

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Л. В. Ксанфомалити

ПАРАД ПЛАНЕТ



МОСКВА
НАУКА • ФИЗМАТЛИТ
1997

“НЛОСР”



За последние 40 лет неизмеримо выросли наши знания о планетах Солнечной системы. Радикально изменились представления о природе спутников планет-гигантов. Появились первые сведения о планетах у других звезд. Среди метеоритов, по-видимому, действительно найдены образцы, прилетевшие с Марса. Если в них удастся найти следы микроорганизмов, пусть даже невообразимо древних, вечный вопрос о происхождении жизни получит новое освещение.

Разумеется, в планетной науке еще немало «белых пятен». Тем не менее, уже сегодня возможно на уровне научно-популярного издания представить более или менее законченное повествование о семействе планет и других тел, обращающихся вокруг Солнца.

В литературу для неспециалистов новые научные данные проникают неторопливо. Доктор физико-математических наук Л.В.Ксанфомалити, заведующий лабораторией Института космических исследований РАН, автор и разработчик многих экспериментов на российских космических аппаратах, стремится популяризировать новые результаты по мере их появления. В его первую популярную книгу «Планеты, открытые заново» (М.: Наука, 1978) вошли планеты до Юпитера включительно, во вторую (Die Planeten. — М.: Mir; Leipzig: Urania-Verlag, 1986, на нем. яз.) вошел и Сатурн.

Предлагаемая книга Л.В.Ксанфомалити «Парад планет» охватывает основные результаты исследований практически всех планет Солнечной системы, от Меркурия до Плутона, а также астероидов и комет.

История изучения планет полна драматических событий, иногда с неожиданными открытиями и забавными недоразумениями, которые тоже отражены в этой книге.

ББК 22.654
К86
УДК 523.4; 523.6

К86 КСАНФОМАЛИТИ Л. В. Парад планет.—М.: Наука. Физматлит, 1997.—256 с., 48 с. цвет, ил.—ISBN 5-02-015226-9.

Многие астрономы-профессионалы наших дней в детстве зачитывались книгами К. Фламариона, Б. А. Воронцова-Вельяминова и другими научно-популярными изданиями. Космические исследования принесли на страницы специальных изданий новый мир планет, разительно не похожий на прежние представления. В наземной технике, используя приборы, способные анализировать ничтожные количества вещества, ученые пытаются обнаружить следы древней жизни в метеоритах, пришедших с других небесных тел. Но в научно-популярные издания новые результаты проникают медленно. Предлагаемая книга представляет собой рассказ о последних открытиях в физике планет, иллюстрируемый большим числом фотографий, цветных иллюстраций и схем.

Для широкого круга читателей, интересующихся астрономией и исследованиями планет Солнечной системы.

К 1605050000—038
053(02)-97 103-97. Наука, II полугодие

ББК 22.654

Научно-популярное издание

КСАНФОМАЛИТИ Леонид Васильевич

ПАРАД ПЛАНЕТ

Редактор *С.С.Куликов*

Корректор *О.Ф.Алексеева*

Компьютерная верстка *Л.Т.Варьяш*

Компьютерная графика *М.В.Ивановского*

ИБ № 41877

ЛР № 020297 от 23.06.97.

Подписано в печать 27.10.97. Формат 84×108/16. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 31,92. Уч.-изд. л. 35,11. Тираж 1000 экз. Заказ тип. № 2598 С-038.

Издательская фирма «Физико-математическая литература» РАН
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Отпечатано в Московской типографии № 2 РАН
121099 Москва Г-99, Шубинский пер., 6

ISBN 5-02-015226-9

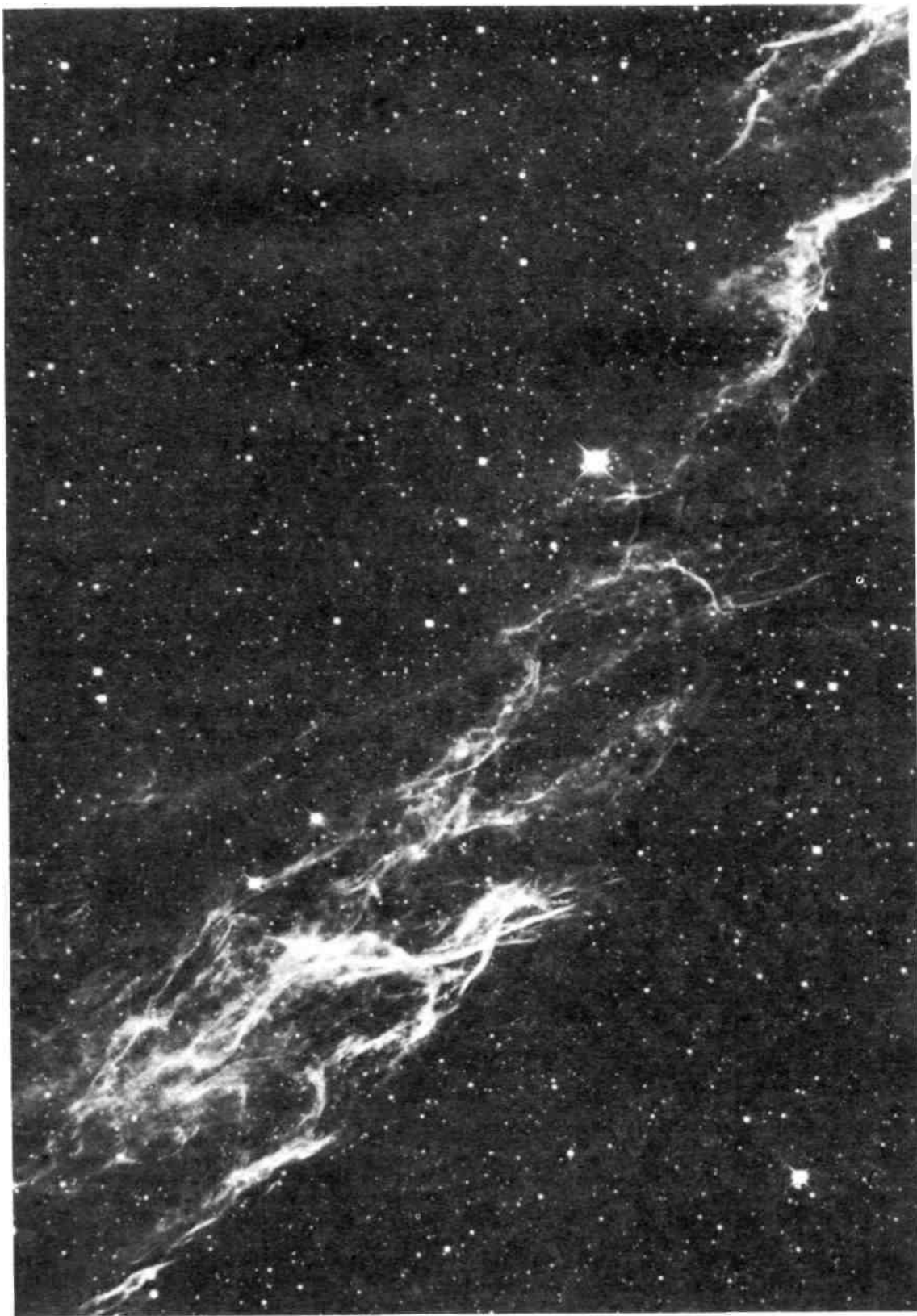
© Л.В.Ксанфомалити, 1997

На первой странице суперобложки приведено фото поверхности Ио (снимок аппарата «Вояджер-2»).

