophys., 1971, 9, 1.
149. *Anders E.* In: Proc. Sympos. Interstellar Molecules, Charlottesville, Virginia. M. Gordon (Ed.). N. Y., John Wiley and Sons, 1971.
150. *Anderson A., Crewe A., Goldsmith J., Moore P., Newton J., Olsen E., Smith J., Wylie P.* Science, 1970, 167, 587.
151. *Anderson D.* Ph. D. Thesis. Univ. Minnesota, March. 1965.
152. *Arp H. C.* Scient. Amer., 1962, 208, N. 1, 70.
153. *Bahadur K.* Nature, 1954, 173, 1141.
154. *Bahadur K.* Synthesis of Jeewanu (The Proto-cell). Ram Narain Lal Beni Prasad. Publ. and Booksel. Allahabad, 1966, 2, 1—VII + 219.
155. *Baltscheffsky H.* In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buvet, C. Ponnampertuma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 466.
156. *Bangham A., DeGrier J., Greville G.* Chem. Phys. Lipids, 1967, 1, 225.

157. *Barghoorn E. S., Meinschein W., Schopf J.* Science, 148, 1965, 461.
158. *Barghoorn E. S., Philippot D., Turbill C.* Science, 1970, 167, 775.
159. *Barghoorn E. S., Schopf J.* Science, 1965, 150, 337.
160. *Barghoorn E. S., Schopf J.* Science, 1966, 152, 758.
161. *Barghoorn E. S., Tyler S.* Science, 1965, 147, 563.
162. *Barth C. A., Fastle W., Hord C., Rearce J., Kelley K., Stewart A., Thomas G., Anderson G., Paper O.* Ultraviolet Spectroscopy. In: *Mariner — Mars 1969. Preliminary Rept. NASA-SP-225.* Washington, 1969, 97.
163. *Bates D., Spitzer L.* Astrophys. J., 1951, 113, 441.
164. *Bayer E., Yang G., Hagenmaier H.* In: *Prebiotic and Biochemical Evolution.* A. Kimball, J. Oro (Eds.). Amsterdam, North-Holland, Publ. Co., 1971, 223.
165. *Beck A., Lohrmann R., Orgel L.* Science, 1967, 157, 952.
166. *Belsky T.* Organic Geochemistry and Chemical Evolution. Ph. D. Thesis. Univ. Cal., Berkeley, Dec. 1965. Univ. Cal. Lawrence Radiation Lab., Report UCRL-16566, 1966.
167. *Belsky T., Johns R., McCarthy A., Burlingame A., Richter W., Calvin M.* Nature, 1965, 206, 446.
168. *Belton M. J., Broadfoot A., Hunten D. J.* Geophys. Res., 1968, 73, 4795.
169. *Belton M. J., Hunten D., McElroy M.* Astrophys. J., 1967, 150, 1111.
170. *Bendoraitis J., Brown B., Hepner L.* 6th World Petrol. Congr., Sect. 5, Paper 15. Frankfurt/Main, 1963.
171. *Bergson A.* L'évolution créatrice. Paris, 1907.
172. *Berlin E., Neugebauer G.* Sky and Telescope, 1968, 217.
173. *Bernal J.* The Physical Basis of Life. London, Routledge, 1951.
174. *Bernal J. D.* The Origin of Life. London, Weidenfeld and Nicolson, 1967.
175. *Bertrand J.* Bull. Sci. géol. France, 1969, 7, 10, 168.
176. *Bird C.* Chem. Rev., 1962, 62, 283.
177. *Blois M.* In: *The Origin of Prebiological System.* S. Fox (Ed.), N. Y., Acad. Press, 1965, 19.
178. *Booij H. L.* Colloid Chemistry of Living Membranes. Conf. Permeability. Agric. Univ. Wageningen, 1962.
179. *Booij H. L., Bungenberg-de-Jong H.* Biocolloids and Their Interactions. Wien, Springer-Verlag, 1956.
180. *Bradley P.* In: *Exobiology Frontiers of Biology,* 23. C. Ponnampuruma (Ed.). Amsterdam, Elsevier Publ. Co., 1971.
181. *Brigs M. H.* Nature, 1960, 187, 1102.
182. *Brigs M. H., Mamikunian G. J.* Brit. Interplanet. Soc., 1963, 19, 45.
183. *Broda E.* In: *Chemical Evolution and the Origin of Life.* R. Buvet, C. Ponnampuruma (Eds.). Amsterdam, North-Holland, Publ. Co., 1971, 447.
184. *Brown H.* In: *The Atmosphere of the Earth and Planets.* G. P. Kuiper (Ed.). Univ. Chicago Press, 1949, 258.
185. *Brown H.* Astrophys. J., 1950, 111, 691.
186. *Brown H.* In: *The Atmospheres of the Earth and Planets.* G. P. Kuiper. (Ed.). Univ. Chicago Press, 1952, 258.
187. *Brown H.* Planetary Systems Associated with Main Sequence Stars, 1964, 145, 1177.
188. *Brown H., Ingraham M.* Phys. Rev., 1947, 72, 347.
189. *Brownie A., Cox A.* Sky and Telescope, 1961, 21, 251.
190. *Buhl D.* Research/Development, 1970, 21, 10, 6.
191. *Buhl D., Snyder L.* Chem. and Engng News, 1970, June 22, 57.
192. *Bungenberg-de-Jong H. G.* Protoplasma, 1932, 15, 110.
193. *Bungenberg-de-Jong H. G.* La coacervation les coacervates et leur importance en biologie. I. Généralités et coacervates complex. II. Coacervates autocomplex. Paris, Hermann et Cie, 1936.
194. *Bungenberg-de-Jong H. G.* Kolloid-Z., 1937, 79, 223; 80, 221, 350.
195. *Bungenberg-de-Jong H. G., Malee A.* Proc. Koninkl. nederl. Akad. wet. B, 1953, 56, 203.
196. *Burbridge E., Burbridge G.* Science, 1958, 128, 387.
197. *Burbridge E., Burbridge G., Fowler W., Hoyle F.* Rev. Mod. Phys., 1957, 29, 547.
198. *Burlingame A., Haug P., Belsky T., Calvin M.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1965, 54, 1406.
199. *Burlingame A. L., Haug P., Schnoes H., Simonet B.* In: *Advance on Organic Geochemistry,* 1968. P. Schenk, I. Havenaar (Eds.). London, Pergamon Press, 1969, 85.
200. *Burlingame A. L., Simonet B.* Nature, 1969, 222, 741—747.
201. *Burton A. J.* Cellular and Compar. Physiol., 1939, 14, 327.
202. *Buvet R., Etaix E., Godin F., Leduc P., Le Port L.* In: *Chemical Evolution and the Origin of Life.* R. Buvet, C. Ponnampuruma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 51.
203. *Molecular Evolution.* R. Buvet, C. Ponnampuruma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 560.
204. *Cairns-Smith A. G. J.* Theoret. Biol., 1966, 10, 53.
205. *Calvin M.* Proc. Roy. Soc., A, 1965, 288, 441.
206. *Calvin M.* Bennet Lecture — Trans. Leicester Lit. Philos. Soc., 1969, 62, 45—69.
207. *Calvin M.* Chemical Evolution. Oxford, Clarendon Press, 1969.
208. *Cameron A.* Mém. in 8 vo. Soc. roy. sci. Liège, 5th ser., 1959, 5, Cointe Sclessin, Inst. astrophys.
209. *Cameron A. G.* Icarus, 1962, 1, 13.
210. *Interstellar Communication.* A. Cameron (Ed.). N. Y., N. A. Benjmin Inc., 1963.
211. *Chang W., Kvenvolden K.* In: *Exobiology. Frontiers of Biology,* 23. C. Ponnampuruma (Ed.). Amsterdam, Elsevier Publ. Co., 1972.
212. *Chapman C. R., Pollack J., Sagan C.* Astron. J., 1969, 74, 1039.
213. *Cheung A. C., Rank D., Townes C., Thornton D., Welch W.* Phys. Rev. Letters, 1968, 21, 1701.
214. *Cheung A. C., Rank D., Townes C., Thornton D., Welch W.* Nature, 1969, 221, 626.
215. *Choughuley A. S., Lemmon R.* Nature, 1966, 210, 628.
216. *Claus G., Nagy B.* Nature, 1961, 192, N 4803.
217. *Cloud P. E.* Science, 1965, 148, 27.
218. *Cloud P. E.* Science, 1968, 160, 729.
219. *Cloud P.* In: *Organic Geochemistry,* G. Eglinton, M. Murphy. (Eds.). Berlin, Springer-Verlag, 1969, 727.
220. *Cloud P. E., Grunar J., Hagen H.* Science, 1965, 148, 1713.
221. *Cloud P. E., Hagen H.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1965, 54 (1), 1.
222. *Crick F. J.* Mol. Biol., 1968, 38, 367.
223. *Dalgarno A., McElroy M.* Science, 1970, 170, 167.
224. *Danville A.* L'origine des planètes. Essai de cosmogonie. Paris, Presses Univ. France, 1956.
225. *Darwin F. (Ed.).* The Life and Letters of Charles Darwin, 3, 18. London, Murray, 1887.

226. Dayhoff M. O. Atlas of Protein Sequence and Structure. Nat. Biomed. Res. Found., Silver Spring, 1969.
227. Dayhoff M. In: Exobiology Frontiers of Biology, 23. C. Ponnampertuma (Ed.). Amsterdam, Elsevier Publ. Co., 1972.
228. Denbigh K., Hicks M., Page F. Trans. Faraday Soc., 1948, 44, 479.
229. Dixon M., Webb E. Enzymes. 2nd ed. N. Y., Acad. Press, 1964.
230. Dollfus A. Compt. rend. hebdomadaires séances Acad. sci., 1950, 231, 1430.
231. Donn B. Astrophys. J., 1968, 152, L129.
232. Donn B. In: Exobiology Frontiers of Biology, 23. C. Ponnampertuma (Ed.). Amsterdam, Elsevier Publ. Co., 1972.
233. Donn B. Organic Molecules in Space. In: Exobiology. C. Ponnampertuma (Ed.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1972.
234. Donn B., Urey H. C. Astrophys. J., 1956, 123, 339.
235. Donn B., Wickramasinghe N. C., Hudson J. P., Stecker T. P. Astrophys. J., 1968, 153, 451.
236. Dose K. In: Abstrs Internat. Sympos. Origin Life and Evolut. Biochem. Varna, Bulgaria, 1971, 31.
237. Dose K. In: Theory and Experiment in Exobiology, v. 1. A. W. Schwartz (Ed.). Groningen, Netherlands, Wolters-Noordhoff Publ., 1972, 41.
238. Dose K., Ponnampertuma C. Radiation. Res., 1967, 31, 650.
239. Dose K., Zaki L. Z. Naturforsch., 1971, 26B, 144.
240. Dufay J. Galactic Nebulae and Interstellar Matter. Philos. Libr. N. Y., 1957.
241. Edsall J., Wyman J. Biophysical Chemistry. N. Y., Acad. Press, 1958.
242. Eglinton G. In: Advances in Organic Geochemistry, 1968. P. Schenk, I. Havenaar (Eds.). London, Pergamon Press, 1969, 1.
243. Organic Geochemistry. G. Eglinton, M. Murphy (Eds.). Berlin, Springer-Verlag, 1969.
244. Eglinton G. In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buve, C. Ponnampertuma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 523.
245. Eglinton G., Calvin M. Scient. Amer., 1967, 216, N 1, 32.
246. Organic Geochemistry. G. Eglinton, M. Murphy (Eds.). Berlin, Springer-Verlag, 1969.
247. Eigen M. Naturwiss. Rundschau, 1971, 24, N 1, 22.
248. Engel A. E., Nagy B., Nagy L., Engel C., Kremp G., Drew C. Science, 1968, 161, 1005.
249. Epstein S., Taylor H. Science, 1970, 167, 533.
250. Evreinova T. [Еврейнова Т.]. In: The Origin of Life on the Earth. A. Oparin (Ed.). London, Pergamon Press, 1959, 493.
251. Evreinova T. [Еврейнова Т.]. Evolutionary Biochemistry, v. 8. Pergamon Press, 1963, 110.
252. Evreinova T. N., Karnaukhov N., Mamontova T., Ivanizki G. [Еврейнова Т. Н., Карнаухова Н., Мамонтова Т., Иванецкий Г.]. J. Colloid and Interface Sci., 1971, 36, N 1, 18.
253. Falk J. Porphyrins and Metalloporphyrins. Amsterdam, Elsevier Publ. Co., 1964, 161.
254. Ferris J., Paud L., Orgel L. E. J. Amer. Soc., 1966, 88, 3829.
255. Fesenkov V. G. In: The Origin of Life on the Earth. A. Oparin et al. (Eds.). N. Y., Pergamon Press, 1959, 9.
256. Fesenkov V. G. In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buve, C. Ponnampertuma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 495.
257. Fitch F. W., Anders E. Current Status of the Analysis of Organized Elements in Carbonaceous Chondrites. Life Sci. and Space Res., 1965, 3.
258. Florkin M. Biochemical Evolution. N. Y., Acad. Press, 1949.
259. Comparative Biochemistry. M. Florkin, H. Meson. (Eds.). Acad. Press, 1949.
260. Fowler W. A. Ann. Phys., 1960, 10, N 2.
261. Fowler W. A. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1964, 52, 524.
262. Fowler W. A., Greenstein J. L., Hoyle F. Geophys. J., 1962, 6, 148.
263. Fox S. W. Science, 1960, 132, 200.
264. Proc. Conf. Conducted Wakulla Springs, Florida. S. Fox. (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1965.
265. Fox S. W. In: The Origins of Prebiological Systems. S. Fox. (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1965, 361.
266. Fox S. J. Scient. and Industr. Res., 1968, 27, 267.
267. Fox S. Naturwissenschaften, 1969, 56, 1.
268. Fox S. W. Self-assembly of the Protocell from a Selfordered Polymer. In: Prebiotic and Biochemical Evolution. A. Kimball, J. Oro (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 8.
269. Fox S. W. In: Abstrs Internat. Sympos. Origin Life and Evolut. Biochem. Varna, Bulgaria, 1971, 37.
270. Fox S. W., Harada K. J. Amer. Chem. Soc., 1960, 82, 3745.
271. Fox S. W., Harada K. Science, 1961, 133, 1923.
272. Fox S. W., Harada K., Hare P., Hinsch G., Meutler G. Science, 1970, 167, 767.
273. Fox S. W., Yaguma S. Ann. N. Y. Acad. Sci., 1963, 108, 487.
274. Gabel W., Ponnampertuma C. Nature, 1967, 216, 453.
275. Gabel W., Ponnampertuma C. In: Exobiology Frontiers of Biology, 23. C. Ponnampertuma (Ed.). Amsterdam, Elsevier/North-Holland. Publ. Co., 1972.
276. Gaffron H. In: Horizons in Biochemistry. M. Kasha, B. Pullman (Eds.). N. Y., Acad. Press, 1962.
277. Gamov G. The Creation of Universe. London, Macmillan Co., 1952.
278. Gamov G., Hynek J. Astrophys. J., 1945, 101, 249.
279. Garrison W., Morrison D., Hamilton J., Benson A., Calvin M. Science, 1951, 114, 461.
280. Gehrke C., Zumwalt R., Ave W., Stalling D., Duffield A., Kvenvolden K., Ponnampertuma C. Geochim. et cosmochim. acta, Suppl., 1971, 1, 2, 1845.
281. Gilvarry J. Icarus, 1966, 5, 118.
282. Glaessner M. F. Scient. Amer., 1961, 204, N 3, 72.
283. Glaessner M. F., Preiss W., Walter M. Science, 1969, 164, 1056—1058.
284. Glaessner M., Wade M. Paleontology, 1966, 2, 599.
285. Glasel J. A. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1961, 47, 174.
286. Glasstone S. The Book of Mars. NASA SP-179. Washington, 1968.
287. Goldacre R. J. Surface Film, Their Collapse of Compression, the Shapes and Sizes of Cells and the Origin of Life. Surface Phenomena in Chemistry and Biology. London, Pergamon Press, 1958, 178.
288. Goldberg L., Muller E., Aller L. Astrophys. J., Suppl., 1960, 5, N 45, 1.
289. Goldring R., Curnow C. South Australia. J. Geol. Soc. Australia, 1967, 14, 195.
290. Goldschmidt V. Skr. Norske vidensk-akad. Oslo. I Kl., 1937, N 4.

291. Gouliau M., Kornberg A., Sinsheimer R. Enzymatic Synthesis of DNA. XXIV. Synthesis of Infections Phage DNA. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1967, 58, 2321.
292. Govaudan P. In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buve, Ponnampuruma C. (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 432.
293. Gravelle M., Lelubre M. Bull. Soc. géol. France, 1957, 6 (7), 435.
294. Green E. F., Toennies J. Chemical Reactions in Shock Waves. N. Y., Acad. Press, 1965.
295. Greenland D., Laby R., Quirk J. Trans. Faraday Soc., 1962, 58, 829.
296. Greenstein I. L. Amer. Scientist, 1961, 49; Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1964, 52, 549.
297. Grossenbacher K. A., Knight C. In: The Origins of Prebiological Systems. S. Fox (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1965, 173.
298. Groth W., Weyenhoff H. Planetary and Space Sci., 1960, 2, 79.
299. ter-Haar D., Cameron A. In: The Origin of the Solar System. R. Yastrow, A. Cameron (Eds.). N. Y., Acad. Press, 1963, 4.
300. Han J., Calvin M. Nature, 1969, 224, 576.
301. Han J., Simonet B., Burlingame A., Calvin M. Nature, 1969, 222, 365.
302. Hanjusa H., Akabori S. Bull. Chem. Soc. Japan, 1959, 32, 625.
303. Harada K. Nature, 1967, 214, 479.
304. Harada K. In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buve, C. Ponnampuruma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 71.
305. Harada K., Fox S. Nature, 1964, 201, 335.
306. Harada K., Fox S. W. In: The Origins of Prebiological Systems. S. Fox (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1965, 187.
307. Harada K., Fox S. In: The Origins of Prebiological Systems. S. Fox (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1965, 289.
308. Harada K., Hare P., Windsor C., Fox S. Science, 1971, 173, 433—435.
309. Hardebeck H. G., Krampitz G., Wulf L. Arch. Biochem. and Biophys., 1968, 123, 72.
310. Hare P. E. Carnegie Inst. Wash. Yearbook, 1965, 64, 232.
311. Härme M., Perttunen V. Compt. rend. Soc. géol. Finlande, 1963, 35, 79.
312. Harteck P., Hensen I. Z. Naturforsch., 1948, 3a, 591.
313. Haser L. Compt. rend. Hebdomadaires séances Acad. sci., 1955, 241, 742.
314. Hasselstrom T., Henry M., Murr B. Science, 1957, 125, 350.
315. Hayatsu R., Studier M., Anders E. Internat. Sympos. Hydrogeochem. and Biogeochem., Sept. 6—12, 1970. Tokyo, Japan, NASA EF1-70-48.
316. Hayatsu R., Studier M., Anders E. Geochim. et cosmochim. acta, Febr. 1971.
317. Hayatsu R., Studier M., Matsuoka S., Anders E. Geochim. et cosmochim. acta, Aug. 1971.
318. Hayatsu R., Studier M., Oda A., Fuse K., Anders E. Geochim. et cosmochim. acta, 1968, 32, N 2, 175.
319. Hayos J. M. Geochim. et cosmochim. acta, 1967, 31, N 9, 1395.
320. Heath M. B. J. Brit. Astron. Assoc., 1960, 70, 29.
321. Hodgson G., Baker B. Geochim. et cosmochim. acta, 1969, 33, N 8, 943.
322. Heisenberg W. Naturwissenschaften, 1963, 50, 3.
323. Henderson W., Eglinton G., Simmonds P., Lovelock J. Nature, 1963, 219, 1012.
324. Henroteau F., Henderson J. Publ. Dominion Astrophys. Observ. Ottawa, 1920, 5, 1; 1921, 8, 331.
325. Herbig G. H. The Diffuse Interstellar Bands. III. The Situation in 1966. I. A. M. Sympos., 1967, N 31, 85.
326. Herbig G. Scient. Amer. Aug. 1967.
327. Herr K., Horn D., McAfee J., Pimental G. Astron. J., 1970, 75, 883.
328. Herr K., Pimental G. In: Mariner — Mars 1969. Preliminary Rept, NASA Sp-225. Washington, 1969, 83.
329. Herrera A. Bull. Lab. Plasmogen. Mex., 1934—35, 1, 49, 63, 71.
330. Herrera A. Science, 1942, 96, 14.
331. Herzberg G. Spectra of Diatomic Molecules. N. Y., Van Nostrand Co., 1950, 658.
332. Herzberg G. Molecular Spectra and Molecular Spectra and Molecular Structure. I. Spectra of Diatomic Molecules. N. Y., D. Van Nostrand Co., 1959.
333. Heyns K., Pavel K. Naturforsch., 1957, 12b, 97.
334. Heyns K., Walter W., Meyer E. Naturwissenschaften, 1957, 44, 385.
335. Hirschelwood C. The Chemical Kinetics of the Bacterial Cell. Oxford, Clarendon Press, 1947.
336. Hochstim A. R. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1963, 50, 200.
337. Hodgson G. In: Theory and Experiment in Exobiology, v. 1. A. W. Schwartz (Ed.). Groningen, Netherlands, Wolters—Noordhoff Publ., 1971, p. 85.
338. Hodgson G., Baker B. Nature, 1964, 202, 125.
339. Hodgson G., Peterson E., Kuenzolden K., Bunnenberg E., Halpern B., Ponnampuruma C. Science, 1970, 167, 763.
340. Hodgson G., Ponnampuruma C. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1968, 59, 22.
341. Hoering T. C. Carnegie Inst. Wash. Yearbook, 1962, 61, 184.
342. Hoering T. C. Carnegie Inst. Wash. Yearbook, 1965, 64, 215.
343. Hoering T. C. Carnegie Inst. Wash. Yearbook, 1966, 65, 365.
344. Holland H. D. Model for the Evolution of the Earth's Atmosphere. Petrologic Studies: A Volume to Honor A. F. Buddington. A. E. Engel, H. James, B. Leonard (Eds.). N. Y., Geol. Soc. America, 1962, 447.
345. Horowitz N. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1945, 31, 153.
346. Horowitz N., Miller S. Current Theories on the Origin of Life. Vienna, Springer-Verlag, 1962.
347. Houck T. E., Lillie C. F. Chem. and Engng News, 1970, March 30, 33.
348. Howard W. E., Barrett A., Haddock F. Astrophys. J., 1961, 66, 287.
349. Hoyle F. The Nature of Universe. Basil Blackwell, Oxford, 1950. 2nd ed. N. Y., Harper and Bros, 1960.
350. Hoyle F., Quart J. Roy. Astron. Soc., 1960, 1, 28.
351. Hoyle F. Observatory, Febr. 1962.
352. Hoyle F., Fowler W., Burbidge G., Burbidge E. Astrophys. J., 1964, 139, 909.
353. Hoyle F., Wickramasinghe N. Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 1962, 124, 417.
354. Huang S. S. Amer. Scientist, 1959, 47, 391.
355. Hurley P. M., Fairbairn H., Pinson W., Hower J. J. Geol., 1962, 70, 489.
356. Jefferts K. B., Penzias A., Wilson R. Chem. and Engng News, 1970, April 20, 14.

357. *Johns R., Belsky T., McCarthy E., Burlingame A., Hang P., Schnoes H., Richter W., Calvin M.* Geochim. et cosmochim. acta, 1966, 30, 1191.
358. *Johnson F. M.* In: Interstellar Grains. J. M. Greenberg, T. P. Roark (Eds.). NASA Sp-140. Washington, 1965, 229.
359. *Johnson F. M.* In: Use of Space Systems and Planetary Geology and Geophysics. R. D. Enzmann (Ed.). Boston, Mass., Amer. Astronaut. Soc., 1967, 51.
360. *Johnson F. M., Hodgson G.* 129th Meet. Amer. Astron. Soc., Honolulu, Hawaii, March 30 — Apr. 2, 1969.
361. *Kaplan L. D.* Planetary and Space Sci., 1961, 8, 23.
362. *Kaplan L. D., Connes J., Connes P.* Astrophys. J., 1969, 157, L 187.
363. *Kaplan I., Degens E., Reuter J.* Geochim. et cosmochim. acta, 1963, 27, 805.
364. *Kaplan I. R., Smith J. W.* Science, 1970, 167, 541.
365. *Keil K., Prinz M., Bunch T.* Science, 1970, 167, 597.
366. *Kellogg H., Basu S.* Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng., 1960, 218, 7.
367. *Kenyon D., Steinman G., Calvin M.* Biochim. et biophys. acta, 1966, 124, 339.
368. *Kenyon H., Steinman C.* Biochemical Predestination. N. Y., McGraw-Hill Book Co., 1969.
369. *Keosian J.* The Origin of Life. Reinhold Publ. Corp., 1964.
370. Prebiotic and Biochemical Evolution. A. Kimball, J. Oró (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 296.
371. *Kliore A., Caine D., Levy G.* VII Space Sci. Sympos. COSPAR, 1966.
372. *Kliore A. D., Cain L., Levy G., Eshelman V., G. Fjeldbo, Drake F.* Science, 1965, 149, 1243.
373. *Kliore A., Fjeldbo G., Seidel B.* XIII Space Sci. Sympos. COSPAR, 1970.
374. *Kliore A., Fjeldbo G., Seidel B., Rasool S.* In: Mariner-Mars 1969. Preliminary Rept, NASA Sp-225. Washington, 1969, 111.
375. *Kliss R., Matthews C.* Hydrogen Cyanide Dimer and Chemical Evolution. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1962, 48, 1300.
376. *Klüber H. von.* Das Vorkommen der chemischen Elemente im Kosmos. Barth. Leipzig, 1931.
377. *Knaap U. F., Van den Meijdenberg C., Beenaker I. and van de Hulst H.* Bull. Astron. Inst. Netherl. 1966, 18, 256—258 see also: Chem. and Engng News, 1970, June, 15, 12.
378. *Kornberg A.* Enzymatic Synthesis of Deoxyribonucleic Acid. N. Y., Acad. Press, 1961, 82.
379. *Kramptitz G., Diehl S., Nakashima T.* Naturwissenschaften, 1967, 54, 516.
380. *Krasnovsky A. A.* In: Prebiotic and Biochemical Evolution. A. Kimball, J. Oró (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 209.
381. *Krebs H. A., Kornberg H.* Energy Transformations in Living Matter. Berlin, Springer-Verlag, 1957.
382. *Kuhn N., Braun E.* Naturwissenschaften, 1929, 17, 227.
383. *Kulper G. P.* Astrophys. J., 1949, 109, 540.
384. *Kuiper G. P.* In: Astrophysics. J. A. Hynck (Ed.). N. Y., McGraw Hill, 1951, 365.
385. *Kuiper G. P.* Planetary Atmospheres and Their Origin. The Atmospheres of the Earth and Planets. 2nd ed. Univ. Chicago Press, 1952, 306.
386. *Kulaev I. S.* In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buve, C. Ponnamperna (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 458.
387. *Kulper G. P.* Mém. Soc. Roy. Sci. Liège, 4 ser., 1953, 13, 401.
388. *Kvenvolden K. A.* In: Theory and Experiment in Exobiology, v. 1. A. W. Schwartz (Ed.). Groningen, Netherlands, Wolters-Noordhoff Publ., 1971, 105.
389. *Kvenvolden K. A., Chang S., Smith J., Flores J., Pering K., Saxinger C., Woeller F., Keil K., Brager I., Ponnamperna C.* Geochim. et cosmochim. acta, Suppl., 1971, 1, 2, 1813.
390. *Kvenvolden K., Lawless J., Pering K., Peterson E., Flores J., Ponnamperna C., Kaplan I., Moore C.* Nature, 1970, 228, 923.
391. *Kvenvolden K., Lawless J., Ponnamperna C.* Proc. Nat. Acad. Sci., USA, 1971, 68, 486.
392. *Kvenvolden K. A., Peterson E., Pollock G.* Science, 1969, 221, 141.
393. *Lancet M., Anders E.* Science, 1970, 170, 980—982.
394. *Langenbeck W.* Die organischen Katalisatoren und ihre Beziehungen zu den Fermenten. 2nd ed. Berlin, Springer-Verlag, 1949.
395. *Langenbeck W.* In: F. Nord. (Ed.). Advances in Enzymology, 1953, 14, 163.
396. *Latimer W.* Science, 1950, 112, 101.
397. *Lawden D. F.* Nature, 1964, 202, 412.
398. *Leighton R. B., Horowitz N. H., Murray B., Sharp R., Herriman A., Young A., Smith B., Davies M., Leovy C.* Science, 1969, 166, 49.
399. *Lemmon R. M.* Abiogenic Synthesis of Biologically-relevant Organic Compounds. Chem. Evolution, 1969.
400. *Lepp H., Goldich S.* Bull. Geol. Soc. America, 1959, 70, 1637.
401. *Levin B. J.* New Scientist, February 1952, 323—325.
402. *Lewis J. S., Prinn R. G.* In: Theory and Experiment in Exobiology, v. 1. A. Schwartz (Ed.). Walters-Noordhoff Publ., Netherlands, 1971, 125—142.
403. *Liebl V., Steblova J. J.* Brit. Interplanet. Soc., 1968, 21, 312.
404. *Liller W.* Astrophys. J., 1960, 132, 867—882.
405. *Lipmann F.* In: Chemical Evolution and the Origin of Life. I. R. Buve, C. Ponnamperna (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 171.
406. *Lipmann F.* In: Abstr. Internat. Sympos. Origin Life and Evolut. Biochem. Varna, Bulgaria, 1971, 27—30.
407. *Lowe C. U., Rees M., Markham R.* Nature, 1963, 199, 219.
408. *MacGregor A. M.* Trans. Geol. Soc. S. Africa, 1940, 43, 9.
409. *MacLeod W. D. J.* Gas. Chromatogr., 1968, 6, 591—594.
410. *Macovski E.* Rev. chim. (Român), 1959, 4, 11.
411. *Mamikunian G., M. Briggs.* (Eds.). Current Aspects of Exobiology. Oxford, Pergamon Press, 1965, 420.
412. *Margulis L.* In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buve, C. Ponnamperna (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 480—484.
413. *Margulis L.* In: Exobiology. Frontiers of Biology, 23. C. Ponnamperna. (Ed.). Amsterdam, Elsevier/North-Holland Publ. Co., 1972.
414. *Mariani E., Torraca G.* Internat. Sugar. J., 1953, 55, 309.

415. *Mason B.* Principles of Geochemistry. N. Y., John Wiley and Sons, 1958.
416. *Mason B. J.* Geophys. Res., 1960, 65, 2965.
417. *Mason B.* Space Sci. Revs., 1962—1963, 1, 621.
418. *Mason B.* Principles of Geochemistry, 3rd ed. N. Y., Wiley and Sons, 1966.
419. *Matthews C. N., Moser R.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1966, 56, 1087.
420. *Matthews C. N., Moser R.* Nature, 1967, 215, 1230.
421. *McCarthy E., Calvin M.* Nature, 1967, 216, 642.
422. *McCord T. B., Adams J.* Science, 1963, 163, 1058.
423. *Michaux C. M.* Handbook of the Physical Properties of the Planet—Jupiter. NASA Sp-3031. Washington, 1967.
424. *Miller S. L.* Science, 1953, 117, 528.
425. *Miller S. L. J.* Amer. Chem. Soc., 1955, 77, 2351.
426. *Miller S. L.* Ann. N. Y., Acad. Sci., 1957, 69, 260.
427. *Miller S. L.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1961, 47, 1798.
428. *Miller S., Parris M.* Nature, 1969, 204, 1248.
429. *Miller S., Parris M.* In: Prebiotic and Biochemical Evolution. Kimball A., Oró J. (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 83.
430. *Miller S., Urey H. C.* Science, 1959, 130, 245.
431. *Monod J.* Chance and Necessity. Paris, Seuil, 1970.
432. *Monod J.* La Recherche, 1970, 1, N 5, 415.
433. *Moore J. H.* Publs Astron. Soc. Pacif., 1939, 51, 274.
434. *Moore C. B., Lewis C., Gobson E., Nichiporuk W.* Science, 1970, 167, 495.
435. *Mora P.* In: The Origins of Prebiological Systems. S. Fox (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1965, 49.
436. *Morávek J.* Tetrahedron Lett., 1967, 18, 1707.
437. *Morowitz H. J.* In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buvet, C. Ponnaperuma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 37.
438. *Morowitz H., Sagan C.* Nature, 1967, 215, 1259.
439. *Mueller G.* In: Bernal J. The Origin of Life. London, Weidenfeld and Nicholson, 1967.
440. *Munday C., Pering K., Ponnaperuma C.* Nature, 1968, 223, 867.
441. *Munday C., Pering K., Ponnaperuma C.* Nature, 1969, 223, 867.
442. *Nagy B., Drew C., Hamilton P., Modzeleski V., Murphy M., Scott W., Urey H., Young M.* Science, 1970, 167, 770.
443. *Nagy B., Meinschein W., Hennessy D.* Science, 1965, 150, N 3694.
444. *Nagy B., Urey H.* Life Sci. Space Rev., 1969, 7, 31.
445. *Nandy K.* Nature, 1967, 215, 5099.
446. *Neugebauer G., Münch G., Chase S., Hatzenberger Jr., Miner E., Schofield D.* In: Mariner—Mars 1969. Preliminary Rept., NASA Sp-225. Washington, 1969, 105.
447. *Nicholson I. J.* Macromol. Sci. Chem., 1970, A4(7), 1619.
448. *Nicolaysen L. O.* In: Petrographic Studies. A. Engel (Ed.). Geol. Soc. America Buddington, 1962, 569.
449. *Nooner D., Oró J.* Geochim. et cosmochim. acta, 1967, 31, N 9, 1359.
450. *Olsen R., Oró J., Zlatkis A.* Geochim. et cosmochim. acta, 1967, 31, N 10, 1935.
451. *Oparin A. I.* [Опарин А. И.]. The Origin of Life. N. Y., Macmillan Co., 1938, 287.
452. *Oparin A. I.* [Опарин А. И.]. The Origin of Life on the Earth, 3rd ed. Edinburgh and London, Oliver and Boyd, 1957.
453. *Oparin A. I.* [Опарин А. И.]. Life: Its Nature, Origin and Development. N. Y., Acad. Press, 1961.
454. *Oparin A. I.* [Опарин А. И.]. The Chemical Origin of Life. Springfield, Ill. C. C. Thomas, 1964.
455. *Oparin A. I.* [Опарин А. И.]. In: Advances in Enzymology. F. Nord (Ed.). N. Y., Intersci. Publishers, 1965, 27, 347.
456. *Oparin A. I.* [Опарин А. И.]. Genesis and Evolutionary Development of Life. N. Y., Acad. Press, 1968.
457. *Oparin A. I.* [Опарин А. И.]. In: Chemical Evolution and the Origin of Life. I. R. Buvet, C. Ponnaperuma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 3.
458. *Oparin A. I.* [Опарин А. И.]. Biochemistry, 1971, 1, 75.
459. *Oparin A. I.* [Опарин А. И.]. In: Prebiotic and Biochemical Evolution. A. Kimball, J. Oro. (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971.
460. *Oparin A. I.* [Опарин А. И.]. Modern Aspects of the Problem of the Origin of Life. Scientia (Milano), mart—apr., 1971, 1.
461. *Oparin A. et al.* [Опарин А. И.]. (Eds.). Proc. First Internat. Sympos. Origin Life Earth. English—French—German ed., ed. for the Internat. Union Biochem. by F. Clark and R. Synge. London, Pergamon Press, 1959.
462. *Opik E. J. J.* Geophys. Res., 1961, 66, 2807.
463. *Opik E. J.* Icarus, 1962, 1, 200.
464. *Orgel L. E. J.* Mol. Biol., 1968, 38, 381.
465. *Orgel L. E., Sulston J.* In: Prebiotic and Biochemical Evolution. A. Kimball, J. Oro (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 89.
466. *Oró J.* Biochem. Biophys. Res. Comm., 1960, 2, 407.
467. *Oró J.* Nature, 1961, 190, 389—390.
468. *Oró J.* Ann. N. Y. Acad. Sci., 1963, 108, 464.
469. *Oró J.* Nature, 1963, 197, 862.
470. *Oró J.* Experimental Organic Cosmochemistry. Formation of Biochemical Compounds. Proc. Lunar and Planetary Exploration Colloq. Aerospace Lab., North-Am. Aviation. Inc. Downey, Cal., 1966.
471. *Oró J.* In: The Origins of Prebiological Systems. S. Fox (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1965, 137.
472. *Oró J.* In: The Origins of Prebiological Systems and of Their Molecular Matrices. S. Fox. (Ed.), 1965, 144.
473. *Oró J.* In: Exobiology Frontiers of Biology, 23. C. Ponnaperuma (Ed.). Amsterdam, Elsevier/North-Holland Publ. Co., 1972.
474. *Oró J., Cox A.* Proc. Federat. Amer. Soc. Exptl. Biol., 1962, 25, 80.
475. *Oró J., Gelpi E.* Internat. Sympos. Meteorite Res. Vienna, 1968.
476. *Oró J., Guidry C.* Arch. Biochem. and Biophys., 1961, 33, 166.
477. *Oró J., Kimball A.* Arch. Biochem. and Biophys., 1961, 94, 217.
478. *Oró J., Kimball A.* Arch. Biochem. and Biophys., 1962, 96, 293.
479. *Oró J., Kimball A., Fritz R., Master T.* Arch. Biochem. and Biophys., 1959, 85, 115.
480. *Oró J., Nooner D.* Nature, 1967, 213, 1082.
481. *Oró J., Nooner D., Zlatkis Z.* Science, 1965, 148, 77.
482. *Oró J., Nooner D., Zlatkis A., Wikstrom S.* Life Sci. and Space Res., 1966, 4, 63.
483. *Oró J., Updegrave W., Gibert J., McReynolds J.* Science, 1970, 167, 765.
484. *Owen T., Moson H.* Science, 1969, 165, 893.

485. *Palm C., Calvin M. J.* Amer. Chem. Soc., 1962, 84, 2115.
486. *Palmer P., Zuckerman B., Buhl D., Snyder L.* Astrophys. J., 1969, 150, L. 147 — L. 150.
487. *Pantskhava E.* In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buve, C. Ponnampuruma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 475.
488. *Papahadjopoulos D., Miller N.* Biochim. et biophys. acta, 1967, 135, 624.
489. *Papahadjopoulos D., Watkins J.* Biochim. et biophys. acta, 1967, 135, 639.
490. *Paschke R., Chang R., Young D.* Science, 1957, 125, 881.
491. *Pasynsky A. G.* Proc. Internat. Sympos. Enzyme Chemistry. Tokyo and Kyoto, 1958, 350.
492. *Pattee H.* In: Advances in Enzymology. F. Nord (Ed.). N. Y., Intersci. Publishers, 1965, 27, 381.
493. *Pavlovskaya T. E., Pasynsky A.* [Павловская Т. Е., Пасынский А.] In: The Origin of Life on Earth. A. Oparin et al (Eds.). N. Y., Pergamon Press, 1959, 151.
494. *Pettengill G. H.* Radar Measurements of Venus, Space Research. III. N. Y., John Wiley and Sons, 1963, 872.
495. *Pflug H., Meinel W., Neumann K., Meinel M.* Naturwissenschaften, 1969, 56, 10.
496. *Plaskett J.* Publ. Dom. Astrophys. Observ. Ottawa, 1924, 11, N 16, 72.
497. *Plooster M. N., Reed T. J.* Chem. Phys., 1950, 31, 66—72.
498. *Ponnampuruma C.* In: The Origins of Prebiological Systems. S. Fox (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1965, 221.
499. *Ponnampuruma C.* Icarus, 1966, 5, 450.
500. *Exobiology. C. Ponnampuruma (Ed.).* Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1972, 485.
501. *Ponnampuruma C., Chang S.* In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buve, C. Ponnampuruma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 216.
502. *Ponnampuruma C., Gabel N.* Space Life Sciences, v. 1. D. Reidel Publ. Co. Holland, 1968, 64.
503. *Ponnampuruma C., Klein H. P.* Quart. Rev. Biol., 1970, 45, N 3, 235.
504. *Ponnampuruma C., Krik P.* Nature, 1964, 203, 400.
505. *Ponnampuruma C., Lemmon R., Mariner R., Calvin M.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1963, 49, 737.
506. *Ponnampuruma C., Mack R.* Science, 1965, 148, 1221.
507. *Ponnampuruma C., Mariner R., Sagan C.* Nature, 1963, 198, 1199.
508. *Ponnampuruma C., Pering K.* Nature, 1966, 209, 979.
509. *Ponnampuruma C., Pering K.* Geochim. et cosmochim. acta, 1967, 31, 1350.
510. *Ponnampuruma C., Peterson E.* Science, 1965, 147, 1572.
511. *Ponnampuruma C., Sagan C., Mariner R.* Nature, 1963, 199, 222.
512. *Ponnampuruma C., Sweeney M.* In: Theory and Experiment in Exobiology, v. 1. A. Schwartz (Ed.). Groningen Netherlands, Walters-Noordhoff Publ., 1971, 1.
513. *Ponnampuruma C., Woeller F.* Nature, 1964, 203, 272.
514. *Ponnampuruma C., Woeller F.* Currents Mod. Biol., 1967, 1, 156.
515. *Prashnowsky A., Schildowski M.* Nature, 1967, 216, 560.
516. *Prigogine I.* Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. Chicago, Thomas Publishers, 1955.
517. *Prigogine I.* In: The Origin of Life on the Earth. A. Oparin et al. (Eds.), Oxford, Pergamon Press, 1959, 419.
518. *Prigogine I., Babloyanz A.* In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buve, C. Ponnampuruma (Eds.). Amsterdam, North-Holland, Publ. Co., 1971, 29.
519. *Pullman B.* In: Molecular Evolution, v. 2. E. Schoffeniels (Ed.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, p. 1.
520. *Pullman B.* In: Exobiology. C. Ponnampuruma (Ed.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1972.
521. *Pullman B., Pullman A.* Nature, 1962, 196, 1137.
522. *Pullman B., Pullman A.* Quantum Biochemistry. N. Y., Intersci., 1963.
523. *Pullman B., Pullman A.* Molecular Orbitals in Chemistry. Physics and Biology. N. Y., Acad. Press, 1964, 547.
524. *Purcell E. M.* Radioastronomy and Communication through Space. Brookhaven Nat. Lab. Lectures, 1960, N 1.
525. *Rabinowiz J., Chang S., Ponnampuruma C.* In: Prebiotic and Biochemical Evolution. A. Kimball, J. Oró (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 70.
526. *Ramdohr P.* Abhandl. Dtsch. Akad. Wiss. Berlin. Kl. Chem., Geol. und Biol., 1958, 3, 35.
527. *Rankama K.* Geol. Soc. America Spec. Paper, 1955, 62, 651.
528. *Rasool I.* In: Exobiology Frontiers of Biology, C. Ponnampuruma (Ed.). Amsterdam, Elsevier/North-Holland Publ. Co., 1972, 23.
529. *Rassol S., Hogan J., Stewart R., Russell L. J.* Atmos. Sci., 1970, 27, 841.
530. *Reid C.* In: The Origin of Life on the Earth. A. Oparin (Ed.). N. Y., Pergamon Press, 1959, 619.
531. *Reuter J. H.* 3rd Internat. Meet. Organ. Geochem. London, 1966.
532. *Rich A.* In: Horizons in Biochemistry. M. Kasha, B. Pullman (Eds.), N. Y., Acad. Press, 1962, 83.
533. *Richter N. B.* Statistic and Physik der Kometen. Leipzig, J. A. Barth, 1954.
534. *Ritchie P.* Asymmetric Synthesis and Asymmetric Induction. St. Andrews. Univ. Publ. Oxford, 1933, N 36.
535. *Robinson R.* Advances Organ. Geochem. Mon. N 15, Earth Sci. Ser., 1964, 7.
536. *Robinson R.* Nature, 1966, 212, 1291.
537. *Robinson R.* Origins of Oil. Nature, 1967, 214, 263.
538. *Rohlfing D. L., Fox S.* Advances Catal. Relat. Subj., 1969, 20, 373.
539. *Rose W., Bologna J., Sloanaker R.* Phys. Rev. Lett., 1963, 10, 123—125.
540. *Rubey W. W.* Bull. Geol. Soc. America, 1951, 62, 1111.
541. *Rubey W. W.* Geol. Soc. America Spec. Papers, 1955, N 62, 531.
542. *The Origin and Evolution of Atmospheres and Oceans. Rubey W. W., P. Brancazio, A. Cameron (Eds.).* N. Y. John Wiley and Sons, 1964, 1.
543. *Russell H. N.* The Solar System and Its Origin. N. Y. Macmillan Co., 1935.
544. *Rutten M. G.* The Geological Aspects of Origin of Life. Amsterdam, Elsevier Publ. Co., 1962.
545. *Rutten M. G.* The Origin of Life. Amsterdam, North — Holland Publ. Co., 1971, 440.