На последней странице суперобложки — поверхность Марса в тепловом ИК-диапазоне (снимок аппарата «Фобос»).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1	Юпитера (156). Спутники Юпитера (157). Ио (158). Европа (162). Ганимед и Каллисто (168). Амальтея и другие. Кольцо Юпитера (172). О событиях почти невероятных. В определенных условиях спутники могут взрываться (174).
О ЗВЕЗДНОЙ БЕЗДНЕ, ПЛАНЕТАХ И ЧЕЛОВЕКЕ 5	
ГЛАВА 2	ГЛАВА 6
ЛУННЫЕ ЛАНДШАФТЫ МЕРКУРИЯ 12	ОКРУЖЕННЫЙ БЕСЧИСЛЕННЫМИ КОЛЬЦАМИ САТУРН 176
Ранние сведения (12). Особенности движения планеты (13). Происхождение рельефа Меркурия (15). Равнина Жары (20). Реголит Меркурия (22). Строение тела планеты (24). Экзосфера Меркурия (26). Магнитное поле Меркурия (27). Новая миссия к Меркурию — как она видится 20 лет спустя после «Маринера-10» (28).	Пояса, зоны, вихри и ветры (176). Радиоисточник у 80° с.ш. Магнитосфера Сатурна (178). Волнующееся море колец (180). Кольцо F, споки и новые идеи (182). Спутники Сатурна (185). Титан: несбывшиеся надежды (191).
ГЛАВА 3	ГЛАВА 7
ПОЛНАЯ ЧУДЕС ВЕНЕРА 32	ПЕРВАЯ ВСТРЕЧА С УРАНОМ 193
Орбита, масса и период вращения Венеры (33). Период вращения находит радиолокация (35). «Венеры» штурмуют Венеру (37). Состав и строение атмосферы (39). Станный ветер Венеры (44). Облака Венеры и их инфракрасное тепловое излучение (46). Четыре взгляда на поверхность Венеры (52). Увидеть невидимое (62). Географические достопримечательности Венеры (64). Парадокс устойчивости рельефа (79). «Электрический дракон» Венеры (83). Еще раз о тепловых потоках. Недра Венеры и поиск ее магнитного поля (87). Дейтерий: так ли это было? (90).	Уран, каким его увидел «Вояджер-2» (194). Магнитный шторм и строение недр. Кольца Урана (196). Семейство спутников Урана (198). Главные спутники (200). Миранда (205).
ГЛАВА 4	ГЛАВА 8
КРАСНЫЕ ПЕСКИ МАРСА 92	НЕПТУН: ОТКРЫТИЕ МИМО КОТОРОГО ПРОШЕЛ ГАЛИЛЕЙ. КОЕ-ЧТО О ПЛУТОНЕ 207
Второе открытие Марса (92). Рельеф планеты (98). Немного подробностей о кратерах и «каналах» (101). Спящие вулканы и лавовые поля равнин (104). Каньоны и древние реки Марса (108). Тепловой портрет Марса (112). Несколько гипотез о тех временах, когда по Марсу текли реки (115). Об истории поверхности Марса, циклах Миланковича, блуждающих полярных районах и кратерах необычной формы (117). Пылевые бури и ураганы. Необычные свойства атмосферы Марса (120). Пылевые облака над равниной Эллада (123). Внутреннее строение. Есть ли у Марса магнитное поле? (125). Прикосновение к поверхности Марса (126). Снова на Марсе через 21 год (130). Где ты, жизнь на Марсе? (130). Естественные спутники Марса (133). Конец Фобоса? (136). Прощание с Марсом и «Викингami» (137).	Вода вместо алмазов (208). До Нептуна 4900 км (209). Призраки метеорологии (211). Наклонный ротатор (212). Кольца бывают и незамкнутыми (214). Спутники Нептуна: шесть новых и два старых (216). Спросите у Плутона (217). Озера и моря на Тритоне? (218). Тритон: прощальное шоу «Вояджера-2» (218). Впереди миллионы лет полета (221). Послание неизвестному адресату (222). Плутон и Харон (224).
ГЛАВА 5	ГЛАВА 9
ВЛАСТЕЛИН НЕБЕС ЮПИТЕР 138	ОБЛОМКИ ПЛАНЕТЫ, КОТОРОЙ НЕ БЫЛО. АСТЕРОИДЫ И КОМЕТЫ 228
Полосатый гигант (139). Состав, строение и динамика атмосферы (143). Немного подробностей об облачном слое и природе цветного наряда планеты (146). Внутреннее строение и магнитное поле (150). Первый зонд в атмосфере	Первое открытие XIX века (229). Ревизия размеров астероидов (232). Форма и масса астероидов. Бывают ли у них спутники? (233). Метеоритные кратеры и метеорит в почтовом ящике (236). Три возраста метеоритов (240). Кометы — гости из далека (242).
	ГЛАВА 10
	ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКА НЕОБИТАЕМЫХ И ОБИТАЕМЫХ ПЛАНЕТ. ПЛАНЕТЫ ДРУГИХ ЗВЕЗД 246
	Охота за планетами (247). Какие планетные системы могут быть обитаемыми? (249). Окаменелости с Марса (250). Другие ограничения на обитаемость планет (253).



Тонковолокнистая туманность «Летящая» в созвездии Лебедя

Время придет, когда долгие и усердные исследования обнаружат такие явления, которые сейчас глубоко скрыты. Жизнь человека, даже если всю ее посвятить изучению неба, не позволит достичь его дальних пределов.

Сенека. (I в.н.э.)

Г Л А В А 1

О ЗВЕЗДНОЙ БЕЗДНЕ, ПЛАНЕТАХ И ЧЕЛОВЕКЕ

В ясную безлунную ночь открывается полная звезд бездна — одно из самых удивительных и красивых зрелищ природы. На Земле шумят моря и океаны, на деревьях распускаются и опадают листья, проходят годы, но вид звездного неба заметно не изменяется. Люди рождаются, взрослеют, потом стареют и уходят навсегда. Казалось бы, что их жизнь по сравнению с вечным ходом небесных светил? Но человек — и зритель, и актер в этом великом театре природы. Возможно, даже единственный зритель в огромном пространстве, где рассеяны миллиарды звезд.

Неизвестно почему, но проблема поиска братьев по разуму почти никого не оставляет равнодушным. Во все времена человек мечтал о встрече с себе подобными, мысленно населяя ими небесные миры. Дж.Бруно поплатился жизнью за идею множественности обитаемых миров, а И.Ньютон, которому это не принесло никакого вреда, полагал, что обитаемы не только планеты, но даже Солнце. Что делать, история человечества не слишком логична.

Когда наука и технология достигли современного уровня, проблема поиска жизни во Вселенной в том или ином виде была включена в научные планы исследований ряда стран.

Если не говорить о всевозможных фантазиях, место, где можно всерьез искать жизнь (в единственной знакомой нам форме), — это планеты. История планетной системы нашего Солнца, в крайне схематичном изложении, такова.

Около 15 млрд лет назад в невообразимом взрыве родилась наша Вселенная, ее время и пространство. Спустя какое-то время возникли гигантские звездные острова — галактики, в том числе и наша Галактика. Звезды в ней рождались, жили, умирали, взрывались. Слева представлена фотография тонковолокнистой туманности «Летящая» в созвездии Лебедя — это все, что осталось от оболочки звезды в гигантском взрыве. Вещество рассеивалось в пространстве, а затем снова конденсировалось в туманности, в которых вновь возникали

звезды. Одна из наиболее активных областей звездообразования в Галактике — это большая туманность в созвездии Ориона. Еще не понятые до конца процессы рождения здесь звезд, возможно, со своими планетными системами, скрыты гигантскими скоплениями пыли и газа. Из туманности исходит таинственное мазерное излучение.

В таком же процессе около 4,55 млрд лет назад в одном из ничем не примечательных уголков нашей Галактики после конденсации крайне разреженной газопылевой туманности родились еще одна звезда — наше Солнце — и окружающие его планеты. История происхождения планетной системы у Солнца полна загадок и не нашедших ответа вопросов.

Здесь можно было бы рассказать о полной драматизма судьбе различных гипотез о происхождении Солнечной системы. Но это отдельная и очень интересная тема, которая могла бы стать самостоятельной книгой. Сейчас наиболее развита гипотеза возникновения планет именно благодаря конденсации протопланетного газопылевого облака, оставшегося после образования Солнца. Она разделяется большинством космогонистов, хотя в происхождении самого облака они не единодушны. По мнению специалистов, остаются непонятными и некоторые этапы весьма длительного процесса, который привел к образованию планет.

Отметим, что переход от качественных рассуждений к более или менее строгой теории указывает на крайнюю сложность происходивших при формировании планет процессов. Выяснилось, например, что после образования Солнца гораздо вероятнее конденсация остатков туманности во вторую, карликовую звезду, чем в планетную систему. Иными словами, вероятность образования двойной звезды намного выше образования звезды с планетами. А именно кратные звезды составляют подавляющее большинство населения Галактики.

Чтобы как-то спасти положение, было предложено несколько «катастрофических» гипотез, согласно которым планетная система могла

образоваться в результате взрывов, сближений звезд и др. Например, рассматривается гипотеза о том, что на определенной стадии эволюции протопланетной туманности неподалеку от нее проходила звезда, которая именно в этот момент взорвалась как сверхновая. Ударные волны в протопланетной туманности создали необходимые условия для дальнейшего формирования планет. Эту идею можно назвать гипотезой «трехполой любви», поскольку для появления «потомства» — планетной системы — требуются три участника: Солнце, протопланетная туманность в определенной стадии своей эволюции и взрыв случайно сближившейся с Солнцем звезды. Сильную поддержку эта гипотеза получила в результате анализа химического состава большого метеорита Альенде. В нем оказалось необычно много кальция, бария и неодима. Именно такая аномалия состава должна возникнуть под действием близкой вспышки сверхновой. И сближения звезд, и взрывы сверхновых — явления крайне редкие. Поэтому изложенная гипотеза допускает, что планетные системы образуются у ничтожного числа звезд как редкое исключение. Так ли это?

В 80-е годы нашего столетия «катастрофические» гипотезы, хотя они еще и сейчас находят много сторонников, стали, пожалуй, уступать место эволюционным гипотезам. Но и в них вероятность образования планетной системы получается очень низкой. Техника сейчас еще только подошла к созданию наземных и космических приборов и аппаратов, способных дать строгие экспериментальные доказательства существования других планетных систем (хотя некоторые результаты уже появились). Поэтому самые нетерпеливые энтузиасты предлагают подойти к проблеме с другой стороны: искать не просто планеты, а планеты обитаемые, с высокоразвитой цивилизацией.

Если образование планет и возникновение жизни на них — процессы закономерные и если возникшая жизнь во многих случаях достигает разумного и технологического уровня, о существовании планет можно было бы судить, обнаружив признаки технической деятельности какой-то цивилизации. Удобнее всего попытаться зарегистрировать радиоизлучение искусственного происхождения. (Например, телевизионные передатчики Земли в радиодиапазоне излучают в космос большую мощность, чем Солнце. Насколько разумна такая трата энергии и как долго это продлится — это уже другой вопрос.) Но пока поиски радиосигналов искусственного происхождения неизменно кончались разочарованием, хотя чувствительность

современных приемных радиоустройств уже позволяет обнаружить такой сигнал, даже если бы передатчик находился в радиусе до 10 пк (около 30 световых лет; 1 световой год составляет $0,95 \cdot 10^{16}$ м, а 1 парсек (пк) $\approx 3,1 \cdot 10^{16}$ м). Подразумевается, что отправители используют технику, близкую к нашей, или несколько опережающую ее.

Поиск таких сигналов — очень увлекательная проблема, но для нас важен именно отрицательный его результат. Считается, что наиболее вероятная причина «Великого молчания Вселенной» — малая распространенность разумной жизни в Галактике. В свою очередь, малую распространенность можно связать как с малой вероятностью возникновения жизни на имеющейся планете, так и с низкой распространенностью самих планетных систем. Следует учитывать и другие факторы. Так, разумная жизнь не вечна, а по сравнению со временем существования звезд и планет ее продолжительность вообще ничтожна. Поэтому маловероятным представляется само совпадение времен существования нашей цивилизации и другой разумной жизни в разных мирах. Читатель может познакомиться с этой проблемой по известной книге И.С.Шкловского «Вселенная, жизнь, разум».

На Земле жизнь возникла всего через полмиллиарда лет после завершения формирования планеты. Подробности происхождения жизни неизвестны. Существенно, что уже первые, самые примитивные организмы были наделены почти всеми важнейшими механизмами, которые клетки всех живых существ используют и теперь. Дальнейшие события развивались очень-очень медленно. Прошел добрый миллиард лет, пока жизнь по-настоящему распространилась на Земле, хотя и в самых простейших формах. Дальнейшее их усложнение, по существу, безмерное, стало возможным только с появлением многоклеточных организмов 570 млн лет назад. Есть убедительные данные о том, что переход к многоклеточным — событие еще менее вероятное, чем само возникновение жизни. Появление же многоклеточных вызвало подлинный «кембрийский взрыв» в образовании новых живых форм. Их мутации и беспощадный естественный отбор наиболее приспособленных видов дали те формы жизни, которые окружают нас на планете и одной из которых является сам разумный человек.

Таким образом, в оценке вероятности как возникновения разумной жизни на Земле, так и образования планетной системы мы располагаем одним-единственным доказательством — это мы сами и наша планетная система.

Поэтому вероятность может быть любой, практически от нуля до единицы, и поэтому так важно изучение планет Солнечной системы и поиск планетных систем у других звезд.

В нашей Галактике около 150 млрд звезд. Часть их доступна для изучения астрофизическими методами. С другой стороны, население Солнечной системы составляют 9 больших планет, 60 их спутников, несколько десятков тысяч астероидов и комет, а также бесчисленные обломки и пыль в межпланетном пространстве. Все эти тела ныне более или менее доступны изучению, но до 1990—1996 гг. сообщения об открытии планет у других звезд никто уверенно подтвердить не мог, из-за неизбежной длительности, трудоемкости и, главным образом, из-за ограниченных возможностей наземной астрономии (которые все-таки растут, медленно, но неуклонно).

Сначала появились результаты, полученные со спутника ИРАС, оснащенного специальной аппаратурой для регистрации излучения очень холодных и просто холодных небесных тел. Оказалось, что некоторые из сравнительно близких звезд посылают два вида излучения: один — от горячей звезды, другой — от очень протяженного облака холодных пылевых частиц. Объяснение происхождения «холодного» излучения было найдено быстро: его излучает протопланетное пылевое облако вокруг горячей звезды, иными словами — возможная будущая планетная система. Благодаря быстрому прогрессу электронной техники уже спустя несколько лет после наблюдений с ИРАС удалось получить прямую электронную фотографию такого объекта (рис. 1.1). Это звезда β в созвездии Живописца (в южном небе), окруженная пылевым облаком. Дальнейшие исследования указали еще на несколько звезд, у которых возможно присутствие планетных систем.

Научной сенсацией последних лет стало обнаружение планетоподобных тел, обращающихся вокруг нейтронных звезд — пульсаров. Благодаря малым размерам (и огромной плотности) некоторые пульсары вращаются с очень коротким периодом, в десятки миллисекунд и менее. При своем вращении пульсары излучают электромагнитные импульсы, повторяющиеся с высокой точностью. У нескольких пульсаров обнаружено ничтожное периодическое изменение периода, что и было интерпретировано как воздействие планетных тел, обращающихся вокруг пульсара. По существу, это могут быть только «огарки» планет, с Солнечной системой имеющие мало общего.

Прошло еще несколько лет, и крупные усовершенствования в спектроскопической тех-

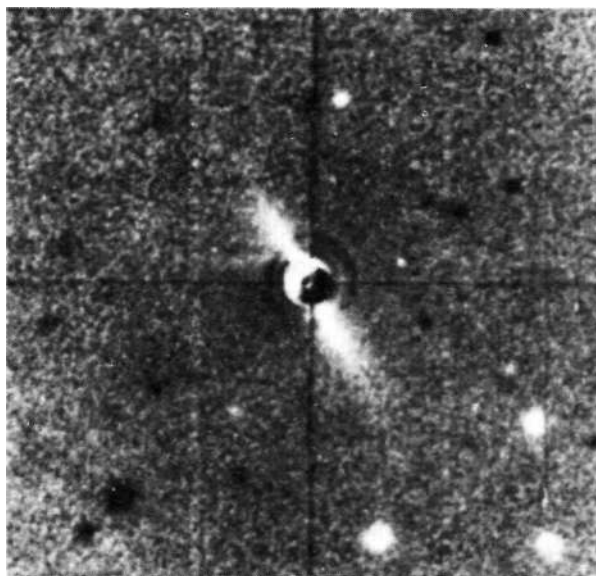


Рис. 1.1. Пылевой диск окружает звезду Бета Живописца. Диск виден с ребра. На снимке это светлая полоса в направлении «без пяти пять». Такой диск может развиться в планетную систему. Из работы Б.Смита и Р.Тэррилла, США

нике позволили ученым в 1996 г. объявить об открытии одиночных массивных планет у других звезд, количество которых уже достигло семи. Лишь ограниченные возможности метода не позволяют обнаружить планеты с малой массой, вроде Земли. Конечно, пока не приходится и думать об их астрофизических исследованиях, но существование других планетных систем — ныне установленный научный факт.

Тема этой книги — планеты Солнечной системы. Свойства «блуждающих звезд» — этих миров, до которых в последней трети XX в. человек дотянулся «руками» автоматов, оказались неожиданными и удивительными. Они значительно отличаются от представлений докосмической эры. Природа продемонстрировала здесь свою неистощимую изобретательность. Среди планет — раскаленные до высоких температур тела с плотной атмосферой и тела ледяные, вовсе лишенные атмосферы; небольшие массивные планеты типа Земли и огромные газовые шары планет-гигантов. Физические условия у поверхности планет и спутников невероятно разнообразны. Нагретая до 460 °C поверхность Венеры и морозные пустыни Марса, теплые океаны Земли и миры глубочайшего холода, откуда даже Солнце видится только очень яркой звездой.

Поразительно, что это второе, подлинное открытие планет произошло всего за какие-нибудь 30 лет. Множество поколений астроно-

мов прошлого в течение многих веков проводили ночи у телескопов в абсолютно нереальной надежде узнать подробности об этих крошечных туманных дисках. Другие посвящали всю свою жизнь расчетам, на которые ныне компьютер затрачивает секунды. Увы, впереди лежала безбрежная, непреодолимая река времени. Она лишь теперь донесла нас до небольших еще, но достаточно надежных островов знаний, которые, вопреки нашему снобизму, содержат вклад всех наших предшественников. Как и во все времена, захватывающая картина мироздания поражает. И, как во все времена, не следует думать, что мы знаем уже достаточно. В качестве эпиграфа в книге К.Сагана «Космос» приводится удивительная по глубине мысль Сенеки, высказанная 2000 лет назад: «В нашей Вселенной... скрыты предметы исследований для всех времен. Природа не раскрывает свои тайны раз и навсегда».