546. Sagan C. Exobiology. In: Life Sci. and Space Res. M. Florin, A. Dollfus (Eds.), 2, Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1964, 35.
547. Sagan C. In: Biology and the Exploration of Mars. C. S. Pittendrigh, W. Vishniac, J. Pearman (Eds.). Publ. 1296. Nat. Acad. Sci. USA (NRC). Washington, 1966, 73—113.
548. Sagan C. Nature, 1967, 216, 1198.
549. Sagan C., Pollack J. Nature, 1969, 223, 791.
550. Salop L. I. Pre-Cambrian of USSR. Proc. Internat. Geol. Congr. 23rd Prague, 1968, 4, 61.
551. Sanchez R. A., Ferris J., Orgel L. Science, 1966, 154, 784.
552. Sanchez R., Ferris J., Orgel L. Science, 1966, 153, 72.
553. Sanchez R., Ferris J., Orgel L. J. Mol. Biol., 1967, 30, 223.
554. Sanchez R., Ferris J., Orgel L. J. Mol. Biol., 1968, 38, 121.
555. Sanford R. Publ. Astron. Soc. Pacif., 1929, 41, 271.
556. Saslaw W., Gaustad I. Nature, 1969, 221, 160.
557. Saslaw W., Willey R. Icarus, 1967, 7, 85.
558. Schidlowski M. Beih. Geol. Jahrb., 1970, 85, 80.
559. Schimpl A., Lemmon R., Calvin M. Science, 1964, 147, 149.
560. Molecular Evolution, v. 2. Biochemical Evolution and the Origin of Life. Schoffaniels E. (Ed.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 398.
561. Schopf J. Antiquity and Evolution of Precambrian Life. McGraw-Hill Yearbook Sci. and Technol., 1967, 47.
562. Schopf J. W. Science, 1970, 167, 779.
563. Schopf W. In: Exobiology Frontiers of Biology. C. Ponnamperna (Ed.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1972, 23.
564. Schopf J., Barghoorn E., Maser M., Gordon R. Science, 1965, 149 (3690), 1365.
565. Schroedinger E. What is Life? Cambridge Univ. Press, 1945.
566. Schramm G. In: The Origins of Prebiological Systems. S. Fox (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1965, 302.
567. Schramm G., Grötsch H., Pollmann W. Angew. Chemie, 1962, 74, 53.
568. Schwarzschild M. Structure and Evolution of Stars. Princeton Univ. Press, 1958.
569. Theory and Experiment in Exobiology, v. 1. A. W. Schwartz (Ed.). Groningen, Netherlands, Wolters-Noordhoff Publ., 1971, 160.
570. Schwartz A. In: Chemical Evolution and the Origin of Life. R. Buvet, C. Ponnamperna (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 207.
571. Schwartz A., Deuss H. In: Theory and Experiment in Exobiology, v. 1. A. Schwartz (Ed.). Groningen, Netherlands, Wolters-Noordhoff Publ., 1971, 73.
572. Schwartz A. W., Fox S. Biochim. et biophys. acta, 1967, 134, 9.
573. Science, 1970, 167, N 3918.
574. Sergienko I. Z., Bobyleva M. [Сергиенко И. З., Бобылева М.]. International Geochemical Congress. Moscow, July 1971, Abstr. II, 922.
575. Shah D. In: Exobiology Frontiers of Biology, 23. C. Ponnamperna (Ed.). Amsterdam, Elsevier/North-Holland Publ. Co., 1972.
576. Shapley H. Of Stars and Men. Boston, Beacon Press, 1958.
577. Shklovskii J., Sagan C. Intelligent Life in the Universe. San Francisco, Holden-Day, 1966.
578. Sidgwick N. V. The Chemical Elements and Their Compounds, v. 1. Oxford, Univ. Press Inc., 1950, 490.
579. Sillen L. Svensk. kem. tidskr., 1965, 75, 161.
580. Sillen L. G. Science, 1967, 158, 1189.
581. Smart W. M. Origin of the Earth. Baltimore, Maryland Penguin Books, Inc., 1959.
582. Smith J., Kaplan I. Science, 1967, 167, 1367.
583. Smith A. E., Raab K., Ekpaka-Mensab J. System. Experientia, 1971, 27, 648.
584. Smoluchowski R. Science, 1968, 159, 1348.
585. Snyder L. E., Buhl D. Astrophys. J., 1969, 155, L. 65.
586. Snyder L., Buhl D. Radio Emission from Hydrogen Cyanide. Internat. Astron. Union. Circ., 1970, 2251.
587. Snyder L., Buhl D., Zuckerman B., Palmer P. Phys. Rev. Lett., 1969, 22, 679.
588. Steinman G., Cole M. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1967, 58, 735.
589. Steinman G., Kenyon D., Calvin M. Nature, 1965, 206, 707.
590. Steinman G., Kenyon D., Calvin M. Biochim. et biophys. acta, 1966, 124, 339.
591. Steinman G., Lemmon R., Calvin M. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1964, 52, 27.
592. Steinman G., Lemmon R., Calvin M. Science, 1965, 147, 1574.
593. Stoops C. E., Furrow C. Science, 1961, 134, 830.
594. Strom R., Fielder G. Comm. Lunar Planet. Lab., 1970, 8, N 150.
595. Strong H., Sinton W. Astrophys. J., 1960, 131, 470.
596. Struve O. Stellar Evolution. Princeton Univ. Press, 1950.
597. Struve O. Sky and Telescope, 1954, 13, 336.
598. Struve O. Communications présentées au neuvième Colloque International d'Astrophysique tenu à Liège les 6, 7 et 8 juillet 1959 sous la Présidence du professeur S. Rosseland. Mém. in 8 vo. Soc. Roy. Sci. Liège, 5th ser, 1959, 5, Cointe Sclessin, Inst. astrophys.
599. Struve O. Sky and Telescope, 1960, 19, 154.
600. Struve O., Zeberg V. Astronomy of the 20th Century. N. Y., Macmillan Co., 1962.
601. Studier M., Hayatsu R., Anders E. Geochim. et cosmochim. acta, June 1971.
602. Studier M., Hayatsu R., Fuse K. Anal. Biochem., 1968, 26, 320.
603. Studier M. N., Hayatsu R., Anders E. Geochim. et cosmochim. acta, 1968, 32, 151.
604. Suess H. J. Geol., 1949, 57, 600.
605. Suess H. In: Summer Course on Nuclear Geology. Varenna, 1960, 28.
606. Suess H. E. J. Geophys. Res., 1962, 67, 2029.
607. Suess H. E., Urey H. C. Rev. Mod. Phys., 1956, 28, 53—70.
608. Sulston J., Lohrmann R., Orgel L., Todd H. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1968, 59, 726.
609. Sulston J. et al. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1968, 60, 404.
610. Sulston J. et al. J. Mol. Biol., 1969, 40, 227.
611. Swallow A. J. Radiation Chemistry of Organic Compounds. London, Pergamon Press, 1960, 244.
612. Swings P., Haser L. Atlas of Representative Cometary Spectra. Univ. Liège Astrophys. Inst. Louvain. Im Centerick, 1956.
613. Swings P. et al. La physique des comètes. Colloq. Internat. Astrophys., Sept. 1953. Liège. Mém. Soc. roy. sci. Liège, 4-e ser., 1953, 13, 43.
614. Sulvester-Bradley P., King R. Nature, 1963, 198, 728.
615. Szutka A. Nature, 1966, 212, 401.

616. *Terenin A. N.* In: *Origin of Life on the Earth*. A. Oparin (Ed.), Pergamon Press, 1959, 136.
617. *Tsuruta R., Inoue S., Matsuura K.* Biopolymers, 1967, 5, 313.
618. *Tyler S. A., Barghoorn E. S.* Science, 1954, 119, 606.
619. *Tull R. G.* Icarus, 1970, 13, 43.
620. *Turner B. E.* Radio Emission from Interstellar Cyanoacetylene. Internat. Astron. Union Circ., 2268, 1970.
621. *Turner B. et al.* Chem. and Engng. News, 1970, 17, 31.
622. *Urey H. C.* *Origin of Earth*. Planet Earth. Simon and Schuster, N. Y., 1950.
623. *Urey H. C.* *The Planets*. New Haven, Conn., Yale Univ. Press, 1952.
624. *Urey H. C.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1952, 38, 351.
625. *Urey H. C.* Astrophys. J., Suppl., 1954, 1, 147.
626. *Urey H. C.* Handbuch der Physik, 52. S. Flüge (Ed.). Berlin, Springer-Verlag, 1959, S. 363.
627. *Urey H. C.* In: *The Origin of Life on the Earth*. A. I. Oparin et al (Eds.). N. Y., Pergamon Press, 1959, 16.
628. *Urey H. C.* Planets. In: *Science in Space*. L. Berkner, H. Odishaw (Eds.). N. Y., MacGraw-Hill Book Co., 1961, 199.
629. *Urey H. C.* Geochim. et cosmochim. acta, 1962, 26, 1.
630. *Urey H. C.* *The Origin and Evolution of the Solar System*. Space Science. N. Y., John Wiley and Sons, 1963, 123.
631. *Urey H. C.* Science, 1966, 151, 157.
632. *Vardya M. S.* Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 1966, 134, 347.
633. *Vdovykin G.* [Вдовыкин Г.]. Carbon Polytypism in Meteorites. Advances in Organic Geochemistry. Amsterdam, 1969.
634. *Vdovykin G.* [Вдовыкин Г.]. Nature, 1970.
635. *Wachneldt T., Fox S.* Biochim. et biophys. acta, 1967, 134, 1.
636. *Wald G.* Ann. N. Y. Acad. Sci., 1957, 69, 352.
637. *Wald G.* In: *Horizons in Biochemistry*. M. Kasha, B. Pullman. (Eds.). N. Y., Acad. Press, 1962, 127.
638. *Wald G.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1964, 52, 595.
639. *Walker G. A., Hutchings J., Younger P.* Astron. J., 1969, 74, 1061.
640. *Waterman E.* Lick Observ. Bull., 1913, 8, 1.
641. *Watson J. D., Crick F.* Nature, 1953, 171, 964.
642. *Watts D. C.* In: *Prebiotic and Biochemical Evolution*. A. Kimball, J. Oro (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 189.
643. *Weissacker C. T. von.* *The History of Nature*. Univ. Chicago Press, 1949.
644. *Whipple F. L.* Astrophys. J., 1950, 111, 375.
645. *Whipple F.* Geochim. et cosmochim. acta, 1955, 10, 230.
646. *Whipple F. L.* In: *The Moon, Meteorites and Comets. The Solar System*, v. IV. B. M. Middlehurst, G. P. Kuiper (Eds.). Univ. Chicago Press, 1963, 639.
647. *Whipple F.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1964, 52, 568.
648. *Wildt R.* Naturwissenschaften, 1932, 20, 851.
649. *Wildt R.* Absorptionsspektren und Atmosphären der grossen Planeten. Veröff. Univ. Sterawarte Göttingen, 1932, N 22.
650. *Wilson R. W., Jefferts K. B., Penzias A. A.* Astrophys. J., 1970, 161, L. 43.
651. *Woeller F., Ponnampuruma C.* Icarus, 1969, 10, 386—392.
652. *Woese C.* In: *Exobiology Frontiers of Biology*, 23. C. Ponnampuruma (Ed.). Amsterdam, Elsevier/North-Holland Publ. Co., 1971.
653. *Wood J. A., Dickey J., Marin U., Powell B.* Science, 1970, 167, 602.
654. *Woolfson M. M.* Nature, 1960, 187, 47.
655. *Wurm K.* In: *The Moon, Meteorites and Comets*. E. Middlehurst, G. Kuiper (Eds.). Univ. Chicago Press, 1963, 57.
656. *Yang C., Oro J.* In: *Chemical Evolution and the Origin of Life*. R. Buvet, C. Ponnampuruma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 155.
657. *Origin of the Solar System*. R. Yastrow, Cameron A. G. W. (Eds.). N. Y., Acad. Press, 1963.
658. *Ybanez J., Kimball A., Oro J.* In: *Chemical Evolution and the Origin of Life*. R. Buvet, C. Ponnampuruma (Eds.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971, 171.
659. *Jefferts K. B., Penzias A., Wilson R.* Chem. and Engng News, 1970, April 20, 14.
660. *Yoshino D., Hayatsu R., Anders E.* Geochim. et cosmochim. acta, febr. 1971.
661. *Young R.* In: *The Origins of Prebiological System*. S. Fox (Ed.). N. Y., Acad. Press, 1965, 351.
662. *Young R., Ponnampuruma C., McCaw B.* Life Sciences and Space Research. III. COSPAR. Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1969.
663. *Young R. S., Ponnampuruma C., McCaw B.* In: *Life Sciences and Space Research COSPAR*. M. Florkin (Ed.). Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1965, 127.
664. *Zeller E., Dreschhoff G.* In: D. Reidel Publ. Co., P. M. Millman (Ed.), Dordrecht, Holland, 1969, p. 524.
665. *Zuckerman B., Buhl D., Palmer P., Snyder L.* Astrophys. J., 1970, 160, 485.

ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕЗЕМНЫХ ФОРМ ЖИЗНИ

А. Б. РУБИН

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва, СССР

Определение жизни на других планетах помимо Земли является важнейшей и интереснейшей проблемой для ученых, занимающихся вопросами возникновения и эволюции жизни. Наличие или отсутствие жизни на планете может оказывать существенное влияние на состав ее атмосферы и на другие физические условия.

Исследование превращений, происходящих в поверхностных слоях планет, с учетом возможных результатов деятельности человека, позволит уточнить наши представления о роли биологических процессов в прошлом и настоящем Земли. С этой точки зрения результаты экзобиологических исследований могут быть полезными и в решении современных биологических проблем.

Занос чужеродных форм жизни может также привести на Земле к самым неожиданным последствиям, которые весьма трудно предугадать.

Обнаружение жизни вне Земли, несомненно, имеет и большое значение для разработки фундаментальных проблем, связанных с выяснением происхождения и сущности жизни. Непосредственной целью предстоящих в ближайшем будущем экзобиологических экспериментов с помощью автоматических биологических лабораторий (АБЛ) является получение ответа на вопрос о наличии или отсутствии на планете признаков жизни. Обнаружение внеземных форм жизни существенно углубило бы наше понимание сущности жизненных процессов и явления жизни в целом. Отсутствие жизни на других планетах солнечной системы имело бы также большое научное значение, подчеркивало специфическую роль земных условий в процессах становления и эволюции живых форм. Неясно, до какой степени внеземные формы могут быть сходны с нашими организмами по биохимическим основам их жизненных процессов.

При рассмотрении проблемы обнаружения внеземной жизни необходимо принимать во внимание разные этапы эволюции органического вещества и организмов, с которыми в принципе можно встретиться на других планетах. Например, в отношении Марса могут представиться различные возможности от обнаружения сложных органических соединений или продуктов абиогенного синтеза и до существования развитых форм жизни [95].

На Марсе к настоящему времени в основном закончилась только химическая эволюция, которая привела к абиогенному образованию (как это было в свое время и на Земле) аминокислот, сахаров, жирных кислот, углеводов, возможно, белков, но жизнь как таковая на планете отсутствует. Эти вещества в той или иной степени отличаются от аналогичных соединений, встречающихся на Земле.

Возможно, что на Марсе могут быть обнаружены: первичные протобиологические открытые системы, отделенные мембранами от окружающей среды; относительно простые примитивные формы жизни, подобные нашим микроорганизмам; более сложные формы, аналогичные нашим простым растениям, насекомым; следы существовавшей ранее жизни; остатки высокоразвитой жизни (цивилизации) и, наконец, можно констатировать полное отсутствие жизни на Марсе.

Экспериментальное изучение перечисленных возможных вариантов обстановки на планете и составляет основную задачу биологического изучения Марса.

В настоящей главе рассматриваются теоретические предпосылки, критерии существования жизни, предлагаемые методы обнаружения живых систем на других планетах. Эти данные основаны на справочном материале, подготовленном Н. Горовитцом (США) и С. И. Аксеновым (СССР), которым автор выражает свою искреннюю признательность.

КРИТЕРИИ СУЩЕСТВОВАНИЯ И ПОИСКА ЖИВЫХ СИСТЕМ

Наши представления о сущности жизни основаны на данных по исследованию жизненных явлений на Земле. В то же время решение проблемы поиска жизни на других планетах предполагает достоверную идентификацию жизненных явлений в условиях, существенно отличных от земных. Следовательно, теоретические методы и соответствующие приборы для обнаружения жизни должны основываться на системе научных критериев и признаков, присущих явлению жизни в целом.

Можно считать, что целый ряд фундаментальных свойств живых систем земного происхождения действительно имеет общий характер, и поэтому эти свойства несомненно должны характеризовать и внеземные организмы. Сюда можно отнести такие хорошо известные биологам и наиболее характерные признаки живого, как способность организмов реагировать на изменение внешних условий, метаболизм, рост, развитие, размножение организмов, наследственность и изменчивость, наконец, процесс эволюции [46]. Не будет сомнений в принадлежности к живым системам неизвестного объекта при обнаружении у него перечисленных выше свойств. Но главная трудность на этом пути заключается в том, что многие признаки живого могут быть так или иначе смоделированы *in vitro*. Например, реакция на внешнее раздражение присуща и неживым системам, изменяющим свое физическое и химическое состояние под влиянием внешних воздействий. Способность к росту свойственна кристаллам, а обмен энергией и веществом с внешней средой характерен для открытых химических систем.

Поиски внеземной жизни должны поэтому основываться на применении совокупности разных критериев существования и методов обнаружения живых форм. Такой подход должен значительно повысить вероятность и достоверность обнаружения инопланетной жизни.

В связи с этим встает вопрос о тех главных общих критериях, которые отражали бы наиболее характерные свойства живого. Рассмотрим с этих позиций основные свойства живых систем.

О химической основе жизни. Исследования последних лет показали возможность синтеза разнообразных биологически важных веществ из исходных простых соединений типа аммиака, метана, паров воды, входивших в состав первичной атмосферы Земли.

В лабораторных условиях в качестве необходимой для осуществления такого синтеза энергии используются ионизирующая радиация, электрические разряды, ультрафиолетовый свет. Таким путем были получены аминокислоты, органические кислоты, сахара, нуклеотиды, нуклеозидфосфаты, липиды, вещества порфириновой природы и целый ряд других. По-видимому, можно считать установленным, что большинство характерных для жизни молекул произошло на Земле абиогенным путем и, что еще более важно, их синтез вполне может происходить и сейчас в условиях других планет без участия живых систем.

Следовательно, само по себе обнаружение сложных органических веществ на других планетах не может служить достаточным признаком наличия жизни.

Примером в этом отношении являются углистые хондриты метеоритного происхождения, в которых содержится до 5—7% органического вещества [2]. Среди них имеются разнообразные соединения, присущие и нашим земным условиям: многоядерные углеводороды, ароматические и жирные кислоты, производные пурина — аденин и гуанин, аминокислоты и ряд других.

В условиях, отличающихся от земных, химическая эволюция углеродистых соединений могла также достигнуть стадии образования сложных органических веществ, которые на Земле составили химическую основу живых систем. Наиболее характерная черта химического состава живых систем земного происхождения заключается в том, что все они включают углерод. Этот элемент образует молекулярные цепочки, на основе которых построены все главные биоорганические соединения и прежде всего белки и нуклеиновые кислоты, а биологическим растворителем служит вода. Таким образом, единственная известная нам основа жизни — углеродорганическая белково-нуклеиново-водная. В литературе обсуждается вопрос о принципиальной возможности построения живых систем на другой органической основе, когда, например, вместо углерода в скелет органических молекул включается кремний, а роль воды как биологического растворителя выполняет аммиак [45]. Но такого рода теоретическую возможность практически было бы очень трудно учесть при выборе методов обнаружения и конструировании соответствующей аппаратуры, поскольку наши научные представления о жизни основаны только на изучении свойств земных организмов.

Вместе с тем внимательный анализ данных по химии углеродсодержащих сложных биополимеров раскрывает уникальные свойства углерода как основного элемента живых систем. Условия для синтеза углеродорганических соединений существовали уже на стадии протопланетного облака, что явилось причиной широкого распространения во Вселенной органических соединений именно углеродного типа [22, 34]. В органических соединениях атомы углерода образуют значительно более сильные химические связи друг с другом и соседними атомами, чем кремний. Кремний не может образовывать кратные связи, что приводит к возникновению гигантских инертных полимеров с ковалентными связями (SiO_2)_n. Наконец, нестойкость цепей кремния и его соединений в присутствии воды или кислорода также делает этот элемент малопригодным для обеспечения жизненных процессов [91].

Углеродорганические макромолекулы, очевидно, обладают и большей теплоустойчивостью в отношении сохранения пространственной структуры (вторичной, третичной) по сравнению с кремнийорганическими аналогами [4].

Роль и значение воды в жизнедеятельности организмов также широко обсуждается в связи с возможной заменой воды аммиаком или другими жидкостями, кипящими при низких температурах (сероводород, фтористый водород). Действительно, вода обладает рядом свойств, обеспечивающих ее роль в качестве биологического растворителя. Сюда относятся амфотерный характер воды и ее способность к самодиссоциации на катион (H^+) и анион (OH^-), высокий дипольный момент и диэлектрическая постоянная, малая вязкость, наконец, высокие удельная теплоемкость и скрытая теплота превращения, предохраняющие организмы от быстрых изменений температуры. Кроме того, роль воды в биологических системах включает те факторы стабилизации макромолекул, которые обеспечиваются общими структурными особенностями воды.

В целом можно считать, что углеродорганическая-водная химическая основа жизни является общим признаком живых систем.

Мы уже говорили, что поразительное единство биохимической основы земных организмов обусловлено наличием ограниченного числа сложных соединений, которые были синтезированы абиогенным путем в условиях первичной восстановительной атмосферы Земли. Дальнейшее взаимодействие этих элементов привело к образованию биологических

полимеров — макромолекул, причем это могло произойти за счет использования тех же самых форм энергии, что и в первичных реакциях абиогенного синтеза [69].

Характерной физической чертой биологических макромолекул является наличие системы конъюгированных двойных связей, образующих π -электронами. Делокализация π -электронов во многом определяет функциональные свойства и стабилизацию структуры биополимеров и может рассматриваться в качестве одного из физических факторов, влияющих на характер молекулярных процессов метаболизма. Очевидно, макромолекулы, близкие к биополимерам земного типа, являются основой структурной организации живой материи и, следовательно, необходимым признаком ее существования в условиях других планет. Характерным признаком структурной организации живых систем является также одновременное включение в их состав, помимо основных химических элементов (C, H, O, N), целого ряда других и прежде всего серы и фосфора. Это свойство может также рассматриваться в качестве необходимого признака существования живой материи.

Рассмотренные особенности химической основы земной жизни обусловлены всем ходом предбиологической эволюции углеродорганических соединений и с этой точки зрения присущи явлению жизни в целом и включают углеродсодержащие органические соединения. Однако специфичность живой материи нельзя сводить лишь к особенностям физико-химического характера ее основных составных элементов — структурных единиц живого, имеющих абиогенное происхождение.

Общие динамические свойства живых систем. В качестве исходных представлений при интерпретации экзобиологических экспериментов необходимо принимать во внимание динамические свойства живых систем. Развитие и эволюция биологических систем шли в основном по пути совершенствования форм взаимодействия между элементами и способов регуляции состояния системы в целом. Жизнь неразрывно связана с существованием открытых систем, свойства которых во многом зависят от соотношения скоростей процессов обмена энергией и массой с окружающей средой [23, 24].

Результаты исследования динамических свойств открытых систем методами математического моделирования позволили объяснить целый ряд их характерных черт, в частности установление в системе при сохранении постоянных внешних условий стационарного

колебательного режима, который наблюдается на разных уровнях биологической организации [14]. Это свойство является важным признаком высокой степени организации системы, что в свою очередь можно рассматривать как необходимое условие жизни.

В открытой системе общее изменение энтропии складывается из двух частей, одна из которых отражает взаимодействие с окружающей средой, а другая — процессы внутри системы [70]. Если система далека от равновесия, то в ней возможно возникновение особых диссипативных пространственных структур, играющих большую роль в развитии биологических систем [70a].

Биологические системы обладают специальными внутренними управляющими процессами. Передача небольших масс вещества или количества энергии в самом процессе управления вызывает в регулируемой системе ответные реакции, в ходе которых перерабатываются значительно большие количества энергии и массы [19]. В этом и состоит энергетическая основа регуляции состояния живых систем по принципу «обратной связи». Ясно, что осуществление такого рода процессов «активной регуляции» возможно лишь при наличии определенных запасов свободной энергии, легко мобилизуемых в системе [8, 27].

В этом отношении уникальные генетические свойства живых систем воспроизводить себе подобных явились результатом эволюции открытых систем, в которых все процессы в конечном итоге направлены на обеспечение размножения. Другим важным динамическим свойством живых систем является существование нескольких категорий процессов, различающихся между собой по скоростям протекания.

Действительно, в клетках различаются основные типы процессов: ферментативные реакции с характерным временем порядка 10^{-3} и 10^{-4} сек., реакции синтеза макромолекул, физиологические реакции со временем (10^{-1} сек. — 10^2 сек.) и, наконец, процессы репродукции, где характерное время может достигать нескольких часов. Обеспечение устойчивости живой системы и достигается в результате динамической сбалансированности этих типов процессов. Перечисленные кратко особенности динамической организации живого явились результатом эволюции относительно простых открытых систем на пути превращения в самовоспроизводящиеся открытые живые системы.

Внутренняя тенденция к организации наблюдается на многих уровнях биологической

упорядоченности [29, 38]. Она, несомненно, играла выдающуюся роль и в эволюции первичных протобиологических систем, способствуя объединению отдельных реакций в единую саморегулирующуюся систему клеточного метаболизма.

Роль света в поддержании жизни. Важным аспектом проблемы внешней жизни является необходимость внешнего притока энергии для ее развития. Мы займемся рассмотрением некоторых свойств фотобиологических процессов, в частности фотосинтеза, и их значения для разработки и критериев обнаружения живых систем.

Солнечный свет, главным образом в ультрафиолетовой области спектра, играл существенную роль в процессах абиогенного образования важнейших соединений. Однако значение света не сводилось только к обеспечению процессов абиогенного синтеза необходимым притоком свободной энергии, но заключалось также и в фотохимическом ускорении дальнейших превращений. Жизнедеятельность первичных живых систем также могла во многом определяться фотохимическими реакциями входящих в их состав соединений. Многие организмы, не имеющие прямого отношения к современному фотосинтезу, изменяют тем не менее свою активность при освещении. Так, явление фотореактивации клеток организмов видимым светом после поражающего действия ультрафиолетовых лучей, очевидно, является в эволюционном отношении древним процессом, возникшим в то время, когда первичные живые системы выработали механизмы защиты от деструктивного действия падавшего на Землю ультрафиолетового света.

Известны также данные по активирующему действию синего света на ферменты флавиновой и цитохромной природы, что в растительных организмах приводит к усилению процесса дыхания [4].

В последнее время появились новые данные о влиянии видимого света на рост, развитие, морфогенез гетеротрофных организмов [28]. Действие света на нефотосинтезирующие организмы, несомненно, свидетельствует о наличии широкого спектра фоторегуляторных реакций, в которых в отличие от фотосинтеза не происходит существенного запаса энергии света. Первичные пигментированные фотосинтезирующие организмы типа современных фотосинтезирующих пурпурных бактерий могли использовать фотохимические реакции порфиринов для ускорения некоторых процессов метаболизма, а не для прямо-

го фотосинтеза органических веществ [15]. В дальнейшем эти свойства фотореакций порфиринов легли в основу фотосинтеза бактериального типа, а затем уже и фотосинтеза высших зеленых растений, идущего с фотоллизом воды и выделением свободного молекулярного кислорода. Его появление в атмосфере Земли знаменовало новую эру аэробного дыхания в развитии жизни.

Следует отметить, что свет мог и не являться единственным источником энергии на ранних этапах эволюции органических соединений. Эту роль могла выполнять и химическая энергия, освобождаемая, например, в реакциях конденсации в неорганический полифосфат [18] или в реакциях окисления, впоследствии составивших энергетическую основу хемосинтеза. Однако в целом жизни для своего возникновения и развития требует, очевидно, постоянного внешнего притока свободной энергии, роль которого на Земле и выполняет солнечный свет. Поэтому свет и играет важную роль на всех этапах эволюции жизни, начиная с абиогенного синтеза первичных соединений, в их дальнейших превращениях, в жизнедеятельности первичных живых систем и, наконец, в современном фотосинтезе, обеспечивающем образование органических веществ на Земле.

Очевидно, существование фотосинтеза в той или иной форме как процесса полезной утилизации энергии в биологических системах является важным критерием существования развитой жизни.

Первичные процессы фотосинтеза представляют собой открытую систему потока электронов по цепи промежуточных соединений, для которой внешним источником электронов служит вода, или донор водорода, а источником энергии — солнечный свет. Циркуляция электронного потока сопряжена с образованием АТФ [42]. В цепи фотосинтеза действует целый ряд специфических механизмов, таких, как окисление цитохрома бактериохлорофиллом, которое может протекать при температуре жидкого азота [7, 41а].

Можно заключить, что независимо от конкретной химической структуры фотосинтетического аппарата общим свойством фотобиологических процессов утилизации световой энергии является наличие такой последовательности реакций: поглощение света и возбуждение молекул пигментов → делокализация электрона (дырки) → перенос электрона (дырки) по открытой цепи окислительно-восстановительных соединений → образование конечных продуктов с запасанием в них энер-

гии света. Существование такой фотосинтетической цепи является общим для большинства фотобиологических процессов и может рассматриваться в качестве необходимого условия существования жизни.

Это справедливо, конечно, в отношении развитых форм жизни, у которых существует сложная цепь переноса электрона от субстрата к конечному акцептору. У гетеротрофных анаэробов, господствовавших на ранних стадиях эволюции на Земле, функционирует простая система переноса электрона, синтезирующая макроэргические соединения в реакциях субстратного фосфорилирования по типу: донор → переносчик → акцептор.

На основании сказанного можно выдвинуть некоторые общие принципы, которыми следует руководствоваться при определении критериев существования и поисках внеземной жизни [5, 11, 21, 49, 77, 79, 82].

1. Основным свойством живой материи является ее существование в виде открытых самовоспроизводящихся систем, которые обладают структурами для сбора, хранения, передачи и использования информации.

2. Углеродсодержащие органические соединения и вода как растворитель составляют химическую основу жизни.

3. Необходимым условием жизни является утилизация энергии света, ибо прочие источники энергии обладают на несколько порядков меньшей мощностью.

4. В живых системах протекают сопряженные химические процессы, в которых происходит передача энергии.

5. В биологических системах могут преобладать асимметрические молекулы, осуществляющие оптическое вращение.

6. Различные организмы, существующие на планете, должны обладать рядом сходных основных черт.

Некоторые вопросы биологии Марса. В предыдущей главе подробно обсуждались вопросы о пределах адаптации живых систем к внешним воздействиям, о физических условиях на других планетах, прежде всего на Марсе, в которых могла бы существовать жизнь. В литературе имеется много данных по теоретическому анализу возможных типов метаболизма гипотетических организмов на Марсе.

Необходимым условием существования активной жизни на планете является наличие внешней питательной среды, в которой должно происходить перемещение вещества, что обеспечивает организм достаточно широкий круг соединений, необходимый для их функ-

ционирования [1]. Это справедливо и в отношении форм жизни, перемещающихся в поисках веществ, необходимых для их жизнедеятельности. Общие энергетические потребности сообщества организмов должны обеспечиваться за счет внешних источников и прежде всего света. Использование света на Марсе для поддержания интенсивного абиогенного синтеза органических соединений всегда представлялось затрудненным, поскольку атмосфера на планете находится преимущественно в окисленном состоянии. Однако недавно была доказана возможность фотокаталитического синтеза на поверхностях органических соединений из CO_2 и H_2O в модельной атмосфере Марса [51a]. Существует и другая возможность абиогенного синтеза органических соединений в результате захвата молекулами CO_2 протонов, входящих в состав солнечной радиации:



Однако расчеты приводят к выводу, что за счет этого источника органических соединений при интенсивности потока протонов $3 \cdot 10^{19}$ частиц/м²·год можно обеспечить на 1 см² появление за весь год не более нескольких тысяч бактериальных клеток, что явно недостаточно для поддержания активной жизни [88]. Очевидно на Марсе использование энергии света организмами, если таковые существуют, может происходить интенсивно в ходе биологического процесса фотосинтеза. Что касается биохимических циклов превращения продуктов фотосинтеза, то их природа может быть весьма различной в зависимости от внешних условий.

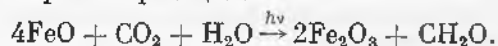
Низкое содержание свободного кислорода (0,1% от CO_2) [41] в атмосфере Марса на первый взгляд доказывает необходимость чисто анаэробного типа обмена веществ марсианских организмов, но в отсутствие свободного кислорода в атмосфере другие кислородсодержащие соединения, и в том числе сам кислород, могли бы запасаться внутри организмов, аналогично некоторым нашим растениям, имеющим специальные органы для запасаания газообразного кислорода. Можно представить себе также использование в процессах окисления соединений с повышенным содержанием кислорода. Вовлечение на Земле кислорода нитратов с восстановлением их до нитритов в процессах дыхания корней высших растений служит примером в этом отношении [1]. Вместо свободного кислорода на Марсе могут поэтому использоваться та-

кие соединения, как сульфаты, нитраты или карбонаты [90].

Таким образом, малое содержание свободного кислорода не исключает возможности процессов окисления и освобождения энергии органических соединений, образованных при фотосинтезе в условиях Марса. Согласно другой гипотезе [89], роль кислорода в аэробном дыхании для марсианских микроорганизмов может играть железо, находящееся в окисленном состоянии в лимоните ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Весь процесс можно представить в следующем виде:



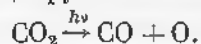
где роль непосредственного акцептора электронов играет Fe^{+3} . Эта гипотеза была проверена экспериментально в процессе культивирования бактерий донного ила на питательных средах в бескислородной среде, куда добавлялись окислы железа (лимонит). Подобный процесс может поддерживать жизнедеятельность микроорганизмов на Марсе с одновременным использованием FeO в качестве донора электрона в реакциях фотосинтеза. Таким образом, под влиянием света происходит обратная реакция:



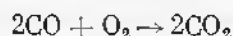
Заметим попутно, что в условиях малого содержания влаги лимонит для марсианских организмов может быть в принципе и источником воды, содержащейся в этом кристаллогидрате.

То, что марсианская атмосфера содержит значительные количества CO_2 и CO , может быть основой для протекания относительно простых биологических циклов (помимо фотосинтеза), в которых также происходит утилизация углерода, содержащегося в этих соединениях, и образование органических веществ [94]. Известно, что на Земле существуют микроорганизмы, которые могут расти на средах, содержащих CO в качестве единственного источника углерода [85].

Предполагается, что в марсианской атмосфере под действием солнечного света молекула CO_2 диссоциирует:

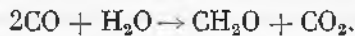


Экзотермическая реакция окисления CO до CO_2 , которая происходит внутри организма,



в свою очередь обеспечивает энергией процессы метаболизма, в которых фиксация углеро-

да ведет к образованию органических веществ:



Возможно сочетание этого цикла с фотосинтезом, в котором расщепление под действием света молекулы воды обеспечивает появление кислорода, окисляющего CO до CO₂, и водорода, восстанавливающего CO до CH₂O.

Предположение об утилизации как CO, так и CO₂ в реакциях метаболизма является преимуществом данной гипотезы. Однако здесь имеются и очевидные трудности, заключающиеся в необходимости тесного сопряжения фотохимической реакции разложения CO₂ в атмосфере Марса с процессом обратного окисления CO до CO₂ внутри организмов. Необходимо предположить также, что марсианские организмы обладают способностью связывать CO и O₂ в особые комплексы, взаимодействие между которыми уже ведет к окислению CO до CO₂.

По-видимому, возможность протекания углеродного цикла указанного выше типа не исключает необходимости фотосинтеза и участия света в поддержании жизнедеятельности марсианских организмов.

Исходя из известных физико-химических условий на Марсе: низкая температура, небольшое давление, низкая концентрация свободного кислорода, малое содержание влаги и водяных паров, можно предположить, что наиболее вероятными формами микроорганизмов должны быть анаэробные, ксерофильные и психрофильные организмы [11]. Жизнь может быть сосредоточена в определенных наиболее благоприятных для ее существования областях, а не равномерно распределена на поверхности планеты.

Заметим, что своеобразные и суровые условия Марса не обязательно должны привести к коренному изменению характера биологических процессов на Марсе по сравнению с нашей планетой. Вполне возможно, что эволюция могла пойти именно по пути выработки специальных приспособительных органов и реакций, обеспечивающих в суровых условиях протекание основных процессов метаболизма, аналогичных земному типу. В этой связи уже упоминались предположения о специальных органах, сохраняющих газообразный кислород в организмах марсианских растений; сюда же можно отнести их гипотетическую способность использовать при низких температурах в качестве биологического растворителя различные водные смеси. С другой стороны, сама способность микроорганизмов вырабатывать

специальные механизмы добывания воды в жестких условиях, возможно, является преувеличенной, поскольку этого не удалось обнаружить у микробных клеток в пустынях Антарктики [49a]. Все эти гипотезы показывают, что очень трудно предсказать однозначно теоретическим путем наличие определенных свойств организмов исходя из современных условий, существующих на той или иной планете.

Окончательное решение этой проблемы возможно только при учете влияния внешних условий, в которых развивались живые системы на всех предшествовавших этапах эволюции форм жизни [22]. В противном случае мы неминуемо будем оставаться в рамках гипотетических моделей типов метаболизма внеземных организмов, в том числе и марсианских. Эти модели могут быть интересны в научном отношении, однако их близость к реально существующим системам, а следовательно, и степень достоверности, будет оставаться далеко не всегда ясной.

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЖИЗНИ ВНЕ ЗЕМЛИ

Практическое решение проблемы существования и обнаружения внеземных форм жизни, возможно, будет получено в 70—80-х гг. в результате прямых космических экспериментов, прежде всего на планете Марс. В настоящее время ведется интенсивная разработка методов обнаружения жизни, стратегии и тактики их применения вне Земли, которые бы обеспечили наибольшую научную достоверность экспериментальных результатов. Напомним, что основная цель применения любого метода состоит в том, чтобы получить информацию, указывающую на наличие того или иного характерного свойства живого.

Вместе с тем, поскольку не существует всеобъемлющего и однозначного признака жизни, эту проблему можно решить только в результате комплексного применения целого ряда методов.

Несмотря на заведомо различный характер методов обнаружения, связанный с необходимостью изучения разных сторон жизнедеятельности гипотетических марсианских микроорганизмов, эти методы должны обладать и некоторыми общими чертами. В условиях космического эксперимента необходимо обеспечить автоматическое функционирование всей аппаратуры без непосредственного вмешательства человека. Получаемая информа-

ция должна определенным образом кодироваться и преобразовываться в радиосигналы, которые уже передаются на Землю. Наконец, сам по себе процесс получения информации не должен изменять нативное состояние образца или, во всяком случае, допустимы только такие воздействия, влияние которых на образец можно предвидеть заранее. Ясно, что не каждый известный в настоящее время метод лабораторного исследования в биологии удовлетворяет этим требованиям. Пока исключается, например, применение весьма тонких, но трудоемких методов биохимического анализа, который удобно проводить в специально оборудованных лабораториях, но не в условиях космического эксперимента. В будущем, когда станет возможной доставка на Землю стерильных образцов грунта с Марса, как это было сделано при исследовании вещества Луны, эти объекты будут подвергнуты тщательному изучению с помощью новейших средств современной биологии. Однако в настоящее время исследователи вынуждены ограничиться лишь теми методами обнаружения жизни, которые применимы в автоматическом режиме и по возможности дают однозначные результаты.

Все предложенные методы можно условно разделить на три большие группы.

1. Дистанционные методы наблюдения определяют общую обстановку на планете с точки зрения наличия признаков жизни.

2. Аналитические методы призваны произвести непосредственный физико-химический анализ свойств грунта и атмосферы на планете при посадке автоматической станции. Применение аналитических методов должно дать ответ на вопрос о принципиальной возможности существования жизни.

3. Функциональные методы предназначены для непосредственного обнаружения и изучения основных признаков живого в исследуемом образце. С их помощью предполагается ответить на вопрос о наличии роста и размножения, метаболизма, способности к усвоению питательных веществ и других характерных признаков живого.

Ясно, что оптимальная стратегия требует правильного сочетания во времени на разных этапах исследования планеты дистанционных, аналитических и функциональных методов обнаружения.

Перейдем теперь к рассмотрению сущности отдельных методов, их надежности, научной ценности, а также стратегии и тактики их применения в экзобиологических исследованиях.

Дистанционные методы

Дистанционные методы обнаружения жизни связаны с использованием техники и приборов, расположенных как на Земле, так и на космических кораблях и искусственных спутниках планеты.

Детали поверхности планет, меньше 100 км по размерам, не могут быть различены при помощи оптических методов на межпланетных расстояниях, и поэтому не приходится рассчитывать на прямое наблюдение отдельных организмов. Однако в результате жизнедеятельности организмов в атмосфере планеты или на ее поверхности могут обнаруживаться отклонения от стационарных состояний. Убедительным признаком жизни могло бы явиться обнаружение на поверхности упорядоченных структур, которые трудно объяснить только наличием неорганических стационарных процессов [79]. Подробная информация о строении «материков» и «морей» Марса, сезонных изменениях цвета на поверхности планеты в разные времена года представляет большой интерес для биологического изучения планеты. Помимо чисто научного интереса, такого рода исследования помогут определить наиболее удобное место высадки автоматической станции для обнаружения жизни на поверхности планеты.

Непосредственными источниками информации в дистанционных методах служат данные пассивного наблюдения свечения и отражения планет в разных частях электромагнитного спектра при облете планеты. Таким образом с помощью методов инфракрасной спектроскопии можно определить наличие в атмосфере планеты, а тем самым оценить и содержание на ее поверхности, CO_2 , H_2O , CO , O_2 , H , O_3 . Одним из приборов явится сканирующий инфракрасный датчик, предназначенный для определения концентрации водяных паров и температуры выше средней. Трехканальный сканирующий фотометр предназначен для исследования теплового излучения поверхности планеты в диапазоне 8—12 мк, поисков водяных паров в области 2,7 мк, а также и для регистрации интенсивности света в видимой области спектра от 0,55 до 1,1 мк.

Важным источником информации является эмиссионный спектр свечения планеты в ультрафиолетовой области за счет резонансного или флуоресцентного рассеяния света атомами в атмосфере. Спектры поглощения в ультрафиолетовой области являются совместным результатом отражения света от поверх-

ности и рассеяния его в атмосфере. Регистрация эмиссионных и абсорбционных спектров осуществляется путем наблюдения ярко освещенного либо темного лимба или освещенного диска планеты с помощью телескопа и сканирующего ультрафиолетового спектрометра, установленных на борту космического корабля.

Определение количества кислорода в атмосфере по поглощению ультрафиолетового света озоном в области 2000—3000 Å является весьма существенным. Обнаружение таким способом избыточных по сравнению с фотохимическим равновесием количеств молекулярного кислорода может указывать на процесс фотосинтеза как источник этого кислорода на Марсе [35]. Помимо этого, рекомендуются активные радиолокационные измерения поверхности планеты с космического корабля, находящегося вблизи нее. В этой связи перспективным будет комплексное использование орбитальной космической станции с оптическим телескопом [72].

Мощным инструментом в исследовании поверхности планеты по-прежнему остается фотографирование отдельных ее участков с высоким разрешением и оптимальной контрастностью. Научная ценность фотографического метода определяется в первую очередь правильной интерпретацией полученных изображений, что возможно, если специалист заранее обладает некоторыми сведениями или достоверными гипотезами о характере поверхности изучаемой планеты, которые позволят ему определить новые структурные особенности на фотографии [66].

Аналитические методы

Аналитические методы предназначены для детального исследования свойств грунта планеты и обнаружения в его образцах признаков жизни, отражающих физико-химические особенности организации живой материи. С помощью аналитических методов исследуются внешние морфологические признаки живого, если они имеются, и устанавливается наличие в образцах грунта сложных органических веществ как необходимого признака жизни.

Результаты аналитических исследований образцов грунта являются необходимой основой в планировании последующих биологических экспериментов по изучению функциональных свойств гипотетических организмов.

В настоящее время предполагается использовать ряд разнообразных приборов и методических приемов для исследования планеты.

Передача панорамы. В течение определенного периода времени передача панорамы проводится для выявления основных топографических особенностей поверхности планеты. Особенно ценными будут получение и передача стереоскопического изображения, на основе которого возможно составление карт и трехмерных топографических моделей больших площадей поверхности планет [36].

Можно назвать по крайней мере два ряда устройств для получения и передачи изображения поверхности Марса: телевизионная медленно сканирующая камера и оптико-механическое сканирующее устройство. Последнее весьма надежно. Это устройство основано на принципе непосредственного преобразования светового сигнала в электрический при последовательном сканировании поверхности планеты с помощью оптической системы. Фотограмметрические измерения размеров объектов, расстояний и высот на поверхности, очевидно, необходимы и для описания общей обстановки на планете, не говоря уже о получаемых преимуществах для предварительного выбора будущего района исследования передвижной автоматической станцией.

Особенно важной может быть передача изображения камерой, перемещающейся по поверхности планеты. Разработана специальная видиконная стереоскопическая камера со сменными объективами, способная передвигаться по поверхности [54]. Особенно ценной в этих устройствах является способность изучать окружающую обстановку в разных районах поверхности планеты, следить за движущимися объектами, т. е. получать информацию о возможных крупных формах жизни. Передача в течение достаточно длительного времени изображения участков поверхности грунта даже при сравнительно небольших увеличениях в принципе могла бы дать сведения об организмах типа насекомых, моллюсков, червей. Следует заметить, что, поскольку существование крупных форм жизни на Марсе в настоящее время вызывает сомнения, методы получения изображения не могут рассматриваться как источник непосредственной информации о существовании организмов и являются в этом отношении лишь вспомогательными.

Методы забора проб. Забор проб осуществляется на планете специальными устройствами, которые доставляют к аналитическим приборам для непосредственного изучения образ-

цы грунта, взятые с поверхности планеты или из под поверхностного слоя. Эти устройства не должны изменять характеристики образца. Получение достаточного количества грунта и его предварительная обработка перед измерением являются необходимыми этапами в исследовании свойств образца с помощью аналитических и функциональных методов, которые на Земле обычно осуществляются человеком в лабораторных условиях. На другой планете эти сравнительно простые операции необходимо выполнять автоматически с высокой надежностью, что представляет значительные трудности. Общее весовое количество грунта, которое необходимо взять для анализа, определяется чувствительностью аналитических приборов, концентрацией в грунте органических соединений или микробных клеток, подлежащих определению.

Эти факторы, очевидно, влияют и на решение вопроса о том, на какой глубине, начиная с наружного поверхностного слоя, и в каком механическом состоянии необходимо получить образец грунта. На Марсе необходимо брать не только мелкодисперсные «пылевые» образцы с поверхности, но и подповерхностные слои на глубинах до 10 см. Последние, по опыту земных исследований, могут не только содержать значительные количества микроорганизмов, но главное то, что микроорганизмы защищены от губительного действия ультрафиолетового облучения.

Наибольшим предпочтением в настоящее время пользуются следующие методы [61]: метод бурения почвенного слоя — дает возможность получать наибольшие количества грунта и весьма близок к обычным методам забора проб в условиях Земли; метод «липкой ленты» — заключается в выбросе на значительное расстояние от места расположения станции длинных лент, покрытых специальным составом, к которому прилипают пылевые частицы; изучение образцов производится непосредственно на поверхности липкой ленты после ее возвращения в корпус станции; метод пневматического аэрозольного забора — по существу, является модификацией вакуумного пылесоса и также позволяет получать поверхностные образцы почвы.

В биологических исследованиях в отличие от геологических предпочтение отдается образцам, содержащим относительно мелкие частицы небольшой плотности. Заборники проб для биологических целей можно разделить на две категории [50].

1. Заборники общей массы, которые доставляют образцы с частицами разных линейных

размеров, не превышающих некий верхний предел (≤ 300 мк). Примером может служить миниатюрный почвенный бур, который ввинчивается в породу и вынимается с грунтом без вращения.

2. Селективные заборники, обеспечивающие взятие образцов с частицами определенных размеров, пригодными для непосредственного аналитического исследования. Операция забора производится здесь методами пневматического всасывания и механического бурения с последующим захватыванием образцов грунта. Селекция частиц осуществляется за счет небольших отверстий определенного размера на выходе заборника и создания таких аэродинамических сил всасывания, которые допускают забор частиц вполне определенных размеров и плотности. Селективные заборники относительно просты в механическом отношении и доставляют материал, более пригодный для биологических и аналитических исследований, чем заборники общей массы. Дальнейшая передача образца из заборного устройства в блок аналитических приборов может происходить различными способами: с помощью пневматического транспорта (под действием разности давлений), механической винтовой передачи, механических подъемных устройств.

Перед непосредственными измерениями образцы подвергаются обработке, которая включает дополнительные процессы: размельчение, гомогенизацию, сортировку частиц. При исследованиях методами рентгеноструктурного анализа или газовой хроматографии взятые образцы транспортируются в соответствующие камеры.

Забор проб должен производиться на некотором расстоянии от места посадки автоматической станции. Это особенно важно в случае мягкой посадки при помощи тормозных двигателей, поскольку при этом происходит нежелательное увеличение температуры поверхности планеты и появление химических соединений, продуктов сгорания ракетного топлива. Аппараты жесткой посадки также вызывают локальные разрушения на поверхности планеты. Эти обстоятельства определяют преимущества подвижных заборников, способных перемещаться направленно или произвольно по поверхности, обеспечивая охват большой площади и статистическую достоверность взятия проб с выбранного участка.

В настоящее время разрабатываются различные типы заборников проб; некоторые из них перечислены ниже.

Заборник «липкая лента»; вентиляторный и аэрозольный заборники, сделанные по типу всасывающего вентилятора; заборник проб поверхностных образцов (типа «Сервейор») с «обратной» лопатой; почвенные буры — безгильзовый и трущееся коническое сито; вращающаяся металлическая щетка на телескопической стреле — «уличный подметальщик»; винтовой транспортирующий заборник; скребовый экскаватор — грейфер.

Сейчас еще не существует универсального заборника, пригодного для всех видов экзобиологических исследований. Поэтому оптимальный способ забора проб и тип заборника будут определяться в зависимости от целей и задач конкретного экзобиологического эксперимента, известных условий на планете, устройства спускаемой станции и способа ее посадки на планету, места высадки.

Микроскопия. Этот метод, как известно, является одним из наиболее универсальных и широко распространенных в биологических исследованиях. Его использование в экзобиологических экспериментах имеет целью выявление на специальных препаратах внешних морфологических признаков, характерных для живых форм, клеток микроскопических организмов.

Возможность обнаружения живых форм по внешним морфологическим признакам основана на фундаментальных концепциях о неразрывной связи функции и формы в биологических системах на всех уровнях их организации. Здесь достаточно напомнить известные факты о наличии, например, специальных структур для обеспечения потоков вещества через клеточные мембраны или наличие четкой архитектоники в расположении клеток в органах и тканях, определенного плана геометрического построения всего многоклеточного организма в целом. Поэтому имеются основания считать, что существование внеземных организмов должно быть также неразрывно связано с определенным их строением, которое обеспечивало бы течение процессов жизнедеятельности этих организмов на всех уровнях организации. С этой точки зрения, обнаружение в препаратах образцов определенной формы, размера, цвета, имеющих вид разветвленных, симметричных, регулярных или агрегированных структур, может свидетельствовать о присутствии живых организмов.

Еще более убедительным доводом было бы обнаружение внутренней структуры у отдельных микроскопических образований. Это является и необходимым признаком гипоте-

тических марсианских организмов, для которых выполнение физиологических функций в сложных условиях планеты должно быть неразрывно связано со специальными морфологическими структурами. Обнаружение под микроскопом подвижных форм и прекращения их подвижности под действием ядов несомненно было бы основанием для заключения о наличии живых форм в образце.

Было бы неверным, однако, преуменьшать трудности в интерпретации микроскопических картин, которые даже в условиях Земли делают в ряде случаев весьма проблематичным правильное и однозначное истолкование характера полученных изображений.

Известны также и споры по поводу природы обнаруженных в метеоритах (углистых хондритах) [84] правильных структур и микроорганизмов. Наиболее вероятным является все же их земное происхождение, обусловленное загрязнением вещества метеорита земными организмами. Эти обстоятельства лишней раз подчеркивают важность стерилизации космических аппаратов, предназначенных для поисков инопланетной жизни.

Не приходится, однако, доказывать, какое научное значение в экзобиологии будет иметь применение микроскопии совместно с другими аналитическими и функциональными методами обнаружения жизни. Именно на этом пути можно надеяться с помощью микроскопа получить ответы на фундаментальные вопросы о клеточных формах живого, строении клеточных мембран и органелл, процессах редупликации, специальных морфологических структурах, связанных с физиологическими функциями организма.

Применение микроскопии в экзобиологических исследованиях характеризуется рядом специфических особенностей, связанных с автоматическим режимом работы станции на поверхности планеты.

Передача изображений на Землю ограничена объемом информации, которую может пропустить канал связи между автоматической станцией и Землей. Простые расчеты показывают, что при обычной скорости сканирования изображения на установке микроскопа с телевизионной приставкой генерируется поток информации около 10^7 бит/сек, т. е. примерно столько же, сколько можно передать за целый день по космической радиосвязи между станцией на Марсе и приемным устройством на Земле [84]. Эти соображения показывают, насколько важно отработать автоматические способы предварительной селекции для передачи на Землю только тех изоб-

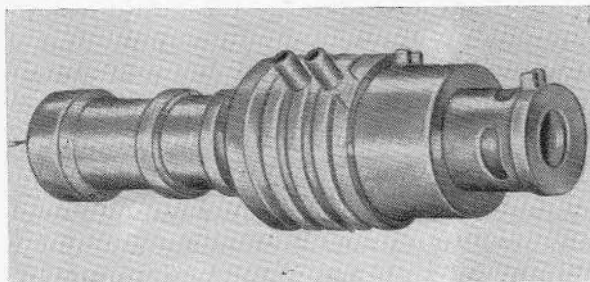


Рис. 1. Биологический микроскоп для исследований на Марсе [84]

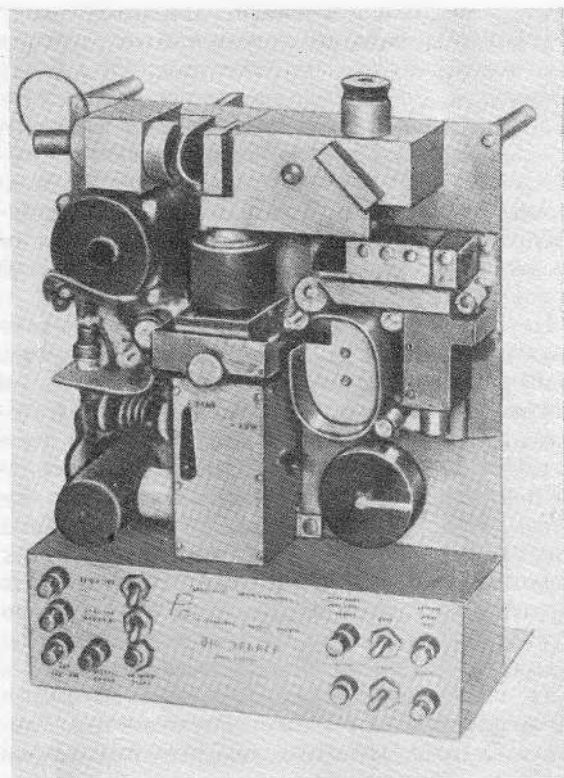


Рис. 2. Цитохимический микроскоп для экзобиологических исследований [84]

ражений, которые могут представить определенный интерес для биолога.

Предварительное обогащение образца путем механической селекции наиболее легких частиц, преимущественно связанных с биологической функцией, может повысить в некоторых случаях содержание микроорганизмов, а следовательно, и вероятность их обнаружения в микроскопируемом образце. Примером может служить упрощенный микроскоп весом 0,295 кг для биологических исследований

аэрозольных образцов атмосферы на Марсе (рис. 1).

Другим способом является окрашивание материала образца биологическими флуоресцирующими красителями (флуорогенами), просмотр под микроскопом всех изображений и передача на Землю только тех, на которых обнаруживаются флуоресцирующие частицы. В цитохимическом микроскопе (рис. 2) это достигается сканированием возбуждающим световым пучком ленты с нанесенным на нее материалом, который окрашен акридиновым оранжевым красителем. Окрашенный участок, а следовательно, и изображение для передачи на Землю, определяется при регистрации дифференциальным методом разности токов от двух фотоумножителей, на которые попадает свет, проходящий через окрашенные и неокрашенные части образца. Таким путем возможно также определение небольших концентраций белков и нуклеиновых кислот [68]. Более подробно метод окрашивания биологических препаратов будет рассмотрен в разделе «Оптические методы обнаружения жизни».

Исследователями обсуждается также возможность использования электронного микроскопа для изучения структурных элементов микробной клетки, не видимых в оптическом микроскопе [44]. Применение электронного микроскопа в сочетании с миниатюрным микротомом может чрезвычайно расширить возможности морфологических исследований, что, как мы знаем из современной биологии, особенно важно для изучения внутренней молекулярной структуры составных элементов живого. Важной особенностью электронной микроскопии является возможность сочетания ее с телевизионной техникой, поскольку они имеют общие элементы (источник электронов, электромагнитные фокусирующие линзы, видиконы). Электронное изображение может быть непосредственно преобразовано в электрические сигналы и в таком виде передано на Землю или, наоборот, зафиксировано на ультратонких пленках фотографической эмульсии и затем уже передано на Землю с помощью телевизионной техники. Основным техническим условием успешного применения этого метода в экзобиологии является разработка вариантов миниатюрных электронных микроскопов, работающих в условиях сверхнизких температур в жидком гелии (1—4° K), где таким образом используется явление сверхпроводимости. Применение алмазных буров для получения сверхтонких срезов дает возможность быстро использовать собранный материал непосредственно для изучения в

электронном микроскопе. В сочетании с другими методами и прежде всего с оптической микроскопией электронный микроскоп сможет занять важное место среди приборов для экзобиологических исследований.

Газовая хроматография — масс-спектрометрия. Наличие сложных органических веществ в образце грунта является необходимым, хотя и недостаточным признаком существования жизни. Известен ряд методов определения биологических соединений в растворах, основанных на процессах их взаимодействия с химическими реагентами (нингидрином). Некоторые из этих методов в настоящее время автоматизированы для массовых лабораторных анализов.

В стадии разработки находятся приборы на основе метода ионообменной хроматографии для экзобиологических исследований, позволяющие анализировать содержание в элюатах аминокислот, пуринов, пиримидинов, нуклеозидов, нуклеотидов и других соединений, поглощающих свет в ультрафиолетовой области спектра. Предварительный кислотный гидролиз образцов почвы для выделения аминокислот может в будущем значительно расширить возможности этого метода [37].

Однако трудности анализа спектров поглощения смеси веществ в ультрафиолетовой области, а также необходимость использовать химические реагенты, строгая специфичность которых для инопланетных органических соединений (возможных аналогов земных аминокислот, белков, оснований, нуклеиновых кислот) весьма проблематична, делает такого рода методы малоприменимыми, по крайней мере на первых стадиях исследования, когда требуется получение данных одновременно по широкому спектру органических соединений. Применение жидких растворов связано также с большими техническими трудностями, особенно в условиях низкого атмосферного давления на Марсе. Поэтому оно, как мы увидим ниже, является оправданным, если ставится цель обнаружения какого-либо определенного биологического соединения.

Эти соображения заставили искать для проведения органического анализа в инопланетных экзобиологических экспериментах других подходов, что вылилось в конечном итоге в разработку миниатюрных приборов, основанных на комбинированном применении современных методов газовой хроматографии и масс-спектрометрии.

Как известно, метод газовой хроматографии состоит в том, что вещество исследуемого образца переводится в газообразное состояние,

а затем компоненты этого вещества переносятся струей газа-носителя и адсорбируются на хроматографических колонках. Определение каждого соединения в исходной газовой смеси производится путем сравнения относительного времени задержки его на колонке с соответствующими данными для заранее известных соединений.

Таким образом, варьируя различные колонки, можно в течение нескольких минут определить компоненты газовой смеси CO_2 , N_2 , O_2 , H_2 , CO , CH_4 , NH_3 , H_2O , C_2H_4 . Наиболее простым и надежным методом первичной обработки материала образца является нагревание его до высоких температур (пиролиз). Правда, эта процедура вызывает ряд трудностей в определении исходных биологических соединений (по характеру обнаруживаемых пиролизатов). Преимуществом метода газовой хроматографии является его простота, неспецифичность в отношении химической структуры исходных соединений, сравнительно небольшой вес и размер аппаратуры. Комбинированное воздействие на материал образца различных растворителей и экстракций с последующим тепловым нагреванием может обеспечить определение в исследуемом материале не только простых исходных соединений, но и органических веществ различного класса.

Для определения аминокислот и углеводов применяются методы последовательного экстрагирования образцов грунта водным раствором этанола и горячей воды [6]. После тройной очистки аминокислоты и углеводы переводятся в их летучие производные силированием, а затем подаются в колонку газового хроматографа. Другим физическим методом определения органических соединений является масс-спектрометрия, применение которой, как известно, позволяет получать непосредственно масс-спектры органических соединений. Масс-спектрометрическое исследование также требует испарения исходного вещества образца и предварительного разделения вещества на отдельные составные части. Оба метода являются высокочувствительными и позволяют получать информацию в пределах 10^{-6} — 10^{-9} г исходного материала. Это позволяет объединить в единый прибор масс-спектрометр и газовый хроматограф. Сущность комбинированного метода состоит в том, что после прохождения через газовый хроматограф и перед впуском пробы в ионный источник масс-спектрометра основная масса газа-носителя удаляется с помощью специального устройства, которое одновременно увеличива-

ет концентрацию исследуемого вещества в 10^2 — 10^5 раз. Блок-схема прибора изображена на рис. 3.

Исследования показали, что при такой аппаратуре достаточно около 15 мг почвы для определения почти 70 различных органических соединений. На рис. 4 представлены результаты исследования с помощью газовой хроматографии образцов почвы, взятой в пустыне. При появлении каждого очередного пика на хроматограмме производился масс-спектрометрический анализ, результаты которого по определению органических веществ также показаны на рис. 4 [83].

Комбинированный метод имеет большие преимущества в отношении быстрого разделения компонентов сложной смеси, непрерывного масс-спектрометрического анализа с высоким разрешением $\Delta m=1$ при молекулярном весе около 500, определения широкого класса разных органических соединений в твердом, жидком или газообразном образце. Определение таких биологически важных соединений, как аминокислоты, сахара (гексозы, пентозы), жирные кислоты, порфирины, делает этот метод весьма перспективным для экзобиологии. Испытания в земных условиях при исследовании почвы пустынь выявили наличие белков, жиров, углеводов практически при отсутствии углеводородов. Оказалось также, что вещество в сланцах и некоторых метеоритах представляет собой смесь алифатических и ароматических углеводородов при отсутствии гетеросоединений [83].

Дальнейшее развитие этого метода для экзобиологических исследований сопряжено с преодолением ряда механических трудностей, таких, как ограниченное количество газа-но-

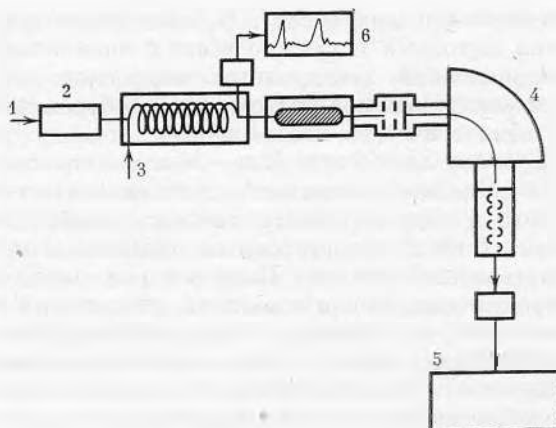


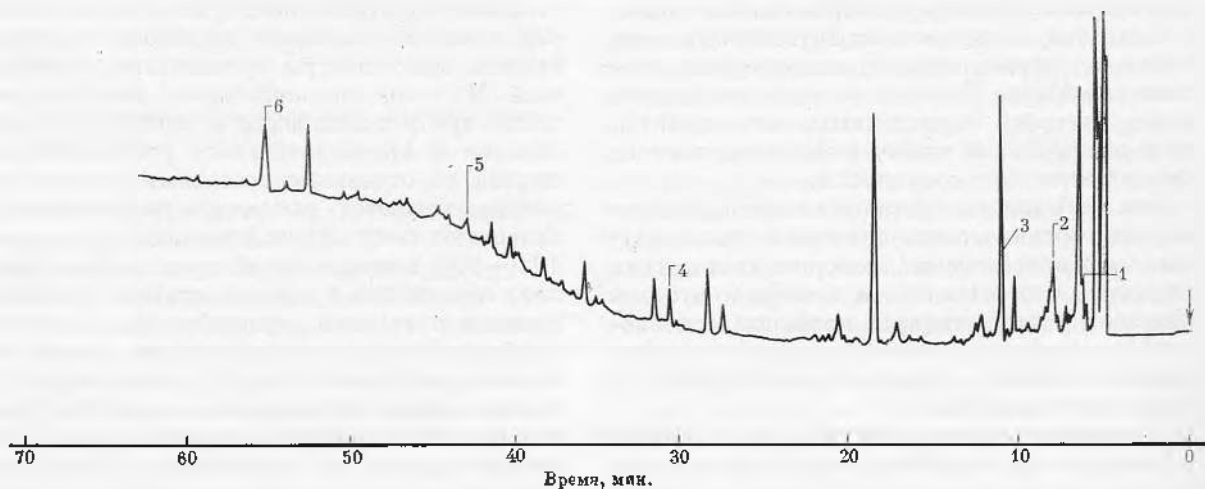
Рис. 3. Блок-схема прибора газовой хроматографии — масс-спектрометра [87]

- 1 — образец;
- 2 — печь;
- 3 — впуск газа;
- 4 — масс-спектрометр;
- 5 — блок записи масс-спектра;
- 6 — запись хроматограммы

Рис. 4. Газовая хроматограмма продуктов пиролиза при 500°C образца почвы (пустыня)

Цифры соответствуют некоторым соединениям, определенным на масс-спектрометре [83]:

- 1 — акролеин;
- 2 — этанцирил;
- 3 — бензол;
- 4 — фурфурол;
- 5 — фенилацетонитрил;
- 6 — индол



сителя на борту корабля для массового анализа веществ, обеспечение низкого давления в камере масс-спектрометра, соединенного с газовым хроматографом, и ряд других. В целом этот метод является, несомненно, наиболее оптимальным для определения с высокой чувствительностью большого числа разнообразных органических соединений на поверхности Марса в ближайших экзобиологических исследованиях.

Оптические методы обнаружения жизни. В современной биологии оптические методы являются мощным средством получения информации о состоянии живых систем, причем само по себе их применение в принципе не связано с нарушением целостности биологического объекта. Оптические методы основаны на изучении способности молекул биоорганических соединений поглощать или излучать свет определенного спектрального состава в различных условиях. В зависимости от целей и условий экзобиологического исследования, от способов обработки образца оптические методы могут давать информацию по поводу наличия сложных органических соединений или служить источником сведений о специфических биологических процессах в ходе изучения функциональных свойств микроорганизмов. В соответствии с этим мы рассмотрим основные оптические методы, которые в настоящее время предлагаются в экзобиологии, учитывая их удельный вес в общей системе экзобиологических экспериментов.

Общим для всех оптических методов является система регистрации световых потоков, основную роль в которой выполняет фотоприемное устройство (фотоумножитель). Разработанные в последнее время типы малогабаритных виброустойчивых фотоумножителей, обладающих высокой интегральной чувствительностью в широком спектральном диапазоне и небольшим темновым током, позволяют регистрировать малые световые потоки до нескольких сот квантов в секунду, падающие на поверхность фотокатода. Этому способствуют и современные радиоэлектронные схемы, построенные по принципу дифференциальных усилителей или накопителей в сочетании со счетно-решающими устройствами. Рассмотрим основные подходы к применению методов.

1. Мы уже отмечали, что определение сложных органических молекул в смеси непосредственно по спектрам их поглощения в ультрафиолетовой области затруднительно в силу перекрытия полос поглощения. Гораздо большие возможности в этом отношении

представляет регистрация спектров или интенсивности люминесценции молекул органических соединений. Поглощение кванта света системой оптических электронов переводит молекулу в синглетное электронное возбужденное состояние, обратное возвращение из которого в основное состояние происходит приблизительно через 10^{-8} сек. и сопровождается высвечиванием квантов флуоресценции. Если за время 10^{-8} сек. происходит внутримолекулярная конверсия в триплетное состояние, то возвращение молекулы с триплетного уровня может привести к фосфоресценции с длительностью от $\sim 10^{-4}$ сек. до нескольких секунд. Наличие характерных максимумов в спектрах люминесценции облегчает обнаружение флуоресцирующих молекул в сложных смесях органических соединений. Прежде всего это относится к таким молекулам, как пигмент хлорофилл и его производные, флавиновые ферменты и ряд других флуоресцирующих соединений, играющих важную роль в биологических процессах.

Кроме того, в смесях органических соединений, а особенно в биополимерах (белках, нуклеиновых кислотах) поглощение квантов света приводит к миграции энергии электронного возбуждения между соседними молекулами. Поэтому молекулы, поглотившие свет, и хромофорные группы, ответственные за люминесценцию, отличаются друг от друга. Таким путем возникает возможность обнаружения биоорганических комплексов по проявлению характерных полос флуоресценции в условиях, когда спектры их поглощения не могут быть разрешены из-за сильного экраняющего фона среды и посторонних примесей.

В биополимерах основными хромофорами, если это нуклеиновые кислоты, являются пуриновые (аденин и цитозин) и пиримидиновые (гуанин и тимин у ДНК, гуанин и урацил у РНК) азотистые основания нуклеотидов. Хромофоры белков — это остатки ароматических аминокислот: триптофана и, в меньшей степени, тирозина и фенилаланина [3, 16]. Возбуждение белков и нуклеиновых кислот в ближней ультрафиолетовой области спектра ($\lambda \sim 280$ нм) вызывает их флуоресценцию в области 300—400 нм, характер которой в сильной степени зависит от pH среды.

Производные нуклеиновых кислот, нуклеиновые основания или продукты их взаимодействия с посторонними веществами могут также обладать характерной флуоресценцией, в связи с чем становится возможным их определение.

На основе этих предпосылок разработаны методы определения рибонуклеотидов в щелочных гидролизатах РНК, содержащих аденозин- и гуанозинмононуклеотиды. По интенсивности флуоресценции гуанина и аденина в кислой среде (рН 2) и гуанина — в щелочной (рН 10,5) можно оценить и содержание РНК в клетках микроорганизмов, находящихся в образцах почв. Таким методом обнаруживается РНК в количестве не больше 10 нг, или около $(1-3) \cdot 10^5$ клеток микроорганизмов [73]. Флуоресценция триптофансодержащих белков служит источником информации о наличии таких белков в изучаемом образце. Исследования показали, что интенсивность флуоресценции белка в культуре клеток *E. coli* пропорциональна их концентрации в диапазоне $2 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^8$ клеток/мл. Подобные опыты с образцами почвы дали результаты при условии предварительного центрифугирования почвенной суспензии для осаждения тяжелых коллоидных частиц, мешающих регистрации флуоресценции белков в клетках почвенной микрофлоры [71, 72]. Аналогичные измерения интенсивности флуоресценции хлорофилла дают возможность определить количество клеток, содержащих этот пигмент [74].

Если производить измерения интенсивности флуоресценции по мере развития клеточной культуры, то увеличение флуоресценции будет служить показателем роста клеток в образце. Таким образом, регистрация флуоресценции может не только обеспечить обнаружение тех или иных биоорганических соединений, но и выполнять роль функционального метода изучения параметров, сопровождающих процессы жизнедеятельности (рост клеток). Предстоит, однако, еще многое сделать для повышения чувствительности описанных флуоресцентных методов в условиях, когда они предназначены для определения в образце отдельных клеток.

2. Выявление оптическими методами биологических макромолекул и в первую очередь нуклеиновых кислот возможно также с помощью флуорохрома — красителя акридинового оранжевого, молекулы которого связываются с молекулами нуклеиновых кислот. В результате этого комплекс с красителем флуоресцирует при фотовозбуждении в зеленой области, а РНК — в красной области спектра. Метод окрашивания флуорохромом позволяет выявить различия в оптических свойствах комплексов биоорганических и неорганических соединений с

флуорохромом и обеспечить применение таких методов, как флуоресцентная микроскопия и другие. Эти свойства флуорохрома проявляются и при окрашивании целых живых клеток, что в сочетании с высокой чувствительностью метода открывает возможности определения отдельных микроорганизмов весом до 10^{-12} г [20, 39]. Проведенные этим методом испытания на содержание нуклеиновых кислот дали положительные результаты на спорах разнообразных микроорганизмов (*Bacillus cereus*) и вегетативных клеток *Bacterionema matruchott*, *E. coli*, *Sarcina lutea*, *Proteus* OX-19, *Chaos chaos* [39].

Отметим, что кроме акридина оранжевого возможно применение и других красителей, например 4,5-4',5'-дибензо-3,3'-диэтил-9-метилтиакарбония бромид, который при соответствующей обработке реагирует только с органическим материалом в почвенном экстракте, давая сдвиги в собственном спектре поглощения [53]. Чувствительность этого метода в обнаружении полипептидов, нуклеотидов значительно ниже, чем при выявлении белков нуклеиновых кислот, полисахаридов ($<0,002\%$), а пуриновые, пиримидиновые основания, аминокислоты и нуклеозиды вообще не обнаруживаются с его помощью.

Необходимо предварительно провести обработку образца для удаления неорганических материалов, которые тоже могут вызывать изменение в спектре красителя.

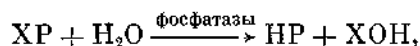
Наиболее удобным способом выявления окрашенных флуорохромом микробных клеток является применение люминесцентного микроскопа; он применяется также для количественного учета и изучения цепозов микроорганизмов. При рассмотрении в микроскоп почвенной суспензии, окрашенной акридином оранжевым, под действием возбуждающего синего света получается цветная картина: почвенные частицы светятся красным, а микроорганизмы — зеленым светом [9, 10]. Полученные картины обычно фотографируются на цветную или черно-белую пленку, причем яркость и четкость изображения зависят от концентрации красителя, которую необходимо специально подбирать или сочетать с применением тушителей, подавляющих люминесценцию субстрата и выявляющих свечение клеток микроорганизмов. В ряде случаев этот же метод позволяет отчасти и дифференцировать живые и мертвые клетки. Живые клетки светятся зеленым, мертвые — красным светом. В земных условиях люминесцентный метод выявляет все

группы почвенных микроорганизмов: бактерии, актиномицеты, грибы, дрожжи, водоросли, простейших животных и др.

Другим оптическим способом определения ДНК является метод, основанный на реакции взаимодействия отщепленной от молекулы ДНК дезоксирибозы с 3,5-диаминобензойной кислотой в кислой среде (4*N* HCl). В результате этого взаимодействия образуются продукты, флуоресцирующие с максимумом в области 510 нм при возбуждении светом с длиной волны $\lambda \sim 410$ нм. Чувствительность метода такова, что позволяет обнаружить по флуоресценции до 3—4 нг ДНК, или 10^5 клеток *E. coli*. Преимуществом метода является возможность определять в образцах почвы, без предварительного выделения, ДНК или РНК [75].

3. Ферменты-фосфатазы, как известно, широко распространены среди земных микроорганизмов, что связано с их участием в фосфорном обмене и переносе энергии в процессах клеточного метаболизма. Определение фосфатазной активности в почвенных экстрактах может дать информацию о наличии живых систем, тем более что при выделении фосфатаз в почвенную среду клетками микроорганизмов ферментативная активность фосфатаз сохраняется. Общий принцип определения фосфатазной активности состоит в том, что фосфатазы, имеющиеся в образце, катализируют гидролиз субстрата красителя, связанного с остатком фосфорной кислоты в единый комплекс. В ходе реакции освобождается свободный краситель, который, в отличие от своего фосфорного производного, обладает способностью флуоресцировать под действием возбуждающего света.

Схематически этот процесс можно представить следующим образом:



где Р — остаток фосфатной кислоты, Х — субстрат краситель, ХР — нефлуоресцирующий комплекс, ХОН — флуоресцирующая форма красителя-флуорогена. В качестве флуорогенов могут употребляться красители флуоресцеин, его производные (3-метоксидигидрофлуоран), α -нафтол ($C_{10}H_7OH$) [81, 93], которые обладают высоким квантовым выходом флуоресценции — до 0,90—0,95 в растворе 0,1 м $NaHCO_3$, что объясняет высокую чувствительность метода в целом. В качестве примера на рис. 5 приведены кривые зависимости интенсивности флуоресценции в присутствии производного флуоресцеина

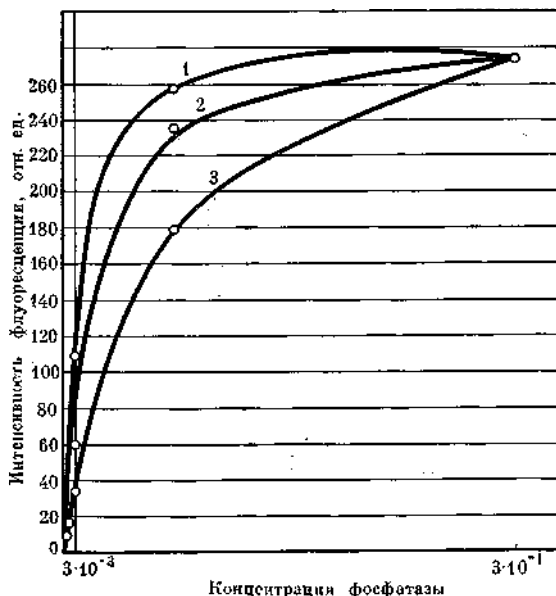


Рис. 5. Зависимость интенсивности флуоресценции флуорогена от концентрации фосфатазы [81]

- 1 — 2 часа инкубации;
2 — 45 мин. инкубации;
3 — 24 мин. инкубации

3-метокси-дегидрофлуоран -6-OL-6- фосфата от концентрации фосфатаз в среде при разных сроках инкубации. Минимальное количество фермента, которое можно определить в этом опыте, составляло 10^{-3} мг/мл. Это соответствовало суммарной активности 10^4 кл/мл *B. subtilis* в течение 100 мин. инкубации [81]. Скорость гидролиза фосфатпроизводных этих веществ под действием фосфатаз, выход флуоресценции свободных флуорогенов могут в значительной степени зависеть от условий реакции, pH среды и других факторов, что необходимо учитывать, применяя этот метод в экзобиологических исследованиях.

Метод окрашивания флуорогенами биохимических соединений — субстратов специфических ферментов для обнаружения активности последних можно использовать и в определении дезоксирибонуклеазы. Гетероциклическая часть молекулы ДНК — субстрат для ДНК-азы метится флуорогеном. Под действием фермента отщепляются низкомолекулярные продукты, обладающие сильной флуоресценцией [86]. В качестве флуорогенов могут также служить производные красителя флуоресцеина и, в частности, сульфон флуоресцеин ($C_{19}H_{12}O_6S$). Подобные методы предполагается использовать в специальных

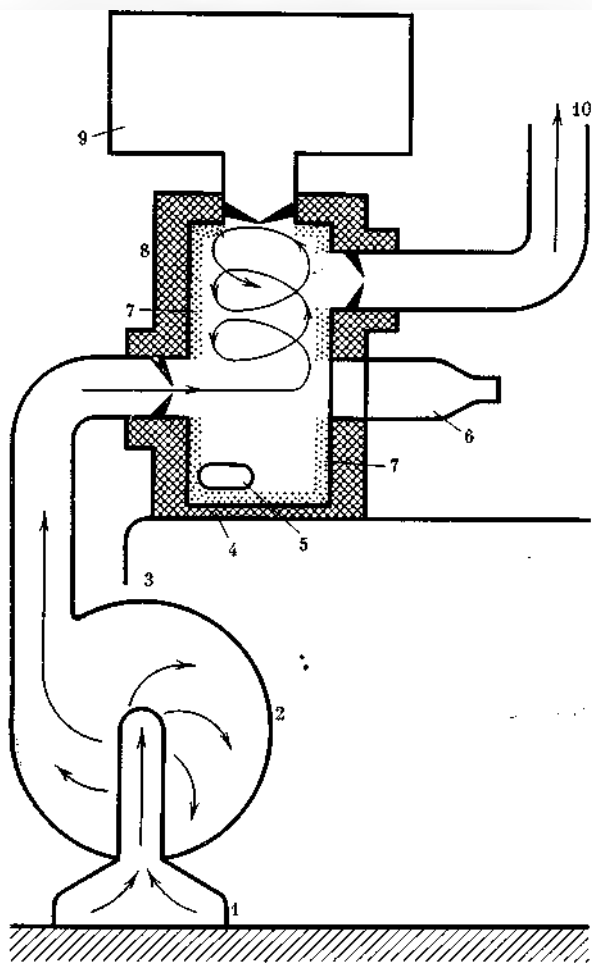


Рис. 6. Схема камеры «Мультипликатор» для определения фосфатазы

- 1 — устройство для захвата пыли;
- 2 — вентилятор (воздушный насос);
- 3 — фотоумножитель;
- 4 — детектор флуоресценции;
- 5 — субстрат;
- 6 — контрольная лампа;
- 7 — пыль;
- 8 — реакционная камера;
- 9 — рабочий раствор флуоресцеина;
- 10 — газоотвод

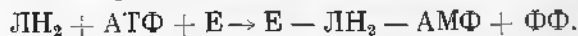
приборах для экзобиологических экспериментов — «мультипликаторах», предназначенных главным образом для обнаружения фосфатазной активности, а также аминоксипептидаз с использованием β -нафтиламидов аминокислот [60]. Кроме флуориметрических измерений, «мультипликатор» предполагается использовать и для колориметрического, нефелометрического анализа происходящих реакций в диапазоне длины волн 300—600 нм, а также

потенциометрических измерений окислительно-восстановительного потенциала (см. ниже). На рис. 6 изображена схема камеры «мультипликатора», в которую будет засасываться пыль с поверхности Марса для определения фосфатазной активности при взаимодействии с фосфатпроизводным флуоресцеина. «Мультипликатор» может обнаружить до 10^3 клеток в 1—10 мг почвы в течение 5—15 мин. Вес прибора 380 г, длина 25 см, диаметр 7 см.

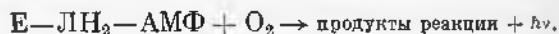
4. Известно, что АТФ является универсальным веществом — аккумулятором и переносчиком энергии в процессах метаболизма. Обнаружение АТФ в экзобиологических экспериментах на Марсе может быть связано либо с абиогенным происхождением этого соединения, либо с наличием живых форм. В последнем случае, так же как и при обнаружении фосфатазной активности, этот факт указывал бы на большое сходство биохимических систем земных и марсианских организмов.

Для определения АТФ предлагается использовать биохимиллюминесцентный метод, в основе которого лежит люциферин-люциферазная реакция, обуславливающая в природе хемилюминесцентное свечение светлячков [62, 76, 80]. В этом процессе специфический восстановленный субстрат люциферин (Л) окисляется кислородом воздуха с выделением энергии в виде света под действием фермента люциферазы (Е). Эта реакция идет в присутствии АТФ, причем ее интенсивность, а следовательно, и количество квантов света, пропорционально величине концентрации АТФ.

Хотя окончательно детали реакций свечения еще до конца не выяснены, предполагается, что на первом этапе происходит активация восстановленного люциферина ($ЛН_2$) и образование активного комплекса люцифериладенилата с люциферазой и освобождением пирофосфата:



Дальнейшее окисление этого комплекса кислородом воздуха сопровождается свечением, которое можно регистрировать с помощью фотоумножителя:



Описанный метод определения АТФ удобен и точен, в настоящее время широко применяется в биохимических исследованиях. Очевидно, его чувствительность зависит от возможности обнаруживать слабые световые потоки.

В лабораторных условиях биолюминесцентным методом можно определить концентрации АТФ от 10^{-12} до 10^{-17} г/мл, причем в области 10^{-17} — 10^{-18} г/мл уже нарушается прямая пропорциональная зависимость между интенсивностью света и количеством АТФ в пробе, которая справедлива для более высоких концентраций этого вещества [31].

Современные технические возможности обеспечивают регистрацию до 100—200 фотонов, падающих на катод фотоумножителя. Поскольку одна бактериальная клетка содержит в среднем 10^3 молекул АТФ, это позволяет обнаружить одну живую клетку.

Для усиления свечения необходимо, очевидно, разрушить клеточные стенки и обеспечить выход молекул АТФ в раствор, где находятся реагенты: люциферин и люцифераза. В лабораторных исследованиях в этих целях применяются различные приемы: химическая обработка хлорной кислотой, лизозимом, кипячение, действие ультразвука [52]. На рис. 7 приведена типичная кривая, соответствующая нарастанию и постепенному спаду свечения АТФ, экстрагированной кипячением из клеток почвенной микрофлоры. Непосредственно для экзобиологических исследований предлагаются прибор «Диоген», в котором имеется устройство для экстракции АТФ из взятой пробы, ампулы с люциферин-люциферазой и стандартным раствором АТФ, измерительная кювета объемом 0,1 мл, фотоумножитель и радиотехническое устройство для определения световых потоков, возникающих при смешивании в кювете экстрагированной из пробы АТФ с люциферин-люциферазой [59, 76]. Метод определения АТФ является несомненно перспективным в экзобиологических исследованиях, однако его ценность ограничивается рядом обстоятельств. Высокая специфичность люциферин-люциферазной реакции по отношению к АТФ может помешать определению родственного АТФ гипотетического вещества, содержащегося в инопланетных живых формах, которое, как и АТФ, может выполнять роль универсального трансформатора энергии, но может отличаться от АТФ по своей структуре. Неясно, какой из испытанных в земных условиях методов разрушения клеточных стенок будет наиболее пригоден для гипотетических марсианских организмов.

5. Железопорфириновые белки, каталаза, цитохром С, гемоглобин, пероксидаза играют важную роль в жизнедеятельности современных земных организмов, обеспечивая перенос электронов по дыхательной цепи (цитохро-

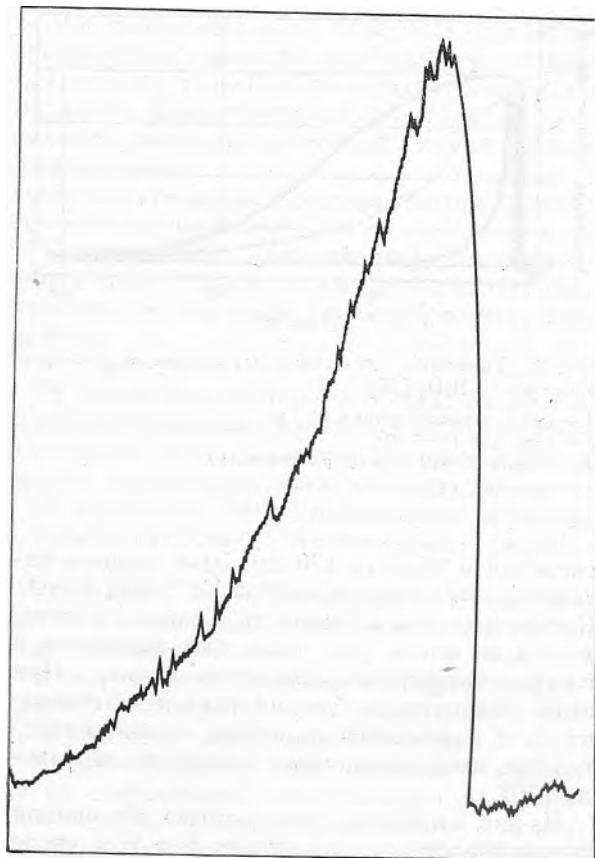


Рис. 7. Запись кинетики реакции люциферин-люциферазы с АТФ микрофлоры почвенного образца. Величина амплитуды сигнала соответствует 10^{-11} г/мл АТФ, или 10^6 клеток на 1 г почвы [31]

мы) и разложение образующейся в клетке перекиси водорода (каталаза, пероксидаза).

Возможно, что синтез некоторых из производных порфиринов был осуществлен на Земле абиогенным путем на стадиях предбиологической эволюции в восстановительной атмосфере. Позднее способность железопорфириновых ферментов катализировать разложение образовавшейся в окислительных условиях перекиси водорода имела важное приспособительное значение на ранних стадиях эволюции живых систем на Земле.

Эти соображения показывают, что обнаружение железопорфириновых белков на других планетах может служить одним из необходимых признаков наличия жизни. В качестве соответствующего метода предлагается определение гидропероксидазной активности. Известно, что окисление люминола перекисью водорода в щелочной среде сопровождается сильной хемилюминесценцией с максимумом

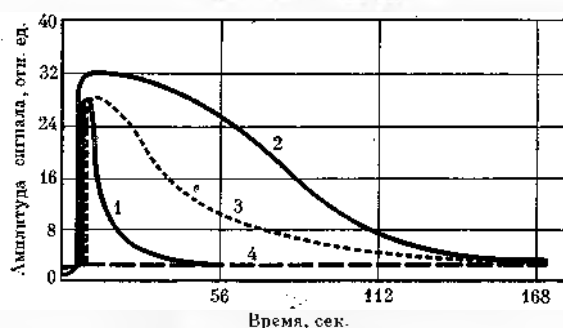


Рис. 8. Кинетика хемилюминесценции в реакции люминола + H_2O_2 [30]

- 1 — $FeSO_4$ в концентрации 10^{-4} м;
2 — каталаза (10^{-6} м);
3 — клетки *E. coli* ($1,5 \cdot 10^6$ клеток/мл);
4 — лимонит, стерильная почва

свечения в области 430 нм. Этот процесс катализируется ионами железа Fe^{+2} соли $FeSO_4$. Каталитическая активность железа увеличивается во много раз, если оно включено в состав порфиринасодержащего белка. При этом значительно увеличивается интенсивность и изменяется кинетика хемилюминесценции, сопровождающей окисление люминола [30].

На рис. 8 представлены кривые изменения интенсивности катализаторов и в том числе культуры клеток *E. coli*. Действие лизирующих препаратов на стенки клеток приводило к выделению в среду порфиринасодержащих белков и увеличению амплитуды сигналов. Контрольные опыты показали, что сигнал в присутствии лимонита $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ практически не превышает по величине фонового свечения в системе люминол — перекись водорода. Чувствительность описанного метода определения гемпной группы 10^{-11} г/мл, что соответствует 10^5 — 10^6 клеток/мл культуры.

Так же, как и в остальных оптических методах, предельная чувствительность хемилюминесцентного определения железопорфириновых соединений зависит в основном от технических характеристик системы, регистрирующей световые потоки.

6. Оптическая активность, заключающаяся в способности вещества вращать плоскость поляризации проходящего света, является одной из важнейших характеристик молекул, входящих в состав живых систем. Природа этого явления, возможно, связана с тем, что стабильность больших молекул биополимеров увеличивается при включении в их состав определенного оптического изомера, хотя

пока и неясно, каким образом в процессе эволюции лишь один из стереоизомеров стал играть исключительную роль.

В самом деле белки состоят только из *L*-аминокислот, в клетках имеется лишь *D*-глюкоза. С другой стороны, оптическая активность в системе с равным количеством антиподов может возникнуть под влиянием какого-то асимметричного катализатора, которым в этом смысле являются и биологические системы. На этих предпосылках и основаны методы обнаружения оптической активности в экзобиологических исследованиях. Одно из направлений в применении этих методов заключается в регистрации спектров дисперсии оптического вращения (ДОВ) микроскопических образцов и связано с тем, что биологические макромолекулы, имеющие регулярную пространственную структуру, изменяют свой спектр ДОВ в комплексе с симметричными красителями. Примером могут быть комплексы нуклеиновых кислот с акридиновым оранжевым. Предварительная обработка образца, использование соответствующих красителей с последующим микроскопированием позволит найти в нем отдельные центры, обладающие локальной оптической активностью [92].

Другое направление основано на способности биологических систем потреблять в метаболизме лишь один из стереоизомеров в питательной среде, содержащей равное исходное количество обоих антиподов. Разное количество антиподов в среде, появляющееся в результате жизнедеятельности организмов, указывает на существование жизни. Конечно, одно лишь обнаружение оптической активности в почвенных экстрактах не является само по себе признаком жизни, а должно быть непременно сопоставлено с определенными оптически активными соединениями, играющими важную роль в биологических процессах [47, 48]. Однако прямое определение оптической активности с помощью поляриметра не всегда обладает достаточной чувствительностью для выявления небольших количеств оптических изомеров. Например, согласно [47], для выявления спектрополяриметрическим методом аминокислот, содержащихся в скальных породах и веществе метеоритов в концентрации 10^{-11} м, необходимо иметь образец весом порядка 100 г.