В начале 80-х годов нашего столетия положение внешних планет было таким, что они сблизились в сравнительно небольшом секторе неба (внутренние планеты не в счет: из-за краткости периода их обращения они успели за это время сделать несколько оборотов вокруг Солнца). До следующего почти такого же сближения пройдет 175 лет. Сближение журналисты назвали «парадом» планет, что совпадает с названием этой книги, хотя смысл здесь другой.

Мы переживаем сейчас самый интересный период в исследовании планет. Не проходит года-двух, как с космодронов стартуют все новые и новые автоматические станции. Вместе с тем и развитие техники наземной астрономии позволяет получать разнообразные сведения о планетах, не покидая Землю.

У планет двойственное положение. С одной стороны, они так далеки от Земли, что, безусловно, являются полноправными небесными телами. С другой — современные технические средства позволяют достичь не только ближайших, но и удаленных планет. Успехи научного приборостроения обеспечивают исследования с помощью автоматов, совершивших длительный полет в космосе и доставивших научную лабораторию к другой планете. В последние годы таким путем получено много очень важных сведений. Научная литература постоянно пополняется специальными изданиями по физике планет.

Цель книги — изложить новые сведения о планетах, полученные с помощью современной техники и прежде всего с помощью космических аппаратов. Это изложение, конечно, не может быть исчерпывающим. Чем больше мы

узнаем, тем больше встает перед нами новых проблем. И об этом тоже интересно рассказать.

Напомним читателю некоторые общие сведения о строении Солнечной системы. Ее схема представлена на рис. 1.2. В нижней части схемы Солнце не показано, так как расстояния планет от него изображены в логарифмическом масштабе. За единицу расстояния, как это принято в планетной астрономии, взято расстояние от Земли до Солнца: 149,6 млн км (это 1 астрономическая единица, а.е.). На схеме даны средние расстояния планет от Солнца. Как известно, все планеты движутся по эллипсам, причем в одном из фокусов каждого эллипса находится Солнце. Орбита характеризуется эксцентриситетом, который тем больше, чем значительнее орбита отличается от круга. Произведение эксцентриситета на величину большой полуоси дает расстояние, на которое планета удаляется от Солнца в афелии или приближается к нему в перигелии в сравнении со средним расстоянием. Самыми большими эксцентриситетами (0,207 и 0,253) обладают Меркурий и Плутон. Самыми малыми — Венера и Нептун (0,0068 и 0,0087).

Представить нашу схему в обычном линейном масштабе трудно: настолько несоизмеримы большие полуоси орбит (так принято называть средние расстояния планет от Солнца) ближайших к Солнцу планет группы Земли, и группы планет-гигантов и Плутона. Поэтому расстояния показаны в двух масштабах, отдельно для планет группы Земли и для планет-гигантов. Основные данные планет приведены в таблице в конце книги.

Все планеты движутся вокруг Солнца в одном направлении (против хода часовой стрелки, если смотреть с северного полюса мира). Плоскости их орбит мало наклонены к плоскости орбиты Земли, называемой эклиптикой. Исключением являются опять-таки Меркурий и Плутон. Угол между плоскостями их орбит и эклиптикой составляет соответственно 7 и 17°. Для остальных планет он меньше 3,4°.

Когда в своем движении вокруг Солнца Земля и какая-либо планета оказываются друг против друга на линии, соединяющей их с Солнцем, говорят о противостоянии планеты, если планета внешняя по отношению к орбите Земли, или о нижнем соединении для внутренних планет (Венеры и Меркурия). Верхним соединением во всех случаях называется такое же положение, но с расположением планеты за Солнцем.

Угол наклона плоскости экватора планеты к плоскости ее орбиты определяет смену времен года. Иногда говорят о наклоне поляр-

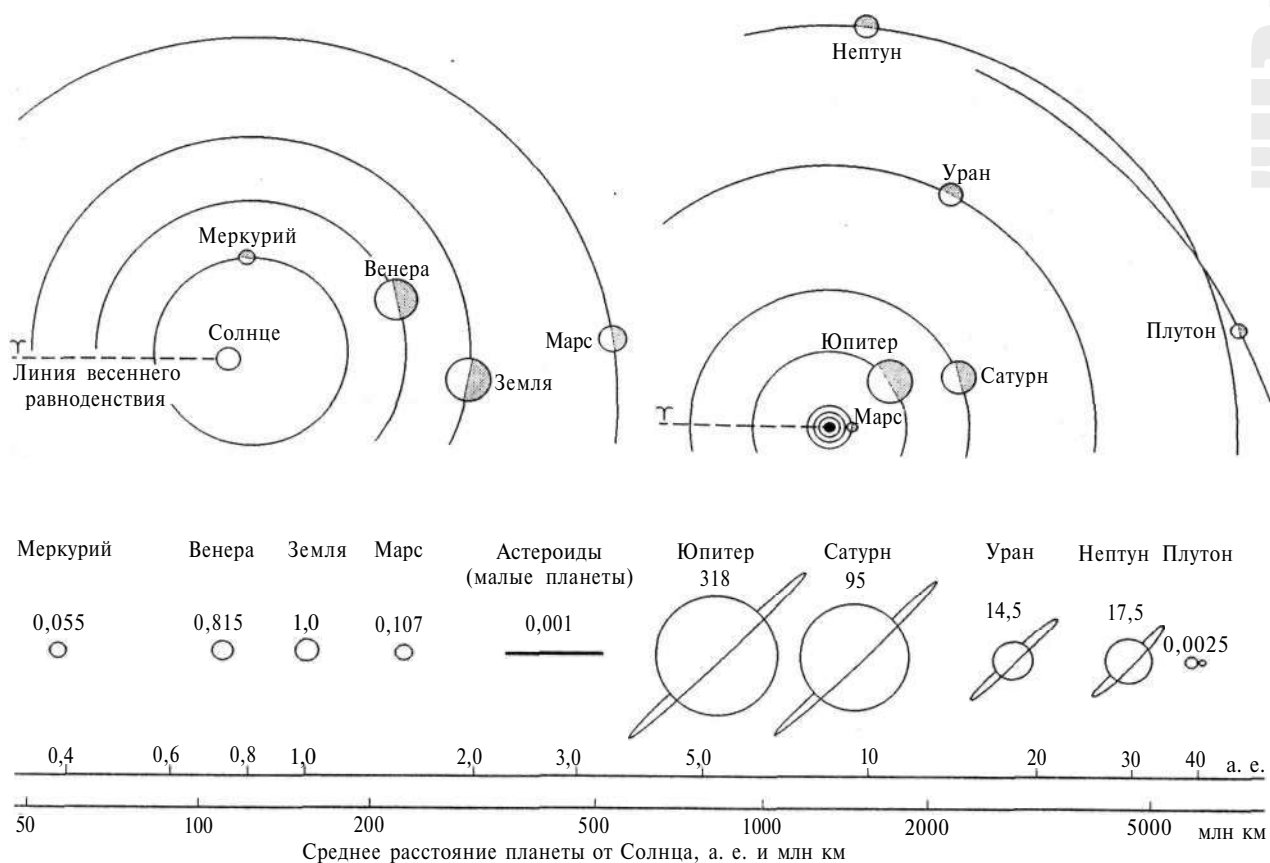


Рис. 1.2. Схема Солнечной системы. Орбиты планет земной группы лежат так близко к Солнцу, что их пришлось выделить отдельной частью рисунка. Относительное положение планет показано на март 1982 г. Слева — средние расстояния от Солнца в миллионах километров и в астрономических единицах, показанные в логарифмическом масштабе. Числа у планет означают их массу в единицах массы Земли

ной оси. Но это не совсем правильно. У Меркурия, Венеры и Юпитера полярную ось практически можно считать перпендикулярной плоскости их орбит, поэтому у них отсутствует смена времен года. Заметный угол наклона плоскости экватора к плоскости орбиты имеют Земля и Марс — около 25° . Своеобразную крайность представляет Уран: его ось вращения образует лишь малый угол с плоскостью орбиты. Поэтому полугодовая полярная ночь, длящаяся на полюсах по 42 земных года, охватывает там попеременно северное и южное полушария почти до самого экватора, а в разгар полярного дня, во время солнцестояния, положение Солнца на полярном небосводе близко к зениту.