Решение проблемы повышения чувствительности возможно путем совершенствования конструкции спектрополяриметров. В настоящее время разрабатываются высо-

кочувствительные однолучевые спектрополяриметры, в которых свет, прошедший через неподвижный поляризатор, модулируется затем по интенсивности вращающимся с определенной частотой анализатором. Фотоумножитель преобразует этот свет в переменный ток с частотой, равной частоте модуляции светового потока. Если между неподвижным поляризатором и вращающимся анализатором поместить вначале оптически инертный контрольный образец, а затем оптически активные образцы, то между соответствующими переменными фототоками возникает разность по фазе. Величина этой разности фаз, очевидно, зависит от способности стереоизомеров в образце вращать плоскость поляризации прошедшего света и является мерой оптической активности образца [92]. В сочетании с монохроматором такой прибор может служить и для снятия спектров дисперсии оптического вращения.

В качестве другого метода применяется выделение оптически активного изомера с помощью газожидкостной хроматографии. Исходная рацемическая смесь двух антиподов (A^+ , A^-) превращается в смесь диастереоизомеров в результате реакции с отдельным оптическим изомером другого асимметрического вещества (B^+). Полученные диастереоизомеры (A^+ , B^+) и (A^- , B^+) будут обладать разными свойствами, и их можно обнаружить с помощью газовой хроматографии. Этот метод был испытан на аминокислотах, где на хроматографической колонке разделялась смесь *d*, *l*-аминокислот в виде метиловых эфиров *N*-трифторацетил-*l*-пролин — *d*, *l*-аминокислот [47]. Чувствительность метода составила 10^{-9} — 10^{-11} молей. Разделение полученных таким путем диастереоизомеров можно проводить и с помощью радиоизотопного или масс-спектрометрического метода, если один из взаимодействующих реагентов помечен соответствующим изотопом [47].

Функциональные методы

Определение параметров, по которым можно судить о наличии активного метаболизма, лежащего в основе проявления основных признаков живого, является главной задачей функциональных методов обнаружения жизни.

Основным направлением в применении функциональных методов является выявление процессов обмена веществом и энергией между изучаемой биологической системой и внешней средой.

Для выявления этих обменных процессов современные методы экзобиологии предусматривают определение общего метаболизма, роста, ферментативной активности, фотосинтеза, дыхания изучаемых инопланетных живых систем.

Соответствующие внешние признаки могут состоять в следующем:

1) потребление (накопление) или выделение в среду определенных химических соединений, в том числе и газообразных продуктов;

2) термогенез;

3) изменение величины общей биомассы, сопровождающееся изменением pH, светорассеяния, интенсивности флуоресценции и других параметров;

4) изменение биолюминесценции образцов в разных условиях температуры, освещенности и др.;

5) влияние света на процессы обмена веществом и энергией между изучаемой системой и внешней средой;

6) характерное изменение во времени (кинетики) регистрируемых параметров в разных условиях содержания образца.

Информативность этих признаков основана на современных представлениях о сущности процессов жизнедеятельности и о возможных формах живого, которые можно ожидать на других планетах и прежде всего на Марсе.

Перейдем теперь к рассмотрению конкретных функциональных методов определения жизни, применение которых в экзобиологических исследованиях связано с перечисленными выше признаками.

Методы инкубации образцов. Одной из ключевых проблем в экзобиологических исследованиях является обеспечение инопланетных форм жизни соответствующей питательной средой, необходимой для их роста и проявления признаков клеточного метаболизма. Рост организмов и увеличение их биомассы требуются для обеспечения достаточного количества материала при применении ряда функциональных методов определения биологической активности организмов. Очевидная и главная трудность в решении этого вопроса состоит в том, что заранее неясно, какие питательные среды могут оказаться пригодными для марсианских микроорганизмов. Можно надеяться, однако, что так же, как и на Земле, применение питательных сред широкого спектра действия позволит выявить микроорганизмы, не требующие специальных условий для своего роста. Хотя

при таком подходе выявляется лишь незначительная часть микрофлоры, для ответа на вопрос о самом существовании жизни этого вполне достаточно. В качестве составных элементов питательных сред целесообразно брать простые неорганические молекулы CO_2 , H_2S , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} и органические соединения (аминокислоты, уксусная, щавелевая, молочная кислоты), часть которых как можно надеяться, будет потребляться в метаболизме марсианских организмов для построения специфических для них, более сложных биологических соединений.

Обогащение питательной среды сульфатами, нитратами и карбонатами [90] может облегчить обнаружение микроорганизмов, использующих эти соединения вместо кислорода для окисления органического субстрата.

В земных условиях были испытаны жидкие питательные среды широкого спектра действия, содержащие меченые по углероду соединения [58] следующего состава (в г): K_2HPO_4 —1,0, KNO_3 —0,5, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ —0,2, NaCl —0,1, FeCl_3 —0,01, белковый гидролизат—4,0, дрожжевой экстракт—13, пептон № 3—20,0, солодовый экстракт—3,0, аскорбиновая кислота—0,2, цистеин—0,6, мясной экстракт—3,0, почвенная вытяжка—250 мл, дистиллированная вода—до 1 литра. Органические соединения с включенным радиоактивным углеродом C^{14} представляли собой глюкозу, муравьиную кислоту, уксуснокислый натрий, пируват натрия, глицерин и дрожжевой экстракт, цистеин, содержащий радиоактивную серу.

В других исследованиях был определен состав прозрачной среды, наиболее благоприятной для роста большинства гетеротрофных почвенных микроорганизмов, встречающихся в засушливых суровых районах [17]: глюкоза—10 г/л, аспарагин—0,1 мл/л, NH_4NO_3 —0,5, K_2HPO_4 —2,61, KH_2PO_4 —0,91, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ —0,3, CaCl_2 —0,01, NaCl —0,1, смесь микроэлементов—1 мл/л; дрожжевой автолизат 6%-ого сухого веса—5 мл/л, печеночный экстракт 4,8%-ого сухого веса—1 мл/л.

Для того чтобы в какой-то степени избежать неопределенности, связанной с составом питательной среды, можно использовать экстракты из грунта, считая, что в грунте содержатся все необходимые вещества для роста природных микроорганизмов. Такая естественная питательная среда может быть приготовлена путем растворения некоторого количества материала с поверхности планеты в небольшом объеме жидкости. В техниче-

ском отношении этот прием осуществляется с помощью особой двухъярусной кюветы, где в верхнем ярусе находится образец грунта, а в нижнем, соединенным с ним капиллярами,—водный раствор [64]. Такая система обеспечивает благоприятные условия роста микроорганизмов в верхнем ярусе и переход микроорганизмов в нижний ярус. Кроме того, согласно данным почвенной микробиологии, предварительное растворение или смачивание образца почвы значительно увеличивает количество выявленных микроорганизмов после посева.

Следует отметить, что предварительное приготовление перед инкубацией щелочного экстракта из песчаных почвенных образцов во много раз ($2 \cdot 10^5$) увеличивает число выявленных микроорганизмов по сравнению с почвенным раствором на дистиллированной воде.

Можно использовать также метод обогащения грунта внесенными питательными веществами. Это позволяет природным микроорганизмам легче адаптироваться к искусственно вносимым питательным веществам и ускорить их развитие.

Кроме того, толщина пленки, окружающей частицы грунта, мала по сравнению с ожидаемыми размерами микроорганизмов (0,5—2 мк), а в этих условиях сами клетки способны создавать благоприятные условия микроокружения и приспосабливаться к ним [67].

Наконец, планируется также проведение экзобиологических экспериментов без всякого применения искусственных питательных веществ или добавления растворителей (воды), которые, конечно, могут сами по себе оказывать вредное влияние на марсианские организмы, привыкшие к малому содержанию влаги в среде. Эти эксперименты главным образом предполагают изучение газообмена между образцом грунта и внешней средой и выявление изменений в составе окружающей атмосферы. Ниже мы остановимся на этом более подробно.

В целом в современной экзобиологии предполагается использование питательных сред, богатых простыми органическими и минеральными веществами и имеющих водную основу. Несмотря на суровые условия Марса (отсутствие влаги, низкие температуры), к которым приспособлены микроорганизмы, последние должны очевидно интенсивно развиваться и на богатых питательных средах.

Определение термогенеза. Биохимические превращения, лежащие в основе жизнедея-

тельности живых систем, сопровождаются необратимым рассеянием химической энергии и продуцированием тепла. С точки зрения термодинамики необратимых процессов, теплопродукция может рассматриваться в качестве общего функционального критерия существования живых систем независимо от их конкретной структурно-химической основы.

В биологических исследованиях метод микрокалориметрии уже давно занимает видное место при изучении роста микроорганизмов, прорастания семян, жизнедеятельности некоторых беспозвоночных и мелких позвоночных животных [40]. Чувствительность современных микрокалориметров позволяет определить теплопродукцию при росте 10^4 клеток бактерий в 1 мл. Подобные определения проводились с образцами почвы, где было обнаружено, что кривые теплопродукции соответствуют кривым роста клеток микрофлоры [63].

В настоящее время сконструирован прибор для определения размножения почвенных микроорганизмов, с помощью которого в образце, содержащем 10^6 клеток/г, производились измерения теплопродукции в процессе метаболизма, а также разности в уровне термогенеза между живыми клетками и контрольным образцом, где клетки были убиты $HgCl_2$ [63]. На обычной питательной среде (трипсин, белки из соевых бобов, глюкоза) удалось определить до 10^3 почвенных микроорганизмов. Общая теплопродукция составила 47,6 кал за сутки, причем скорость термогенеза доходила до 1200 мкал/сек. Добавление влаги к сухим образцам почвы также усиливало интенсивность метаболизма, что приводило к повышению скорости термогенеза на 10—40 мкал/сек. В таких смоченных водой образцах почвы удавалось определить до 10^5 — 10^6 клеток без добавления питательной среды.

Наиболее чувствительным методом определения термогенеза является дифференциальная микрокалориметрия, при которой с помощью включенных навстречу друг другу термопар регистрируется термоэлектрическая разность токов, возникающая между двумя ячейками с контрольным и изучаемым образцами.

Наряду с очевидными преимуществами (главные из них — неспецифичность по отношению к химической природе регистрируемых процессов и высокая чувствительность) применение метода микрокалориметрии в экзобиологии пока встречает ряд технических трудностей. Они сводятся в основном к необ-

ходимости обеспечить термостатирование и однородное распределение температур между двумя ячейками, которые для этого помещаются в цилиндрический металлический бак сравнительно большой массы.

Требования с точки зрения экономии веса аппаратуры, неизбежные на начальных этапах экзобиологических экспериментов на Марсе, очевидно, на первых порах ограничат применение этого метода.

Определение роста микроорганизмов. Наиболее простой метод определения роста микроорганизмов в жидких средах заключается в определении степени мутности питательного раствора. Рост микроорганизмов сопровождается изменением поглощения и рассеяния света на разной длине волн, что давно уже используется в практике микробиологических исследований. В ближайшей ультрафиолетовой области спектра поглощение света обусловлено главным образом белками (280 нм) и нуклеиновыми кислотами (260—265 нм). В видимой области спектра происходит поглощение света молекулами пигментов, цитохромов, а в основном наблюдается рассеяние света, зависящее от размеров, концентрации, показателя преломления клеток микроорганизмов.

Сами по себе изменения светорассеяния, сопровождающие рост микроорганизмов, не зависят от химической природы происходящих при этом процессов, что является, конечно, достоинством данного метода. Применение его для экзобиологических исследований основано на предположении, что марсианские микроорганизмы смогут жить и размножаться в водной питательной среде. Для изучения светорассеяния используется прибор, блок-схема которого приведена на рис. 9.

Контролем служит образец с суспензией клеток, отравленных каким-либо ядом, которые в результате этого не должны изменять со временем своих оптических свойств. Сравнение во времени оптических характеристик двух объектов, содержащих живые и мертвые клетки, позволяет следить за динамикой развития почвенной микрофлоры и выявлять минимальное количество клеток микроорганизмов, содержащихся в культуральной жидкости. Изучение временных характеристик кривых светорассеяния является непременным условием правильной интерпретации результатов экспериментов по определению светорассеяния в зависимости от роста клеток.

Недостатком этой, как и других однолуче-

тех или иных групп микроорганизмов. Большинство микроорганизмов способно размножаться при нейтральной или близкой к ней величине pH, но отдельные группы могут развиваться при значении pH, лежащем в пределах от 0,6 до 11. Размножение микроорганизмов в свою очередь вызывает изменения pH среды обитания вследствие потребления питательных веществ и выделения в среду определенных продуктов обмена. Так, на средах, содержащих углеводы, в процессе брожения происходит в основном образование кислых и нейтральных продуктов, в то время как развитие на белковых средах приводит, как правило, к подщелачиванию за счет выделения аммиака. Исследования [31] показали, что размножение микрофлоры различных почв на средах с глюкозой всегда вызывало подкисление среды и смещение pH в кислую сторону, а на белковых средах происходило подщелачивание культуральной жидкости. Так, рост микрофлоры пустынных почв от $2 \cdot 10^3$ до $3,9 \cdot 10^3$ клеток/мл в течение 28 час. вызвал смещение pH с 6,95 до 5,4.

Подобные изменения зависят в основном от состава питательной среды, поскольку именно последнее определяет, какие группы организмов могут развиваться в данных условиях и вызывать сдвиги pH в соответствии с характером своего метаболизма.

Изменение pH в процессе роста микроорганизмов наблюдается при наличии в среде не менее 10^6 клеток/мл.

По своей чувствительности этот метод несколько уступает фотометрическому, описанному выше. Однако он имеет то преимущество, что не требует оптически прозрачной среды для своего применения.

Определение роста микроорганизмов возможно и различными оптическими методами, на которых мы уже останавливались при рассмотрении аналитических методов.

Динамика изменений в содержании биологически важных соединений в процессе инкубации образца почвы может быть важным показателем развития микрофлоры. Увеличение оптической активности среды при потреблении развивающейся микрофлорой одного из оптических антиподов также весьма показательно в этом отношении. Сюда же относятся и чувствительные методы регистрации флуоресценции пигментов (хлорофилла) клеток фотосинтезирующих водорослей (хлореллы), которые позволяют обнаружить увеличение количества клеток на 100—200 кл/мл уже в течение первых часов роста культуры [74].

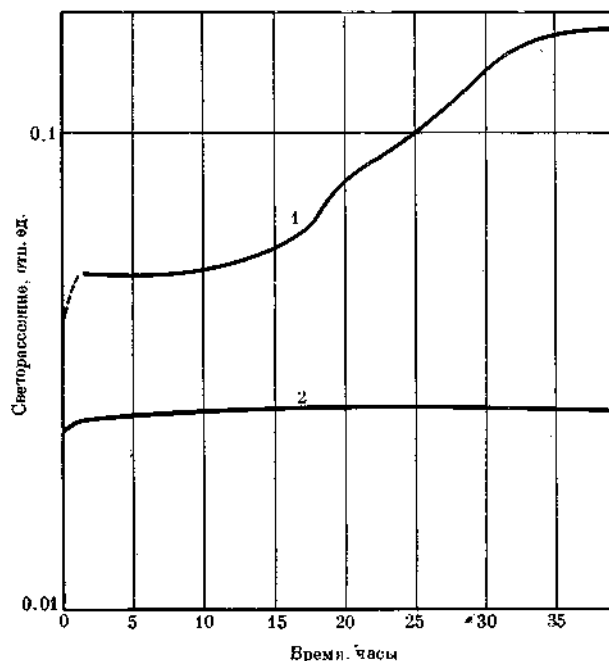


Рис. 11. Изменение светорассеяния в процессе роста микрофлоры садовой почвы [90]

1 — садовая почва;
2 — стерилизованный образец почвы

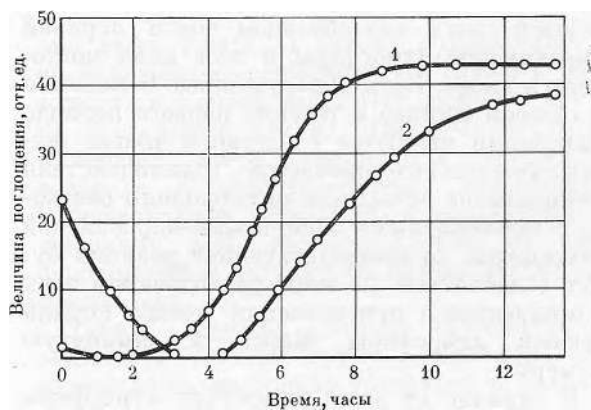


Рис. 12. Изменение поглощения монохроматического света при 280 нм в процессе размножения микрофлоры пустынной почвы (при $+37^\circ \text{C}$) [30]

1 — 2,5 мг почвы + 2,5 мг лимонита на 10 мл среды;
2 — 25 мг почвы + 25 мг лимонита на 10 мл среды

Заметим еще раз, что во всех опытах по определению роста микроорганизмов контролем должны служить образцы с убитой тем или иным способом микрофлорой, а основным показателем — динамика изменения регистрируемого параметра в течение всего периода роста изучаемых микроорганизмов.

Определение продуктов метаболизма. Обнаружение общей биологической активности в образце почвы удобно проводить по тем изменениям в газовом составе окружающей атмосферы, которые являются результатом жизнедеятельности почвенной микрофлоры. На Земле современный состав атмосферы обусловлен в основном жизнедеятельностью живых систем, в первую очередь зеленых растений. С другой стороны, хотя бедная микрофлора, очевидно, не способна существенно повлиять на общий состав атмосферы, но газообразные продукты ее метаболических процессов могут быть обнаружены в экспериментах с образцами почвы в небольших замкнутых объемах. В этих опытах периодически с помощью методов газовой хроматографии и масс-спектропии измеряется содержание газов H_2 , CH_4 , CO_2 , Kr (He) в атмосфере, окружающей почвенный образец в небольшом замкнутом объеме [65]. Эти эксперименты предназначены, таким образом, для регистрации изменений в составе марсианской атмосферы в течение продолжительного периода в закрытой системе, где содержится образец марсианской почвы с питательной средой.

В конце этого периода и после снятия показаний происходит замена оставшейся газовой смеси над образцом новой порцией марсианской атмосферы и весь цикл повторяется вновь. Если обнаруженные изменения в газовом составе в течение первого периода инкубации являются следствием только физико-химических процессов взаимодействия компонентов почвы или питательного раствора с газообразными элементами марсианской атмосферы, то соответствующие реакции будут ослабляться по мере расходования этих компонентов и при внесении новых порций свежей атмосферы Марса в замкнутую камеру.

В отличие от этого изменения атмосферы вследствие роста и жизнедеятельности почвенных микроорганизмов будут повторяться в каждом цикле и нарастать по мере развития микрофлоры. Контролем служат образцы, нагретые до высоких температур, инактивирующих живые системы.

Подобные опыты в земных условиях выявили наличие в образцах почвы организмов, продуцирующих H_2 , N_2 , CH_4 в анаэробных условиях.

Другие важные метаболические газообразные продукты, NH_3 , H_2S , CO_2 , также выделяются организмами, но они легко растворимы в водной питательной среде, вследствие

чего определение их в газовой фазе может быть несколько затруднено.

По составу газообразных продуктов можно, особенно в случае простых питательных сред, идентифицировать отдельные физиологические группы микроорганизмов, ответственные за определенный тип метаболизма, такие, как аммонификаторы, сульфатпродуцирующие и метанобразующие бактерии, денитрификаторы. Денитрифицирующие бактерии интересны в том отношении, что в анаэробных условиях они используют нитраты в качестве акцептора электронов при окислении различных дыхательных субстратов. Этот тип обмена может иметь значение и на Марсе в условиях резкого недостатка кислорода в атмосфере.

Для обнаружения денитрификаторов на Марсе предлагается использование соответствующей среды с нитратом, а о наличии организмов можно будет судить по появлению в газовой фазе окиси азота NO , закиси азота N_2O и молекулярного азота N_2 [33]. Если вместо нитрата использовать промежуточный продукт денитрификации N_2O , то по двум газовым компонентам, N_2O и N_2 , можно оценить интенсивность процесса восстановления N_2O денитрифицирующими микроорганизмами.

Известно также, что в круговороте азота на Земле большую роль играет процесс фиксации азота, который осуществляется различными группами микроорганизмов, способных к восстановлению веществ с тройной связью (N_2 , N_2O , H_2CN , C_2H_2). Считается, что в процессе восстановления этих соединений играют роль те же ферментные системы, которые участвуют в восстановлении молекулярного азота. Очевидно, эти метаболические реакции могут также осуществляться и марсианскими микроорганизмами в процессе жизнедеятельности. Введение ацетилена C_2H_2 в качестве донора электрона стимулирует процесс восстановления нитратов (NO_2), приводя к одновременному выделению CO_2 и закиси азота N_2O . Добавление глюкозы также ускоряет денитрификационные процессы, но вызывает появление новых газовых компонентов (H_2 , C_2H_4). Таким образом, в зависимости от активности азотфиксирующих и денитрифицирующих форм микроорганизмов, содержания и состава органического субстрата, начальных концентраций продуктов NO_2 , NO , N_2O , N_2 динамика изменения газовых компонентов над образцом почвы будет носить различный характер, являющийся следствием перечисленных выше факторов.

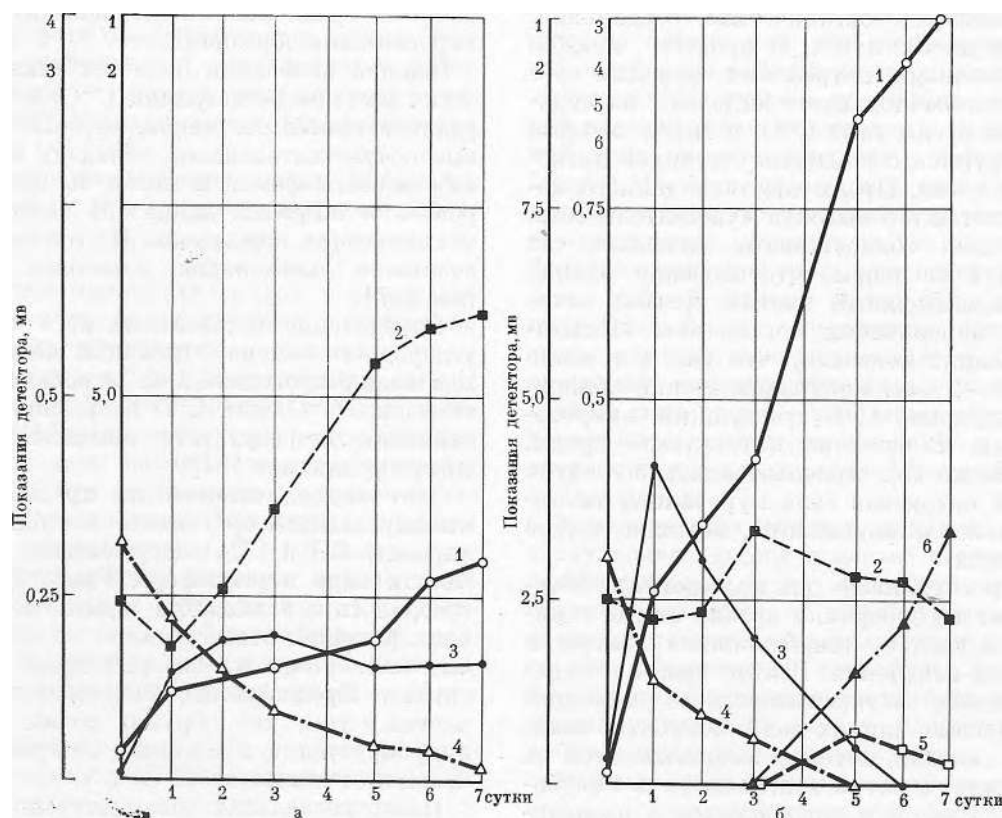


Рис. 13. Динамика изменения содержания компонентов газовой смеси в образце почвы из оранжереи [33]

а — без глюкозы;
б — с глюкозой;
1 — CO_2 ; 3 — N_2O ; 5 — C_2H_6 ;
2 — N_2 ; 4 — C_2H_4 ; 6 — H_2

В качестве примера на рис. 13 приведена динамика газообмена в опыте с образцом почвы из оранжереи [33].

Как видно, в первые сутки отмечается интенсивное выделение закиси азота и углекислоты. Начиная со вторых суток (в варианте с глюкозой) уровень N_2O неуклонно снижается до полного его исчезновения к шестым суткам. Это свидетельствует о высокой активности денитрификаторов. В результате редукции закиси азота (вторые-третьи сутки) повышается содержание N_2 в обоих вариантах. Наблюдаемое снижение количества N_2 в первые сутки (независимо от условий опыта), очевидно, является следствием его адсорбции почвенными частицами. Однако по прошествии трех суток характер динамики азота в разных вариантах опыта был различен. Так, в отсутствии глюкозы в продолже-

нии всего опыта (7 суток) потребления N_2 не наблюдалось. Внесение же глюкозы приводило к его снижению в этот период (с третьих по седьмые сутки). Потребление молекулярного азота совпадало с появлением водорода и этилена — новых компонентов в газовой фазе. Убыль N_2 и увеличение содержания C_2H_4 свидетельствуют об азотфиксирующей активности почвенных микроорганизмов.

Таким образом, метод газообмена в замкнутой системе грунт — атмосфера дает возможность не только убедиться в наличии активных микроорганизмов, но и в ряде случаев идентифицировать важные биологические процессы денитрификации и азотификации в исследуемом образце.

В современной биологии широко применяются меченые атомы для расшифровки деталей процессов и идентификации промежуточных и конечных продуктов. На этом принципе основан прибор для обнаружения метаболизма микроорганизмов, носящий условное название «Гулливёр» [58, 59].

Эксперимент заключается в том, что в питательную среду, предназначенную для размножения марсианской почвенной микро-

флоры, вносятся органические соединения, меченные по C^{14} и S^{35} . В процессе метаболизма организмы потребляют меченый субстрат и в конечном итоге выделяют из культуральной среды газы $C^{14}O_2$ и H_2S^{35} , которые регистрируются с помощью счетчиков мягкого β -излучения. Преимуществом данного метода является его высокая чувствительность, позволяющая обнаруживать несколько сот клеток в 1 мг почвы, что особенно важно, учитывая возможный низкий уровень метаболизма марсианских организмов. Испытания на Земле показали, что уже в течение первых 1—2 час. инкубации можно обнаружить выделение $C^{14}O_2$ растущими микроорганизмами. В качестве питательной среды, меченной по C^{14} , использовались наряду с глюкозой натриевая соль муравьиной кислоты, а также аминокислоты, белки и другие компоненты.

Прибор «Гулливер» для исследования Марса состоит из заборника пробы, сосуда с питательной средой, инкубационной камеры и счетчика β -излучения. Взятие проб с поверхности почвы осуществляется с помощью 6—8-метровых липких лент, покрытых силиконовой смазкой, которые выбрасываются на поверхность, а затем вытягиваются в инкубационную камеру и погружаются в радиоактивную питательную среду.

Другие модели «Гулливера» включают эксперименты для проведения непосредственно на поверхности планеты. В обоих случаях выделяющийся радиоактивный газ (CO_2) фиксируется гидроокисью бария, нанесенной на поверхность счетчика.

Практическое отсутствие воды на поверхности Марса заставляет внести некоторые изменения в подготовку будущих экспериментов на этой планете. Предварительные исследования образцов почвы весом в несколько грамм, которые смачивались всего лишь 1 мл водного раствора, также обнаружили наличие в них микроорганизмов. В дальнейшем необходимо будет провести дополнительные исследования по поводу возможности самопроизвольного распада меченых соединений и выделения радиоактивного газа в течение полета к Марсу.

Развитие метода меченых питательных сред показало, что с его помощью можно определять различные почвенные микроорганизмы, обитающие в разных условиях (пустыни, тундра и др.) [12]. Кривые нарастания $C^{14}O_2$ могут иметь различный характер. Однако во всех случаях они однозначно указывают на наличие жизнедеятельности в

почве по сравнению с контрольными инактивированными образцами.

Важной проблемой является также разработка методов регистрации $C^{14}O_2$ с помощью радиоактивных счетчиков, которые были бы высокочувствительными, обладали бы малым собственным фоном и могли бы функционировать в широком диапазоне температур и механических перегрузок. В этом отношении возможно применение алмазных детекторов [57].

Определение метаболизма и, в частности, углеродного обмена с помощью меченых атомов можно проводить и по включению радиоактивных $C^{14}O_2$ или $C^{14}O$ в органические соединения в результате жизнедеятельности микроорганизмов [51].

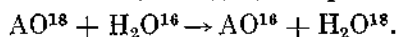
Этот подход основан на предположении, что марсианские организмы способны ассимилировать CO и CO_2 , содержащиеся в газообразном виде в атмосфере. Ранее (стр. 356) говорилось о возможных типах метаболических реакций, ответственных за эти процессы, важнейшим из которых является фотосинтез. Предлагаемый эксперимент заключается в том, что образец почвы на свету инкубируется в атмосфере, содержащей небольшие количества $C^{14}O_2$ и $C^{14}O$.

После нескольких часов инкубации первоначальная атмосфера заменяется инертным газом, а почва подвергается пиролизу при $600^\circ C$. В образующемся при этом газе содержатся продукты пиролиза биоорганических соединений с меченым C^{14} и частично остатки исходных газов $C^{14}O_2$ и $C^{14}O$.

Последние попадают в особую ловушку и там учитываются отдельно, а органические продукты пиролиза собираются на колонке из огнеупорного материала и нагреваются до $700^\circ C$. После этого происходит измерение радиоактивности продуктов их окисления, количество которых указывает уже на биологическую активность процессов ассимиляции почвенных микроорганизмов. В земных условиях было показано, что таким методом можно обнаружить фиксацию $C^{14}O_2$ на свету фотосинтезирующими организмами в количестве 10^2 — 10^3 клеток и в темноте нефотосинтезирующими бактериями — до 10^5 — 10^6 клеток. Этим же методом можно обнаружить и ассимиляцию $C^{14}O$ из атмосферы. Эксперименты не давали положительного результата, если образец был предварительно высушен. Добавление паров воды в камеру реактивировало микроорганизмы. Таким образом, предложенный метод способен обнаружить ксерофитные формы марсианских организмов.

Другое известное свойство организмов — катализировать обмен кислорода между фосфатными, нитратными, сульфатными анионами и водой — лежит в основе метода определения метаболизма по стойкому изотопу кислорода O^{18} [56].

Реакция осуществляется между анионами, меченными по O^{18} , и водой, содержащей O^{16} :



Появление изотопа O^{18} в воде и указывает на биологическую активность препарата. Определение проводится с помощью масс-спектрометра, в приемную вакуумную камеру которого вода и растворенные газы диффундируют из образца через тефлоновую мембрану. Опыты дали положительные результаты и показали, что самые разнообразные культуры клеток, а также почвенные образцы содержат микрофлору (10^5 – 10^7 кл/г), способную осуществлять катализ кислородного обмена. Контролем служили инактивированные образцы почвы и биоорганические соединения (аминокислоты, пурины, ацетаты, глицины), которые не катализировали обмен по O^{18} .

Определение присутствия фотосинтезирующих организмов. В экзобиологических исследованиях один из подходов в определении фотосинтеза состоит в изучении метаболизма с помощью описанных выше изотопных методов исследования почвенных образцов, которые подвергаются действию света. Контролем при этом являются полностью инактивированные образцы (нагревание до $160^\circ C$) или опыты в условиях темноты. Однако возможен и другой подход в идентификации процессов полезной утилизации световой энергии, при котором цепь фотосинтеза рассматривается как открытая система транспорта электронов по промежуточным переносчикам. Существенно, что при таком подходе можно в значительной степени абстрагироваться от конкретной физико-химической природы продуктов, субстрата фотосинтеза и компонентов фотосинтетического аппарата и ставить задачу выявления функциональной активности фотосинтетической цепи.

В самом деле, большинство сведений о сложном характере процессов транспорта электронов при фотосинтезе получено методами дифференциальной и импульсной спектроскопии, применение которых основано на изменении коэффициента поглощения молекулами переносчиков волн света определенной длины в окислительно-восстановительных процессах.

Освещение суспензии клеток фотосинтезирующих организмов возбуждающим светом или изменение интенсивности последнего вызывает в свою очередь изменение стационарной концентрации электронов в промежуточной цепи фотосинтетических переносчиков. На рис. 14 приведена запись во времени некоторых кривых перехода между «темновым» и «световым» стационарными состояниями фотосинтетической цепи при освещении светом с разной длиной волн. Не вдаваясь в подробный анализ механизма протекающих здесь окислительно-восстановительных превращений, отметим, что форма переходных кривых сама по себе свидетельствует о последовательном характере реакций в сложной системе переносчиков, ответственных за эти превращения.

Характер этих кривых, а также свойства устанавливающегося в клетке стационарного состояния зависят от физиологического состояния организма, от воздействия на клетки различных метаболических ядов, газового состава окружающей атмосферы, температуры, что также позволяет отличать открытые живые системы от других сложных систем пебиологического происхождения.

Важным параметром, по которому можно судить о сложном характере фотоиндуциро-

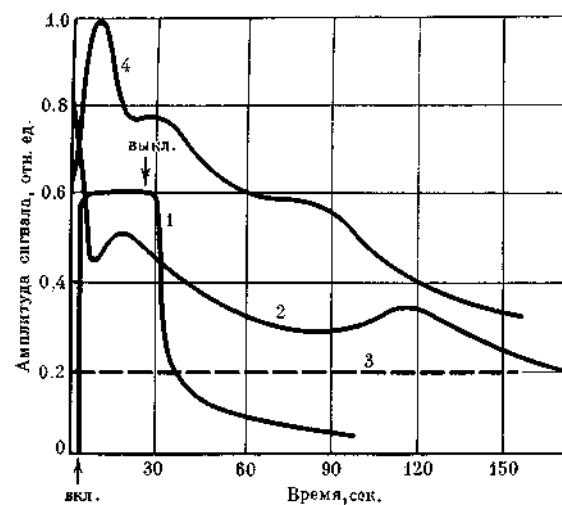


Рис. 14. Кинетика переходных процессов в цепи фотосинтеза между световыми и темновыми стационарными состояниями [26]

- 1 — переходная кривая в фотосинтезе высших растений (поглощение цитохрома);
- 2 — то же, для интенсивности послесвечения;
- 3 — кривые 1, 2 после инактивации образца;
- 4 — индукционная кривая флуоресценции при включении света

ванных пигментами реакций, являются индукционные кривые, т. е. временные кривые изменения интенсивности и средней длительности флуоресценции пигментов при переходе клеток от темного состояния в стационарный световой режим. Для обычных растворов красителей, в том числе хлорофилла, бактериохлорофилла, переходные кривые носят плавный, монотонный характер, а время переходного периода составляет примерно $5 \cdot 10^{-9}$ сек. В случае интактных живых клеток время переходного процесса составляет величину порядка нескольких секунд, а сами кривые носят сложный характер [25]. Очевидно, что в живых системах форма переходных кривых определяется уже не столько чисто физическими процессами дезактивации возбужденных молекул пигментов, как это имеет место в растворах или разрушенных клетках, сколько характером и длительностью индуцированных пигментом реакций переноса электронов. Наличие подобных индукционных кривых независимо от конкретного механизма ответственных за эти кривые процессов является указанием на то, что молекулы пигментов включены в сложную систему реакций, где происходит использование энергии их возбужденного состояния.

Другим важным признаком живых систем, в частности фотосинтетических, является хемилюминесценция. Давно известно, что протекание целого ряда химических реакций сопровождается излучением света. В биологических системах хемилюминесценция была обнаружена в клетках фотосинтезирующих организмов [87] и клетках животных тканей [32], причем характер свечения оказался зависимым от состояния организмов. Так, ингибиторы метаболизма изменяют интенсивность хемилюминесценции. У фотосинтезирующих организмов световое насыщение люминесценции наступает при тех же интенсивностях возбуждающего света, что и световое насыщение фотосинтеза. Температурная зависимость послесвечения аналогична температурной зависимости ферментативных процессов, а температурный оптимум близок к оптимуму фотосинтеза. При нагревании до температуры выше оптимальной, но ниже $+45^\circ$, послесвечение обратимо подавляется, при температуре выше $+45^\circ$ С наблюдается уже необратимое подавление послесвечения. Очевидно, само излучение квантов света происходит в ходе обратной рекомбинации некоторых промежуточных продуктов в фотосинтетической цепи с молекулами пигментов. Кинетика изменения интенсивности хемилю-

минесценции в переходный период после выключения света (переход свет \rightarrow темнота) или после включения возбуждающего света (переход темнота \rightarrow свет) отражает характер временной последовательности реакций переноса электронов, приводящих в конечном счете к излучению кванта света.

Было показано [26], что форма кривой затухания послесвечения может иметь достаточно сложный характер, являющийся следствием взаимодействия первичных реакций переноса электронов в фотосинтезе.

Действительно, сложный характер представленных на рис. 14 переходных кривых свидетельствует о том, что процессы, ответственные за появление хемилюминесценции и флуоресценции, протекают в организованной открытой системе и связаны не только с конечным физическим актом испускания кванта света, но определяются временной и пространственной последовательностью реакций транспорта электронов в гетерогенной живой системе.

Таким образом, существует ряд параметров (хемилюминесценция, флуоресценция), изучение которых в определенных условиях позволяет констатировать наличие такого рода сложно организованных фотобиологических систем. Существенно, что для получения этой информации требуется только изменение условий светового возбуждения (интенсивности и спектрального состава) включенных в живые системы пигментов. Диапазон изменений световых воздействий оказывается того же порядка, что и диапазон смены освещения в естественной жизни соответствующих организмов. В сочетании с применением различных реагентов, ингибиторов, температурных воздействий эти методы являются средством обнаружения фотосинтезирующих организмов и получения весьма важных признаков наличия жизни на планете.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАБОРАТОРИИ ДЛЯ ЭКЗОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотренные в предыдущем разделе экзобиологические методы обнаружения жизни, с технической точки зрения, вполне осуществимы в настоящее время. Именно с их помощью можно рассчитывать не только на обнаружение инопланетных живых форм, но и на получение их определенных характеристик.

Однако очевидно, что в отдельности ни один из предложенных методов обнаружения

не дает данных, допускающих однозначную интерпретацию с точки зрения наличия жизни. Это существенно отличается от методических подходов при космических экспериментах, предназначенных для измерения тех или иных физических параметров других небесных тел или межпланетного пространства.

Так, вопросы существования магнитного поля, радиационного пояса в атмосфере планеты решаются измерением соответствующих параметров, причем достоверность ответа зависит целиком от точности и статистической достоверности полученных количественных результатов. Также, например, достаточно измерения массы, скорости и других физических величин для получения характеристики микрометеоритов.

Неясные причины того или иного физического явления так же, как и его параметры, могут уточняться в процессе новых измерений, однако само существование явления определяется точностью первоначальных экспериментов. Наоборот, в экзобиологическом исследовании отдельные эксперименты так же, как и повышение точности измерений, мало дают для ответа на основной вопрос о самом существовании жизни в изучаемом образце. Единственным выходом является только комплексное применение отдельных методов, «привязанное» к динамике развития микрофлоры во времени.

Другим отличием экзобиологических экспериментов от физических является их тесная взаимозависимость. Очевидно, например, что опыты по выращиванию марсианской микрофлоры на искусственных средах должны следовать за экспериментами по обнаружению органических веществ и предшествовать определению метаболизма. С другой стороны, отрицательный результат по выращиванию марсианских организмов на жидких питательных средах заставит значительно изменить программу дальнейших исследований, возможность чего должна быть уже предусмотрена на Земле.

Все эти обстоятельства показывают, что единственно правильным подходом в проведении экзобиологических исследований является создание АБЛ, в которой отдельные методы по обнаружению жизни были бы конструктивно объединены, а их применение регламентировано единой программой функционирования АБЛ.

Следует заметить, что в настоящее время технически неосуществимо создание таких АБЛ, в которых были бы представлены все

известные методы обнаружения. Поэтому в зависимости от конкретных целей, сроков запуска и времени жизни космических станций на поверхности планеты конструкции АБЛ должны иметь различный приборный состав.

Пока еще, однако, эти биологические лаборатории так или иначе предназначены для ответа на основной вопрос о самом существовании жизни, и поэтому все предлагаемые проекты АБЛ имеют целый ряд общих черт.

В конструктивном отношении АБЛ должна иметь собственное заборное устройство или обеспечиваться образцами за счет заборного устройства, общего для всей космической станции, частью которой является АБЛ. После забора образца он поступает в дозатор-распределитель, а затем в инкубационное отделение, где при определенной температуре и освещении происходит выращивание микрофлоры и обогащение материала образца.

Эти процессы можно вести в разных режимах, начиная от полного сохранения первоначальных марсианских условий и кончая созданием температуры, давления и влажности, близких к земным.

В связи с этим в конструкции АБЛ предусматривается существование систем, наполняющих емкости под определенным давлением, система вакуумных клапанов для отделения АБЛ от наружной атмосферы после забора пробы. Необходимым элементом является также устройство для поддержания определенной температуры как в блоке выращивания микроорганизмов, так и непосредственно в измерительной ячейке, где производится снятие оптических параметров образца. Через определенные промежутки времени, по мере развития микрофлоры, материал образца в твердом и растворенном виде анализируется с помощью функциональных, а также некоторых аналитических методов. При этом предполагается, что информация о наличии на планете общих предпосылок для существования жизни (температура, состав атмосферы, присутствие органических веществ) должна быть получена с помощью дистанционных и аналитических методов.

Рассмотрим кратко некоторые из наиболее разработанных проектов АБЛ или ее отдельных функциональных узлов.

Согласно проекту «Викинг» [55] предполагается высадка на поверхность Марса тяжелой станции, на которой будет осуществлен ряд экзобиологических экспериментов. Намечаются следующие эксперименты: опреде-

ление метаболизма, ассимиляция CO и CO_2 , разложение субстрата, меченного по C^{14} , опыты по газообмену, измерение светорассеяния. Все четыре эксперимента проводятся параллельно на материале от одного и того же взятого образца (рис. 15). Это обстоятельство весьма существенно, поскольку изменение каждой отдельной характеристики может быть отражением чисто физико-химических процессов. Действительно, изменение газового состава может быть следствием химических процессов, сорбции и десорбции, изменением растворимости газов; рассеяние света может изменяться из-за образования кристаллов и выпадения осадков; наконец, изменение накопления C^{14} в органических продуктах может вызываться фотохимическими реакциями. Однако вероятность соответствующего изменения этих трех параметров практически равна нулю, если в образце отсутствуют активные организмы [67].

Предусматривается 9 измерительных камер, 3 из них предназначены для экспериментов по газообмену, и по 2 камеры — на каждый из остальных трех [55]. В течение

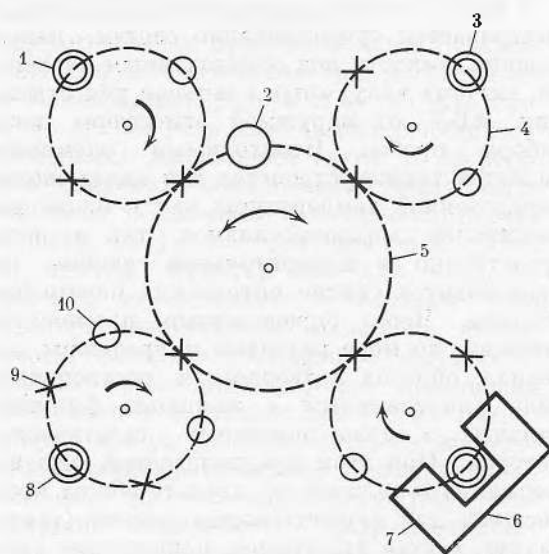


Рис. 15. Схема экспериментов на АБЛ проекта «Викинг-75» [55]

- 1 — блок эксперимента по газообмену;
- 2 — бункер для почвы;
- 3 — блок эксперимента по разложению субстрата, содержащего C^{14} ;
- 4 — измерительная камера;
- 5 — путь распределения материала образца;
- 6 — блок эксперимента по светорассеянию;
- 7 — оптическая система;
- 8 — блок эксперимента по ассимиляции CO_2 и CO ;
- 9 — ячейка для сброса;
- 10 — измерительная камера

90 дней функционирования станции на поверхности планеты планируется провести по крайней мере три 15-дневных цикла измерений и один контрольный опыт для каждого из четырех экспериментов.

В качестве контроля предполагается брать образцы, инактивированные нагреванием до 160° в течение 3 час. Станция имеет инжекторы для введения марсианской атмосферы, паров воды, газов с радиоактивной меткой, а также счетчики β -излучения для определения C^{14} . Специальное устройство контролирует последовательность экспериментов и может изменять ее по команде с Земли. Информация передается на Землю или поступает предварительно в блок памяти всей космической станции. Общий вес АБЛ составит 8,5 кг.

В основу другого проекта положены три характерных метода: фотометрия культуральной среды в процессе развития в ней микроорганизмов, биолуминесцентный метод определения железопорфириновых соединений, радиометрический метод определения разложения глюкозы, меченной по C^{14} в процессе жизнедеятельности микроорганизмов [13]. Последний метод легко модифицируется для одновременного определения фотосинтеза по убыли C^{14}O_2 в газообразной фазе при освещении образца. В целом проект АБЛ включает пять методов обнаружения жизни и широко использует оптические измерительные устройства. В приборе предусмотрено два шлюза для забора грунта планеты, а само взятие пробы осуществляется с помощью липкой ленты. Проба грунта весом 1 г поступает в дозатор, который распределяет его по рабочим кюветам: фотометрический канал — 25 мг, биолуминесцентный — 500 мг, радиометрический — 100 мг. После распределения грунта шлюзовое отверстие герметически закрывается и давление в приборе поднимается до заданной величины. По команде программного устройства ампулы с питательной средой и ингибиторами поступают в рабочие и контрольные кюветы; начинается культивирование микроорганизмов. Измерения проводятся в шести реакционных кюветах, где регистрация света осуществляется вибростойкими фотоумножителями, а в радиометрическом канале используются счетчики β -излучения. В приборе предусматривается три цикла измерений по два повторных в каждом. Программное устройство устанавливает время между циклами.

Важным функциональным узлом в АБЛ

является измерительная кювета для получения оптических характеристик исследуемого материала. Действительно, как мы уже видели, эта задача стоит при применении аналитических методов определения сложных органических соединений по их оптическим характеристикам, при исследовании с помощью функциональных методов свойств микроорганизмов и отдельных процессов метаболизма. Во всех этих весьма различных случаях независимо от предварительной обработки первоначального материала образца, будь то живые клетки или органические соединения, схема исследования с помощью оптических методов в измерительной кювете остается в целом одной и той же. Это обстоятельство позволило предложить измерительный оптический узел АБЛ для определения жизни на основе фотобиологических методов и комплексного получения оптических характеристик исследуемого образца [77].

На рис. 16 изображена принципиальная блок-схема установки, дающей возможность получать одновременно несколько параметров образца, взятого с поверхности почвы. Система возбуждения объекта монохроматическим светом с параллельной регистрацией с помощью фотоэлектронных умножителей позволяет производить в измерительной ячейке после автоматического забора и приготовления проб снятие следующих параметров.

1. Спектр и интенсивность поглощения света в области 250—1000 нм.
2. Спектр и интенсивность отражения света в области 250—1000 нм.
3. Спектр и интенсивность флуоресценции.
4. Спектр, интенсивность и кинетика процесса спонтанной и фотоиндуцированной хемилюминесценции.
5. Биолуминесценция при наличии АТФ.
6. Динамика изменения оптической плотности при наличии размножения микроорганизмов.
7. Динамика изменения содержания O_2 , CO_2 , pH с помощью введенных в среду электродов.
8. Содержание восстановленных пикотин-амидадениннуклеотидов.

Введение в измерительную ячейку различных веществ может обеспечить регистрацию практически любой реакции обнаружения тех или иных биологически важных соединений, в том числе и сложных органических молекул, которые сопровождаются изменением поглощения или излучения света реакционной средой.

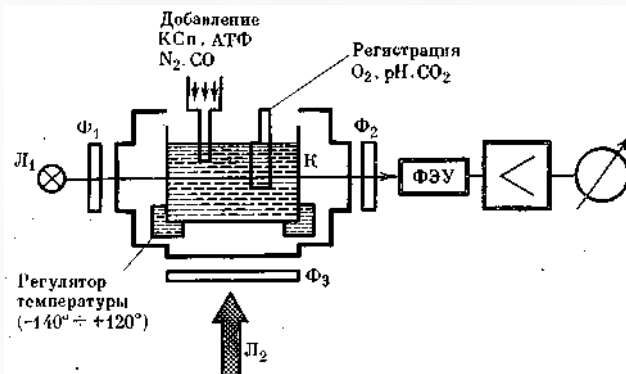


Рис. 16. Блок-схема оптического измерительного блока АБЛ для обнаружения жизни на основе фотобиологических методов [28]

Л₁ — источник измерительного света;
Л₂ — источник возбуждающего света;
Ф₁, Ф₂, Ф₃ — светофильтры;
К — кювета с образцом;
ФЭУ — фотоэлектронный умножитель в цепи с усилителем и регистратором

Легко также изменять условия освещения объекта для обнаружения реакций фотосинтезирующих и других организмов, жизнедеятельность которых также зависит от действия света. Существенным является изменение температуры образца в широких пределах (от +120 до -140°), поскольку именно своеобразный характер температурной зависимости ряда параметров является отличительным признаком живых систем.

Важной особенностью является возможность снятия оптических характеристик не только растворов, но и твердых образцов. Хотя чувствительность такой установки и ограничивается пределами, характерными для обычных однолучевых схем (10^2 — 10^3 клеток фотосинтезирующих организмов, 10^{-14} г/мл АТФ), она может быть повышена современными средствами радиоэлектроники. Преимуществом установки является одновременная регистрация во времени ряда параметров на одном и том же образце, что значительно повышает достоверность научной информации, дает экономию веса и количества отдельных приборных единиц.

Развитие экзобиологии теснейшим образом связано с разработкой фундаментальных проблем биологии, имеющих первостепенное значение для понимания сущности жизненных процессов, принципов организации живых систем.

В описанных конструкциях отдельных приборов и АБЛ для инопланетных биоло-

гических исследований отражается уровень наших знаний в этой области естествознания. Трудно переоценить тот вклад в развитие науки, который будет сделан в случае обнаружения инопланетных форм жизни. Однако и отсутствие жизни на Марсе и других планетах солнечной системы не только не исключает развития экзобиологии как науки, но и не является препятствием на пути дальнейшего совершенствования методов автоматического обнаружения и снятия характеристик живых систем. Результаты в этой области, являющейся частью биологического приборостроения, несомненно найдут широкое применение как в совре-

менной биологической науке, так и других областях человеческой деятельности, не говоря уже о задачах освоения космического пространства и необходимости в связи с этим автоматического контроля за состоянием живых систем в этих условиях. Планируя экзобиологические эксперименты на Марсе, необходимо учитывать и возможность обнаружения на этой планете различных доклеточных форм, отражающих этапы эволюции предбиологических систем, давно и безвозвратно утерянных на Земле. Нет сомнения, что изучение такого рода объектов могло бы внести неоценимый вклад в развитие биологической науки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов С. И. О пределах адаптации жизни к экстремальным условиям. В кн. «Проблемы космической биологии», 19. М., «Наука», 1972, 7.
2. Вдовыкин Г. П. Углеродистое вещество метеоритов. М., «Наука», 1967.
3. Владимиров Ю. А. Фотохимия и люминесценция белков. М., «Наука», 1965.
4. Воскресенская Н. П. Фотосинтез и спектральный состав света. М., «Наука», 1965.
5. Горюхиц Н. Г. Изучение космоса и происхождения жизни. В кн. «Проблемы эволюционной и технической биохимии». В. Л. Кретович (ред.). М., «Наука», 1964, 12.
6. Горяев П. П. Выделение органических веществ из почв применительно к целям экзобиологии. Изв. АН СССР, серия биол., 1972, вып. 5, 672.
7. Гризоров Л. Н., Кононенко А. А., Рубин А. Б. Исследование низкотемпературных фотиндуцированных реакций цитохромов в клетках серобактерий. Молекулярная биология, 1970, 4, 483.
8. Девев Г., Маскона А. Оптимальная самонастройка обменных процессов в клетке. Докл. АН СССР, 1965, 162, 201.
9. Звягинцев Д. Г. Изучение прикрепляющихся микроорганизмов с помощью флуоресцентной микроскопии. Биологические науки, 1965, 3, 11.
10. Звягинцев Д. Г. Адсорбция почвами микроорганизмов и ее влияние на их жизнедеятельность. Докт. дисс. М., 1970.
11. Имшенецкий А. А. Обнаружение жизни вне Земли. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, 27.
12. Имшенецкий А. А., Мурзаков Б. Г., Восканян А. Г., Суриков В. К. Динамика разложения 1-6- C^{14} -глюкозы микрофлорой пустынных почв. Микробиология, 1972, 41, 727.
13. Казаков Г. А. Прибор для обнаружения жизни вне Земли. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1967.
14. Колебательные процессы в биологических и химических системах. Г. М. Франк (ред.). М., «Наука», 1967.
15. Кондратьева Е. Н. Фотосинтезирующие бактерии. М., Изд-во АН СССР, 1963.
16. Конев С. В., Вологовский И. Д. Введение в молекулярную фотобиологию. Минск, «Наука и техника», 1971.
17. Кузюрина Л. А., Яшина В. М. Питательные среды, которые могут быть применены для обнаружения микроорганизмов на Марсе. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, 41.
18. Липман Ф. Современный этап эволюции биосинтеза и предшествовавшее ему развитие. В кн. «Происхождение предбиологических систем». М., «Мир», 1966, 261.
19. Ляпунов А. А. Об управляющих системах живой природы. Проблемы кибернетики, 1963, 10, 179.
20. Мейсель М. Н. Флуоресцентная микроскопия и цитохимия в общей микробиологии. Усп. микробиол., 1971, 7, 3.
21. Опарин А. И. Жизнь, ее природа, происхождение и развитие. М., Изд-во АН СССР, 1960.
22. Опарин А. И. Возникновение жизни на Земле и за ее пределами. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, 16.
23. Пасынский А. Г. Биофизическая химия. М., «Высшая школа», 1963.
24. Пасынский А. Г. Некоторые вопросы теории возникновения жизни на Земле. В кн. «Проблемы эволюционной и технической биохимии». В. Л. Кретович (ред.). М., «Наука», 1964, 26.
25. Рубин А. Б. Процессы дезактивации возбужденных молекул пигментов в фотосинтезирующих организмах. Канд. дисс. М., 1962.
26. Рубин А. Б., Венедиктов П. С. О связи хемиллюминесценции фотосинтезирующих организмов со световыми реакциями фотосинтеза. Физиол. раст., 1963, 34, 15.
27. Рубин А. Б., Фохт А. С. Об определении скорости прироста энтропии для систем, далеких от термодинамического равновесия. Биофизика, 1972, 17, 96.
28. Рубин Л. Б., Еремеева О. В., Ахобадзе В. В. Влияние света на метаболизм нефотосинтезирующих микроорганизмов. Усп. совр. биол., 1971, 71, 220.
29. Руденко А. П. Теория саморазвития открытых каталитических систем. М., Изд-во МГУ, 1969.
30. Сотников Г. Г. Обнаружение железопорфириновых белков при поисках жизни вне Земли. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, 60.
31. Сотников Г. Г. О возможности обнаружения вне-

- земной жизни некоторыми физико-химическими методами. Канд. дисс. М., 1971.
32. Тарусов Б. Н., Поливода А. Н., Журавлев А. И. Обнаружение хемилюминесценции в печени облученных мышей. Радиобиология, 1961, 1, 150.
 33. Федорова Р. И. О возможности метода газообмена для обнаружения жизни вне Земли — идентификация денитрифицирующих микроорганизмов. Изв. АН СССР, серия биол., 1972, № 5, 7.
 34. Фесенков В. Г. Условия жизни во Вселенной. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, 7.
 35. Barth C. A. Planetary ultraviolet spectroscopy. Appl. Optics, 1969, 8(7), 1295.
 36. Batson R. M. Photogrammetry with surface-based images. Appl. Optics, 1969, 8(7), 1315.
 37. Biemann K. Organic analysis. Appl. Optics, 1970, 9(6): 1282.
 38. Bernal J. D. The origin of life. London, Weidenfeld and Nicolson, 1967.
 39. Botan E. A., Hovnanian H. P. The detection of extraterrestrial life by means of a quantitative fluorescent nucleic acid orange reaction. Life Sci. and Space Res., 1965, 3, 95.
 40. Calvet E., Prat H. Microcalorimetric. Paris, Masson etc., 1956.
 41. Carlton N. P., Traub W. A. Detection of molecular oxygen on Mars. Science, 1972, 177, 988.
 - 41a. Chance B., Nishimura M. On the mechanism of chlorophyll-cytochrome interaction. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1960, 46, 19.
 42. Duysens L. N. M. Photosynthesis. Progr. Biophys., 1964, 14.
 43. Engineering Breadboard. Model-wolftrap microbe detection device. BBRC F65-6, Contract NsG-209AG-1, Ball Brothers Res. Corporation. Boulder, Colo., 1965.
 44. Fernandez-Maran H. Exobiological study. Analytical systems for biological study of Mars. The role of electron microscopy and electron optical techniques in exobiology. NASA-CR-75702, 1965.
 45. Firsoff V. A. Life beyond the Earth. London, Hutchinson Scient. and Techn., 1963.
 46. Giese A. C. Cell physiology. Philadelphia, W. B. Saunders Co., 1962.
 47. Halpern B. Optical activity for exobiology and the exploration of Mars. Appl. Optics, 1969, 8(7), 1349.
 48. Halpern B., Westley J. W., Levinthal E. C., Lederberg J. The Pasteur probe: an assay for molecular asymmetry. Life Sci. and Space Res., 1967, 4, 239.
 49. Horowitz N. H. The search for extraterrestrial life. Science, 1966, 151, 789.
 - 49a. Horowitz N. H., Cameron R. E., Hubbard S. S. Microbiology of the dry valleys of Antarctica. Science, 1972, 176, 242.
 50. Hotz G. M. Sampling. Applied Optics, 1969, 8(7), 1329.
 51. Hubbard J. S., Hobby G. L., Horowitz N. H., Geiger P. J., Morelli F. A. Measurement of C^{14} assimilation in soils: an experiment for the biological exploration of Mars. Appl. Microbiol., 1970, 19, 32.
 - 51a. Hubbard J. S., Hardy J. P., Horowitz N. H. Photocatalytic production of organic compounds from CO and H₂O in simulated Martian atmosphere. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1971, 68, 574.
 52. Imshenetsky A. A., Butenko S. A., Kuzjurina L. A., Mikhlin L. M., Sotnikov G. G., Fedorova R. I. [Имшенецкий А. А., Бутенко С. А., Кузюрина Л. А., Мухин Л. М., Сотников Г. Г., Федорова Р. И.]. A comparative evaluation of different methods for detections of extraterrestrial life. Life Sci. and Space Res., 1968, 6, 117.
 53. Kay K. E., Walweck E. K. Philco labs developing protein detector to probe for life on Mars. Missiles and Rockets, 1962, 14(9), 26.
 54. Kenneth F. R. Electronic frog eyes may search for life on Mars. Electronic Design, 1966, 14, 17.
 55. Klein H. P., Lederberg J., Rich A. The Viking 1975 biological experiments. Icarus, 1972, 16, 139.
 56. Kok B., Varner J. E. Extraterrestrial life detection based on oxygen isotope exchange reactions. Science, 1967, 155, 1110.
 57. Kozlov S. F., Fedorova R. I., Konorova E. A., Mikhlin L. M. [Козлов С. Ф., Федорова Р. И., Копорова Е. А., Мухин Л. М.] The use of diamond radiation counters in the detection of extraterrestrial life. Life Sci. and Space Res., 1971, 9, 153.
 58. Levin G. V., Heim A. H., Clendenning J. R., Thompson M. F. «Gulliver» a quest for life on Mars. Science, 1962, 133, 114.
 59. Levin G. V., Peretz G. R. Life detection by means of metabolic experiments. Proc. 12th Annual Meet. Amer. Astronaut. Soc. Anaheim, Cal., 1966.
 60. Liventhal E. C., Lederberg J., Hundley L. Multi-vator — a biochemical laboratory for Martian experiments. Life Sci. and Space Res., 1964, 11, 112.
 61. Mars biological sample collection and processing study program, 1965. Contract SPL-950771.
 62. McElroy W., Strehr B. L. Factors influencing the response of bioluminescent reaction to adenosine triphosphate. Arch. Biochem. and Biophys., 1949, 22, 420.
 63. McLaren A. D., Novick A. Calorimetry. In: Biology and exploration of Mars. D. G. Rea (Ed.). N. Y., 1966, 406.
 64. Merck E. L., Oyama V. I. Analysis of methods for growth detection in the search for extraterrestrial life. Appl. Microbiol., 1968, 16, 724.
 65. Merck E. L., Oyama V. I. Integration of experiments for the detection of biological activity in extraterrestrial exploration. Life Sci. and Space Res., 1970, 8, 108.
 66. Murray B. C., Davies M. F. Space photography and exploration of Mars. Appl. Optics, 1970, 9(6), 1270.
 67. Oyama V. I., Berdahl B. Y., Carle G. C., Merck E. L. Experimental concepts of life detection for planetary exploration. Pap. ASME, NAV/SpT-3, 1970.
 68. Petersen K. E., Ginsberg R., Green V., Lundyren D., Rottenberg D. Microscopic system for Mars study program. Final Rept. NASA-CR-50429, 1962.
 69. Ponnampetuma C. Life in the universe-intimations and implications for space science. Astronaut. and Aeronaut., 1965, 3, 52.
 70. Prigogine I. Introduction to thermodynamics of irreversible processes. N. Y., Intersci. Publ., 1967.
 - 70a. Prigogine I., Nicolis G. Biological order, structure and instabilities. Quart. Rev. Biophys., 1971, 4, 1071.
 71. Rho J. H. Fluorometric measurement of growth II. Fluorescence of soil as a measure of bacterial growth. Space Program Sum., 1964, 37—24, 4, 243.
 72. Rho J. H. Fluorometric measurement of growth III. The interference of soil with the fluorescence of proteins in a neutral aqueous solution. Space Program Sum., 1964, 32—37, 4, 116.
 73. Rho J. H. Fluorometric determination of nucleic acids. II. Assay of purines and purine nucleoti-

- des of biological samples of chemical hydrolysis. Space Program Sum., 1966, 37-42, 4, 153.
74. *Rho J. H., Behar J. V.* Fluorometric measurement of growth. Fluorescence of chlorophyll «a» as a measure of algal growth. Space Program Sum., 1966, 37-42, 4, 262.
 75. *Rho J. H., Thompson J. R.* Fluorometric determination of nucleic acids. I. Deoxyribose assay of biological material. Space Program Sum., 1966, 37-41, 4, 170.
 76. *Rich E., Plakes C. J.* Flight instrumentation for extraterrestrial detection of adenosine triphosphate. Aerospace Med., 1968, 39, 879.
 77. *Rubin A. B.* [Рубин А. Б.]: Photobiological processes and criteria for the existence of extraterrestrial life. Life Sci. and Space Res., 1971, 9, 12.
 78. *Sagan C.* Biological exploration of Mars. Exploration Mars. N. Y., Amer. Astronaut. Soc., 1963, 571.
 79. *Sagan C.* Exobiology: a critical review. Life Sci. and Space Res., 1964, 2, 35.
 80. *Seliger H. H., McElroy W. D.* Spectral emission and quantum yield of firefly bioluminescence. Arch. Biochem. and Biophys., 1960, 88, 136.
 81. *Shneour E. A.* 3-methoxy-dihydrofluoran-6-OL-6-phosphate: a fluorogenic substrate for the detection of enzymatic activities. Techn. rept. IRL-1015. Stanford Univ., 1965a.
 82. *Shneour E. A.* Criteria for the detection of biological systems. Unmanned Exploration Solar. Syst. Wash. D. C. Amer. Astronaut. Soc., 1965b, 215.
 83. *Simmonds P. G., Shulman G. P., Stembridge C. N.* Organic analysis by pyrolysis — gas chromatography mass spectrometry: a candidate experiment for the biological exploration of Mars. J. Chromatogr. Sci., 1969, 7, 36.
 84. *Soffen G. A.* Extraterrestrial optical microscopy. Appl. Optics, 1969, 8(7), 1341.
 85. *Stephenson M.* Bacterial metabolism. London, Longmans Green, 1949.
 86. *Stevens V. L.* Fluorometric assay for nuclease activity. Techn. rept IRL-1029. Stanford Univ., 1965.
 87. *Strehler B., Arnold W.* Light production by green plants. J. Gen. Physiol., 1951, 34, 809.
 88. The biological exploration of Mars. GTG 900-44, Jet Prop. Lab. Cal. Inst. Technol. Pasadena, Cal., 1967.
 89. *Vishniac W.* Bacterial ecologies in limonite. Life Sci. and Space Res., 1965, 3, 159.
 90. *Vishniac W., Buckendahl D. F.* Detection of microorganisms on the planet Mars. In: Unmanned Explorat. Solar. Syst. Wash. D. C., Amer. Astronaut. Soc., 1965, 325.
 91. *Wald G.* The origins of life. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1964, 52, 595.
 92. *West S. S., Liskowitz J., Usdin V. R., Welch E. A.* A polarimeter for detection of extraterrestrial life. Proc. 18th Annual Conf. Engng. Med. and Biol., 1965, 7, 176.
 93. *Westley J.* Fluorescein and naphthol substrates for phosphatase assays. Techn. Rept IRL-1010. Stanford Univ., 1964.
 94. *Wolfgang R.* Carbon monoxide as a basis for primitive life on the other planets. Nature, 1970, 225, 876.
 95. *Young R. S.* Extraterrestrial biology. N. Y., Holt, Rinehart and Winston, 1966, 60.

КАРАНТИН ПЛАНЕТ: ПРИНЦИПЫ, МЕТОДЫ И ПРОБЛЕМЫ

ЛОУРЕНС Б. ХОЛЛ

Отдел космических исследований НАСА,
Вашингтон, О. К., США

ОСНОВЫ ПЛАНЕТНОГО КАРАНТИНА

Проблема загрязнения

Еще с древних времен человечество привлекала перспектива открытия и изучения внеземных форм жизни. Теперь, когда исследование космического пространства стало реальностью, обнаружение инопланетной жизни или установление ее предшественников является одной из важных целей национальных программ исследований планет Советским Союзом и Соединенными Штатами Америки.

Однако успешному исследованию космического пространства угрожает возможность заноса человеком при полете от одной планеты к другой инопланетных форм жизни, что может привести к самым неожиданным последствиям. Занесение и размножение земных форм может уничтожить раз и навсегда благоприятную возможность изучить планеты в присущих им условиях. Планетный карантин осуществляется для сохранения этой возможности.

Вероятно, Земля является единственной планетой в Солнечной системе, на которой жизнь может существовать. Если это положение подтвердится, необходимость соблюдения карантина отпадет.

Однако в настоящее время осуществление планетного карантина необходимо по трем причинам.

1. Земная микрофлора, занесенная на планету автоматическими аппаратами или пилотируемыми космическими кораблями, может размножиться и распространиться на ней, что станет препятствием для дальнейших исследований и маскирует или совсем разрушит жизнь, характерную для данной планеты. Природные условия при этом могут так измениться, что эта планета уже

не будет представлять значительного научного интереса для последующих поколений.

2. Автоматический космический аппарат, предназначенный для определения признаков жизни на планете, не должен быть загрязнен земной микрофлорой. В противном случае приборы будут обнаруживать в первую очередь земную микрофлору, а не представителей внеземной жизни.

3. Земля может быть заражена опасными для нее организмами или веществами, занесенными с другой планеты или из космического пространства.

Хотя упомянутые выше причины, обуславливающие необходимость осуществления планетного карантина, в основном связаны с микроорганизмами как наиболее простым источником заражения в силу того, что они обладают способностью выдерживать воздействие экстремальных факторов окружающей среды и быстро размножаться, интересы науки в области внеземной жизни не ограничиваются только этими живыми формами. Например, обнаружение органических молекул, которые могут быть предшественниками жизни или ее остатками, представляло бы огромную научную значимость. Случайное занесение органических молекул или иных земных форм жизни (не обязательно жизнеспособных микроорганизмов) может явиться причиной ошибочного заключения о вероятности жизни в пределах Солнечной системы. Поэтому программа планетного карантина должна учитывать и эти возможности.

До сих пор вероятность заражения Земли внеземными формами жизни могла существовать только во время пилотируемых полетов на Луну. Лунная приемная лаборатория обеспечила карантин возвратившихся космонавтов и проб лунного грунта. По мере накопления информации об условиях на

Марсе определится целесообразность изоляции и обеззараживания кораблей, которые будут совершать полеты на эту планету.

Поэтому при составлении программ таких полетов следует исходить из необходимости предупреждения загрязнения Земли внеземными формами жизни. Методы такого карантина существенно отличаются от методов, применяемых для предупреждения заражения других планет земными организмами.

Один из возможных приемов предотвращения заражения для непилотируемых кораблей включает предварительное обследование возвращаемых образцов на околоземной орбите. Карантин снимается и образцы доставляются на Землю только в том случае, если тесты на биологическую активность окажутся отрицательными. Другой возможный прием заключается в инкапсуляции возвращаемых образцов до приземления; карантин должен соблюдаться в течение всего периода исследования образцов на Земле.

Первые дискуссии по планетному карантину проходили в Вашингтоне в 1964 г. в Национальной академии наук США на конференции по потенциальной опасности заражения Земли при исследовании других планет [27].

Рекомендации этой конференции легли в основу программы США по контролю за обратным заражением.

Автор выражает признательность В. И. Вашкову, Н. В. Рамковой, Т. В. Щегловой и Б. Б. Полякову — советским авторам обзора, использованного при написании этой главы.

Разработка международной программы планетного карантина

Интерес к проблеме планетного заражения способствовал развитию международного сотрудничества в рамках программы Планетного карантина (ПК). В 1957 г. Национальная академия наук США выразила серьезную озабоченность по поводу того, что заражение планет уже на ранних этапах изучения космического пространства ставит под угрозу их дальнейшие исследования. Международный совет научных обществ принял участие в оценке степени опасности заражения планет и высказался за разработку карантинных мероприятий. В соответствии с этим международный совет образовал подкомитет по изучению проблемы заражения при внеземных исследованиях [33]. В 1958 г. подкомитет рекомендовал ряд мер, позволяющих проводить исследования Луны

и планет при соблюдении максимальных предосторожностей против возможного их загрязнения земными организмами.

На заседании подкомитета в 1958 г. [35] было высказано мнение, что разрешение проблемы загрязнения должно стать составной частью обязанностей, возложенных на Комитет космических исследований (КОСПАР), который был образован в октябре 1958 г. КОСПАР взял на себя ответственность за изучение проблемы загрязнения и принял ряд резолюций, определяющих цели планетного карантина для государств, осуществляющих запуски космических кораблей.

Развитие национальных программ планетного карантина

В соответствии с резолюциями КОСПАР СССР и США составили свои программы проведения планетного карантина. В США эта программа осуществляется Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА).

Руководители операций ПК в обоих государствах стремились выполнить требования КОСПАР, разрабатывая комплекс реальных мероприятий ПК и следя за их практическим осуществлением. В резолюции заседаний КОСПАР в 1964 г. впервые был определен допустимый предел загрязнения космических аппаратов $1 \cdot 10^{-3}$ — один микроорганизм на тысячу полетов.

Таблица 1. Вероятность заражения при полетах американских космических аппаратов*

Полет	Вероятность заражения
«Маринер-1» к Венере	$1 \cdot 10^{-4}$
«Маринер-2» к Венере	$1 \cdot 10^{-4}$
«Маринер-3» к Марсу	$4,5 \cdot 10^{-5}$
«Маринер-4» к Марсу	$4,5 \cdot 10^{-5}$
«Маринер-5» к Венере	$3 \cdot 10^{-5}$
«Маринер-6» к Марсу	$3 \cdot 10^{-5}$
«Маринер-7» к Марсу	$3 \cdot 10^{-5}$
«Маринер-8» к Марсу	$7,1 \cdot 10^{-5}$
«Маринер-9» к Марсу	$7,1 \cdot 10^{-5}$
«Пионер-10»	$6,4 \cdot 10^{-5}$
«Маринер-Венера-Меркурий» вокруг Венеры	$7 \cdot 10^{-5}$
«Викинг-75» (каждый полет)	$1 \cdot 10^{-4}$

* Комитет Планетного карантина, НАСА, Служба Планетного карантина, Отдел космических исследований, Вашингтон, О. К.

Установление этой конкретной величины позволило выработать количественные требования ПК для каждого космического полета.

В соответствии с принятой в США процедурой комитет ПК разделил эту предельно допустимую величину, установленную КОСПАР ($1 \cdot 10^{-3}$), на число полетов, которые могут привести к загрязнению, и определил для каждого полета величину вероятного загрязнения. В этих расчетах отражается различная степень риска загрязнения в зависимости от характера космического полета: полет с посадкой, орбитальный, пролетный и т. д.

Орбитальные и пролетные аппараты легче удовлетворяют этим требованиям, тогда как посадочные аппараты требуют выполнения дорогостоящих, хотя и эффективных операций по обеззараживанию.

В табл. 1 представлены расчетные величины вероятности загрязнения планет во время некоторых космических полетов, осуществленных в США.

МЕТОДОЛОГИЯ ПЛАНЕТНОГО КАРАНТИНА

Основные требования, которые предъявляет ПК к космическим полетам на другие планеты, заключаются в максимальном снижении вероятности загрязнения планеты и научных приборов, находящихся на борту космического корабля. Эти требования необходимо учитывать при изготовлении космических кораблей и аппаратуры, а также при выборе траектории полета. Так как космический корабль и его аппаратура должны быть абсолютно надежны, чтобы обеспечить успешное осуществление полетов, большое внимание следует уделять выбору карантинных средств, применение которых не отразится на успехе полета.

Это противоречие целей должно учитываться, с одной стороны, теми, кто устанавливает требования к ПК, и с другой — теми, кто выбирает и осуществляет контроль за загрязнением. Эффективное осуществление программ ПК должно также учитывать технические и финансовые возможности полетных проектов. С этой целью осуществляются теоретические расчеты и экспериментальные поиски методов карантина, обеспечивающих максимальную эффективность при минимальных изменениях в программе полета и минимальной стоимости.

Основным достижением США по ПК является разработка аналитической модели,

связывающей различные факторы, которые необходимо учитывать при расчете вероятности загрязнения. Существующие в настоящее время аналитические модели [59, 112, 123], основанные на математической формуле вероятности загрязнения, впервые предложенной Саганом и Коулманом [110], облегчают определение количественных требований ПК и оценку их влияния на результаты полетов, помогают установить величину потенциального загрязнения, определить необходимость обеззараживания космических кораблей и выбрать соответствующие средства контроля за загрязнением.

Модели вероятности загрязнения

Характер взаимодействия различных факторов, определяющих степень необходимого контроля загрязнения, можно проиллюстрировать с помощью модели допустимого риска загрязнения. Риск определяется как вероятность появления различных условий, при которых может произойти загрязнение планеты из любого потенциального источника.

Одна из моделей, используемая для количественного определения обеззараживания, которое необходимо осуществлять во время сборки и испытаний посадочных аппаратов, основывается на аналитической формуле, предложенной в 1967 г. в Лондоне рабочей группой КОСПАР [118]. Она выражает вероятность заражения планеты, если на космическом аппарате, совершающем посадку на эту планету, сохраняется по крайней мере один из $N_i(o)$ организмов. Приведен-

¹ Микробная обсемененность космического аппарата до термической стерилизации определяется путем взятия проб и их оценок. Эта процедура описана в разделе «Нормы и рекомендации» (стр. 396 данной главы). В реальных условиях поверхностная обсемененность определяется путем взятия большого числа проб с любых участков поверхности и статистической обработки результатов для вычисления среднего количества микроорганизмов на единицу поверхности. Затем производят расчет на общую поверхность космического аппарата. Путем пересчета результатов тех же самых проб по отношению к соединяющимся поверхностям космического аппарата определяют общую микробную обсемененность. Загрязнение внутренних объемов определяется в основном пересчетом величины средней плотности микроорганизмов на общую массу неметаллических материалов космического корабля. Читатель может найти описание методики взятия проб с поверхности космического корабля и ознакомиться с результатами определения общей обсемененности космических аппаратов, запущенных за последнее время в США, в работе [40].

ная ниже формула представляет собой упрощение более сложных расчетов и предполагает, что произведение вероятностей, стоящих в правой части уравнения, намного меньше единицы:

$$P(c) = \sum_i N_i(o) \cdot P(st) \cdot P(uv) \cdot P(sa) \cdot P(r) \cdot P(g).$$

Значение $P(c)$ равно произведению числа микроорганизмов в каждом источнике и вероятности распространения загрязнения для отдельных источников микробного заражения i .

В этом уравнении [52] $N_i(o)$ — количество жизнеспособных земных организмов, находящихся на аппарате при запуске. Факторы, влияющие на возможность загрязнения и используемые в этой формуле, таковы: $P(st)$ — вероятность того, что микроорганизм на космическом аппарате выживет в течение межпланетного космического полета; $P(uv)$ — вероятность того, что микроорганизм на космическом аппарате выдерживает влияние ультрафиолетовой радиации космоса; $P(sa)$ — вероятность того, что микроорганизм, выживший в течение космического перелета, сохранится при входе в атмосферу исследуемой планеты; $P(r)$ — вероятность высвобождения жизнеспособных микроорганизмов и попадания их на поверхность планеты или в атмосферу; $P(g)$ — вероятность того, что жизнеспособный микроорганизм, случайно попавший на поверхность планеты или в ее атмосферу, будет расти и размножаться.

Каждый член правой стороны уравнения может быть разделен на несколько подчленов. Так, например, $P(g)$ включает вероятность того, что данный вид микроорганизмов может расти на этой планете, что на ней существуют благоприятные условия для его роста и что этот микроорганизм благополучно перенесет переход из аппарата в окружающую среду.

Окончательная сумма представляет собой вероятность, которую можно непосредственно сравнить с вероятностью допустимого заражения для данного полета. Такой подход позволяет определить вероятность развития непредвиденных событий. Знание этой величины и отклонений от ожидаемого значения помогает установить параметры контроля при сборке космического аппарата и его подготовке к полету.

Для правильной оценки вероятности заражения необходимо знать условие, при котором микроорганизмы будут выживать в

космическом пространстве. Этот вопрос изучается специалистами в области космической микробиологии и экологии. Многие из этих исследований организуются комитетом ПК, чтобы уточнить количественные оценки, заложенные в основу требований ПК.

Изучение влияния факторов космического пространства на выживаемость

Как в СССР, так и в США проводятся исследования по оценке влияния факторов космического пространства на выживаемость. В экспериментах, имитирующих условия космоса, показано, что космическая среда менее губительна для микроорганизмов, чем для других, более сложных форм жизни. Тем не менее можно ожидать некоторую инактивацию микроорганизмов, вызванную радиацией и в меньшей степени действием температуры и вакуума.

В Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института исследовалась выживаемость микроорганизмов в длительных (до 180 дней) экспериментах, имитирующих воздействие температуры и вакуума при космическом полете. Как оказалось [51], летальный эффект этих воздействий не так уж велик, и поэтому нет оснований предполагать, что при совместном воздействии вакуума и температуры в космосе погибнет значительная часть микроорганизмов. Можно ожидать лишь незначительного начального снижения роста микробной популяции, но нельзя рассматривать температуру и вакуум как стерилизующие или обеззараживающие агенты, особенно в отношении спор.

Учеными СССР и США проводятся эксперименты с различными видами микроорганизмов в условиях, имитирующих физические параметры Марса, Венеры и Луны. При параметрах среды, близких к марсианским, а именно: перепад температур от -60 до $+26^\circ\text{C}$, атмосферное давление 7 мм рт. ст., газовый состав 80% углекислого газа и 20% азота, некоторые пустынные микроорганизмы [7] сохраняли способность к росту при относительной влажности, равной 3,8%. Очевидно, это определялось тем, что для этих земных форм жизни достаточно очень незначительное количество влаги.

В экспериментах по имитации условий космического пространства, проводимых в СССР [8], обнаружено, что некоторые микроорганизмы и ферменты устойчивы к действию вакуума порядка 10^{-10} мм рт. ст.

Некоторые исследования в США также выявили способность микроорганизмов сохраняться в условиях вакуума [44, 98]. Интерпретируя результаты экспериментов с вакуумом, нужно учитывать два фактора. Первый — для того, чтобы в условиях эксперимента получить вакуум, эквивалентный вакууму космического пространства, необходимо относительно длительное время его воздействия, особенно если при этом требуется повышенная температура. Поэтому обезвоживание микроорганизмов в условиях эксперимента происходит со значительно меньшей скоростью, чем на поверхности космического аппарата в момент его выхода из атмосферы Земли. Второй фактор, который достаточно трудно учесть, касается адекватности контроля. Даже при умеренном вакууме (10^{-2} мм рт. ст.), который используется как контроль, зачастую трудно установить тот момент, когда клетка при воздействии вакуума, высушивании или регидратации либо теряет жизнеспособность, либо становится устойчивой к данным факторам.

Ионизирующая космическая радиация, за исключением излучений солнечных вспышек и радиационных поясов Земли, не может рассматриваться как инактивирующий фактор; неясно, может ли эта радиация уничтожить живые формы, расположенные на поверхности космического аппарата. Известно, например, что организмы, обитающие в воде атомных реакторов, адаптируются к радиации в 1 млн. р.

Наиболее губительным фактором космического пространства являются ультрафиолетовые лучи. В табл. 2 указаны дозы, необходимые для 80—100%-ной инактивации незащищенных микроорганизмов. Приведенные цифры взяты из экспериментов, проводившихся в СССР и США [8, 9, 10, 31]. Однако, благодаря высокой степени отражения, поток ультрафиолетовой радиации легко экранируется пылью или каким-либо другим непрозрачным материалом; например, верхний слой микроорганизмов может защитить нижележащие клетки. Для оценки вероятности выживания микроорганизмов на посадочных аппаратах при входе в атмосферу планет использовали опыт изучения температур при входе космического аппарата в атмосферу Земли и модели атмосфер других планет. Эти исследования выполнены для конкретных проектов космических полетов, поскольку многие траектории и используемые технические средства являются уникальными для каждого полета. Следова-

но, эти результаты имеют ограниченное применение в отношении других полетов.

Недавно проведен анализ выживаемости микроорганизмов при входе в атмосферу Юпитера [117]. Предполагается сильный нагрев поверхности капсулы и вероятное ее сгорание, вызванные высокой плотностью атмосферы и траекторией полета аппарата, которая обуславливает высокие скорости при входе в атмосферу.

Недавно закончены исследования, дающие более точную оценку вероятности выживания на поверхности планеты микроорганизмов, сохранившихся на посадочной капсуле или внутри нее. Возможны несколько путей высвобождения микроорганизмов из космиче-

Таблица 2. Устойчивость различных микроорганизмов к ультрафиолетовой радиации [12]

Микроорганизм	Доза ультрафиолетовой радиации, эрг/см ² ·10 ⁴		
	[9]	[31]	[8, 10]
<i>Actinomyces</i> sp.	—	—	4,0—8,0
<i>Aspergillus nidulans</i>	—	—	54
<i>Aspergillus niger</i>	—	—	90—100
<i>Bacillus megaterium</i>	2,9	—	1,13
<i>Bacillus megaterium</i>	6,0	—	2,73
<i>Bacillus pyocyaneum</i>	4,4	—	—
<i>Bacillus subtilis</i>	—	7	6—7
<i>Bacillus subtilis</i>	—	12	12
<i>Bacterium aertrycke</i>	0,048	—	—
<i>Escherichia coli</i>	1,55	3	1—2,5
<i>Micrococcus candicans</i>	3,67	—	—
<i>Micrococcus lysodeikticus</i>	—	—	27—50
<i>Micrococcus pyogenes aureus</i>	—	—	6,0
<i>Micrococcus radiodurans</i>	—	—	80—160
<i>Micrococcus sphaeroides</i>	—	—	10
<i>Oospora lactis</i>	—	5	—
<i>Penicillium digitatum</i>	—	44	—
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	—	—	1,8—3,6
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	—	—	3,0—3,5
<i>Saccharomyces</i> sp.	14,7	—	—
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	6,5	6	—
<i>Saccharomyces (ганлоид)</i>	—	—	8,4
<i>Saccharomyces turbidans</i>	9,0	—	—
<i>Saccharomyces vini</i> (диплоид)	—	—	30
<i>Salmonella typhimurium</i>	—	—	1,9
<i>Sarcina lutea</i>	—	—	19,7
<i>Serratia marcescens</i>	0,7	—	1,8—4,0
<i>Staphylococcus albus</i>	—	—	1,84—3,0
<i>Staphylococcus aureus</i>	1,54	—	2,18—4,95
<i>Streptococcus hemolyticus</i>	—	—	2,16
<i>Streptococcus lactis</i>	—	—	6,15
<i>Streptococcus ridans</i>	—	—	2,0

ского корабля при посадке его на Марс. В программе исследований, осуществляемой фирмой «Боинг», рассмотрены возможные способы высвобождения микроорганизмов в результате разрушения материалов при ударе или эрозии [82]. Материалы космического аппарата с зараженными кусочками разрушались при сильных ударах и при обдувании песком. Эти эксперименты подтвердили величины микробного загрязнения, допустимые при будущих полетах в США¹ (табл. 3).

Таблица 3. Вероятность высвобождения микроорганизмов во время полетов к Марсу при разрушении космического корабля вследствие удара и эрозии

Источник загрязнения	Посадка	Величина
Поверхность корабля	Штатная	От 1 до $1 \cdot 10^{-2}$
То же	Нештатная	0,5
Пространство между соединяемыми поверхностями	Штатная	10^{-3}
То же	Нештатная	10^{-1}
Внутренний объем корабля	Штатная	10^{-4}
То же	Нештатная	10^{-4}

Особое внимание уделяется оценке $P(g)$, т. е. вероятности того, что земные микроорганизмы, достигнув данной планеты, будут расти и размножаться. Результаты лабораторных исследований роста земных организмов в имитируемой марсианской среде не являются убедительными из-за отсутствия сведений о наличии воды в атмосфере. Комитет космических исследований Национальной академии наук США пересмотрел оценку $P(g)$ для Марса в июле 1970 г. и рекомендовал принять величину $1 \cdot 10^{-4}$ за предельно допустимую обсемененность, учитывая, однако, что эта оценка отражает неполное знание марсианских условий и что при получении более точных сведений она может быть опять пересмотрена. Сведения, полученные в СССР и США при полетах к Марсу, также могут способствовать этой переоценке.

Эти несколько примеров показывают, как лабораторные исследования заполняют пробелы в знаниях, способствуют установле-

нию более точных количественных значений вероятности выживания организмов в космосе и помогают выбору эффективных средств контроля за загрязнением.

НОРМЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Для уменьшения степени обсемененности и разработки средств контроля необходимо прежде всего знать исходный уровень микробного загрязнения. При этом нужно учитывать зависимость этого уровня от методов сборки и испытания аппарата.

Комитет ПК проводит систематические лабораторные исследования и выдает соответствующие рекомендации и инструкции по контролю за загрязнением проектным группам космических систем.

Оценка уровня микробной обсемененности

Определение числа микроорганизмов может быть осуществлено либо путем прямых исследований, например при поверхностном загрязнении, либо путем расчета в случаях, когда непосредственное взятие пробы невозможно без разрушения космического аппарата.

Поверхностное загрязнение. Точность подсчета числа микроорганизмов на поверхности космического аппарата зависит от ряда факторов. Поверхность космического аппарата составлена из самых разнообразных материалов, некоторые из которых являются ингибиторами роста микроорганизмов. Обследование металлической поверхности сводится к взятию с нее микробиологической пробы с последующим посевом на питательную среду.

Однако микроорганизмы, способные длительное время сохраняться на поверхностях, и те, которые выжили после обработки обеззараживающими средствами, достаточно прочно «приклеиваются» к поверхности, что может заметно повлиять на точность исследования. Кроме того, следует учитывать, что в естественных условиях микроорганизмы не встречаются в виде одиночных клеток, а собраны в группы, состоящие из многих клеток. Стандартные приемы взятия микробиологических проб с поверхности [41, 103] — смыв, соскоб-смыв и метод отпечатков [54] — не позволяют отличать отдельные клетки от клеточных скоплений и, следовательно, могут дать неточные результаты. Хотя метод смыва и соскоба-смыва дает возможность разделения колоний встре-

¹ Справочник спецификаций по Планетному карантину. Комитет ПК, НАСА, 1972.

хиванием вручную или механическим встряхиванием, возможны расхождения в подсчетах. Точность подсчета зависит не только от размера площади и видов материала поверхностей, но также и от методов, применяемых разными исследователями.

Разработанные в настоящее время способы позволяют снизить эту вариабельность и определить число микроорганизмов на металлических поверхностях космического аппарата с большой точностью. Один из таких способов (вакуумный зонд) может быть с успехом использован для взятия проб с больших по размеру поверхностей [78, 106].

Пулео и др. [103] эффективно использовали ультразвуковой вакуумный зонд для обнаружения микроорганизмов на различных поверхностях, даже когда бактериальные споры были зафиксированы на них в результате тепловой обработки. С помощью ультразвука можно также разрушить скопления микробных клеток, разъединить их на небольшие группы и даже единичные клетки. Оба эти приема, снятие и разрушение скоплений, заметно повышают точность определения. Последующие исследования [102] показали, что ультразвуковые ванны дают такой же эффект, как и ультразвуковой зонд. Ультразвуковые ванны доступны для использования и позволяют обработать за данный период времени большее количество образцов. Этот способ в равной степени может быть использован для обнаружения как спор, так и вегетативных форм микроорганизмов, и в то же время он не вызывает сколько-нибудь заметной гибели микроорганизмов. Поэтому ультразвуковой метод используется для исследования поверхностного загрязнения небольших участков нержавеющей стали, отдельных узлов, поверхностей приборов, фильтров и наконечников, вакуумных зондов. Однако вакуум и ультразвук не могут быть использованы при исследовании целых космических кораблей, так как ультразвук может разрушать некоторые материалы, из которых сконструирован корабль. В результате этого приемлемым пока является только метод соскоба-смыва. Ультразвуковая энергия может быть использована только в случае, если проба берется с поверхности космического корабля.

Другой метод, позволяющий определить поверхностное загрязнение, разработан лабораториями Центра борьбы с заболеваемостью Министерства здравоохранения США (г. Феникс). Снятие пробы осуществляется протира-

нием из любого искусственного шелка, производящегося в США. Микроорганизмы, собираемые этой тканью, извлекаются ультразвуком в раствор, который затем исследуется. Этот метод протирки-смыва по своей эффективности имеет заметное преимущество, так как позволяет исследовать сразу большие поверхности и вследствие этого дает более точные результаты [42].

Внутреннее загрязнение. Микроорганизмы, расположенные между двумя поверхностями или инкапсулированные внутри какого-либо материала, обычно недоступны для прямого исследования; уровень загрязнения в этих случаях может быть определен только косвенным путем. Исследование проводится во время сборки аппарата, когда соприкасающиеся в будущем поверхности открыты и доступны для исследования. В это время определяется плотность обсемененности каждой поверхности в отдельности, которая потом суммируется для определения общего уровня обсемененности соприкасающихся поверхностей. Таким образом, экспериментальным путем можно определить зараженность большинства узлов. При этом принимается, что обсемененность не возрастет и не уменьшится до окончательного соединения поверхностей при сборке.