Планеты делятся на две большие группы. Группа Земли — это сравнительно небольшие планеты с высокой средней плотностью, достигающей $5,5 \text{ г/см}^3$. Все они расположены очень близко к Солнцу — от 0,39 до 1,52 а.е. В эту

группу входят Меркурий, Венера, Земля и Марс. Группу планет-гигантов возглавляет Юпитер. К ней относятся также Сатурн, Уран и Нептун. Это планеты с огромными массами, низкой средней плотностью, близкой к плотности воды, и быстрым вращением (период 10–17 ч). Их орбиты расположены в интервале от 5,20 до 30,07 а.е. Среднее расстояние от Солнца последней планеты Солнечной системы, Плутона, еще больше: 39,52 а.е., но из-за большого эксцентриситета орбиты он иногда заходит внутрь орбиты Нептуна.

Периоды обращения планет вокруг Солнца находятся в пределах от 88 суток у Меркурия до 249 годов у Плутона.

К 1990 г. космические аппараты уже побывали у всех планет, кроме Плутона. Советская программа периода 1975–1985 гг. была сосредоточена на весьма подробных исследованиях Венеры, что потребовало создания очень специальных аппаратов «Венера» (рис. 1.3). Эти

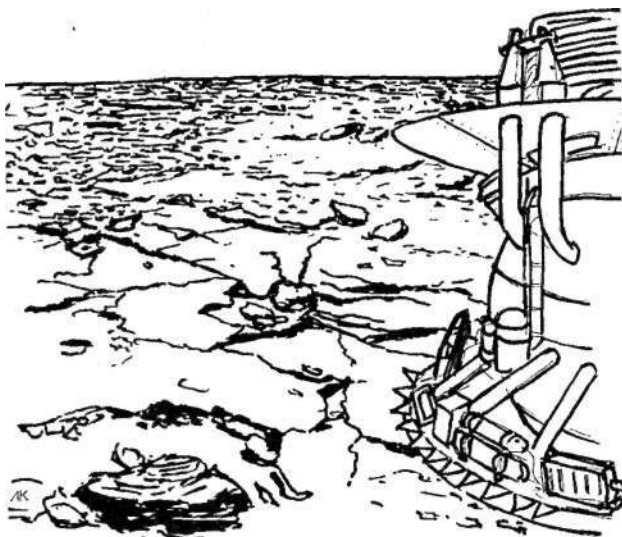


Рис. 1.3. Спускаемый аппарат «Венера-12», один из тех, которые достигли Венеры и работали на ее огнедышащей поверхности. Рисунок автора

аппараты, способные работать при температурах 500°C и давлениях 100 атм, принесли большой успех.

Очень подробные и сложные исследования Марса проводили в период 1976—1978 гг. аппараты США «Викинг». Это был первый эксперимент, посвященный непосредственному поиску живых микроорганизмов на поверхности другой планеты. Программа поиска жизни на Марсе не дала положительного результата. Причины, из-за которых жизнь могла не появиться, пока неясны. Не исключено, что она могла существовать там в ранние эпохи истории Марса. В 1996 г. большое внимание привлекли сообщения о том, что в найденном в Антарктиде метеорите марсианского происхождения ALH 84001 как будто были обнаружены микроокаменелости, которые могут быть следами древней жизни на планете. Будущие экспедиции к Марсу должны продолжить эти исследования.

Еще до «Викингов» Марс исследовали также советские «Марсы» и американские «Маринеры».

В 1985—1986 гг. советские многоцелевые аппараты «ВЕГА», на которых имелись также приборы иностранных участников, после сближения с Венерой и сброса на нее спускаемых аппаратов с аэростатами выполнили чрезвычайно сложный эксперимент по исследованию кометы Галлея.

После полета разведывательных аппаратов «Пионер-10 и -11», очень много данных о планетах-гигантах дали аппараты «Вояджер», за-

пущенные в США в 1977 г. С помощью «Вояджера-2» была реализована идея облета одним аппаратом многих планет: Юпитера (1979), Сатурна (1981), Урана (1986), Нептуна (1989).

И снова ученые вернулись к Марсу. В 1988 г. в СССР был запущен аппарат «Фобос» (также с международной программой) для исследований спутника Марса и самой планеты. К сожалению, с 1989 г. началась какая-то неудачная полоса в исследовании Марса. После двух месяцев работы на орбите у Марса «Фобос» был потерян, когда он только начал исследования одноименного спутника. Очень большие надежды возлагались на американский «Марс-Обсервер», запущенный в США осенью 1992 г. Через год, в 1993 г., он достиг Марса, но при выходе на орбиту спутника планеты также был потерян. Специалисты невесело шутили, что марсиане против наших исследований. На 1994 г. был назначен старт российского аппарата «Марс-94», но из-за экономических неурядиц его отложили на осень 1996 г. Запуск «Марса-96» был неудачным, и аппарат погиб. В июле 1997 г. на Марсе начал работать новый аппарат США «Пасфайндер» («Следопыт»), а в сентябре того же года на орбиту спутника Марса вышел еще один аппарат США, «Марс Глобал Сервейер». В космических агентствах США, России, Европы и Японии рассматриваются новые, в том числе совместные, проекты исследований в 1998—2010 гг., с доставкой грунта с Марса.

Запущенный в 1989 г. в США аппарат «Магеллан» выполнил блестящий эксперимент по радиолокационному картированию Венеры, начатый советскими «Венерой-15 и -16». К концу 1993 г. съемкой удалось охватить уже всю поверхность планеты. В 1990 г. аппарат «Галилей» (запущенный в 1989 г. в США) на своем весьма витиеватом пути к Юпитеру, с использованием многочисленных гравитационных маневров, сблизился с Венерой, а потом снова с Землей. Затем он ушел к поясу астероидов, снова вернулся к Земле, снова прошел пояс астероидов и, наконец, устремился к своей главной цели — Юпитеру. Рассказ о гравитационных маневрах читатель также найдет на наших страницах. Все новые миры Солнечной системы, с которыми знакомят нас эти посланцы Земли, составляют подлинный Парад Планет, которым древняя наука астрономия завершает XX век.

Заканчивая этот очень неполный перечень достижений, удач и неудач в космосе, необходимо подчеркнуть, что много уникальных сведений удалось получить также с помощью новых средств наземной астрономии — таких

как высокочувствительные приемники изображения, построенные на приборах с зарядовой связью, спектроскопия сверхвысокого разрешения, радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой и др. Мощным средством исследований оказалась летающая высотная обсерватория, смонтированная на большом самолете. С помощью ее аппаратуры в 1977 г. у Урана удалось обнаружить систему колец, в чем-то подобных кольцам Сатурна, но более слабым. Благодаря новой технике очень малые спутники Сатурна были открыты с Земли за год до сближения с планетой аппарата «Вояджер».

Кстати, о технике. Автор избегал технических подробностей, касающихся методов исследования. Но иногда без них невозможно было объяснить смысл полученных результатов. Поэтому небольшие исключения встречаются, например, при рассказе о радиолокации планет.

В книге много фотографий. Они получены с советских и американских космических аппаратов за последние 15—20 лет. Автор благодарит российских и американских коллег за любезно предоставленную возможность познакомиться с этими фотографиями наших читателей. Черно-белые иллюстрации в тексте называются «рисунками» и приводятся в порядке упоминания, а все цветные названы «фото» и вынесены на цветные вкладки.

В тексте почти нигде не приводятся имена ученых, чьими талантом и трудом создана и создается современная планетная наука. Конечно, это несправедливо, и автор приносит коллегам свои извинения. Но как быть, если простое упоминание имени в связи с той или иной работой ничего читателю не говорит, а блестящих имен, о которых хотелось бы рассказать, так много?

Оглавление книги может вызвать некоторое недоумение: где же Земля и Луна? Действительно, раздела, специально посвященного нашей планете (как планете) и ее естественному спутнику, в книге нет. На современном уровне знаний о Земле браться за такую задачу немного страшно. Но и Землю, и Луну можно найти практически в каждой главе книги. Они служат отправной точкой всех приводимых сравнений и понятий, особенно в разделе планет группы Земли. Земля, ее атмосфера, поверхность и недра часто рассматриваются в главах о Венере и Марсе, Луна — в главе о Меркурии.

Наконец, последнее замечание. Наряду с автоматами в небо уходит множество пилотируемых кораблей. Часто можно слышать вопрос: какова их роль в астрономических исследованиях? Как ни странно, измерения, выполняемые автоматами, гораздо продуктивнее. Во-первых, потому, что это очень специальные и вместе с тем однообразные измерения, с которыми легко справляется автомат и которые так не любит человек. Во-вторых, потому, что измерения надо проводить у далекой планеты. А к планетам человек еще не летал. Но полеты пилотируемых аппаратов приближают время экспедиций и на другие планеты.

Среди задач не очень отдаленного будущего — запуск к Марсу все более сложных аппаратов, по предварительной программе примерно до 2015 г. Предполагается, что после ее завершения ученые будут готовы отправить на Марс международную экспедицию космонавтов. Они увидят твердь и небо другой планеты и, возвратясь, скажут, что ничего прекраснее Земли нет.