Живые организмы, инкапсулированные в твердых материалах, могут высвободиться и попасть на поверхность планеты при разрушении или эрозии этих материалов. Для выявления микроорганизмов, скрытых в материалах космического корабля, многие исследователи пытались разработать специальные методики. Исследователи США в 1960 г. показали [88], что определенные типы электронной аппаратуры содержат внутри жизнеспособные микроорганизмы. Сотрудники Лаборатории реактивного движения и их коллеги из группы «Дайнемик Сайенс» провели специальные исследования по изучению микробиологических и инженерных аспектов определения внутренней загрязненности [78, 106]. Аналогичные работы проводились лабораториями Центра борьбы с заболеваемостью Министерства здравоохранения США в г. Феникс [104] и в г. Цинциннати [17—19] и в университете штата Миннесота [49].

Основные результаты этих исследований можно суммировать следующим образом.

Для подсчета инкапсулированных микроорганизмов исследуемый образец твердого материала необходимо раздробить на минимальные частицы, чтобы обеспечить выско-

бождение заключенных внутри микроорганизмов, не повредив их. Если все-таки микроорганизмы погибают, то их гибель должна быть одинаковой во всех пробах.

Пока нет единой методики подсчета внутреннего загрязнения для всех потенциально загрязненных материалов; твердые материалы обычно можно раздробить или распылить, но при этом погибает большое количество микроорганизмов. Отдельные полимеры можно растворить в нетоксических растворителях для высвобождения заключенных в них микроорганизмов, сделать посев и подсчитать их количество [55]. Относительно мягкие материалы, которые нельзя легко раздробить при обычной температуре, можно обработать жидким азотом и сделать их достаточно хрупкими. Но эта проблема еще далека от окончательного разрешения.

Некоторые материалы содержат токсические вещества, которые необходимо химически нейтрализовать или удалить до культивирования. Отверждение, полимеризация и хранение твердых материалов могут привести к значительной гибели микроорганизмов, находящихся внутри образца, при исследовании модельных систем, используемых для оценки различных приемов извлечения микроорганизмов.

В США лабораториями Министерства здравоохранения и фирмой «Экзотех Системз» были проведены исследования по определению внутренней загрязненности образцов. Эти исследования проводились на основе аналитической модели, учитывающей неточности методов оценки. В модели используются результаты лабораторных исследований, полученные при поломке, размельчении, растворении и разборке различных образцов твердых материалов и отдельных частей космического корабля [75]. В результате удалось установить среднюю плотность загрязнения неметаллических материалов — около 130 спор в 1 см³. Эта величина может быть использована для оценки внутреннего загрязнения тех материалов, которые производятся в США и применяются для изготовления и сборки корабля. Полученные результаты устраивают необходимость проведения дорогостоящих биоисследований в летных программах. Комитетом ПК составлены рекомендации, которые в будущем должны учитываться при разработке программ полетов. Они включают отбор стандартных тест-микроорганизмов, методы обеззараживания и стерилизации, стандартные микробиологические методы и величины гибели микроор-

ганизмов. Эти стандарты основаны на экспериментальных исследованиях, проводимых специалистами по ПК в СССР и США.

В США в качестве теста эффективности средств обеззараживания и стерилизации, используемого для межпланетных кораблей, были выбраны споры *Bacillus subtilis* var. *niger* [13]. Этот микроорганизм хорошо изучен. Его стандартные культуры взяты из лабораторий Центра борьбы с заболеваемостью. Характерные особенности поведения этого микроорганизма при тепловой инаktivации сухим воздухом хорошо изучены в многочисленных исследованиях и сопоставлены с теми характеристиками, которые дает естественная загрязненность космического аппарата при его сборке и испытаниях [124]. Инаktivацию спор сухим воздухом принято выражать специальной величиной *D*, обозначающей время, которое требуется для уменьшения в 10 раз числа жизнеспособных микроорганизмов.

При использовании величины *D* в описании характера гибели микроорганизмов важно знать, является ли кинетика инаktivации экспоненциальной, т. е. является ли она линейной в полулогарифмических шкалах, или же кривая имеет пик и хвостовую часть. Наличие пика указывает на необходимость увеличения времени стерилизации. Хвостовой эффект свидетельствует о том, что какая-то часть микроорганизмов выживает при данном способе обеззараживания независимо от времени воздействия. Описанные отклонения не могут поставить под сомнение полезность использования величины *D* при выборе методов обеззараживания. Несмотря на существующую неуверенность в надежности экспоненциальной аппроксимации, величина *D* успешно используется при разработке, осуществлении и проверке методов тепловой стерилизации.

В настоящее время в США продолжаются исследования по выявлению «хвостового» эффекта в естественных популяциях микроорганизмов.

Величина *D* является функцией микробной обсемененности, температуры и влажности окружающей среды. Практически значение *D* определяется при +125°С и максимально допустимой влажности. Другая принятая величина, *Z*, позволяет экстраполировать значение *D* на другие стерилизующие температуры. В табл. 4 представлены величины температурного воздействия при тепловой стерилизации сухим воздухом, которые в настоящее время используются в США.

Таблица 4. Параметры тепловой стерилизации сухим воздухом

Температура	100° С миним.
Максимальная относительная влажность	25% при 0° С и 760 мм рт. ст.
Величина D	
Внутренняя обсемененность	5 час.
Обсемененность между соприкасающимися поверхностями	1 час
Обсемененность открытых поверхностей	1/2 часа
Величина Z	21° С
Температурная зависимость	$D_T = D_{125} \cdot 10^{\frac{125-T}{Z}}$, где D_T — значение D при $T^\circ \text{C}$

Существуют и другие методы обеззараживания. Наиболее распространенными в США являются тепловая стерилизация и стерилизация окисью этилена. В Советском Союзе используются эти и другие средства, которые будут описаны ниже.

В опубликованных руководствах описываются различные типы барьеров, которые используются для ограничения микробного загрязнения на внешних и внутренних поверхностях космических кораблей. Более подробно эти методы изложены в разделе «Методы контроля за обсемененностью».

Анализ источников загрязнения

Анализ возможных источников загрязнения применительно к конкретным полетам проводится для обоснования необходимости контроля за предполагаемым загрязнением планеты и выбора надлежащих средств.

Для определения вероятности загрязнения планеты необходимо: 1 — идентифицировать все возможные источники загрязнения, связанные с данным полетом; 2 — определить уровень обсемененности каждого такого источника; 3 — определить уровень обсемененности космического аппарата во время запуска; 4 — установить уровень обсемененности тех частей аппаратуры, которые достигнут поверхности планеты; 5 — выяснить, какая часть микроорганизмов выживет при действии факторов космического пространства во время полета и достигнет планеты.

На рис. 1 приведены возможные источники загрязнения [35, 93] для посадочных аппаратов. Анализ источников загрязнения в Лабо-

ратории реактивного движения включал следующие основные этапы:

1) все аспекты программы полета, включая воздействие на космический аппарат физических условий космического пространства, изучались для идентификации возможных источников загрязнения;

2) каждый источник загрязнения исследовался, чтобы понять причины его потенциальной опасности;

3) во всех случаях составлялись математические модели вероятности загрязнения; эти модели основывались на существующих методах вероятностных расчетов с описанием свойственных этим методам недостатков.

Наиболее вероятные источники загрязнения [58] для орбитальных полетов показаны на рис. 2. По нашему мнению [53], карантинные требования для нестерильного космического аппарата, падение которого на поверхность планеты можно предполагать, являются серьезным основанием для изменения траектории полета и высоты орбиты; таким образом, необходимость внимательного изучения возможного риска, связанного с пролетными и орбитальными вариантами космических аппаратов, очевидна.

Начальную обсемененность космического корабля можно определить экстраполированием величины микробной пробы и выразить несколькими способами; она может быть либо как некая средняя величина нескольких измерений, либо как максимальная величина нескольких измерений. По модели, используемой Ингремом [64], это число выводится из нескольких рядов значений, каждое из которых имеет соответствующую вероятность, т. е. представляет собой гистограмму.

Однако применение модели Ингрема довольно сложно, так как при этом требуется знать все возможные источники загрязнения во время сборки аппарата и параметры окружающих условий. Была разработана стохастическая модель, которая снимает эти трудности [109], и именно она рекомендована для использования в проекте «Викинг-75» США.

Разрабатываются также методы системной обработки данных гистограмм с различным уровнем неопределенности [57, 111].

Документация

Группы по планированию летных экспериментов оформляют результаты своих анализов и измерений, используемых для контроля загрязнения. В США в проекты включаются

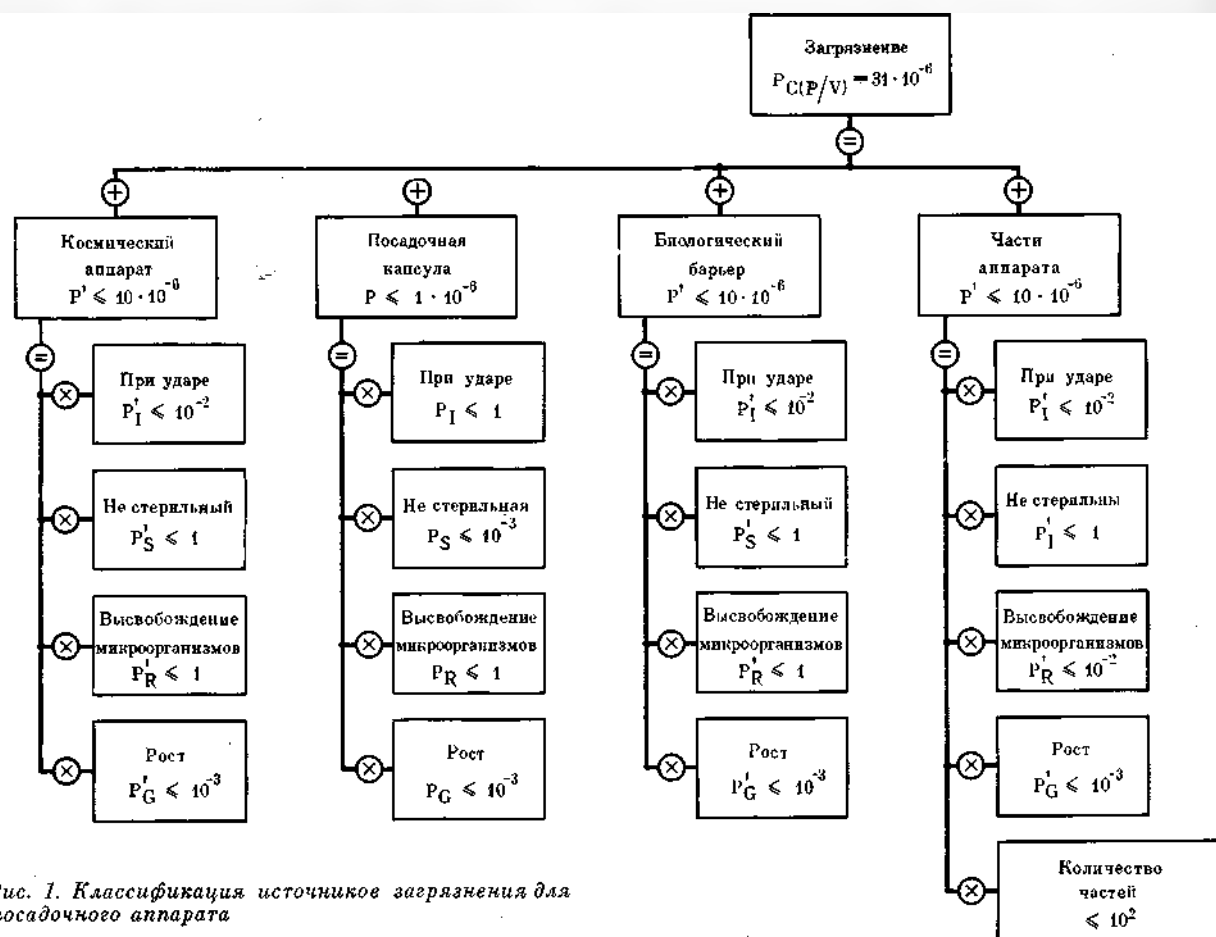


Рис. 1. Классификация источников загрязнения для посадочного аппарата

P_C — вероятность загрязнения;
 P/V — вероятность для данного космического аппарата;
 P_1 — вероятность удара;
 P_S — вероятность выживания микроорганизмов;
 P_R — вероятность высвобождения жизнеспособных микроорганизмов;
 P_G — вероятность роста выживших микроорганизмов

планы мероприятий по стерилизации (в том числе план ПК, порядок проведения микробиологических исследований и общий план работ по стерилизации), а также прилагаются отчеты по результатам стерилизации. Эти документы представляются в Комитет ПК, для того чтобы обеспечить необходимое внимание стерилизации и средствам обеззараживания. В отчеты включаются требования по стерилизации и в случае необходимости предлагаются рекомендации по изменению конструкции космического аппарата.

До принятия решения о полете в Комитет ПК представляется отчет, в котором указываются меры, предпринятые группой разработчиков космического аппарата, и их эффективность с точки зрения уменьшения вероят-

ности микробиологического загрязнения аппарата в период его изготовления. После принятия этого отчета и соответствующей проверки, проведенной Службой ПК, дается разрешение на полет.

Все страны, участвующие в космических исследованиях, должны представлять на рассмотрение КОСПАР сведения с указанием, в какой мере космический аппарат отвечает требованиям ПК. Все эти данные обобщаются, для того чтобы определить теоретическую вероятность загрязнения каждой планеты в результате выполнения программ космических исследований. Результаты обсуждаются группой ПК КОСПАР на его ежегодных собраниях. Это делается для того, чтобы обеспечить выполнение программ ПК и определить необходимость пересмотра политики в этом вопросе.

До настоящего времени в рамках КОСПАР еще не достигнута полная договоренность о международном сотрудничестве в области

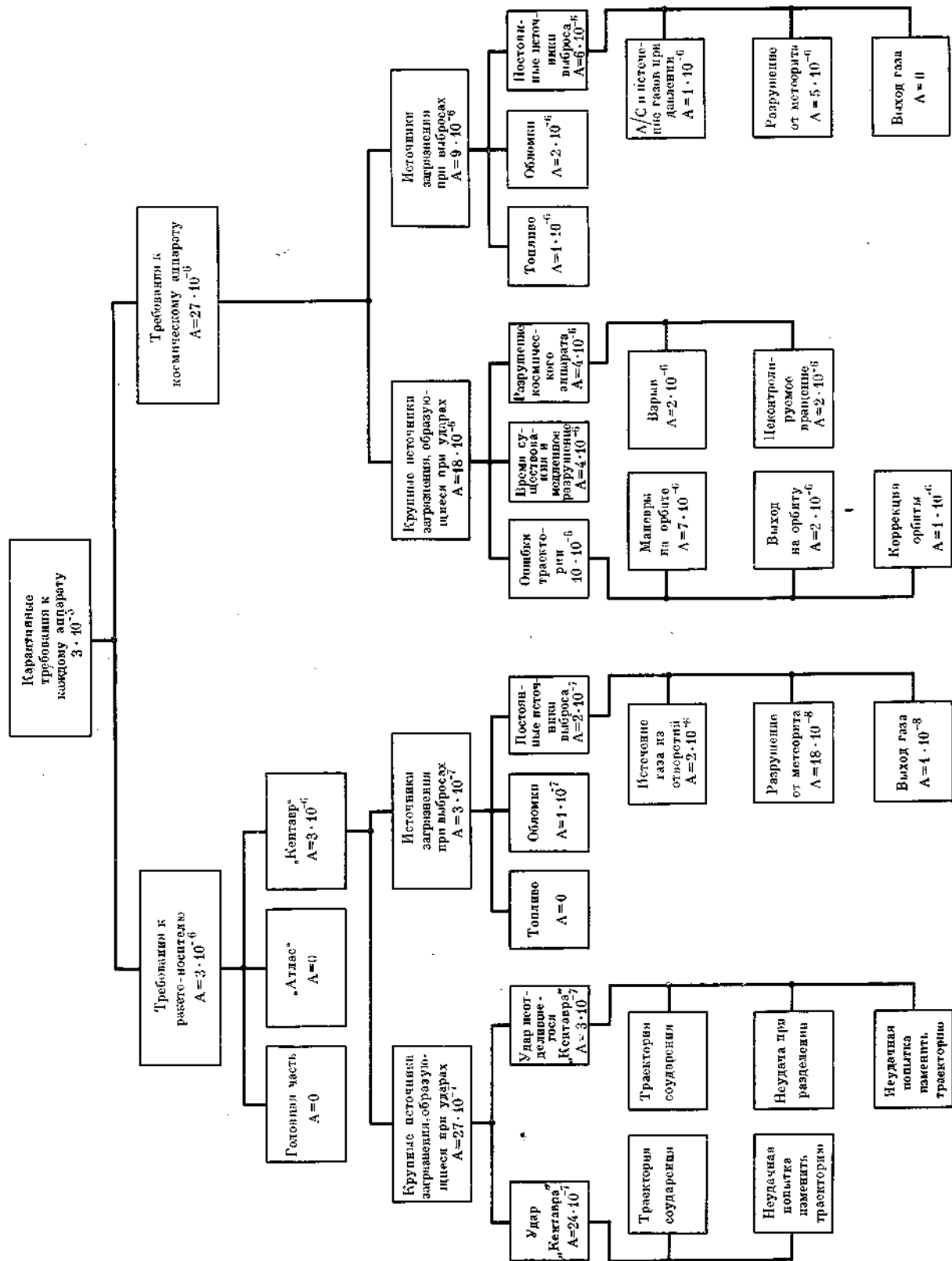


Рис. 2. Схема картины для аппаратов «Маринер»,
 А — исходная величина;
 А/С — исходная величина загрязнения

ПК, поскольку специалисты разных стран придерживаются отличающихся друг от друга точек зрения.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЗА ОБСЕМЕНЕННОСТЬЮ

В предыдущих разделах дано описание карантинных мероприятий, установленных Комитетом ПК, определены проблемы, подлежащие решению, а также показано развитие карантинных требований и осуществление основных рекомендаций. Однако выполнение задач карантинных мероприятий возможно при осуществлении мер, принятых для контроля за уровнем загрязнения космического аппарата и при обеспечении его надежности, позволяющей свести к минимуму вероятность случайного загрязнения. На основе анализа источников загрязнения разрабатываются методы контроля за загрязнением, включающие определение уровня микробиологической обсемененности в течение основных этапов сборки. Эти данные могут быть положены в основу мероприятий по контролю для каждого этапа сборки. Могут быть количественно рассчитаны требования ПК, которые должны

учитываться при разработке соответствующего проекта и при выработке норм, обеспечивающих условия, при которых число микроорганизмов не превысит установленного допустимого предела обсемененности. Очевидно, что наиболее эффективным мероприятием с микробиологической точки зрения является стерилизация, т. е. полное уничтожение жизнеспособных микроорганизмов. Хотя полная стерильность является основной целью мероприятий по обеззараживанию космического аппарата, она не всегда может быть достигнута. Поскольку стерилизация может оказывать неблагоприятное действие на работу космических систем, применять сильнодействующие средства весьма нежелательно. Вероятность загрязнения планет в результате полетов космических аппаратов США приведена в табл. 5, где обобщены данные по обсемененности поверхности аппаратов в момент запуска. Сравнение их с уровнями загрязнения поверхностей изделий, не подвергавшихся обеззараживанию, показывает, что на космических аппаратах был достигнут очень низкий уровень обсемененности.

Для снижения загрязненности использу-

Таблица 5. Вероятность загрязнения планет *

Аппарат	Дата запуска	Тип полета	Вес, кг	Обсемененность аппарата		Вероятность загрязнения планеты	Стерилизация	Количество спор микроорганизмов на поверхности	Результаты полета
				до запуска	после запуска				
Полеты к Марсу									
«Маринер-3»	5. XI 64	Пролетный	261	$4,5 \cdot 10^{-5}$	0	0	Нет	$2 \cdot 10^5$	Не отделился спускаемый аппарат
«Маринер-4»	28. XI 64	То же	261	$4,5 \cdot 10^{-5}$	0	0	»	$2 \cdot 10^5$	Прошел в 9850 км от Марса 14. VII 65
«Маринер-6»	24. II 69	»	380	$3 \cdot 10^{-5}$	Прибл. $3,2 \cdot 10^{-8}$	Прибл. $3,2 \cdot 10^{-8}$	»	$2 \cdot 10^4$	Прошел в 3400 км от Марса 31. VII 69
«Маринер-7»	27. III 69	»	380	$3 \cdot 10^{-5}$	То же	Прибл. $6,1 \cdot 10^{-8}$	»	$3 \cdot 10^5$	Прошел в 3540 км от Марса 5. VIII 69
«Маринер-8»	8. V 71	Орбитальный	990	$7,1 \cdot 10^{-5}$	0	Прибл. $6,4 \cdot 10^{-3}$	»	$1 \cdot 10^4$	Не вышел на земную орбиту
«Маринер-9»	30. V 71	То же	990	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	Прибл. $3,9 \cdot 10^{-6}$	»	$1 \cdot 10^3$	Достиг орбиты Марса 14. X 71
Полеты к Венере									
«Маринер-1»	22. VII 62	Пролетный	202	$1 \cdot 10^{-4}$	0	0	»	$2 \cdot 10^5$	Полет отменен
«Маринер-2»	27. VIII 62	То же	203	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-17}$	0	»	$5 \cdot 10^5$	Прошел в 34826 км от Венеры 14. XII 62
«Маринер-5»	14. VI 67	»	245	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-17}$	0	»	$1 \cdot 10^5$	Прошел в 3200 км от Венеры 19. X 67

* Фирма «Экзотех Системз». Вашингтон, О. К., 1971. Отчеты по контракту NaSw-2062.

ются комбинация защитных и нейтрализующих средств, ограничивающих распространение загрязнения, приемы, снижающие обсемененность различных сооружений, персонала и оборудования. Многие способы были заимствованы из медицины, пищевой промышленности, из системы охраны окружающей среды и других областей. Некоторые из них получили дальнейшее развитие, были разработаны также новые приемы. Несомненно, что определенные успехи в области снижения загрязнения, достигнутые применительно к проблеме ПК, будут использованы в дальнейшем в тех же областях, из которых были заимствованы некоторые способы обеззараживания.

Предупреждение загрязнения

Предупреждение загрязнения включает изучение потенциальных источников загрязнения космического аппарата и использование барьеров для его защиты [76].

Биологические барьеры. Цель биологического барьера — сохранить количество микроорганизмов внутри замкнутого объема на возможно более низком уровне. Это может быть достигнуто использованием воздушного потока в биологически чистом помещении или с помощью жесткого микробиологического фильтра. Использование чистых помещений уменьшает или исключает микробную загрязненность открытых поверхностей и оборудования, что увеличивает вероятность успешного проведения обеззараживания. Улучшается функциональная надежность приборов, так как увеличивается химическая и биологическая чистота [81].

Эффективность использования чистого помещения в снижении уровня поверхностного загрязнения зависит от системы воздухообмена и характера выполняемых операций в этом помещении. Величина загрязнения, перепосимого воздушным потоком, выражается максимальным числом частиц, находящихся в нем; например, чистое помещение класса 100 имеет меньше чем $3,5 \cdot 10^3$ частиц на 1 м^3 (100 частиц на 1 фт^3). Такой низкий уровень обычно достигается при вертикальном ламинарном потоке в противоположность турбулентному воздушному потоку. С помощью ламинарного потока микробное загрязнение, находящееся в пределах этого помещения, поддерживается на очень низком уровне. При этом значительно уменьшается число почвенных микроорганизмов, бактериальных спор и спор микроскопических грибов.

Чистое помещение с вертикальным ламинарным потоком обычно снабжено высокоэффективными воздушными фильтрами, расположенными на потолке. Задерживающая способность таких фильтров превышает 99,6% для частиц размером $0,3 \text{ мкм}$ и более. Отработанный воздух выходит через решетчатый пол. Поток воздуха проходит по полу через все поперечное сечение комнаты. Использование чистой комнаты с горизонтальным ламинарным или поперечным потоком воздуха менее эффективно. Существуют также переносные чистые комнаты — отделения с вертикальным ламинарным потоком воздуха, имеющие пластиковые занавеси для боковых стенок, воздуходувки, комплект фильтров на потолке и опоры на колесиках для легкости передвижения.

Лаборатория реактивного движения организовала Экспериментальную лабораторию по сборке и стерилизации [67, 77, 85], которая имеет в своем распоряжении помещения для отбора биопробы с крайне низким уровнем микробного загрязнения и рабочие помещения с ламинарным потоком воздуха [76]. Позднее лаборатория реактивного движения расширила и усовершенствовала экспериментальную лабораторию по сборке и стерилизации и создала лабораторию по разработке методов стерилизации [105] с полным оборудованием для сборки космических аппаратов. Эта лаборатория включает: 1) комнаты с ламинарным направленным впускным потоком воздуха площадью 130 м^2 и отсеком высотой 10 м , 2) помещение с вспомогательным оборудованием, 3) камеру объемом 75 м^3 для проведения обеззараживания различных материалов окисью этилена, 4) камеру объемом 75 м^3 для тепловой стерилизации сухим воздухом, 5) оборудование для взятия микробиологических проб.

Микробиологические барьеры любых размеров предотвращают прохождение микроорганизмов внутрь или наружу этого барьера [89, 90]. Для целей ПК защита оборудования или материалов за барьером имеет первостепенное значение, но иногда возникает необходимость в барьерах, работающих в обоих направлениях. Герметичные камеры использовались в США при исследовании лунных образцов. Лунная приемная лаборатория предотвратила возможность распространения потенциально опасных лунных веществ в течение карантина, а также загрязнение лунных образцов земными микроорганизмами.

Барьеры препятствуют обмену между защищенной и незащищенной средой, так как

исследуемые материалы размещаются в газонепроницаемой камере. Все операции проводятся через стенки этой камеры или при помощи инструмента с дистанционным управлением. Степень микробиологического загрязнения герметичных объемов можно определять при помощи детектора утечки газа.

Для частичной защиты используются комнаты, боксы, не являющиеся газонепроницаемыми, в них эффективность защиты зависит от разностей воздушного давления. Воздух на входе и выходе может быть профильтрован. Степень герметизации таких защитных устройств зависит либо от характера работы, либо от наличия персонала, который должен быть защищен. В камере поддерживается положительное давление, если помещение за барьером нужно защитить от наружного загрязнения. Для того чтобы предотвратить выход микроорганизмов за пределы барьера, в камере создают отрицательное давление.

Система биоизоляции человека как часть комплекса стерилизационного оборудования, предназначенного в США для изоляции стерильного космического аппарата, состоит из гофрированного рукава, достаточно большого, чтобы обеспечить вход и выход оператора, и герметического костюма (рис. 3) [14, 136].

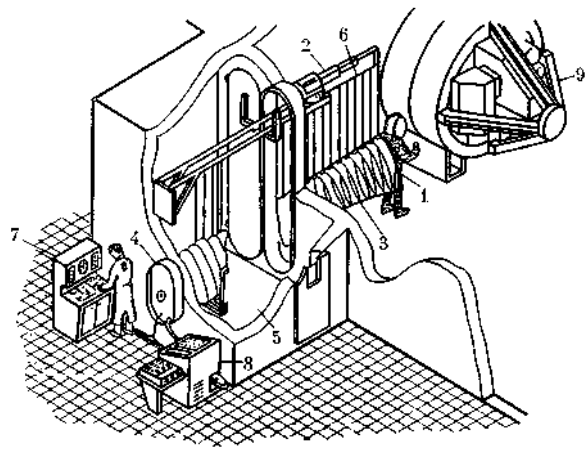


Рис. 3. Система биологической изоляции при сборке космического корабля

- 1 — биоизолятор, герметический костюм;
- 2 — поперечная перекладина;
- 3 — гофрированный рукав;
- 4 — люк;
- 5 — передняя камера;
- 6 — продольные балки;
- 7 — пульт управления;
- 8 — пульт управления системой жизнеобеспечения;
- 9 — космический корабль

Биоизолятор снабжен системами жизнеобеспечения и регистрации. После начала стерилизации все проводимые человеком операции изолируются от космического корабля при помощи костюма и тоннеля.

Гремилсон составил обширный обзор по методам или способам изоляции людей [50], в котором описаны различные виды защиты — инкубаторы, рефрижераторы, центрифуги, весы, закрытые дезинфекционные ванны и автоклавы для внесения и выноса различных материалов. Подобные камеры описаны в работах Бликмана, Лейхена [24] и Мак Дейда [76], которые предлагают различные средства защиты для применения в авиации и космонавтике.

Гибкие пластмассовые камеры для содержания безмикробных животных явились результатом главным образом развития работы Трекслера [125]. Филлипс и др. [92] предложили для этих целей устройство, изготовленное из гибкой пластмассовой пленки, которая обеспечивает безопасность при низком давлении. Одновременно были сконструированы жесткие пластмассовые герметические камеры [91]. Различные типы камер и изоляторов для экспериментов с безмикробными животными описаны в работах Трекслера [126, 127].

Профилактика загрязнения персоналом. Основным источником микроорганизмов при сборке космического аппарата является персонал, связанный с процессом производства. Известно, что поверхность кожи человека — благодатная почва для выживания и роста микроорганизмов [39, 74].

Исследования показали, что микроорганизмы могут быть обнаружены практически на всей поверхности кожи, включая роговой слой, и в протоках большинства экскреторных желез.

Удаление микроорганизмов с поверхности кожи или их уничтожение производится многократно с помощью различных приемов; например, хирурги обрабатывают кожу гексахлорофеном, что значительно уменьшает число микроорганизмов на ней. Особое внимание должно уделяться чистоте пальцев, так как именно руки находятся в более частом и тесном контакте с поверхностью космического аппарата. Хотя прием соскоба-смыва удаляет с кожи значительное число микроорганизмов, стерильность при этом не достигается [132].

Бактерицидные мыла помогают подавить бактериальную флору кожи на некоторое время, как видно из работ Ульриха [129].

хотя в конце концов число бактерий на коже возвращается к тому уровню, который является специфическим для данного человека. Совершенно очевидно, что микробная популяция, расположенная глубоко в коже, одинаково хорошо защищена как от воздействия биологически активных концентраций бактерицидов, так и от механического удаления. Очевидно также, что эти микроорганизмы служат источником, за счет которого восстанавливается исходный уровень бактериального загрязнения кожи. Лишь очень немногие споры или спорообразующие бактерии рассеиваются человеческим телом, хотя некоторые выживают, проходя через пищеварительный тракт, и могут вновь попасть в окружающую среду. Это очень важно для целей ПК.

В настоящее время неизвестен ни один метод стерилизации, не повреждающий кожи. Так как бактерии постоянно удаляются с кожи, механический барьер, такой, например, как резиновые перчатки, в сочетании с бактерицидными мылами, очевидно, является лучшим методом ограничения или предохранения переноса микроорганизмов с кожи на оборудование космического аппарата.

Методы обеззараживания

В настоящее время разработано много методов снижения уровня микробного загрязнения космического аппарата и его компонентов. Хотя они и не идеальны, некоторые из них используются с успехом в настоящее время, другие являются перспективными в будущем. Эксперименты показывают, что более высокая степень стерильности может быть достигнута, если эти приемы используются для гладких поверхностей. При шероховатых поверхностях выживаемость микроорганизмов остается значительной. В данном разделе описаны такие методы, как уборка доступных поверхностей с использованием растворителей и дезинфицирующих средств, стерилизация труднодоступных поверхностей с помощью химических веществ или радиации, а также тепловой стерилизации в сочетании с радиацией или без нее, и, наконец, аутостерилизации.

Обработка дезинфицирующими средствами. Дезинфицирующая обработка заключается в промывке доступных поверхностей компонентов космического аппарата такими дезинфицирующими веществами как этиловый спирт, изопропиловый спирт, формальдегид с метаном и перекись водорода.

В проекте полетов АИМР, подготовленном НАСА [72], предусматривалось использование дезинфицирующей обработки, включающей промывание щеткой электронных элементов в этиловом спирте, промывание электронных элементов в ваннах с 85—95%-ным изопропиловым спиртом, протирку поверхности ватными тампонами и салфетками, смоченными изопропиловым спиртом. В результате такой обработки уровень микробной загрязненности поверхности аппарата на старте снизился до $1,5 \cdot 10^4$.

Подобные приемы применялись в программе «Маринер» для ограничения уровня микробного загрязнения поверхностей. Были использованы полипропиленовые прокладки, пропитанные растворителем, который не повреждал обрабатываемые материалы. Остатки удалялись путем протирания поверхностей стерильной фланелью. Для обработки таких хрупких частей, как панели солнечных батарей, применялись заостренные стержни с ватными наконечниками.

Перекись водорода, применяемая в промышленности, благодаря своим биологическим свойствам используется и для стерилизации некоторых материалов космических аппаратов. В концентрации от 3 до 5% она эффективна для вегетативных форм микроорганизмов, в концентрации от 3 до 10% губительна для спор (в зависимости от их типа), а в концентрации от 1 до 5% убивает вирусы [4].

Недостатком перекиси водорода является высокое поверхностное натяжение раствора — 73 дин/см. Однако его можно уменьшить добавлением поверхностно активных веществ, таких, как 0,5%-ный сульфатол, а также применение более сложного метода грунтовки поверхностей. Добавление анион-активных детергентов может уменьшить поверхностное натяжение раствора до 28 дин/см. Согласно Шумаевой [13], обработка поверхностей такой смесью будет иметь летальный эффект для вегетативных и спорогенных форм микроорганизмов.

Погружение в 6%-ный раствор может обеззараживать поверхности, инфицированные спорами сибирской язвы; при повышении температуры раствора до 50°С концентрацию перекиси водорода можно уменьшить вдвое без снижения эффективности.

Стерилизация поверхности. В этом разделе описаны методы стерилизации поверхности химическими средствами и с помощью радиации без прямого контакта с поверхностью. В качестве стерилизующих веществ исполь-

зовались окись этилена, бромистый метил, формальдегид, а также радиация (лазерные лучи, ультрафиолетовая ионизирующая радиация и плазма).

Окись этилена (ОЭ) уже в течение многих лет используется для обеззараживания в фармацевтической и пищевой промышленности. Ее эффективность зависит от времени, температуры, концентрации и относительной влажности [116], при которых проводится обработка. Существует несколько факторов, которые следует учитывать при использовании ОЭ для уменьшения микробной популяции на поверхностях космических аппаратов [68, 86]. Окись этилена токсична и взрывоопасна одновременно. Небольшая (3%) концентрация ее в воздухе поддерживает горение, применение ее в замкнутом объеме может привести к взрыву. Однако можно приготовить невзрывоопасную смесь путем добавления инертных газов. В США используются смеси ОЭ с углекислотой или различными фтористыми углеводородами. Эти смеси в любом соотношении не поддерживают горения в воздухе.

ОЭ может вызывать нежелательные эффекты, к которым относится коррозия материалов, полимеризация, вызванная каталитическими свойствами некоторых материалов, химические реакции с определенными материалами [38, 69, 120] и изменения характеристик некоторых электронных приборов [23, 119]. Однако всего этого можно избежать, применяя правильные приемы и меры предосторожности.

В настоящее время ученые СССР, занимающиеся космическими исследованиями, полагают, что смесь 40% ОЭ и 60% бромистого метила (известная как смесь ОБ) является наиболее пригодной для обеззараживания поверхностей космических аппаратов. По их сообщениям, эта смесь в 5 раз эффективнее в отношении *Staphylococcus aureus*, в 2,5 раза эффективнее по отношению к спорам *B. mesentericus*, чем смесь 12%-ной ОЭ и 88%-ного фреона (известная как криоксид). Комбинация ОЭ и бромистого метила превосходит криоксид по бактерицидным свойствам в силу бактерицидной способности обоих компонентов. Советскими исследователями показано, что смесь ОБ не оказывает повреждающего действия на стерилизуемые материалы [3], однако этот вопрос остается открытым для американских специалистов.

Бромистый метил сам по себе обладает несколькими положительными свойствами. Он широко используется в огнетушителях, яв-

ляется превосходным фунгицидом при хранении зерна и семян.

Бромистый метил не столь эффективный стерилизующий агент, как ОЭ, но его добавление увеличивает проникающую способность последнего, поэтому смесь убивает микроорганизмы гораздо быстрее, чем каждый компонент в отдельности [3].

Эксперименты [87] с использованием газообразного формальдегида, полученного из параформальдегида, позволяют надеяться, что этот газ может быть использован в некоторых случаях для стерилизации отдельных частей космического аппарата. Преимущество формальдегида как газообразного стерилизующего агента заключается в том, что пространство, подлежащее стерилизации, не обязательно должно быть герметичным, чего невозможно достичь, когда необходимо обрабатывать большие объемы. Газообразный формальдегид обладает медленной проникающей способностью — особенность, которая может оказаться очень важной, когда необходимо длительное последствие. Абсорбирующая поверхностная пленка полимера продолжает медленно выделять газообразный формальдегид, часто в течение нескольких дней после завершения цикла стерилизации. Если стерилизация проводится в вакуумной камере, то скорость проникновения может быть повышена. Принципиальные возражения против применения формальдегида для стерилизации поверхности космического аппарата основываются на его способности взаимодействовать с некоторыми широко используемыми материалами, а также на том, что он может быть потенциальным источником органического загрязнения при экспериментах по обнаружению жизни.

В последнее время интерес к стерилизации с помощью формальдегида снова возрос в результате получения высоко очищенной формы параформальдегида, который, очевидно, увеличивает легкость получения газа и уменьшает количество отходов. Нагревание этого полимера приводит к образованию чистого газообразного формальдегида с небольшим количеством или полным отсутствием примесей. В лаборатории Сандиа были синтезированы на основе формальдегида споридины без запаха¹. В этой же лаборатории получены желеобразные и жидкие формы, кото-

¹ Данные представлены Р. Е. Трухильо на семинаре по технологиям стерилизации космических кораблей. Сан-Франциско, июль 1972 г., НАСА, контракт W-12-853.

рые обладали такой же бактерицидной активностью, как обычный формальдегид; при незначительном нагревании их активность увеличивалась.

Исследователи Массачусетского технологического института обнаружили, что бактерии могут быть разрушены при воздействии лазерным лучом [100]. Устойчивые к нагреванию споры *Bacillus subtilis* полностью разрушились в течение сотой части секунды при действии лазерного луча мощностью 50 вт несфокусированного CO_2 . При использовании лазерного луча субстраты (медь, алюминий, стекло, бумага) не разрушаются. Это свойство позволяет использовать лазер для стерилизации материалов, крайне чувствительных к нагреванию. Среди материалов космического аппарата таким способом могут быть обработаны медицинское и хирургическое оборудование, продукты питания, металлы, бумага, вероятно, даже поверхности ран, полученные при различных процедурах, а также и воздух в командном отсеке. Эффективность в отношении стерилизации бактериальных спор была обнаружена у волн разной длины (от 2 до 10,6 мкм). Высокая отражающая энергия вызывает значительную гибель клеток, снижая возможные защитные эффекты конструкционных материалов.

Стерилизация газовым разрядом или плазмой исследовалась как средство для полного уничтожения загрязнения с поверхности медицинского оборудования и продуктов питания [62]. Сотрудники фирмы «Бойнг» изучали эффективность применения радиочастот, генерируемых плазмой кислорода, для инокулированных образцов различных материалов. Поверхности оказались стерильными при воздействии плазмой при температуре 50°C , при этом не было отмечено какого-либо разрушения материалов. Плазма является мощным источником ультрафиолетового излучения и поэтому может быть использована как эффективный стерилизующий агент. Плазма и лазерные лучи используются для стерилизации только поверхностей, так как обладают ограниченной проникающей способностью.

Целесообразность применения этих средств для стерилизации поверхности пленок толщиной более чем 1 мкм и для обеззараживания микрофлоры, находящейся в глубоких порах и углублениях, остается спорной.

Ионизирующая радиация γ -лучей, электронов и протонов высоких энергий также

используется для обеззараживания. Имшенецкий и Абызов показали, что во многих случаях, когда нагревание разрушает электронную аппаратуру, можно с успехом использовать γ -лучи [6].

В соответствии с данными Джаффе [65, 66], доза γ -облучения, необходимая для стерилизации материалов и аппаратуры космического корабля, равна 10 млн. рад. Однако Астафьева и др. [1] полагают, что эти дозы являются завышенными. По их данным, стерилизация радиоаппаратуры, даже если она заражена спорами *B. mesentericus*, которые относительно устойчивы к воздействию γ -лучей, может быть осуществлена при дозе 2,5 млн. рад. Эти дозы испытывались для определения эффективности стерилизации пористых резин и некоторых жидкостей, которые в значительной степени были заражены тест-культурами.

Исследования, проведенные в СССР [2], выявили, что физические и химические свойства материалов и технические параметры радиоаппаратуры остаются без изменения после стерилизации облучением при различных сроках хранения (от 1 дня до 3 месяцев). Показано, что во многих случаях для стерилизации космических аппаратов может быть с успехом применено облучение, однако при этом особое внимание должно быть уделено отбору и конструкции узлов, устойчивых к облучению.

Несмотря на то, что электроны и протоны высоких энергий не отличаются проникающей способностью γ -лучей, их можно применять для стерилизации поверхности. Кроме того, благодаря отражению и рассеянию эти частицы могут с успехом применяться для стерилизации внутренних поверхностей. Электронные и протонные пучки следует сфокусировать, что увеличит эффективность процесса обеззараживания. В Лаборатории реактивного движения проводились эксперименты [80] с целью исследования летальных свойств энергии радиационных поясов Юпитера для дальнейшего расчета эффективности стерилизации при помощи протонного и электронного излучения.

Существует обширная литература по изменению под влиянием радиации различных свойств материалов, подобных тем, которые используются в космических аппаратах. Большая часть этих сведений касается излучений ядерных реакторов (со смешанным гамма-нейтронным излучением), которые, как полагают, не пригодны для стерилизации поверхности космических аппаратов, так как могут

¹ По неофициальному сообщению Р. Олсона, фирма «Бойнг», Сяэтл, Вашингтон.

вызывать радиоактивность в облученных материалах [43, 73, 84, 112].

К материалам, которые наиболее чувствительны к разрушающему действию рентгеновских лучей, γ -лучей и электронов, можно отнести электронные полупроводники и органические полимеры. Полупроводники подвергаются поверхностному разрушению, что может повлиять на их свойства [28, 29, 79, 115, 121]. Для полного разрушения необходимо, чтобы энергия облучения превысила пороговую дозу. Причиной разрушения органических полимеров является их ионизация [25]. Ковалентные связи разрушаются, происходит случайная рекомбинация свободных радикалов, что может привести к разделению и образованию новых поперечных связей. Разрушение прямо пропорционально дозе облучения.

Технические приемы стерилизации космического аппарата радиацией, которые включают тщательный отбор электронной аппаратуры, органических материалов, технологию и испытания, подробно рассмотрены в работе [22]. Необходимы дальнейшие исследования по оценке экономических аспектов стерилизации облучением и сравнению ее эффективности и целесообразности с другими методами.

Тепловая стерилизация. Общеизвестно, что земные микроорганизмы чувствительны к высоким температурам. Автоклавирование — обычный процесс стерилизации, широко применяемый в промышленности и в процессе приготовления пищи. При этом в качестве активного начала используется пар под давлением или сухой горячий воздух.

В соответствии с этим ученые в США, занимающиеся исследованием космоса, полагают, что стерилизация нагретым сухим воздухом является наиболее эффективным средством для обеззараживания космических аппаратов. Ее эффективность зависит от температуры, времени, водного режима, характера микробной системы (открытая или закрытая), физических и химических свойств микроорганизмов, свойств субстрата и от окружающей среды.

Простая логарифмическая модель [86], используемая для определения параметров системы, выражает процесс разрушения микроорганизмов как функцию времени и температуры:

$$\log N_U = \frac{-U}{D_T^z} + \log N_0,$$

где N_0 — начальная микробная популяция,

D_T^z — время необходимое для уменьшения популяции на 90% при температуре T и температурном коэффициенте z , N_U — средняя величина популяции в течение U времени нагревания.

Однако тепловая инактивация микроорганизмов является более сложным процессом по сравнению с тем, который выражается приведенной выше логарифмической моделью. При более строгом подходе к описанию этого процесса должны быть приняты во внимание такие факторы, как водный режим, сложность микробной популяции и ее равновесные свойства. Наличие смешанной популяции из нескольких микробных групп, когда каждая из них имеет отличные от других начальный уровень популяции и величину D , может привести к тому, что не удастся добиться успешной инактивации. Такое повышение устойчивости популяции вызывает необходимость тщательной отработки режимов инактивации, если необходимо достичь высокий уровень обеззараживания.

Открытые или закрытые системы представляют собой два крайних понятия в отношении движения воды в бактериальную клетку или из нее при нагревании. В закрытых системах, характерных для инкапсулированных или, в некоторых случаях, внутренних поверхностей, микроорганизмы располагаются так, что они полностью окружены твердым материалом, непроницаемым для прохождения паров воды. В открытых системах, характеризующих поверхностное загрязнение, микробы расположены таким образом, что находятся в непосредственном контакте с окружающей атмосферой в тот момент, когда подвергаются тепловой стерилизации. Организмы на соприкасающихся поверхностях находятся в открытой или закрытой системе в зависимости от местоположения и водного режима. Содержание водяных паров в атмосфере, непосредственно окружающей клетки, является крайне важным фактором в этом процессе, тогда как газовый состав атмосферы не оказывает существенного влияния на скорость стерилизации.

В интервале температур 100—125° C инактивация находится в строгой зависимости от относительной влажности, причем гибель наступает гораздо быстрее при относительной влажности выше 50% и ниже 0,2%, чем при промежуточных значениях [26]. Рис. 4 отражает влияние влажности на инактивацию *Bac. subtilis* при 125° C [20].