ГЛАВА 2

ЛУННЫЕ ЛАНДШАФТЫ МЕРКУРИЯ

Ранние сведения

Иногда на западе сразу после захода Солнца или на востоке перед его восходом можно видеть очень яркую планету, лишь немного уступающую Венере по блеску. Это Меркурий. Согласно легенде, Копернику за всю жизнь ни разу не удалось его увидеть и, умирая, он сожалел об этом. Но увидеть Меркурий нетрудно, если только знать, где его искать и помнить, что он виден очень недолго, теоретически не более 1,5 ч, а практически намного меньше. В дневное время его можно видеть только с помощью телескопа, причем различить какие-либо детали почти не удастся. До начала современных исследований считалось, что планета постоянно обращена к Солнцу одной стороной, нагретой до очень высоких температур. Рисунки в научно-популярных изданиях изображали моря из расплавленных металлов в берегах, образованных рельефом лунного типа.

Меркурий — одна из ближайших к Земле планет. Минимальное расстояние до него в нижнем соединении составляет всего 80 млн км, но наблюдать его в это время не удастся как из-за близости к Солнцу, так и потому, что в этот период к Земле обращена его ночная сторона. Но и в наибольшей элонгации Меркурий можно наблюдать только на фоне светлого неба и в течение короткого времени после захода Солнца или перед его восходом. До 1974 г. о планете было известно немного. Детали на ее диске при наземных телескопических наблюдениях практически неразличимы. Лишь некоторые авторы утверждали, что им удавалось видеть нечеткие пятна на поверхности планеты (рис. 2.1). Спектрофотометрические измерения показывали, что по своим свойствам поверхностные породы многих районов Меркурия напоминают материковые породы Луны, хотя и несколько светлее их. Разумеется, из наземных наблюдений были найдены основ-

ные небесно-механические параметры орбиты планеты. Меркурий обращается вокруг Солнца по сильно вытянутой эллиптической орбите, наклоненной к плоскости эклиптики на 7° . Его средняя удаленность от Солнца всего 0,39 а.е. (58 млн км), в перигелии 0,31, в афелии 0,47 а.е. Орбитальная скорость планеты в среднем составляет 48 км/с, а в максимуме,

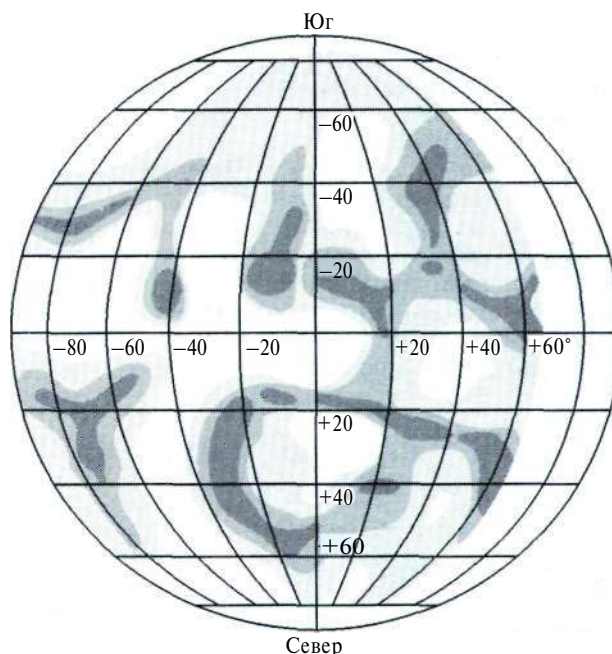


Рис. 2.1. Карта Меркурия, составленная по наземным телескопическим наблюдениям. Карты у разных авторов, как правило, не совпадали

из-за большого эксцентриситета, достигает 54 км/с, что почти вдвое превышает скорость Земли (и затрудняет достижимость планеты космическими аппаратами). Сидерический период обращения вокруг Солнца составляет 88 сут. До 1974 г. диаметр планеты был

известен неточно, а оценка средней плотности из-за отсутствия, спутников расходилась у разных авторов в полтора раза. Считалось установленным, что период вращения планеты синхронизирован с периодом ее обращения вокруг Солнца (что оказалось неверным).

Не прекращались попытки обнаружить атмосферу Меркурия, причем в некоторых случаях исследователи приходили к положительным (ошибочным) выводам, хотя в действительности Меркурий обладает лишь эквивалентом разреженной экзосферы планет земной группы, причем с весьма экзотическим газовым составом.

Таково было положение с исследованиями Меркурия в начале 1974 г., когда аппарат «Маринер-10», запущенный в США в 1973 г., сблизился с планетой. «Маринер-10» был аппаратом пролетного типа. Свои задачи исследования Венеры и Меркурия он выполнял в процессе кратковременного сближения с этими планетами, причем при сближении с Венерой был выполнен гравитационный маневр, который в дальнейшем позволил перейти на орбиту спутника Солнца с периодическими сближениями с Меркурием и его исследованиями. По существу, все основные данные о физике Меркурия были получены в трех сближениях с ним «Маринера-10», в которых были израсходованы все запасы газа в системе ориентации аппарата. Дальнейшие сближения уже не контролировались с Земли; возможно, они продолжаются и до сих пор. Необходимо отметить, что такое свойство орбиты «Маринера-10» (повторные сближения) оказалось неожиданным. Причиной были квазирезонансные явления (соизмеримости) в орбитах планеты и аппарата.

Меркурий — ближайшая к Солнцу планета. Ранее высказывались предположения о возможном существовании еще одной небольшой планеты внутри орбиты Меркурия. Но сейчас можно смело утверждать, что такой планеты нет.

Особенности движения планеты

До 1965 г. считалось, что вращение Меркурия синхронно и он всегда обращен к Солнцу одним полушарием, подобно тому, как Луна обращена одной стороной к Земле. Эти представления появились более 100 лет назад, когда астрономическими наблюдениями было установлено, что нечеткая картина пятен, подобных тем, которые можно видеть на рис. 2.1, устойчиво повторялась в одних и тех же фазах планеты. Авторитет ученых прошлого был так

высок, что более 100 лет никто не решался на ревизию этих представлений.

Первые сомнения принесли наблюдения теплового излучения планеты, выполненные в 1962 г. Если исходить из синхронного вращения, с вечным днем на одной стороне и вечной ночью на другой, средние температуры должны составить 880 и 60 К соответственно. Но дневная сторона оказалась не так горяча, как ожидалось, а от ночной исходил ощутимый поток тепла. Излучение приходило от поверхности, с глубины около 10 см и более. Поскольку атмосферы нет, а перенос тепла сквозь твердое тело планеты пренебрежимо мал, был сделан вывод о несинхронном вращении планеты. Но действительность оказалась еще интереснее: Меркурий находится в резонансном, но несинхронном вращении. Эти данные были получены с помощью наземной планетной радиолокации в 1965 г. (она же позволила в 1967 г. определить радиус планеты с ошибкой всего в 5 км). Уже тогда на поверхности Меркурия была обнаружена какая-то область с высокими радиоотражательными свойствами, по доплеровскому сдвигу от которой (составившему на частоте 3 ГГц всего 32 Гц) был, наконец, определен весьма необычный период вращения планеты. (Что же касается самого необычного объекта, то он остался за пределами сектора, исследованного «Маринером-10». Как показали дальнейшие радиоастрономические исследования, он обладает необычными свойствами, привлекающими исследователей, например, высокой радиояркой температурой. По-видимому, этот объект будет темой будущих исследований.)

При локации радиоимпульс сначала отражается небольшим «пятачком» в центральной части планеты и со скоростью света устремляется во все стороны, в том числе и к антенне пославшего его радиолокатора. Возвратившаяся часть импульса так слаба, что необходимо все могущество современной радиотехники, чтобы, как говорят радиоинженеры, «выделить» его. Вслед за первой частью импульса придет вторая, отраженная примыкающим к «пятачку» бесконечно узким кольцом, удовлетворяющим единственному условию: расстояния от любой его точки до антенны радиолокатора равны. А там на очереди третье, четвертое, пятое кольца и так до последнего, ограничивающего диск планеты. (Конечно, в действительности отдельных колец не существует; процесс отражения непрерывен.) Дальняя от нас сторона планеты окажется в радиотени и ничего не отразит (рис. 2.2).

Проходя перигелий, когда его отделяет от Солнца только 0,31 а.е., Меркурий поочередно

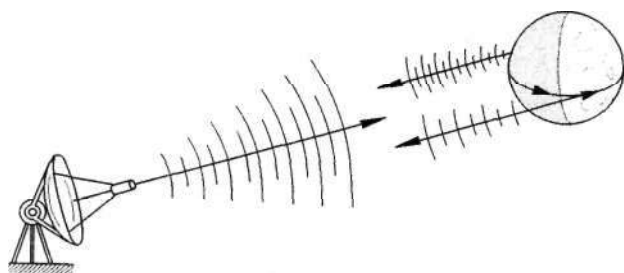


Рис. 2.2. Схема радиолокации Меркурия. При отражении радиоволн вследствие вращения планеты возникают различия в доплеровских сдвигах сигналов. Частота сигнала, отраженного движущимся на наблюдателя краем планеты, несколько возрастает, а отраженного удаляющимся краем — убывает

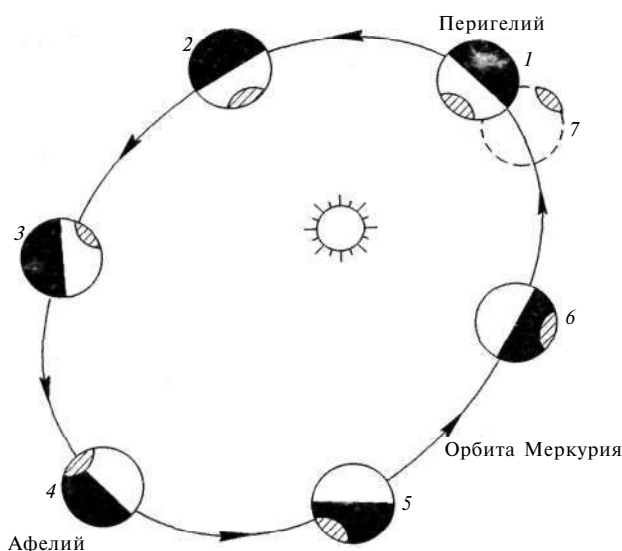


Рис. 2.3. Схема связи периодов вращения и орбитального движения Меркурия. Благодаря приливным воздействиям Солнца Меркурий захвачен в «резонансную ловушку»: период его обращения вокруг Солнца относится к периоду вращения как 3/2. Иными словами, Меркурий делает три оборота вокруг своей оси за два меркурианских года, что легко видеть по положению светлого пятна на схеме

бывает обращен к Солнцу то одной, то другой стороной. (Поэтому правильнее говорить, что один полный солнечный цикл на Меркурии составляют два его года.) В этих, подсолнечных в перигелии районах температура поверхности достигает наибольших значений. Один из них получил название равнины (или Моря) Зноя. За $2/3$ своего года планета завершает полный оборот вокруг своей оси (рис. 2.3). Таким образом, период обращения Меркурия вокруг Солнца (87,97 земных суток) составляет точно $3/2$ сидерического периода его вращения (58,65 земных суток). Но необычность характера

вращения Меркурия не только в этом. К тому моменту, когда он оказывается в нижнем соединении (на линии Солнце — Земля), он всегда занимает одно и то же положение относительно звезд. Любое выбранное положение планеты относительно Солнца повторяется только через 176 земных суток, — это продолжительность солнечных суток на Меркурии.

Планета обладает резонансным периодом относительно Земли — 116 (точнее 115,88) земных суток. Механизм возникновения этого резонанса остается неизвестным, а попытки объяснить его приливными возмущениями в масконе, находящемся под поверхностью Моря Зноя или в приливном горбе, представляются не очень убедительными. Силы приливных взаимодействий пропорциональны обратному кубу, а не обратному квадрату, как в законе всемирного тяготения; они быстро убывают с расстоянием, и поэтому приливные воздействия от Земли на Меркурий в $1,6 \cdot 10^6$ раз меньше, чем от Солнца, и в 5,2 раза меньше, чем от Венеры. Но других объяснений пока нет.

Среди других странных совпадений — возникший «сам собой» квазирезонанс орбиты «Маринера-10» с Меркурием. Как уже говорилось, после гравитационного маневра у Венеры, 29 марта 1974 г. аппарат сближился с Меркурием и перешел на высокоэксцентрическую орбиту спутника Солнца. Когда аппарат уже был в полете, возник вопрос, какими будут параметры этой орбиты. Как рассказывал Дж.Колombo, которому принадлежала идея орбиты «Маринера-10», когда результаты расчетов были готовы, он вначале подумал, что произошла ошибка: период спутника составил точно 2 меркурианских года, или 176 сут. В результате аппарат каждые 176 сут возвращается в одну и ту же точку орбиты Меркурия и встречает там планету в той же самой фазе, с теми же тенями от тех же самых деталей рельефа. К сожалению, запасов рабочего тела в системе ориентации хватило только на первые три сближения с планетой, 29 марта и 21 сентября 1974 г. и 16 марта 1975 г. Эта особенность орбиты позволила картировать только 30% поверхности планеты.

Близость периодов вращения и обращения планеты, с одной стороны, и большой эксцентриситет орбиты, с другой, приводят к тому, что в своем видимом движении по небу Меркурия Солнце останавливается и даже возвращается назад (рис. 2.4). В некоторых зонах планеты восходы и заходы Солнца наблюдаются дважды за одни сутки, причем как на востоке, так и на западе. Процесс этот, по-видимому,

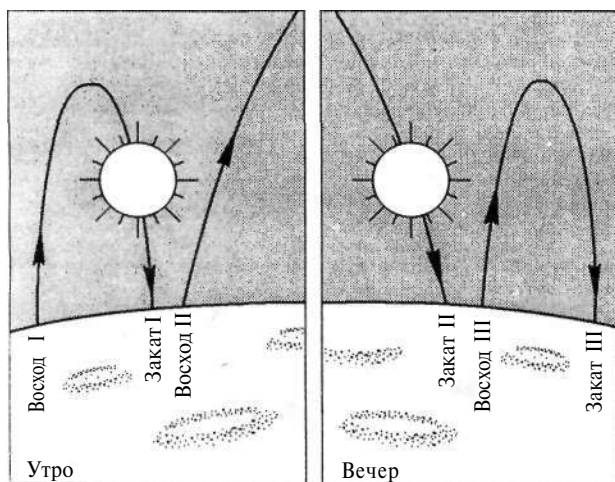


Рис. 2.4. Видимое движение Солнца по небу Меркурия, наблюдаемое с точек, расположенных на меридианах 0 и 180°. На этих долготах можно видеть три восхода и три захода за одни солнечные сутки, которые длиннее земных в 176 раз

не подвержен сезонным изменениям, так как положение полярной оси близко к нормали к плоскости орбиты (по данным «Маринера-10», с точностью до 1°, хотя эти результаты требуют подтверждения).

Меркурий — маленькая планета, его диаметр составляет всего 4878 км. Но масса планеты довольно велика, $3,3 \cdot 10^{26}$ г, или 5,51% от массы Земли. Средняя плотность почти такая же, как у Земли, $5,44 \text{ г/см}^3$. Таким образом, внешне неотличимый по деталям поверхности от Луны, Меркурий обладает совершенно другим внутренним строением. Ускорение свободного падения на поверхности составляет $3,72 \text{ м/с}^2$ (практически такое же, как у Марса).

Происхождение рельефа Меркурия

Вид поверхности Меркурия, представленный на рис. 2.5, относится к наиболее типичным. Размер самых мелких деталей, которые можно здесь видеть, составляет всего 300 м («рекордное» разрешение, достигнутое на «Маринере-10», составило 50 м). Солнце светит слева и находится довольно низко над горизонтом. Вся поверхность покрыта сплошной сеткой кратеров и на вид неотличима от хорошо известной поверхности Луны в материковых районах. Кратерированная поверхность безатмосферных небесных тел представляет собой удобный «протокол» событий этапа их формирования. На крупных, но сильно разрушенных кратерах, таких как половина 45-километрового кратера

на рис. 2.5, справа, видны более поздние и более мелкие кратеры. Это хорошая иллюстрация постепенного изменения размеров выпадавших на поверхность тел. Сначала выпадали планетезимали и метеоритные тела самых различных размеров, а потом все более мелкие, следами которых покрыто все дно кратера на рис. 2.5. Вместе с тем, крупные метеоритные тела порой врезались в поверхность даже на поздней стадии. Таков хорошо сохранившийся кратер правее и ниже центра. Диаметр кратера 25 км. Следов более поздних мелких кратеров его вал не имеет.

Еще одна отметка последовательности событий (несколько другого рода) видна в левом нижнем углу снимка, где расположен большой 60-километровый кратер с сильно разрушенным валом. На его дне — следы извержения лавы, образовавшей огромный поток, который двигался слева и затвердел, пройдя больше половины диаметра кратера. Извержение происходило уже после выпадения основного объема метеоритного вещества и даже после образования мелких кратеров на дне большого кратера справа. Вместе с тем, редкие и сравнительно мелкие тела выпадали на поверхность лавового натека и после его образования. Возраст поверхности Меркурия очень велик и относится в основном к событиям, происходившим $3,9 \cdot 10^9$ лет назад. Точно так же выглядит поверхность Луны, возраст образцов которой установлен непосредственно.