Для эффективной стерилизации нужно выбрать влажный или сухой воздух. С точки

зрения надежности, влажная стерилизация, хотя она и использовалась ранее [2], непригодна для чувствительных компонентов космического аппарата; из этих соображений как в СССР, так и в США для стерилизации космических аппаратов и их составных частей применяется нагретый сухой воздух. Проводимые в настоящее время исследования сводятся к определению реально достижимого минимума относительной влажности во время стерилизации космического аппарата для получения максимального эффекта. Поэтому должна быть тщательно определена чувствительность к нагреванию у большинства материалов, входящих в состав космического аппарата, чтобы правильно выбрать температурный режим тепловой стерилизации сухим воздухом. Последние исследования [2] показали, что температура в интервале $110-140^{\circ}\text{C}$ является наиболее эффективной для стерилизации космических аппаратов. В космических программах США принята температура 100°C и выше; в табл. 4 представлены спецификации тепловой стерилизации сухим воздухом [94].

Другими факторами, определяющими эффективность процесса тепловой стерилизации, являются термодинамические характеристики космического аппарата, температура окружающей среды, число микроорганизмов, подлежащих стерилизации, и характер распределения микробов по поверхности аппарата.

Температурный режим полета космического аппарата зависит от следующих характеристик его конструкции и конфигурации: расположения системы терморегулирования, размещения теплоизоляции, физических свойств конструкционных материалов.

Существует несколько альтернативных методов использования тепла для стерилизации. Один из них заключается в том, что камера, в которую помещается посадочный аппарат, герметизируется, помещается в печь и нагревается. Воздух поступает из атмосферы в печь и через камеру к посадочному аппарату. При другом способе стерильный газ нагревается в теплообменнике и пропускается через камеру. Для обеспечения минимально допустимого уровня микроорганизмов в США пользуются температурой порядка 100°C и циклом стерилизации, состоящим из этапов нагревания, поддержания температуры на повышенном уровне и охлаждения. Для того чтобы обеспечить стерилизацию различных посадочных аппаратов, необходимо разработать режимы стерилизации, учитывающие

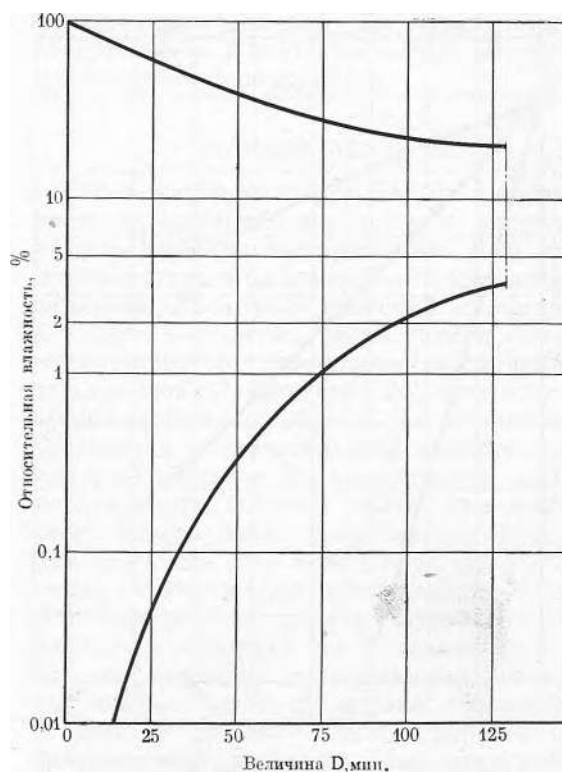


Рис. 4. Тепловая инактивация при 125°C как функция относительной влажности

особенности разных конфигураций аппаратов. Очевидно, окончательный режим стерилизации может быть выбран на основе тщательного изучения конструкционных особенностей аппарата и параметров стерилизационного процесса.

Использованные нестерильные космические аппараты и элементы, например пролетные или орбитальные станции, теоретически можно простерилизовать с помощью бортовых экзотермических средств (термитные шашки, смесь порошка алюминия и окиси железа). При поджигании эта смесь создает высокую стерилизующую температуру. Однако использование такого средства привело бы к серьезному усложнению системы терморегулирования и увеличению веса аппарата.

Проводить стерилизацию на конечном этапе существования капсулы спускаемого аппарата было бы слишком поздно для того, чтобы обеспечить проведение экспериментов по обнаружению жизни или чтобы предотвратить попадание живых микроорганизмов на планету. Поэтому данный метод исключается из серьезного рассмотрения.

Терморадикация. Сочетание тепловой стерилизации и радиации во время сборки косми-

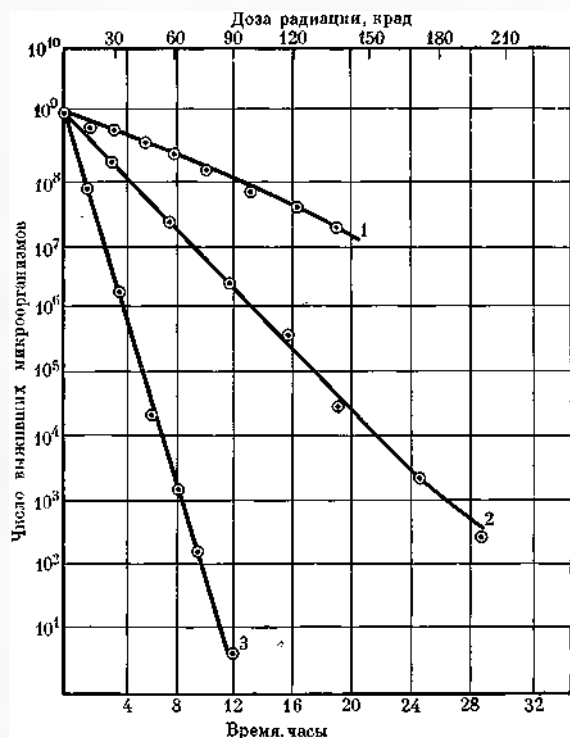


Рис. 5. Сравнительная инактивация *Bac. subtilis* var. *niger* γ-лучами при комнатной температуре сухим воздухом при 105°С и при одновременном воздействии сухого воздуха и γ-лучей [107]

- 1 — только радиация;
2 — только сухой воздух при 105°С;
3 — комбинированное воздействие радиации и сухого воздуха

ческого аппарата имеет преимущества [99], поскольку компоненты аппарата подвергаются воздействию меньших температур, чем во время только тепловой стерилизации, и меньшей радиации, чем во время одного облучения.

Летальный эффект комбинированного воздействия тепла и радиации на биологические системы отмечается во многих экспериментах. Чувствительность к радиации повышается с увеличением температуры в таких различных биологических системах, как белки [21, 30, 96, 97], вирусы [15, 36, 61, 95, 128], споры [2, 13, 62, 63, 100], бактерии [65, 66], дрожжи [1], парамеции [97], насекомые [45], клетки позвоночных [71, 122], опухоли человека [16, 32, 36, 46, 56, 60, 61, 70, 101, 133, 134]. Стерилизующий эффект комбинированного воздействия тепла и радиации можно объяснить увеличением радиочувствительности. Температуры, при которых отмечается повышенная скорость инактивации, ниже

температур, при которых тепловая инактивация становится эффективной.

Для того чтобы оценить летальный синергизм тепла и радиации, лаборатория Сандиа¹ провела эксперименты с использованием температур в пределах от 60 до 125°С в сочетании с определенными дозами радиации, которые, как полагают, являются приемлемыми для обычных материалов космического аппарата и его элементов.

Проведено сравнение эффективности стерилизующего воздействия ионизирующей радиации, сухого тепла и одновременного применения ионизирующей радиации и сухого тепла при разных температурах. На рис. 5, отражающем один из таких типичных экспериментов, сравнивается инактивирующий эффект стерилизующих агентов в отдельности и в сочетании [107]. Дополнительные эксперименты показывают, что это синергическое действие тепла и радиации существует при температурах до 60°С. Величина *D* при мощности дозы 8 крэд/час колеблется в пределах от 1,5 часа при температуре 105°С до 3 час. при температуре 90°С и 6 час. при 69°С [107]. Эти значения *D* отражают значительное уменьшение времени стерилизации. Например, значение *D* тепловой стерилизации для *Bac. subtilis* var. *niger* при 60°С колеблется от 53 до 274 час. [130] в зависимости от влажности спор.

Грайкоски [48], используя γ-лучи ⁶⁰Co для воздействия на различные спорообразующие виды, пришел к выводу, что существует некий общий механизм, ответственный за выживаемость спор и радиосенсибилизацию. Он утверждает, что нуклеопротеин как компонент дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) представляет в этом плане большой интерес.

Самойленко и Иванов [11], сравнивая чувствительность бактерий к γ-лучам и теплу (50°С), отметили, что радиоустойчивые тест-культуры были также и более устойчивы к температурному воздействию. ДНК устойчивых штаммов отличается по своему составу от ДНК неустойчивых штаммов повышенным содержанием фракций аденина и тимина.

Связь радиочувствительности с нуклеиновой кислотой была подтверждена работами лаборатории Сандиа [37], и эта корреляция, кроме того, служит доказательством, что нуклеиновая кислота определенной биосистемы является ответственной за специфическую

¹ Терморрадиация — Экспериментальные исследования по контракту W-12-853. Техническая помощь (системы анализа и контроль чистых помещений) для программы Планетного карантина

для данной биосистемы радиочувствительность.

Аутостерилизация. Самостерилизующийся материал содержит ингредиенты, токсичные в отношении бактерий. Исследования Астафьевой и соавт. [1] показали, что различные материалы, используемые в космическом аппарате, окисные пленки, которые образуются в промышленных условиях, обладают самостерилизующими свойствами. К таким материалам относятся сплавы магния, алюминия, меди, серебра, поверхности, покрытые медью или серебром, и определенные виды резины. Существуют также эмали, которые способны уменьшить микробное загрязнение в десятки тысяч раз, однако тест-культуры, находящиеся под эмалевым покрытием, сохраняют свою жизнеспособность.

В соответствии с данными Шенка и соавт. [114], Жолней [135], Годдинга и Линча [47], жидкое топливо, которое используется для заправки космических аппаратов, обладает стерилизующими свойствами разной степени в отношении бактерий, в то время как твердое топливо такими свойствами не обладает.

Опфелл [83] представил данные, показывающие, что, когда небольшие количества параформальдегида добавлялись в краски, пластмассы, смазки и другие соединения, перечисленные материалы приобретали бактерицидные и самостерилизующие свойства. Уиллард и Александер [131] обнаружили, что добавление 3—7% формальдегида к различным краскам и покрытиям придавало бактерицидные свойства этим материалам. Вашков и Щеглова [5] изучали бактерицидные ткани для космического аппарата, в которых к макромолекулам целлюлозы были химически присоединены бактерицидные металлы, четырехаммонийные основания и фенольные препараты. Эти материалы вызвали гибель от 70 до 100% грамположительных и грамотрицательных бактерий, расположенных на их поверхности.

Тепло, выделяемое во время производства или испытания отдельных частей космических аппаратов, также может вызвать внутреннюю стерильность этих частей. В качестве примера можно привести воздействие тепла, которое выделяется в экзотермических реакциях при полимеризации.

При стерилизации космического аппарата очень часто возникают трудности, связанные с тем, что определенные материалы не могут выдерживать дозы радиации или температуры, которые должны обеспечить необходимую степень стерильности. В связи с этим, само-

стерилизующиеся материалы представляют значительный интерес для целей ПК, что следует иметь в виду при выборе материалов для космических аппаратов.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Успех мероприятий по борьбе с загрязнением определяется количеством микроорганизмов, особенно бактериальных спор, оставшихся внутри и на поверхности космического аппарата. Хотя этот критерий применяется и в других областях, стерилизация космических аппаратов представляет собой уникальную проблему. В пищевой и фармацевтической промышленности пробы на стерильность проводятся на статистически достоверном количестве образцов. На космическом аппарате нельзя взять большое количество проб на стерильность после стерилизации, т. к. увеличение числа проб может привести к загрязнению и нарушению конструкции. Поэтому для определения уровня загрязнения космического аппарата после завершения цикла стерилизации используются результаты взятия проб до начала стерилизации и данные по инаktivации, полученные в лабораторных условиях. При этом необходимо знать состав микробной популяции космического аппарата, чтобы убедиться, что показатели процесса инаktivации, присутствующие в избранной методике стерилизации, не слишком отличаются от результатов, полученных во время лабораторных исследований. Микробиологические образцы, собранные обслуживающим персоналом, культивируются и их количество подсчитывается с помощью лабораторных методик, разработанных для этой цели.

В 1967 г. НАСА был опубликован сборник работ, переизданный в 1968 г., в котором содержатся рекомендации по взятию проб с космического аппарата и из помещения, в котором происходит сборка и испытания. Методы выявления аэробных и анаэробных микроорганизмов и спор приведены на рис. 6.

Большинство методов выявления спор включает нагревание микробной суспензии до высева на среды. Эта процедура называется тепловой обработкой. Неоднократно было показано, что многие споры требуют именно таких условий для максимального прорастания. В экспериментах с *Bac. subtilis* было обнаружено, что при тепловой обработке прорастание увеличивается в 2 или 3 раза [40]. Однако определенные виды спор прорастают без тепловой обработки, а у некоторых тепло-

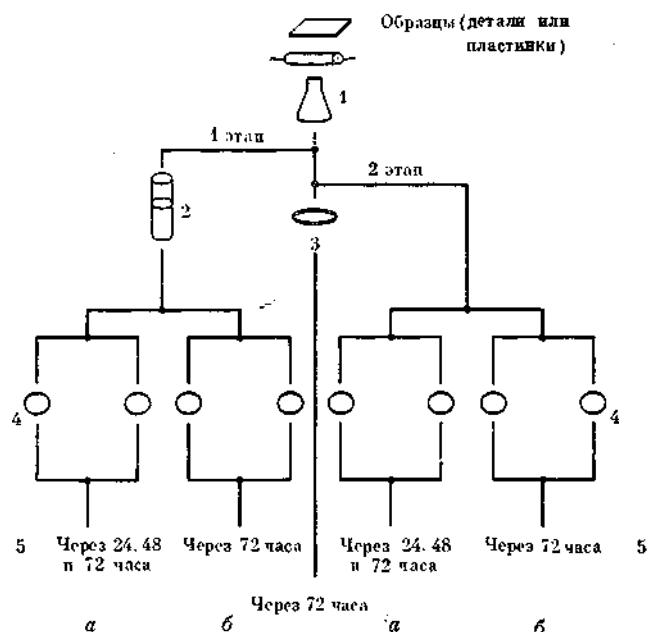


Рис. 6. Последовательность операций при анализе отдельных деталей и образцов материалов космического аппарата [40]

- а — аэробные условия;
- б — анаэробные условия;
- 1 — 50 мл стерильного раствора вносят в колбу с образцом и выдерживают 2 мин.;
- 2 — 25 мл раствора помещают в водяную баню на 20 мин. при 80° С;
- 3 — образец помещают в триптический соевый агар (ТСА) и инкубируют в аэробных условиях при 32° С 72 час.;
- 4 — производят посев 5 мл раствора на ТСА и инкубируют при 32° С 72 часа в аэробных и анаэробных условиях;
- 5 — производят подсчет

вая обработка приводит к обратному эффекту. Например, число жизнеспособных спор *Bac. subtilis* var. *niger* после тепловой обработки уменьшается в 2—3 раза. Следовательно, смешанная, естественно встречающаяся споровая популяция состоит из трех разновидностей спор — одни погибают после тепловой обработки, другие выживают, а у третьих стимулируется прорастание.

Исследования в этой области ведутся в двух направлениях. Специалисты Лаборатории по борьбе с заболеваемостью в г. Феникс полагают, что идеальная система выявления спор в смешанной микробной популяции должна использовать средства, исключающие применение тепла для уничтожения вегетативных клеток. К таким средствам относятся нетоксические химические стимуляторы, применяемые для максимального увеличения числа прорастающих спор.

Методика определения анаэробных микроорганизмов такая же, как и для выявления аэробных, за исключением того, что культуры инкубируются в первом случае в строго анаэробных условиях. Однако исследования показали, что строгие анаэробы на космическом аппарате встречаются в очень небольших количествах. Следовательно, используется редко.

Комитет ПК может дать гарантии в том, что данный космический аппарат удовлетворяет требованиям КОСПАР на основании данных о количественном и качественном составе микрофлоры, эффективности используемых стерилизующих агентов и методов стерилизации. Соответствие полетного проекта требованиям ПК дает возможность каждому государству, осуществляющему космические полеты, заверить соответствующие организации, что биологический карантин соблюден и что в результате этих полетов планеты будут сохранены как биологические заповедники для дальнейших научных исследований.

ПЕРСПЕКТИВЫ БУДУЩЕГО

В истории нашей планеты было немало случаев, когда вторжение каких-то видов растений и животных приводило к местным изменениям катастрофических масштабов. Раньше человек воздвигал лишь элементарные барьеры, чаще всего увеличивая дистанцию между собой и болезнетворными организмами. Развитие торговли и взаимосвязей в мире способствовало уничтожению естественных барьеров. Сейчас наступило время рассмотреть, каким образом можно обеспечить создание межпланетных барьеров.

Гигантское по размерам и, возможно, враждебное человеку космическое пространство служило во все века естественным барьером, предотвращающим перенос патогенных агентов, если они существуют, с одного небесного тела на другое. Возможность космических путешествий делает этот естественный барьер преодолимым. Поэтому в настоящее время, чтобы создать необходимую степень защиты, нужно установить искусственный барьер, а именно, планетный карантин.

Программа исследования планет в США составлена с учетом основных положений Программы ПК НАСА. В соответствии с международным соглашением, необходимо ежегодно представлять в КОСПАР информацию о мероприятиях по контролю за загрязнением для каждого космического аппарата.

В результате успешного осуществления исследования космического пространства происходит накопление сведений о биологических и физических свойствах планет. В настоящее время мы совершенно уверены в правильности оценок характеристик среды планет Венеры и Марса, полученных во время полетов «Марса-1», «Марса-2», «Маринера-9» и последующих аппаратов.

Подобные знания позволяют с большей уверенностью относиться к требованиям ПК и допускают их смягчение. Например, в результате полета «Венеры-7» было установлено, что вероятность роста микроорганизмов на поверхности планеты в 50 раз меньше, чем предполагали, за счет воздействия очень высоких температур, существующих на ней.

Программа изучения Меркурия и Венеры не предусматривает в настоящее время проведения карантинных мероприятий, за исключением отдельных областей атмосферы этих планет.

Предполагают, что подобные изменения и в дальнейшем будут иметь место в результате развития космических исследований. Предстоящие пилотируемые полеты на Марс с посадкой на его поверхность должны разрешить важный вопрос о наличии воды в отдельных местах марсианской поверхности. В зависимости от полученных сведений могут быть пересмотрены карантинные требования в отношении Марса. Полеты «Пионера» к Юпитеру должны дать ответ на вопрос о наличии или отсутствии на этой планете и ее спутниках подходящих для жизни условий. Результаты исследований будут определять

карантинные требования к этим небесным телам.

Успех программы ПК может быть обеспечен только при строгом соблюдении предосторожностей, чтобы не допустить никаких ошибок и учесть все возможные факторы. Только при соблюдении самых строгих мер, какими бы сложными они ни были, планеты будут оставаться нетронутыми в ожидании будущих научных исследований.

Программа ПК, сформулированная Международным комитетом научных обществ, реализуется соответствующими организациями внутри каждого государства, осуществляющего космические исследования. Эта программа включает соблюдение всевозможных предосторожностей и использует научные и технические знания для установления и обоснования основных карантинных требований. Таким образом, ПК гарантирует планеты нашей Солнечной системы от возможных необратимых изменений, связанных с развитием космической техники. До того времени, пока результаты исследований космического пространства не подтвердят возможность снятия карантина, должны соблюдаться все карантинные требования к космическим аппаратам. Только при этих условиях человечество может продолжать изучение космического пространства с уверенностью, что не существует угрозы необратимого загрязнения планет и что они будут оставлены в первоначальном виде до того времени, когда человек высадится на эти планеты и сможет в отдаленном будущем использовать их в соответствии со своими замыслами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астафьева А. К., Башков В. И., Никифорова Н. В., Рамкова Н. В., [Astafyeva A. K., Vashkov V. I., Nikiforova N. V., Ramkova N. V.]. Methods for spacecraft sterilization. In: Brown A. H. and Favorite F. G., (Eds) Live Sci. and Space Res. Amsterdam, North-Holland, 1967, 5, 8.
2. Башков В. И. Современные методы и средства стерилизации космических объектов. В сб. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, 167.
3. Башков В. И., Прищеп А. Г. [Vashkov V. I., Prishchep A. G.]. Efficiency of sterilization by making use of ethylene oxide and methyl bromide mixture. In: Brown A. H. and Favorite F. G. (Eds) Life Sciences and Space Res. Amsterdam, North-Holland, 1967, 5, 44.
4. Башков В. И., Рамкова Н. В., Щеглова Г. В. Планетный карантин. Принципы, методы и проблемы (методы и средства стерилизации космических кораблей). Обзор советских работ. Комиссия по исслед. и использ. косм. простр. при АН СССР. 1972 г.
5. Башков В. И., Щеглова Г. В. Придание антимикробных свойств различным материалам. КОСПАР, 1968, № 4, 127—131.
6. Имшенецкий А. А., Абызов С. С. Стерилизация космических аппаратов. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, 184.
7. Имшенецкий А. А., Абызов С. С., Воронов Г. Г., Кузюркина Л. А., Лысенко С. В. [Imshenetskiy A. A., Abyzov S. S., Voronov G. T., Kuzurykina L. A., Lysenko S. V.]. In: Brown A. H. and Favorite F. G. (Eds) Live Sci. and Space Res. Amsterdam, North-Holland, 1967, 5, 250.
8. Имшенецкий А. А., Лысенко С. В. Действие глубокого вакуума на микроорганизмы. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, 106.
9. Майер А., Зейц Е. [Meyer A., Seith E.]. Ультрафиолетовая радиация. Получение, действие и использование в медицине, биологии и технологии. М., ИЛ, 1952.
10. Самойлова К. А. Действие ультрафиолетовой радиации на клетку. Л., «Наука», 1967.

11. *Самойленко И. И., Иванов К. К.* Устойчивость бактерий к действию радиации и тепла. Журн. микробиол., эпидемиол. и иммунобиол., 1972, № 2, 113.
12. *Федорова Р. И.* Возможность распространения жизнеспособных зародышей в космическом пространстве. В кн. «Жизнь вне Земли и методы ее обнаружения». А. А. Имшенецкий (ред.). М., «Наука», 1970, 125.
13. *Шумаева Ю. Ф.* Использование некоторых поверхностноактивных веществ для дезинфекции. Канд. дисс. М., 1966.
14. A research study to definitize a bio-isolator Suit System (BISS), Final Rep. 67SD888, General Electric Co., Philadelphia, 1967.
15. *Adams W. R., Pollard E. C.* Combined thermal and primary ionization effects on a bacterial virus. Arch. Biochem. Biophys., 1952, 36, 311.
16. *Altman K. I., Gerber G. B., Orada S.* Radiation biochemistry. N. Y., Acad. Press, 1970, 3.
17. *Angelotti R., Lewis K. H.* Ecology and thermal inactivation of microbes in and on interplanetary space vehicle components. First Quart. Rep. Contr. R-36-015-001, Cincinnati, USPHS, Robt. A. Taft Sanit. Eng. Cent., 1965.
18. *Angelotti R., Lewis K. H.* Ecology and thermal inactivation of microbes in and on interplanetary space vehicle components. Second Quart. Rep. Contr. R-36-015-001, Cincinnati, USPHS, Robt. A. Taft Sanit. Eng. Cent., 1965.
19. *Angelotti R., Lewis K. H.* Ecology and thermal inactivation of microbes in and on interplanetary space vehicle components. Fifth Quart. Rep. Contr. R-36-015-001, Cincinnati, USPHS, Robt. A. Taft Sanit. Eng. Cent., 1966.
20. *Angelotti R., Maryanski I. H., Butler T. F., Peeler J. T., Campbell J. E.* Influence of spore moisture content on the dry heat resistance of *Bacillus subtilis* var. *niger*. Appl. Microbiol., 1968, 16(5), 735.
21. *Augenstein L. G., Brustad T., Mason R.* The relative role of ionization and excitation processes in the radiation inactivation of enzymes. In: Augenstein L. G., Mason R., Quastler H. (Eds.). Advances in Radiation Biology, v. 1. N. Y., Acad. Press, 1964, 227.
22. *Barrett M. J., Cooley W. C.* On the feasibility of radiation sterilization of planetary spacecraft. NASA CR-75187, TR-012, Washington, D. C., Exotech Inc., 1966.
23. *Bartholomew C. S., Porter D. C.* Reliability and sterilization. J. Spacecr. Rockets, 1966, 3(12), 1762.
24. *Blickman B. I., Lanahan T. B.* Ventilated work cabinets reduce lab risks. Saf. Maint., 1960, 120, 34, 44.
25. *Bolt R. O., Carroll J. G.* (Eds.). Radiation Effects on Organic Materials. N. Y., Acad. Press, 1963.
26. *Brannon J. P., Garst D. M.* Dry heat inactivation of *Bacillus subtilis* var. *niger* spores as a function of relative humidity. Appl. Microbiol., 1972, 20, 1125—1130.
27. *Brown A. H.* Conference on potential hazards of back contamination from the planets. Washington, D. C., Nat. Acad. Sci. USA, Space Sci. Board, 1965.
28. *Brown R. R.* Proton and electron permanent damage in silicon semi-conductor devices. Philadelphia, Am. Soc. Test. Mater., Spec. Publ. No. 384, 1964.
29. *Brucker G., Denneky W., Holmes-Siedle A.* High energy radiation damage in silicon transistors. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1965, NS-12(5).
30. *Brustad T.* In: Biological Effects of Neutron and Proton Irradiations, v. 2. Vienna, Internat. Atom. Energy Agency, 1964, 404.
31. *Clemenson C. J.* Sterilization of lunar and planetary vehicles. XIIth Internat. Astronaut. Congr. (Varna, 1962). Vienna — N. Y., Springer, 1, 1964.
32. *Conger A. D., Randolph M. L.* Magnetic centers (free radicals) produced in cereal embryos by ionizing radiation. Radiat. Res., 1959, 11, 54—66.
33. Contamination by extraterrestrial exploration. CETEX. Nature, 1959, 183, 925.
34. *Craven C. W.* Planetary quarantine analysis, Part I. Astronaut. Aeronaut., 1968, 6(8), 20.
35. Development of international efforts to avoid contamination by extraterrestrial exploration. CETEX. Science, 1958, 128, 887.
36. *DiGioia G. A., Liciardello J. J., Nickerson J. T. R., Goldblith J. H.* Effect of temperature on radiosensitivity of Newcastle disease virus. Appl. Microbiol., 1970, 19, 455.
37. *Dugan V. L., Trujillo R.* Synergistic inactivation of biological systems by heat and ionizing radiation. Biophys. J., 1972, 12, 92.
38. Effects of decontamination and sterilization on spacecraft polymeric materials. JPL Rep. C8-58-501, Pasadena Calif., Jet Propuls. Lab., 1968.
39. *Evans C. W., Smith W. M., Johnson E. A., Biblett E. R.* Bacterial flora of the normal human skin. J. Invest. Dermatol., 1950, 4, 305.
40. *Favero M. S.* In: Hall L. B. (Ed.). Planetary quarantine: principles, methods and problems. N. Y., Gordon and Breach, 1971, 27.
41. *Favero M. S., McDade J. J., Robertson J. A., Hoffman R. K., Edwards R. W.* Microbiological sampling of surfaces. J. Appl. Bacteriol., 1968, 31, 336.
42. *Favero M. S., Peterson N. I.* Recovery of surface and buried contamination. Presented at AIBS/NASA Semi-ann. NASA Spacecr. Steriliz. Technol. Semin., San Francisco, July 1972.
43. *Frank M., Taulbee C. D., Chambers H. G.* Influence of operating conditions on radiation damage to transistor gain. Philadelphia, Am. Soc. Test. Mater., Spec. Publ. N 384.
44. *Geiger P. J., Morelli F. A., Conrow H. P.* Effects of ultrahigh vacuum on three types of microorganisms. In: Space Programs Summary. Pasadena, Jet Propuls. Lab., 1962, v. IV, 37, 109.
45. *Ginoza W.* The effects of ionizing radiation on nuclei acids of bacteriophages and bacterial cells. Ann. Rev. Microbiol., 1967, 21, 325.
46. *Ginoza W.* Inactivation of viruses by ionizing radiation and by heat. In: Maramorosch K., Kaprowski H. (Eds.). Methods in Virology 1968, 4, 139. N. Y., Acad.
47. *Godding R. M., Lynch V. H.* Viability of *Bacillus subtilis* spores in rocket propellants. Appl. Microbiol., 1965, 13(1), 10.
48. *Graikoski J. T.* The simultaneous lethal effect of temperature and gamma radiation on bacterial spores. Univ. Mich. Order No. 61-1754. Diss. Abstr., 1961, 22(2), 394.
49. *Greene V. W., Walker B., Jr., Anderson O. A.* Methodology of measuring internal contamination in spacecraft hardware. Final Rep. Proj. I, Phase 2. Contr. NGR-24-005-063, Minneapolis, Univ. Minn., School Public Health, 1967.
50. *Gremillion G. G.* The use of bacteria-tight cabinets in the infectious disease laboratory. Proc.

- Second Sympos. Gnotobiotic Technol. Terre Haute Ind., Notre Dame Univ. Press, 1960, 171.
51. Hagan C. A., Codfrey J. F., Green R. H. The effect of temperature on the survival of microorganisms in deep space vacuum. *Space Life Sci.*, 1971, 3(2), 108.
 52. Hall L. B. A decade of development in sterilization technology by the United States space program. Presented at Internat. Steriliz. Conf., Amsterdam, Sept. 1972.
 53. Hall L. B. The importance of sterilization techniques in space exploration. *COSPAR Tech. Manual*, N 4. Paris, Murray Print, 1968.
 54. Hall L. B., Hartnett M. J. Measurement of the bacterial contamination on surface in hospitals. *Publ. Health Rep.*, 1964, 79 (II), 1021.
 55. Hill L. W. Quantitation of buried contamination by use of solvents. Rep. on NASA Grant NGR35-001-012. Grand Fors. Univ. N. Dakota, 1972.
 56. Hoff A. J., Konigsberger D. C. Production of free radicals in DNA and inactivation of its biological activity by gamma-rays. *Internat. J. Radiat. Biol.*, 1970, 17, 459.
 57. Hoffman A. R. Microbial burden prediction model. In: Planetary quarantine, Doc. 900—484 (Semi-ann. Rev., Space Res. and Technol., July—Dec. 1970). Pasadena, Calif., Jet Propuls. Lab., 1971.
 58. Hoffmann A. R., Reichert R. J. Mariner Mars 1971 planetary quarantine plan. JPL Rep. PD610-18, Part I. Pasadena, Calif., Jet Propuls. Lab., 1970, 5.
 59. Hoffman A. R., Winterburn D. A. Microbial burden prediction model for unmanned planetary spacecraft. JPL Rep. 900—566. Pasadena, Calif., Jet Propuls. Lab., 1972.
 60. Horan P. K., Snipes W. The temperature dependence of radiation-induced free-radical destruction. *Internat. J. Radiat. Biol.*, 1971, 19, 37.
 61. Hotz G., Müller A. The action of heat and ionizing radiation on the infectivity of isolation. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 1968, 60, 251.
 62. Hunt R. E., Ernst R. R. A study of the requirements, preliminary concepts and feasibility of a new system to process medical/surgical supplies in the field. Final Rep., Phase I: Contr. DADA-17-70-C-0072, v. I (Technical Summary), Part 1 (Technical Investigation). Cambridge, Mass., Arthur D. Little, 1971.
 63. Hunt R. E., Ernst R. R. Analysis of candidate sterilizers and sterilization processes. In: A study of the requirements, preliminary concepts, and feasibility of a new system to process medical/surgical supplies in the field. Final Rep. 72688, Phase I: Contr. DADA 17-70-C-0072, v. I (Technical Summary), Appendix 6.2. Cambridge, Mass., Arthur D. Little, 1971.
 64. Ingram G. E., Martin M. A., Berger E., Green T. F. Voyager Mars planetary quarantine-basic math model report. Rep. VOY-C2-TR8. Philadelphia General Electric Co., 1967.
 65. Jaffe L. D. *Aeronaut. Aerosp. Eng.*, 1962, 1, 22.
 66. Jaffe L. D. Problems in sterilization of unmanned space vehicles. In: Florkin M., Dolfus A. (Eds). *Life Sciences and Space Research II*. Amsterdam, North-Holland, 1964.
 67. Kapell G. F., McDade J. J., Gavin T. R. Experimental assembly and sterilization laboratory (EASL) operations: Phase I. Tech. Rep. TR32—941. Pasadena, Calif., Jet Propuls. Lab., 1966.
 68. Kautz G. P., Tarver P. Plan for sterilization of Voyager capsule. In: *Spacecraft Sterilization Technology*. NASA SP-108. Washington, D. C., NASA, 1966, 559.
 69. Kohorst D. P., Harvey H. Polymers for use in sterilized spacecraft. In: *Spacecraft Sterilization Technology*. NASA SP-108. Washington, D. C., NASA, 1966, 327.
 70. Kurzinger K. Temperature-dependence of radiation sensitivity in the dry state: a model derived from experiments using atomic hydrogen. II. *Internat. J. Radiat. Biol.*, 1971, 19(1), 45.
 71. Lea D. E. *Actions of Radiations on Living Cells*. London, Cambridge Univ. Press, 1955, 816.
 72. LeDoux F. N. Decontamination of the AIMP—D spacecraft. Doc. X-723-67-171. Greenbelt, Md., NASA/Goddard Space Flight Cent., 1967.
 73. Levy P. W. Radiation effects in glass and other materials. *Phys. Today*, 15(9), 1962, 19.
 74. Lovell D. L. Skin bacteria. *Surg., Gynecol. and Obstetr.*, 1945, 80, 170.
 75. Lyle R. G., Jacoby I. Estimation of encapsulated microbial burden. Contr. NASW-2062, Interim Rep. TR 72—13. Washington, D. C., Exotech Syst., 1972.
 76. McDade J. J. Control of microbial contamination. In: Hall L. B. (Ed.). *Planetary quarantine: principles, methods, and problems*, New York, Gordon and Breach, 1971, 37.
 77. McDade J. J., Favero M. S., Michaelsen G. S., Vesley D. Environmental microbiology and the control of microbial contamination. In: *Spacecraft Sterilization Technology*. NASA SP-108. Washington, D. C., NASA, 1966, 51.
 78. McNall E. G., Duffy W. T., Landolo J. J. Microbiological techniques for recovery from interiors of solids. In: *Spacecraft Sterilization Technology*. NASA SP-108. Washington, D. C., NASA, 1966, 155.
 79. Messenger G. C. Displacement damage in transistors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1965, NS-12, (2).
 80. Minutes, Semi-Annual NASA Spacecraft Sterilization Technology Seminar. American Institute of Biological Sciences (AIBS) NASA. Washington, D. C., 1972.
 81. NASA standards for clean rooms and work stations for the microbially controlled environment. NHB 5340.2. NASA. Washington, D. C., 1967.
 82. Olson R. L., Fraser S. J. Release of microorganisms from solids after simulated hard landings. Final Rep., Seattle, Boeing Co., 1970.
 83. Opfell J. B. A general review of chemical sterilization in space research. In: Florkin M., Dolfus A. (Eds). *Life Sciences and Space Research*, v. 2. Amsterdam, North—Holland, 1964, p. 385.
 84. Radiation Effects State-of-the Art. REIC-38. Battelle Memorial Institute. Columbus, Ohio, 1965.
 85. Patk W. W., Stern J. A. The microbiological aspects of sterilization assembly development laboratories EASL and SADL. Tech. Rep. TR 32—1207. Pasadena, Calif., Jet Propuls. Lab., 1968.
 86. Pflug I. J. Sterilization of space hardware. *Environ. Biol. Med.*, 1971, 1, 63.
 87. Phillips C. R. Gaseous sterilization. In: Lawrence C. A., Block S. S. S. (Eds). *Disinfection, Sterilization and Preservation*. Philadelphia, Lea & Febiger, 1968.
 88. Phillips C. R., Hoffman R. K. Sterilization of interplanetary vehicles. *Science*, 1960, 132, 991.
 89. Phillips G. B. Microbiological barrier techniques. Tech. Manuscr. 260, AD626—085. Ft. Detrick, Md. US Army Biol. Labs, 1965.

90. Phillips G. B. Microbiological barrier techniques. In: *Spacecraft Sterilization Technology*, NASA SP-108. Washington, D. C., NASA, 1966, 105.
91. Phillips G. B., Hanel E. Jr. Use of ultraviolet radiation in microbiological laboratories. US Govt. Res. Rep., 1960, 34, 122.
92. Phillips G. B., Novak P. E., Alg R. L. Portable inexpensive plastic safety hood for bacteriologists. *Appl. Microbiol.*, 1955, 3, 216—217.
93. Planetary Quarantine Specification Sheets. Issued by direction of NASA Planet. Quarant. Off. Inc. Washington, D. C., 1972.
94. Planetary Quarantine Provisions for Unmanned Planetary Missions. NASA, NHB 8020.12. Washington, D. C., 1969.
95. Pollard E. C. The action of ionizing radiation on viruses. In: Smith K. M., Lauffet M. A. (Eds). *Advances in Virus Research*, v. 2. N. Y., Acad., 1954, 109.
96. Pollard E. C. Thermal effects on protein, nucleic acid and viruses. In: Duchesne J. (Ed.). *Advances in Chemical Physics*, v. 7. The structure and properties of biomolecules and biological systems. N. Y., Intersci. Pubs, 1964, 201.
97. Pollard E. C., Solosko W. The thermal inactivation of T₄ and λ bacteriophage. *Biophys. J.*, 1971, 11(1), 66.
98. Portner D. M., Spiner D., Hofman R. K. Effect of ultra high vacuum on viability of microorganisms. *Science*, 1961, 134, 2047.
99. Potter R. C., Schneider C., Ryska M., Hummel D. O. Trends in radiation polymerization. *Angew. Chem. Engl.*, 1968, 7, 845.
100. Pratt. The cleansing light. In: *Mass. Inst. Technol. Reports on Research*, Cambridge, Mass., MIT, 1972, 3.
101. Pryor W. A. Free radicals in biological systems. *Sci. Amer.*, 1970, 223 (2), 70.
102. Puleo J. R., Favero M. S., Peterson N. J. Use of ultrasonic energy in assessing microbial contamination on surfaces. *Appl. Microbiol.*, 1967, 15 (11), 1345.
103. Puleo J. R., Favero M. S., Tritz G. J. Feasibility of using ultrasonics for removing viable microorganisms from surfaces. *Contam. Control*, 1967, 6 (4), 58.
104. Puleo J. R., Oxborrow G. S. Recovery of viable microorganisms from solids: I. Model Systems. *Nat. Commun. Dis. Cent. Rep.* 13, Phoenix, Ariz., USPHS, 1966.
105. Redmann G. H. Experimental assembly and sterilization/sterile assembly and development laboratory test and operation. *Tech. Rep. TR33—322*, Pasadena, Calif., Jet Propuls. Lab., 1967.
106. Reed L. I. Microbiological analysis techniques for spacecraft sterilization. In: *Space Programs Summary 37—32*. Pasadena, Calif., Jet Propuls. Lab., 1965, IV, 35.
107. Reynolds M. C., Garst D. M. Optimizing thermal and radiation effects for bacterial inactivation. *Space Life Sci.*, 1970, 2, 394.
108. Reynolds O. E. Developments in the analysis of planetary quarantine requirements. In: Sneath P. H. A., (Ed.) *Life Sciences and Space Research*, XI. (Proceedings, 15th Plenary Meet., COSPAR, Madrid, Spain, 1972). Berlin, Akademie, 1973, 3.
109. Roark A. L. A stochastic approach to bioburden estimation and prediction.—A preliminary report. *Rep. SC-70-561*. Albuquerque, N. M., Sandia Labs, 1970.
110. Sagan C., Coleman S. Spacecraft sterilization standards and contamination of Mars. *J. Astronaut. Aeronaut.*, 1965, 3(5), 22.
111. Schalkowsky S., Jacoby I. Safety margins in the implementation of planetary quarantine requirements. *Interim Rep. TR72—14*; Contr. NASW-2062. Washington, D. C., Exotech. Syst., 1972.
112. Schalkowsky S., Kline R. C. Jr. Analytical basis for planetary quarantine. In: Hall L. B. (Ed.). *Planetary Quarantine: Principles, Methods and Problems*. N. Y., Gordon and Breach, 1971, 9.
113. Shank J. J., Stilliker J., Harper R. The effect of nitric oxide on bacteria. *Appl. Microbiol.*, 1962, 10, 185.
114. Shielding for High-Energy Electron Accelerator Installations. National Bureau of Standards Handbook, 97, o. p. (Presently available from Nat. Council. Rad. Prot. & Meas., Bethesda, Md.). Washington, D. C., 1964.
115. Sonder E., Templeton L. C. Gamma irradiation of silicon. *J. Appl. Phys.*, 1960, 31(7).
116. Stroud R. H., Lyle R. G. Contamination control by use of ethylene oxide. *Tech. Summary TR72—II* Contr. NASW-2062. Washington, D. C., Exotech Syst., 1972.
117. Swenson B. L. Spacecraft component survivability during entry into the Jovian atmosphere. NASA TM-X-22776. Washington, D. C., NASA, 1971.
118. Tentative nomenclature and analytical basis for use in planetary quarantine. COSPAR Study Group on Standards for Space Probe Sterilization. COSPAR Tech. Man. Ser. N 4, Appendix B, Paris, Murray Print, 1968.
119. The effects of ethylene oxide upon operating electronic devices with breached hermetic seals. *Rep. D2-36527-I*, Seattle, Boeing Co., 1967.
120. The effects of ethylene oxide sterilization in typical spacecraft materials. General Electric Co. Program Information Request Release, N. D.
121. The energy dependence of electron damage in silicon. TRW Space Technology Laboratory, Redondo Beach, Calif., TRW Space Technol. Lab., 1964.
122. Timofeeff-Ressovsky N. W., Zimmer K. G. Das Trefferprinzip in der Biologie (Transl.: The Thrust Principle in Biology). Stuttgart, Hirzel, 1947.
123. Trauth C. A., Jr. A multistage decision model for mission non-contamination requirements. *Space Life Sci.*, 1968, 1, 135.
124. Trauth C. A., Jr., Roark A. L. Dry heat sterilization of heterogeneous bacterial populations. Presented to PQAP.
125. Trexler P. C. Flexible-wall plastic film isolators. *Proc. Second Sympos. Gnotobiotic Technol. Terre Haute, Ind.*, Notre Dame Univ. Press, 1960, 55.
126. Trexler P. C. Germ-free isolators. *Sci. Amer.*, 1964, 211 (1), 78.
127. Trexler P. C. The gnotobiotic-review and future. *Bio-Med. Purv*, Fall, 1961.
128. Trujillo R. E. Preparation and assay of T₄ bacteriophage. *Tech. Rep. SC-RR-710107*; Contr. W-12-853. Albuquerque, N. Mex., Sandia Labs, 1971.
129. Ulrich J. A. Skin carriage of bacteria in the human. In: *Spacecraft sterilization technology*, NASA SP-108. Washington, D. C., NASA, 1966, 87.
130. Vesley D., Smith G., Hangen J., Thun Y. Survival of microbial spores under several temperature and humidity conditions. In: Pflug I. J. (Ed.). *Environmental Microbiology as Related to Pla-*

- netary Quarantine. Semi-ann. Rep. 3, Minneapolis, Univ. Minn., School Public Health, 1969.
131. Willard M., Alexander A. A self-sterilizing coating for spacecraft surfaces. *Nature*, 1964, 202, 658.
 132. Williams F. E. D. Health carriage of *Staphylococcus aureus*: Its prevalence and importance. *Bacteriol. Rev.*, 1963, 27, 56.
 133. Zimmer K. G. From target-theory to molecular radiobiology. *Phys. Med. and Biol.*, 1969, 14, 545.
 134. Zimmer K. G., Ehrenberg L., Ehrenberg A. Nachweis langlebiger magnetischer Zentren in bestrahlten biologischen Medien und deren Bedeutung für die Strahlenbiologie. (Transl.: Determination of long-lived magnetic centers in irradiated biological media and their significance for radiation biology). *Strahlentherapie*, 1951, 103, 3.
 135. Zsolnai T. Versuche zur Entdeckung neuer Fungistatika-VI. (Transl.: Experiments for the development of new fungistatics). *Biochem. Pharmacol.*, 1962, 2, 995.
 136. Zwerling S. A research study to definitize a bio-isolator suit system (BISS). Final Rep. 67SD660, Philadelphia, General Electric Co., 1967.
- Дополнительная литература*
- Adams M. H. Bacteriophages. N. Y., Intersci. Pubs, 1959, p. 592.
- Brannen J. P. A rational model for thermal sterilization of microorganisms. In: *Mathematical Biosciences*, v. 2. N. Y., Elsevier, 1968, 165.
- Clean room and work station requirements, controlled environments. Gen. Services Admin. Fed. Stand. No 209a. Washington, D. C., 1966.
- Davis N. S., Silverman G. J., Keller W. H. Combined effects of ultra-high vacuum and temperature on the viability of some spores and soil organisms. *Appl. Microbiol.*, 1963, 11, 202.
- Decker N. J., Buchanan L. M. Filter applications for spacecraft sterilization program. In: *Spacecraft Sterilization Technology*. NASA SP-109. Washington, D. C., NASA, 1966, 259.
- Dugan V. L. A kinetic analysis of spore inactivation in a composite heat and gamma radiation environment. *Space Life Sci.*, 1971, 2, 498.
- Dugan V. L. Principles of operation of the vacuum probe microbiological sampler. SC-RR-67-688. Albuquerque, Sandia Labs, 1967.
- Dugan V. L., Whitfield W. J., McDade J. J., Beakley J. W., Oswalt F. W. A new approach to the microbiological sampling of surfaces: The vacuum probe sampler. SC-RR-67-114, Albuquerque, Sandia Labs, 1967.
- Favero M. S. Dual meanings of activation. In: Murrel G. (Ed.) *Space Newsletter* (Ryde, Austr.), 1967, 2, 963.
- Freifelder D., Trumbo B. Matching of single-strand breaks to form double-strand breaks in DNA. *Biopolymers*, 1969, 7, 381.
- Ginoza W. Radiosensitive molecular weight of single-stranded virus nucleic acids. *Nature*, 1963, 199, 453.
- Green R. H. Environmental simulation studies/Mol-sink. JPL Planetary Quarantine Program. Status Review, June, 1968.
- Hutchinson F., Pollard E. In: Errera M., Forssberg A. (Eds) *Mechanisms in Radiobiology*, v. 1. N. Y., Acad. Press, 1961, 71.
- Imshenetskiy A. A., Lysenko S. V. [Имшенецкий А. А., Лысенко С. В.]. Ultra-high vacuum and microorganisms. In: *Life Science and Space Research*, 1965, v. 3, 142.
- Kaplan H. S., Moses L. E. Biological complexity and radio-sensitivity. *Science*, 1964, 145, 21.
- Lea D. E., Smith K. M. The inactivation of plant viruses by radiation. II. The relation between inactivation dose and size of virus. *Parasitology*, 1942, 34, 227.
- Mahler H. R., Cordes E. H. In: *Biological chemistry*, 2nd ed. N. Y., Harper & Row, 1966, 177.
- Miltra S., Enger M. D., Kaesburg P. Physical and chemical properties of RNA from the bacterial virus R 17. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 1963, 50, 68.
- Morelli F. A., Fehner F. P., Stembbridge C. H. Effect of ultrahigh vacuum on *Bacillus subtilis* var. niger. *Nature*, 1962, 196, 106.
- Phillips G. B. Back contamination. *Environ. Biol. Med.*, 1971, 1 (2), 121.
- Reynolds M. C., Lindell K. F., Laible N. A study of the effectiveness of thermoradiation sterilization. NASA CR-109972; SC-RR-70-423. Albuquerque. Sandia Labs, 1970.
- Rabbo S. D., Gardner J. F. Efficiency of sterilants in terrestrial and extraterrestrial environments. In: Sneath P. H. A. (Ed.). *COSPAR Tech. Man.* Paris, Murray Print, 1968, N 4, 37.
- Schachman M. K., Williams R. C. The physical properties of infective particles. In: Burnet F. M., Stanley W. M. (Eds). *The Viruses*, v. 1. N. Y., Acad. Press, 1959, Chap. III, 223.
- Schuster H. In: Chargaff E., Davidson J. N. (Eds.). *The Nucleic Acids: Chemistry and Biology*, v. 3. N. Y. Acad. Press, 1959, 217. N. Y.
- Silverman G. J. Microbial survival in deep space environment. *Environ. Biol. Med.*, 1971, 1(1), 83.
- Sinsheimer R. L. A single-stranded deoxyribonucleic acid from bacteriophage $\phi \times 174$ T. *J. Mol. Biol.*, 1959, 1, 43.
- Stent G. S. Mating in the reproduction of bacterial viruses. In: Smith K. M., Lauffet M. A. (Eds.). *Advances in Virus Research*, v. 5. N. Y., Acad. Press, 1958, 95.
- Taylor D. Effect of planetary trapped radiation belt on microorganisms. Presented at AIBS/NASA Semi-ann. NASA Spacecr. Steriliz. Technol. Semin., San Francisco, Calif., July 1972.
- Terzi M. Comparative analysis of inactivating efficiency of radiation of different organisms. *Nature*, 1961, 191, 461.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Абиогенный синтез органических соединений 323, 325, 326, 328—331, 334, 356—358
 — — восстановительные условия на примитивной Земле 334, 335
 — — источники энергии 335
 — — исходные углеводистые соединения 334
 — — модельные эксперименты по воспроизведению абиогенных синтезов на примитивной Земле 334—338
 Авроральные явления 104, 106—111
 Автоматические биологические лаборатории (АБЛ), конструкция и основные методы 355, 384—388
 Адаптация организмов к экстремальным факторам 271, 272, 274, 276, 279, 280, 287, 290, 359
 — — анаэробы (микроаэрофилы) 273, 275, 299, 361, 411
 — — аэробы 273, 299, 411
 — — баротолерантные формы 273, 287
 — — барофилы 286, 287
 — — галофилы 297
 — — гомойотропные животные 278
 — — ксерофилы 296—298, 309, 361
 — — осмофилы 297
 — — пойкилотермные животные 278
 — — психрофилы 276, 361
 — — радиорезистентные формы 292—294
 — — термофилы 280
 Актиномицеты 272, 280, 302
 Амага 202
 Анабиоз 276, 278, 296
 Аналитические методы (см. «Методы обнаружения жизни»)
 Атмосферика 105
 — свистящие 99, 105

Б

- Бактерии 272, 273, 276, 277, 280, 281, 286, 287, 290, 293—295, 298—300, 302—305, 332, 407, 411
 Биогенный синтез органических соединений 329, 330, 333, 334
 Биологически важные вещества
 — — аденозинтрифосфорная кислота 281, 284, 359, 372, 373
 — — аминокислоты 333, 336, 341, 367, 369, 374, 375
 — — белки 336—338, 342, 343, 356, 357, 369, 370, 373, 374
 — — нуклеиновые кислоты и их компоненты 286, 336—338, 343, 369—371
 — — порфирины 321, 359, 373

- Биологические исследования на кораблях и спутниках 274, 276, 288, 290, 300—302, 304
 Биологическое действие экстремальных факторов 271, 272, 274—276, 309, 391
 — — — вакуум 280—284, 300, 304
 — — — вибрация 271, 289, 290, 300
 — — — высушивание клеток 271, 295—298
 — — — газы 298—300
 — — — азот 300
 — — — инертные 299
 — — — свободный кислород 299
 — — — углекислый газ 299, 300
 — — — ядовитые 298
 — — — давление 284—286
 — — — ионизирующая радиация 271, 273, 291, 292, 294, 300, 301
 — — — β -частицы 292
 — — — γ -лучи 292
 — — — нейтроны 293, 301
 — — — протоны широкого спектра действия 293
 — — — комплекс экстремальных факторов
 — — — магнитное поле 295
 — — — — низкочастотное и высокочастотное 295
 — — — невесомость 273, 287, 288
 — — — pH 273
 — — — температура высокая 271, 273, 275, 279, 280, 286
 — — — низкая 271, 276—279, 281, 300, 304
 — — — ультрафиолетовая радиация (излучение) 290—292, 300, 304, 307, 309, 358
 Биология Марса 178—181, 191, 355, 359—363, 366, 367, 380
 — планет-гигантов 198
 — Юпитера 207
 Биосфера (см. «Земля»)
 Благородные газы 327

В

- Вакуум (см. «Биологическое действие экстремальных факторов»)
 Величина загрязнения (см. «Загрязнение микроорганизмами»)
 Венера 84, 85, 112, 113, 134, 136, 139, 149—168, 199, 323, 324, 394, 402, 413
 — атмосфера 139, 149, 151, 153—168, 190, 191, 323, 413
 — — модели 153, 155—157, 161, 163, 164
 — облака 156—161, 163, 168
 — парниковый эффект 160, 167
 — поверхность 149, 151—155, 159, 160

- альbedo 151, 152, 156—159
- происхождение, эволюция 166—168
- радиоизлучение 154
- характеристики 112, 113, 149—151, 189—191, 241
- — давление 153—157, 159—161, 167, 323
- температура 153—158, 161, 164, 165—167, 280, 323

Вероятность загрязнения (см. «Загрязнение микроорганизмами»)

Вибрация (см. «Биологическое действие экстремальных факторов»)

Видиконная стереоскопическая камера 363

«Викинг» (см. «Автоматические биологические лаборатории»)

Вирусы 272

Витрификация 278

Внеземные формы жизни 276, 307, 309, 311, 318, 327, 356—362, 365, 375, 376, 382, 385, 391, 392

Внутреннее загрязнение (см. «Загрязнение микроорганизмами»)

Вода — как биологический растворитель 356, 357

Водоросли 272, 280, 281, 286, 293, 300, 331, 332

Возмущения магнитные 101, 109, 111, 112

— солнечные 100

Вселенная

— возраст 20—22

— замкнутая 19, 21

— закон Хаббла 18, 19

— — красное смещение 18, 19

— критическая плотность вещества 19

— замкнутая 19, 21

— несимметричная 20, 22—24

— открытая 19, 21, 22, 24

— происхождение 1—45

— расширяющаяся 17—19, 21—26

— — модель Фридмана 18, 19, 22

— сжимающаяся 17, 18, 25

— симметричная 20, 22—25

— стадии развития, эволюция 20—23, 45, 317, 318

— — — «большой взрыв» 18, 20

Вспышки протонные 49, 56

— рентгеновские 54

— солнечные 47, 49—54, 57—61, 63—66, 68—83, 100, 103—106, 109, 110, 292

Высушивание (см. «Биологическое действие экстремальных факторов»)

Г

Газовая оболочка 26

— среда 26, 40

— сфера 319

— хроматография (см. «Методы обнаружения жизни»)

Газовый обмен (см. «Методы обнаружения жизни»)

Газопылевая материя (облако, небула) 319, 322, 327

Газы (см. «Биологическое действие экстремальных факторов»)

Галактики 17, 18, 20, 22—24, 26—28, 30, 31, 34, 36, 37, 318—322

— изолированные 31

— неправильные 27, 31

— система 17, 31

— скопления 18, 22, 23, 26

— спиральные 27, 28

— центр 31

— эволюция 27—31

— эллиптические 27, 31

Галактический газ 27, 30

— диск 27, 28, 31

Галактическая плотность 30, 31

— среда 31

— туманность 16

Галактическое время 37

— гало (корона) 26, 27, 31

Геомагнитная активность 65, 100, 101, 106, 109, 110, 112

Геомагнитное поле 87, 89, 94, 100—103, 110—112, 166

Геомагнитные бури 57, 78, 100, 101, 103—106, 112

— возмущения 57, 65, 76, 92, 93, 98, 100, 103—107, 109, 110

Геомагнитный хвост 101—103, 110—112

Глобула 319, 320

Гидросфера 338, 341, 342

Гравитропическая реакция 287—289

Гравитационная неустойчивость 24—26, 135, 214, 322

— — длина волны Джинса 24, 25

— постоянная 19, 169

— потенциальная яма 30

— связь 26, 30

— энергия 42, 133, 135, 175, 319, 322

Гравитационное поле 19

— — Земли 85, 130, 139, 327

— — Луны 121—124, 130

— — Марса 169

— сгущение 28

— тепло 328

Гравитационные возмущения 27

— — от планет 170

— волны 24

— процессы 38

Гравитационный потенциал 22, 44

— — галактики 30

— центр 25

— — Венеры 155

Гравитация 254, 287, 288

— Солнца 49, 138, 170

Грибы 272, 286, 302, 304, 305

«Гулливвер» (см. «Методы обнаружения жизни»)

Д

Давление (см. «Биологическое действие экстремальных факторов»)

Дегидратация 277

«Диоген» (см. «Методы обнаружения жизни») 373

Дисперсия оптического вращения 374

Дистанционные методы обнаружения жизни (см. «Методы обнаружения жизни»)

Дрозofiла 292, 301

З

Забор проб

— — методы 363, 364

— — — бурение 364

— — — липкая лента 364, 365

— — — механический 365

— — — пневматический аэрозольный 364

— — — типы заборников 364

— — — общей массы 364

— — — селективный 364

* Загрязнение (заражение) микроорганизмами 391, 392, 396—398, 402—404

— — величина 393, 402, 403

— — вероятность (риск) 392, 393, 402

— — — модели 393

— — внутреннее 397, 398, 408

— — — методы определения 397, 398

- — источники 399, 400, 402, 404
- — методы контроля
- — — предупреждение загрязнения 391, 403
- — — биологический барьер 404
- — — биологические барьеры 403
- — — — микробиологические фильтры 403
- — — — поверхность 393, 396, 402, 405, 408
- — — — методы определения 393, 396, 397, 404
- — — — вакуумный зонд 397
- — — — отпечатки 396
- — — — протирка-смыв 397
- — — — смыв 396
- — — — соскоб-смыв 396, 397, 404
- — — — ультразвуковые ванны 397
- — профилактика загрязнения персоналом 404, 405
- Замкнутые системы 340
- Замораживание — оттаивание 277, 278
- Звездообразование 21, 25—27, 29—31, 37, 40, 215, 320
- спиральные рукава 27, 28, 30, 31
- Звездная переменность 26
- система 27
- Звездное вещество 25, 26, 32
- лучеиспускание 318, 319
- население 318, 319, 321
- Звездный ветер 26, 34
- Звезды 25—38, 40, 44, 135
- атмосфера 319, 321
- белые карлики 34
- взрыв 25, 34
- водородно-гелиевые 25, 26
- водородные 26
- второго поколения 27
- главной последовательности 32, 33, 36
- голубые 27
- горячие 27—29, 31
- догалактические 31
- карликовые 319
- красные гиганты 33, 34, 320
- массивные 21—24, 26, 29—32
- молодые 21, 30
- нейтронные 35
- первого поколения 26, 36
- сверхновые 26, 34, 36, 318—320
- — взрывы 35
- — вспышки 26, 29, 30, 34—36, 320
- современные 25, 26
- старые 21, 27
- структура 27—29, 32
- теория водной плотности 28
- типа Солнца 31, 32
- углеродные 321
- физика 25, 31
- холодные 319
- эволюция 21, 25, 26, 31, 33—36, 318
- эманация 320
- Земля 16, 38, 39, 41—43, 52, 60, 62—64, 66, 67, 75, 80, 81, 84—86, 89, 101—104, 112, 113, 120—124, 126—128, 131, 133—136, 139, 140, 147, 149—151, 153, 156, 158—160, 163—166, 168, 169, 171, 176, 181, 184, 202, 210, 212, 214, 218, 235, 247, 250, 256, 273, 276, 279, 280, 288, 290, 292, 295, 300, 303, 308, 317, 321, 323, 328—335, 337, 355, 356, 358—362, 364, 365, 375, 380, 385, 386, 388, 391, 392
- атмосфера 44, 52—55, 89, 94, 95, 98, 100, 105, 107—109, 111, 140, 156, 160, 165—168, 172, 179, 181, 198, 237, 248, 332, 380, 395
- — верхняя 84, 85, 94, 100, 104—106, 110, 111
- биосфера 166, 167, 272—274, 329
- — границы 272
- ионосфера 49, 53, 55, 89, 92, 100, 101, 104—106, 109, 110, 112, 164, 217
- — бури 105, 106, 109, 110
- — возмущения 59, 93
- — электроджет 111
- — кора 328, 330
- — литосфера 167, 328
- — магнитосфера 63, 67, 75, 76—78, 87, 90—94, 97—99, 101—104, 106, 107, 111—113
- — модели 90, 91
- — области 92, 93, 98
- — структура 87, 88, 91, 110—112
- — суббури 98, 99
- — мантия 328
- — поверхность 84, 89, 124, 291, 325, 328
- — температура 130, 154, 166
- — породы 121, 131, 153
- — происхождение 42—44, 134, 166
- — вторичная атмосфера 44, 328, 329, 334, 335
- — жизни 44, 45
- — первичная атмосфера 44, 198, 327—329, 334, 357
- — протонные пояса 98, 99
- — радиационные пояса 90, 92—100, 110, 111, 204
- — характеристики 112, 113, 189, 191
- — эволюция 321, 324, 327—329, 343
- — электронный пояс 98
- — ядро 42, 132, 328

И

Излучение

- во Вселенной 23, 25
- — радио 18, 19
- — — микроволновое 18, 19, 22
- — — инфракрасное 25
- — Галактики электромагнитное 60
- — звезд ультрафиолетовое 25, 26, 28—30
- — — электромагнитное 28, 31, 60
- — космическое радио 106
- — межзвездной среды рентгеновское 30
- — Солнца 49, 52—54, 105, 143, 155, 158—161, 173, 176, 253, 254, 292, 304, 318, 323
- — — электромагнитное 47, 48, 52, 60, 79, 101
- — — ультрафиолетовое 49, 53, 105, 106, 164, 165, 167, 207, 210, 335
- — — рентгеновское 49, 52, 53, 65, 68, 75, 79, 80, 105, 106, 110
- — — коротковолновое 47, 52—55, 104, 105, 292
- — — спектр 52—55
- — — ионизирующее 53, 105
- — — циклотронное 99, 100
- — — радио 49, 51—53, 55—59, 65, 80, 100, 109
- — — — постоянный континуум 55—57
- — — — медленно меняющаяся компонента 55, 56, 59
- — — — спорадическое 55, 56, 59
- — — — шумовые бури 52, 55—59
- — — — всплески пяти типов 55—59, 63, 68, 74, 80, 106
- — — — микроволновые всплески 55, 58, 59, 68, 79
- — — — дециметровый континуум 55, 56, 58, 59
- — — — излучение электронов 49
- — — — тормозное 49, 55, 56, 59, 79, 110
- — — — магнитно-тормозное 49, 55, 56, 59, 79
- — — — синхротронное 49, 58, 80, 113, 220
- — — — циклотронное 55
- — — — черенковское 55, 56
- — энергии
- — в звездах 31—33
- — Земли 44
- Инопланетная жизнь (см. «Внеземные формы жизни»)

Ионизирующая радиация (излучение) (см. «Биологическое действие экстремальных факторов»)
 Искусственные самоизолирующиеся системы 339
 «Искусственный Марс» (см. «Моделирование физических условий планет»)
 Источники загрязнения (см. «Загрязнение микроорганизмами»)

К

- Карантин планет (ПК) 391, 392
 — — документация 399
 — — количественные требования 392, 393, 399, 402, 413
 — — мероприятия ПК 402
 — — методы 393
 — — программы 392, 393
 Климатологические станции 274
 Клиностаг 287, 288
 Коацерватные капли 340, 341
 Коллапс 26, 34, 39
 — вещества Вселенной 36, 39, 216
 — галактического газа 27, 31
 — гравитационный 24, 216, 227, 319
 — динамический 25, 30
 — звезд 35
 — межзвездного газа 30, 31, 40
 — — облака 30, 39, 40
 — релятивистский 35
 — — «черные дыры» 26, 35
 Комбинированное действие экстремальных факторов (см. «Биологические исследования на кораблях и спутниках»)
 Кометы 37, 84, 86, 124, 198, 199, 248, 250—256, 321
 — альбедо 254
 — модели 252—255
 — орбиты 251
 — поведение 251, 252
 — происхождение, эволюция 255, 256
 — хвосты 60, 252, 254
 Кометозималии 322, 323
 Контаминирование (контаминация) 325
 Космическая биология 271—276, 280, 284, 292, 298, 308
 — медицина 275, 287, 300
 Космические аппараты
 — «Аполлон-11» 120, 125, 326
 — «Аполлон-12» 122, 125, 326
 — «Аполлон-13» 126
 — «Аполлон-14» 127
 — «Аполлон-15» 124, 128
 — «Аполлон-16» 128, 130
 — «Аполлон» (серии) 125, 127, 132
 — «Биосателлит-2» 287, 288
 — «Вела-2А» 61
 — «Вела-3А» 64, 65
 — «Вела-3В» 64
 — «Вела» (серии) 92, 102
 — «Венера-1» 61
 — «Венера-2» 76, 77, 103
 — «Венера-4» 103, 149, 154—156, 161, 164, 190
 — «Венера-5» 149, 154—156, 190
 — «Венера-6» 78, 103, 149, 154, 155, 190
 — «Венера-7» 149, 153—155, 161, 413
 — «Венера-8» 149, 153—155, 158, 159, 161, 163, 190
 — «Венера» (серии) 154, 157, 161, 323
 — «Джемини-8» 288
 — «Джемини-12» 288
 — «Дискаверер-17» 301
 — «Зонд-3», 76, 77
 — ИМП-1 63, 103, 111
 — ИМП (серии) 70, 71
 — «Интеркосмос-6» 85
 — «Космос-470» 85
 — «Космос-502» 85
 — «Луна-1» 111
 — «Луна-2» 61, 111
 — «Луна-3» 61
 — «Луна-16» 326
 — «Луна-19» 85
 — «Лунар Орбитер» 85
 — «Лунар Эксплорер» 85
 — «Маринер-1» 392, 402
 — «Маринер-2», 392, 402
 — «Маринер-3», 392, 402
 — «Маринер-4» 169, 175, 324, 392, 402
 — «Маринер-5» 149, 150, 155—157, 164, 165, 392, 402
 — «Маринер-6», 169, 175, 182, 324, 392, 402
 — «Маринер-7» 169, 171, 175, 182, 324, 392, 402
 — «Маринер-8» 392, 402
 — «Маринер-9» 168, 169, 171, 172, 174, 175, 179—188, 392, 402, 413
 — «Маринер-10» 143, 147—149, 155, 156, 162—164
 — «Маринер» (серии) 401, 405
 — «Марс-1» 111, 413
 — «Марс-2» 168, 169, 175, 324, 413
 — «Марс-3» 168, 169, 175, 176, 182, 324
 — «Марс-4» 169
 — «Марс-5» 141, 169
 — «Марс-6» 169
 — «Марс-7» 169
 — «Молния-1» 78
 — «ОГО-3» 85
 — «ОГО» (серии) 92
 — «Пегас» 85, 86
 — «Пионер-6» 73
 — «Пионер-8» 74, 77, 85
 — «Пионер-9» 74, 85
 — «Пионер-10» 85, 113, 199, 203—206, 210, 211, 213, 216, 219—221, 235, 237, 392
 — «Пионер» (серии) 413
 — «Просперо» 85
 — «Салют» 85
 — «Сервейор-3» 85
 — «Сервейор-5» 127
 — «Сервейор-6» 127
 — «Сервейор-7» 127
 — «Сервейор» (серии) 365
 — «Эксплорер-10» 101
 — «Эксплорер-12» 101, 111
 — «Эксплорер-14» 111
 — «Эксплорер-16» 85, 86
 — «Эксплорер-23» 85, 86
 — «Эксплорер-26» 99
 — «Эксплорер-33» 65, 66, 103
 — «Эксплорер-34» 74, 77, 78
 — «Электрон» 95
 Космические лучи 84, 90, 94, 95, 98, 101, 105, 320
 — — альбедо 94, 95
 — — галактические 60, 63, 64, 66, 67, 76, 78
 — — межзвездной среды 30
 — — солнечные 49, 58, 60, 64, 67, 68—83, 106, 109
 — — вблизи Земли 70
 — — в межпланетном пространстве 80
 Космобарометр 41
 Космологическая гипотеза 21
 — постоянная 18
 — система 17
 Космологические модели 18, 19, 22—24
 — теории 18, 19
 — — Омнеса 22—24
 Космологический принцип 17, 18

- — совершенный 18
- процесс 18
- Космологическое время 17
- Космология 17—19
- «большой взрыв» 18, 20
- Космотермометр 41

Л

- Лимонит 297, 307, 309, 324, 360
- Литофилизация 275, 296
- Литосфера (см. «Земля»)
- Луна 41—43, 112, 113, 120—136, 143—145, 152, 235, 236, 242, 243, 274, 277, 324, 326, 327, 362, 391, 394
- возраст 124, 129—132, 134
- либрации 122
- масконы 122—126, 130—132, 135
- поверхность, рельеф 84—87, 121—135, 143, 149, 153, 184, 284, 326
- — волны Ван Дорна 123, 125
- породы 122—132
- происхождение 41—44, 124, 130, 132—136, 143, 182
- — теории 41—44, 133—135
- характеристики 112, 113, 121, 148, 149
- Лунотрясения 126, 127, 132
- Люциферин-люциферазная реакция 372, 373

М

- Магнитное поле
 - — биологическое действие 285
 - — «замороженное в плазму» (см. «Плазма»)
 - — в ударной волне 66
 - — геомагнитного хвоста 111
 - — Земли 64, 75, 87, 89—94, 100—103, 106, 113, 132, 139, 295
 - — корональное 51
 - — космического пространства 84
 - — межзвездное 30, 39
 - — межпланетное 47, 60—67, 70, 72, 74, 75, 80, 82, 101—103, 113, 169
 - — планет солнечной системы 112, 113
 - — Марса 169, 170
 - — на лунной поверхности 131, 132
 - — Юпитера 112—114, 204, 216, 217, 219—221
 - — солнечного ветра 170
 - — солнечной системы 38, 67
 - — солнечных пятен 48, 57, 59, 79, 80
 - — Солнца 38, 47—50, 55, 58, 59, 61—63
- Магнитная энергия солнечной туманности 39
 - — Солнца 50
- Магнитные бури 64, 68, 72, 79, 94, 95, 99, 103, 105, 109, 111, 112
 - области Солнца 47, 48, 51, 57, 62, 63
 - суббури 98
- Магнитоауза 88, 101—103, 112
 - планет солнечной системы 112, 113
 - Венеры 166
 - Юпитера 217, 220
- Малые планеты (астероиды) 40, 84, 85, 136, 193, 199, 245—250, 256, 323, 324, 327
 - — альbedo 249
 - — пояс 85, 130, 131, 247
 - — группы 246, 247
 - — происхождение, эволюция 248
 - — — характеристики 248—250
- Марс 84, 95, 113, 133, 139, 166, 168—191, 198, 199, 205, 235, 247, 276, 279, 292, 299, 300, 304, 305, 307—309, 311, 324, 355, 360—362, 364, 365, 376, 380, 388, 391, 394, 396, 401, 402, 413
 - атмосфера 139, 164, 165, 169, 171—176, 178, 181, 187, 188, 191, 299, 300, 307, 311, 324, 329, 360—363, 366, 380, 386, 413
 - — модели 172, 174
 - ионосфера 113, 170, 175
 - поверхность, рельеф 141, 168, 169, 171—173, 176—187, 190, 284, 292, 304, 307, 311, 363, 368, 382, 385
 - — альbedo 177, 178, 180
 - — вулканы 183—185
 - — спектры излучений 164
 - пылевые бури 168, 173, 178
 - сезоны 170, 171, 178, 179
 - спутники 188, 190, 191
 - характеристики 112, 113, 169, 170, 189, 239
 - — давление 171, 174, 182, 187, 361, 367
 - — температура 164, 165, 172, 173, 176, 177, 187, 188, 297, 324, 361
- Масс-спектрометрия (см. «Методы обнаружения жизни»)
- Межзвездная среда (пространство, материя) 28—31, 36, 319—321, 327
- Межзвездное вещество 26, 28, 31, 39, 40
 - пространство 35, 67
 - пылевое облако 30, 320, 327
- Межзвездный газ 25—31, 38, 40
- Меркурий 39, 43, 133, 139—149, 168, 235, 323
 - атмосфера 139
 - — модели 146, 147
 - модели строения 143
 - поверхность 143—149
 - — альbedo 143, 144, 147
 - спутники 139
 - характеристики 112, 113, 148, 149, 189, 241
- Метеорная опасность 84—86
- Метеориты 36, 37, 39—41, 43, 44, 84—87, 121—123, 125—129, 136, 143, 177, 182—184, 190, 248, 250, 296, 324—326
 - железные 291, 325
 - каменные (углистые хондриты) 36, 41, 127, 135, 248, 250, 291, 325, 326
- Метеоры 81—87
- Методы выявления аэробных и анаэробных микроорганизмов 411, 412
 - — — — — применение нетоксических химических стимуляторов 412
 - — — — — тепловая обработка 411, 412
- Методы контроля загрязнения (см. «Загрязнение микроорганизмами»)
- Методы обеззараживания (стерилизации) космических аппаратов (см. «Стерилизация космических аппаратов»)
- Методы обнаружения жизни 129, 271, 352, 356, 361, 362, 381, 382, 384
 - — — — — аналитические 363
 - — — — — газовая хроматография — масс-спектрометрия 325, 367, 368, 381
 - — — — — забор проб (см. «Забор проб»)
 - — — — — микроскопия 365—367
 - — — — — оптические (см. «Оптические методы обнаружения жизни»)
 - — — — — передача панорамы 363
 - — — — — дистанционные 362
 - — — — — спектроскопия инфракрасная 362
 - — — — — ультрафиолетовая 362
 - — — — — фотография 363
 - — — — — функциональные 365, 375
 - — — — — инкубация образца 375
 - — — — — определение роста микроорганизмов 377
 - — — — — изменение pH 378, 379
 - — — — — оптические методы 379
 - — — — — светорассеяние 377, 378, 386

- — — — определение продуктов метаболизма 380, 381, 386
- — — — определение фотосинтезирующих организмов 365, 383, 384
- — — — термогенез — микрокалориметрирование 376, 377

Методы определения загрязнения (см. «Загрязнение микроорганизмами»)

Микоплазма 272

Микробиоценоз 273, 298

Микробная обсемененность (см. «Загрязнение микроорганизмами»)

Микроорганизмы 272, 275—277, 279—281, 283—286, 291, 294, 297, 299, 300, 365, 368, 376—378, 381, 382, 391—394, 397, 405, 408, 409

Микроскопия (см. «Методы обнаружения жизни»)

Микросфера 339

Мировой океан 167, 278, 328

Моделирование физических условий планет 291, 297, 304—307, 309

Модель вероятности загрязнения (см. «Загрязнение микроорганизмами»)

Модель допустимого риска загрязнения (см. «Загрязнение микроорганизмами»)

Модельные опыты с открытыми системами 388, 341

Мультипликатор (372)

Мутации 286, 301—303

Н

Небула 321

Невесомость (см. «Биологическое действие экстремальных факторов»)

Нептун 39, 198, 227—233, 235, 256

— атмосфера 227—233

— — модели 231, 232

— модели строения недр 232, 233

— поверхность 230, 231, 233

— — альbedo 200, 231

— радиоизлучение 229

— спутники 245

— — характеристики 245, 246

— характеристики 113, 198—200, 228

— — температура 229—233

Нуклеиновый код 343, 356, 357

Нуклеогенетические элементы 319

— — азот 322

— — водород 320—323, 327

— — гелий 322, 327

— — кислород 320, 323, 328, 332, 335

— — углерод 320, 321, 325, 326, 332

Нуклеосинтез

— вспышки сверхновых звезд (см. также «Звезды») 318, 320

— звездное лучеиспускание в стабильных звездах 318, 319

О

Оптические методы обнаружения жизни (см. также «Методы обнаружения жизни»)

— — — — биохемилюминесценция 372, 373

— — — — окрашивание флуорохромом 370, 371

— — — — определение гидропероксидазной активности 373

— — — — определение оптической активности 374

— — — — регистрация спектров люминесценции и интенсивности флуоресценции 369, 370

— — — — флуорометрические измерения 372

Открытые системы 338, 408

- — — — живые системы, свойства 339—341, 357, 358
 - — — — стационарный колебательный режим 324, 358
 - — — — целесообразность организации 339, 343, 358
 - — — — энтропия 339, 340, 358
- Относительная биологическая эффективность радиации (ОБЭ) 292

П

Первичная восстановительная атмосфера Земли (см. «Земля»)

Перенос жизни 271

Первичный бульон 338, 341, 342

Питательная среда 271, 279, 280, 299, 376—380

Плазма

— в солнечной системе 38

— во Вселенной 23

— вспышечная 65

— ионосферная 92

— — Венеры 113

— квазитермализованная 101

— магнитосферная 111, 112

— — Юпитера 198

— межзвездная 38

— межпланетная 60—66, 170

— околоземная 92, 93, 103

— с «вмороженным магнитным полем» 57, 61, 76

— солнечная 49, 55, 57, 59—63, 65, 79, 100—104, 106, 110—112, 166

— — потоки 60, 63

— солнечного ветра 65, 76, 84, 102

— ударные волны (см. «Ударные волны»)

Плазменная гипотеза 57

— плотность 221

Плазменные волны 57

— облака 320

— течения 66

Плазменный сгусток 58

Планетарная туманность 34

Планетезимали 42, 323, 327

Планетные системы 45

Планеты образование 38, 39, 216

Планеты земной группы (см. также «Венера», «Марс», «Меркурий») 112, 113, 133, 139, 140, 151, 166, 168, 198, 323

— — — спутники 235

— — — характеристики 112, 113, 189, 198

Планеты-гиганты и их спутники 42, 198—256

— — спутники 198

— — характеристики 198, 199

Плутон 198, 233, 256

— альbedo 200, 234, 235

— атмосфера 234

— характеристики 112, 113, 200, 233, 234

Поверхностное загрязнение (см. «Загрязнение микроорганизмами»)

Полярные сияния 57, 90, 93, 101, 103—112

— — протонные 108

Приспособляемость (см. «Адаптация организмов к экстремальным факторам»)

Пробионты 341, 342

Проблема происхождения жизни 317

— — — возникновение жизни на Земле 287

— — — теория панспермии 271, 272

— — — эволюция органических соединений на Земле 327—335, 356

Простейшие 272, 281

Протопланетное облако 322

Протопланеты 133, 357

Протосолнце 39, 135

Пульсары 35

Пылевые бури (см. также «Марс») 309

Пылевые облака (см. также «Межзвездное облако») 320, 321

Р

Радиационная опасность 60, 83

Радиационные условия около планет солнечной системы 112—114

Радиационный пояс Земли (см. «Земля»)

Радиозвезда 55

Растительные организмы 288—290, 293, 295, 301—303

С

Сатурн 39, 198, 221—230, 235, 239—241, 245, 255, 323

— атмосфера 201, 221—224, 226, 239

— — модели 222, 226, 227, 241

— кольца 222—225, 227, 235, 239—241

— — характеристики 239, 240

— модель строения недр 227

— поверхность 222, 224

— — альbedo 200, 225, 240

— радиоизлучение 223, 224, 241

— спутники 239, 242

— — альbedo 242

— — Титан (см. «Титан»)

— — характеристики 242, 243

— — температура 242

— радиационный пояс 223

— характеристики 112, 113, 198—200, 209, 221, 223, 226

— — давление 222

— — температура 222—226, 241

Свановские полосы 319

Свет, роль в поддержании жизни 358, 359

Свободный кислород 273, 360—362

Синергизм 274

Система Земля — Луна 41—45, 134, 139, 199

Солнечная активность 47—53, 56, 57, 61, 63, 66—68, 70, 76, 83, 101, 105, 109, 207, 219, 220, 255

— — центры 51, 55, 56, 59, 65

— — циклы 51—56, 63, 64, 76, 105

— — постоянная 52, 147

— — система 13, 35—43, 47, 60, 67, 81—84, 86, 87, 113, 133, 135, 136, 146, 168, 198, 209, 230, 235, 239, 322, 391

— — теории происхождения 37—43, 133, 198, 233, 251

— — физико-химические свойства (см. «Химический состав, элементы»)

— — туманность 22, 38—40, 43, 133, 135, 136, 166, 256, 320

— — теории первичной 38, 40, 41, 43, 44, 214, 251, 256, 320

— — — модели 40

— — — физико-химические свойства (см. «Химический состав, элементы»)

Солнечно-земные связи 47, 87, 100, 106

Солнечные рентгеновские лучи 128

Солнечный ветер 33, 34, 44, 47, 60—67, 70, 74, 76, 80—82, 87, 88, 90—92, 94, 97, 101—103, 106, 111—113, 146, 147, 165, 166, 170, 172, 173, 252, 254, 323, 327

— — характеристики около планет солнечной системы 112, 113

Солнце 28, 31, 32, 34, 35, 37—40, 47—83, 85, 87, 100, 102—104, 106, 109, 111, 113, 121, 122, 133, 135, 139, 143, 145—151, 166—168, 170, 171, 203, 210, 216, 229, 230, 233, 239, 242, 244, 245, 248, 252—256 318—323

— атмосфера 47, 48, 51, 53, 55, 56, 58

— королевские зоны 48, 51

— корона 47, 49, 51, 53, 55—61, 63, 64, 79—81, 83, 320

— — протуберанцы 47, 49, 50, 51

— — — водородные волокна 50

— — — корональное вещество 51

— — — корональный газ 51

— — корпускулярное излучение, потоки 47, 57, 60, 63, 66, 67, 84

— — «спокойное» 52, 54—56

— — фотосфера 47—49, 51, 53, 57, 62

— — — солнечные пятна 47—49, 51, 52, 56, 57, 70, 83

— — — — группы 47, 48, 50—52, 59

— — — — число Вольфа 48, 51, 52, 56

— — — факелы 47—49, 51, 59

— — хромосфера 47—51, 53, 55, 56, 79, 83

— — — флоккулы 47—51, 56, 59

Спектры М, N, R 319

Статолиты 288

Стерилизация космических аппаратов 271, 276, 299, 304, 402, 403

— — — методы обеззараживания 405

— — — аутостерилизация 411

— — — газовая стерилизация 298, 299, 405, 406

— — — — бромистый металл 406

— — — — окисью этилена 399, 406

— — — — формальдегид 406

— — — — использование радиации 406—408

— — — — обработка дезинфицирующими средствами 405

— — — — тепловая стерилизация 279, 391, 408, 409

— — — — терморадияция 409, 410

Строматолиты 332

Т

Температура (см. «Биологическое действие экстремальных факторов»)

Теория мишени 294, 295

Теория панспермии 271, 272

Термогенез (см. «Методы обнаружения жизни»)

Термоядерные реакции

— в звездах 32—36, 39

— во Вселенной 21

— на Венере 123

— на Луне 123

— на Солнце 38

Титан 198, 235, 237, 242—244

— атмосфера 198, 242—245

— — модели 244

— — парниковый эффект 244

— — модели строения недр 245

— — поверхность 198

— — альbedo 243, 244

— — характеристики 242—244

— — температура 244

У

Углеводы 319—321, 325

Углеродистые соединения, углеводороды 129, 318—321, 324—326, 328, 330, 333—335, 356, 364

Ударные волны

— — в межпланетном пространстве 61, 63—66, 68, 78, 82, 83, 104, 112

— — — — бесстолкновительные 65, 101, 102

— — — головная 97, 99, 102, 103, 220

— — — около Венеры 112, 113

— — — Луны 112

- — — Марса 112, 113, 170
- — — плазменные 57—59, 79
- — — солнечного ветра 65, 113, 169
- — — солнечных космических лучей 77, 78, 80
- — — стоячие 77, 113
- Ультрафиолетовая радиация (излучение) (см. «Биологическое действие экстремальных факторов»)
- Уран 39, 198, 227—233, 245
- атмосфера 201, 227—229, 231—233
- модели строения недр 232, 233
- поверхность 230, 231, 233
- — альbedo 200, 230, 231
- радиоизлучение 229
- спутники 245
- — альbedo 245
- — характеристики 245, 246
- — характеристики 112, 113, 199, 200, 228
- — температура 229, 230, 232, 233

Ф

- Физиологическая точка действия фактора 275
- Флуорохромы 370, 371
- Фотобиологические процессы 359
- Фотореактивация 275, 281, 291, 304, 358
- Фотосинтез 309, 358—361, 383, 384
- Фотосинтезирующие организмы 299, 309, 332, 358, 365, 383, 384
- Фотохимические реакции порфиринов 358
- Функциональные методы обнаружения жизни (см. «Методы обнаружения жизни»)

Х

- Хемосинтез 300
- Химическая основа жизни 353, 356, 357
- Химический состав, элементы
- — — атмосферы
- — — Венеры 153, 154, 157, 158, 164—167, 190, 191
- — — Земли 36, 39, 44, 45, 139, 166, 167, 191, 298, 328
- — — Марса 171, 172, 191
- — — Меркурия 146, 147
- — — Нептуна 228, 229
- — — планет-гигантов 198
- — — планет земной группы 139
- — — Сатурна 221—224, 226
- — — Урана 228, 229
- — — Юпитера 201—203
- — — звезд 25, 26, 28, 29, 32—37
- — — комет 251—253, 321
- — — космических лучей галактических 66, 67, 70
- — — — солнечных 70
- — — межпланетной плазмы 61, 66
- — — метеоритов 39, 41, 43, 66, 85, 128, 136
- — — поверхности Марса 177—179, 181
- — — пород Земли 66, 128
- — — Луны 125, 127—130, 134—136
- — — при эволюции Вселенной 19, 21—26
- — — — солнечной системы 36, 37
- — — — туманности 39—41
- — — Солнца 32, 43, 44, 53, 61, 66, 136
- Хондриты углистые (см. «Метеориты»)
- Хромосомные аберрации 301

Ч

- Частицы, потоки высоких энергий
- — — в космических лучах галактических 66, 67
- — — — — солнечных 59, 60, 67—78, 80—83
- — — в магнитосфере Юпитера 113, 114, 221
- — — в межпланетном магнитном поле 82
- — — — — пространстве 68—70, 75, 80, 81
- — — в околоземном пространстве 68, 70, 109
- — — в радиационных поясах Земли 93, 94, 98, 99
- — — в солнечной плазме 110
- — — — — туманности 39
- — — в солнечных вспышках 49, 64, 81
- — — во Вселенной 20—23, 25, 29

Э

- Эволюция
- Вселенной 313, 317—319, 321
- Земли 327, 329, 338
- Экобиология (см. «Внеземные формы жизни»)
- Экзотермические средства 409
- Экологическая ниша 271
- Экстремальные факторы (см. «Биологическое действие экстремальных факторов»)

Ю

- Юпитер 39, 62, 133, 134, 136, 198—229, 237, 244, 247, 254—256, 322, 323
- атмосфера 139, 201—209, 211—215, 217, 323, 395
- — модели 205, 206, 211—214
- — полосы 201
- — состав 201—204
- — строение 201, 202
- Красное пятно 207—210, 214
- магнитосфера 113, 216—218, 221, 237, 239
- модели строения недр 214—216
- поверхность 206—208
- — альbedo 200, 201, 210, 211, 225
- радиационные пояса 113, 114, 204, 205
- радиоизлучение 113, 204, 205, 212, 216—220
- спутники 198, 235, 242
- — галилеевы 235
- — альbedo 236—238
- — атмосфера 237
- — радиоизлучение 238
- — строение 239
- — характеристики 236
- — — температура 237, 238
- — — характеристики 235, 236
- — характеристики 112, 113, 199, 200, 205, 220
- — давление 202, 203, 206, 209, 212—215
- — температура 202—207, 211—215, 241

Я

- Ядерно-магнитный резонанс 266, 281, 298
- Ядерный синтез
- — в Галактике 37
- — в звездах 26, 27, 31—35
- — в Солнце 32
- — во Вселенной 21, 24
- — космологический 21, 24, 36

АДРЕСА АВТОРОВ, РЕДАКТОРОВ
И ЧЛЕНОВ РЕДКОЛЛЕГИИ *

Бурназян А. И.

СССР, 103051, Москва К-51, Рахмановский пер., д. 3.
Министерство здравоохранения СССР.

Вернов С. Н.

СССР, 117234, Москва В-234, Ленинские горы,
МГУ, Научно-исследовательский институт ядерной
физики

Газенко О. Г.

СССР, 123007, Москва Д-7, Хорошевское шоссе,
д. 78а, Институт медико-биологических проблем
МЗ СССР

Давыдов В. Д.

СССР, 117901, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 88,
Институт космических исследований АН СССР

Имшенецкий А. А.

СССР, 117312, Москва В-312, Профсоюзная ул., д. 7,
Институт микробиологии АН СССР

Логачев Ю. И.

СССР, 117234, Москва В-234, Ленинские горы,
МГУ, Научно-исследовательский институт ядерной
физики

Calvin Melvin

Laboratory of Chemical Biodynamics, University
of California, Berkeley, California 94720, USA

Cameron A. G. W.

Harvard College Observatory, Cambridge, Massachu-
setts 02138, USA.

Gulkis Samuel

Jet Propulsion Laboratory, California Institute
of Technology, Pasadena, California 91103, USA

Jones Walton L.

Deputy NASA, Director for Life Sciences, NASA
Headquarters, Washington, DC 20546, USA

Hall Lawrence B.

Planetary Programs Office of Space Sciences, Natio-

Маров М. Я.

СССР, 125047, Москва А-47, Мясуская пл., д. 4,
Институт прикладной математики АН СССР

Опарин А. И.

СССР, 117071, Москва В-71, Ленинский проспект,
д. 33, Институт биохимии им. А. Н. Баха АН СССР

Панченкова Э. Ф.

СССР, 125047, Москва А-47, Мясуская пл., д. 4. Ин-
ститут прикладной математики АН СССР

Петров Г. И.

СССР, 117901, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 88,
Институт космических исследований АН СССР

Писаренко Н. Ф.

СССР, 117901, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 88,
Институт космических исследований АН СССР

Рубин А. Б.

СССР, 117234, Москва В-234, Ленинские горы, МГУ,
Проблемная лаборатория космической биологии

Черниговский В. Н.

СССР, 199164, Ленинград В-164, Набережная Мака-
рова, д. 6, Институт физиологии АН СССР
им. И. П. Павлова

nal Aeronautics and Space Administration, Washing-
ton, D. C. 20546, USA

Krauss Robert W.

Dean, College of Science, Oregon State University,
Corvallis, Oregon 97331, USA

Newburn Raymond L.

Jet Propulsion Laboratory, California Institute
of Technology, Pasadena, California 91103, USA

Reynolds Orr E.

American Physiology Society, 9650 Rockville Pike,
Bethesda, MD 20014, USA

Urey Harold C.

Department of Chemistry, University of California,
San Diego, La Jolla, California 92307, USA

* Адреса редакторов II и III томов помещены в соответствующих томах.

ОСНОВЫ КОСМИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ

Том I

КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО КАК СРЕДА ОБИТАНИЯ

Утверждено к печати
Комиссией по исследованию
и использованию
космического пространства
Академии наук СССР

Редакторы
Ю. И. Ефремов, Д. В. Петрова

Художник *Б. П. Кузнецов*

Художественный редактор
Н. Н. Власик

Художественно-технический редактор
А. П. Гусева

Корректоры *Н. М. Вселюбская,*
В. Г. Петрова, В. А. Шварцер

Сдано в набор 13/III 1975 г.
Подписано к печати 19/IV 1975 г.
Формат 84 × 108¹/₁₆. Бумага люксарт.
Усл. печ. л. 44,94. Уч.-изд. л. 48,6
Тираж 7700. Т-07032. Тип. зак. 1748.
Цена 5 р. 53 к.

Издательство «Наука»
103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21
2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10