Телевизионная фотография, охватывающая участок поверхности 130×170 км, представлена на рис. 2.6. Солнце слева. Здесь также видны несколько относительно молодых кратеров на фоне сильно разрушенного рельефа. Диаметр кратера в центре 12 км. В нем заметна центральная горка. Такие горки хорошо знакомы по лунным ударным кратерам. Еще одна примечательная деталь в верхней левой части рис. 2.6 — широкая, более или менее прямая долина. Такие же образования известны и на Луне. Предполагается, что они появились в эпоху интенсивного вулканизма, которая, по видимому, совпадала с завершающей стадией формирования поверхности обоих небесных тел. Потoki очень жидкой лавы текли вдоль таких долин, как широкие реки. Разрушенный рельеф формировался раньше, когда множество кратеров накладывалось друг на друга под действием интенсивной метеоритной бомбардировки. Это была завершающая стадия формирования планеты, когда рост ее массы практически прекратился. Кинетическая энергия, которой обладали сталкивающиеся с поверхностью Меркурия протопланетные тела, была очень велика.

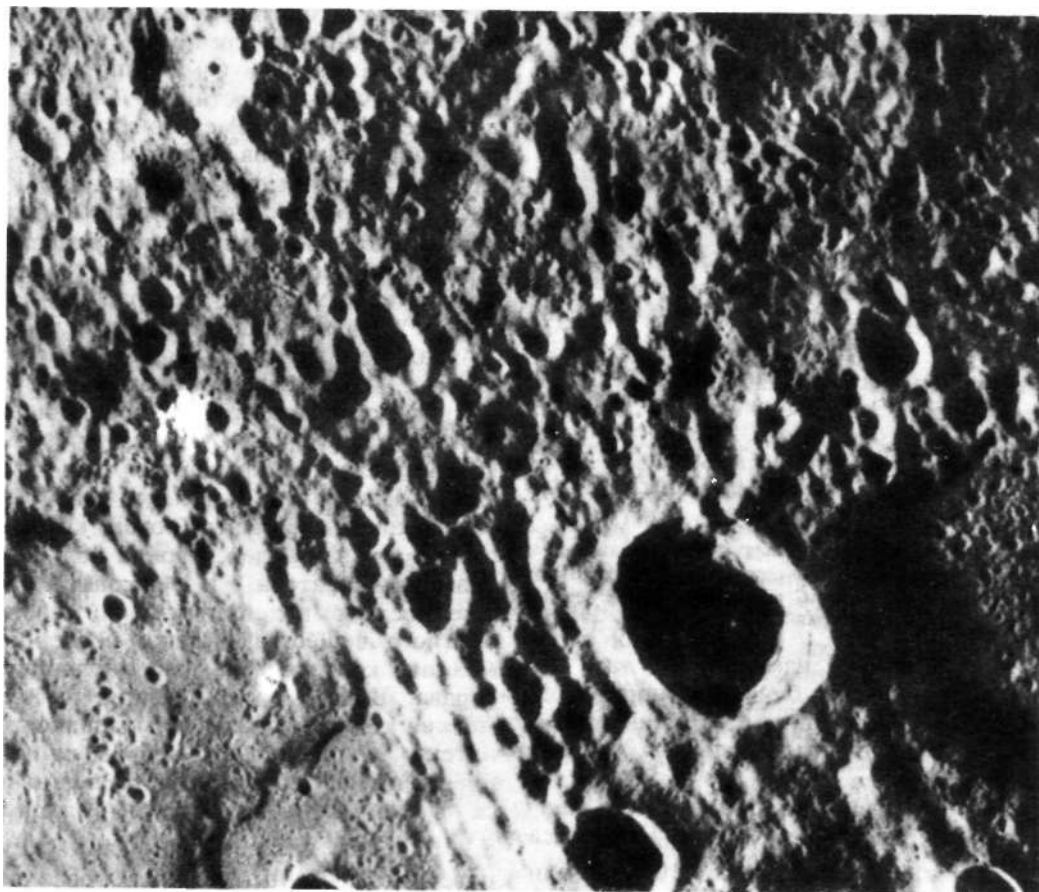


Рис. 2.5. Поверхность Меркурия. Вблизи центра на снимке виден хорошо сохранившийся 25-километровый кратер, чуть правее расположен кратер поперечником 45 км. На дне его можно разглядеть мелкие кратеры, образовавшиеся позднее. Слева внизу находится 60-километровый кратер, дно которого несет следы излияния лавы. Снимок NASA

Ее можно сравнить с тем, что несет обычная взрывчатка с той же массой, что и у метеоритного тела. Каждый такой удар сопровождался мощным взрывом. Кратеры многократно накладывались друг на друга, образуя насыщенный рельеф (рис. 2.5). С большей или меньшей плотностью ударные образования покрывают всю известную ныне поверхность Меркурия (рис. 2.7 и 2.8). Интересно, что лунные кратеры имеют значительно большие диаметры, чем аналогичные кратеры на Меркурии. Поскольку Меркурий имеет в 4,5 раза большую массу, чем Луна, ускорение свободного падения на нем выше (372 см/с^2 на Меркурии, 162 см/с^2 на Луне). Поэтому при ударе метеоритного тела выбрасываемый при взрыве материал выпадал гораздо ближе к центру, а площадь, которую покрывали выбросы на Меркурии, оказывалась в 5 раз меньше, чем на Луне.

В ряде районов Меркурия можно встретить бескратерные равнины. Таков район, показанный на рис. 2.9 и расположенный вблизи южного полюса планеты (сам полюс находится внизу, за пределами снимка). Как можно видеть, в центральной части снимка между кратерами есть промежутки. Таким образом, насыщения рельефа здесь нет. Однако специалисты не считают, что когда-то вся поверхность планеты была расплавлена. Местных извержений, даже обильных местных извержений, было много, но океана жидкой лавы на Меркурии не было, по-видимому, никогда.

Бескратерные равнины (или обширные промежутки между кратерами) характерны только для Меркурия. Тем не менее, сходство внешнего вида Луны и Меркурия поразительно. Более того, мелко раздробленный материал, которым покрыт Меркурий, имеет такие же фотометрические и поляризационные свойства, как и на Луне. По имеющимся данным, это анортозитовые породы, образование которых

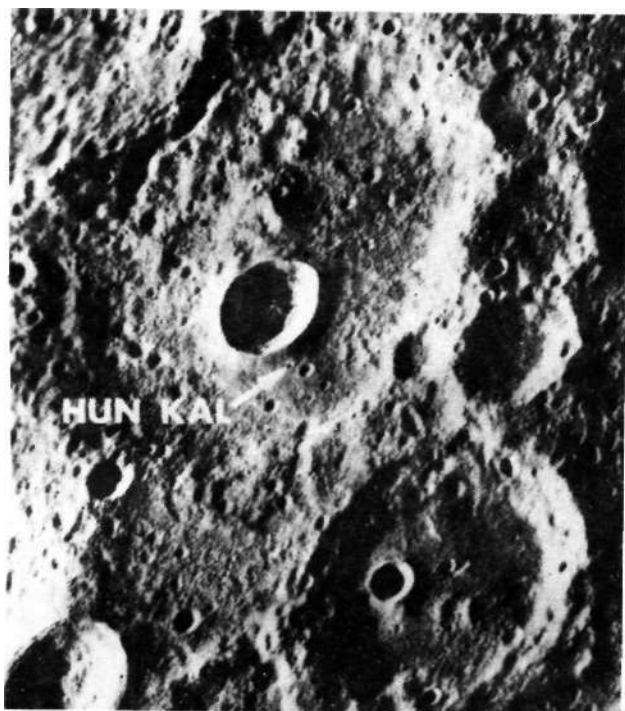


Рис. 2.6. Участок поверхности Меркурия. «Свежий» кратер диаметром 12 км (почти в середине снимка) имеет центральную горку, которая хорошо знакома по лунным фотографиям. На расстоянии 1/5 поперечника кратера вниз и вправо находится 1,5-километровый кратер Хан Кол (Hun Kal), что означает «20» на языке Майя. Это экзотическое название присвоено точке, через которую проходит 20° — меридиан сетки долгот. По широте кратер Хан Кол расположен на 1° южнее экватора. Размеры участка 130×170 км. Снимок NASA

обязательно требует, чтобы геологическая история планеты включала гравитационную и геохимическую дифференциацию. Эти процессы представляют собой разделение горных пород в результате своеобразного «всплывания» более легких составляющих (силикатов) и погружения в ядро планеты тяжелых элементов (железа и никеля). Некоторые из меркурианских кратеров имеют системы лучей, простирающихся на огромные расстояния. На том же рис. 2.8 яркие лучи у кратера с темной центральной горкой и темным валом (вверху снимка) охватывают площадь, достигающую 700 км в диаметре. И все-таки на Луне, где много таких кратеров, протяженность лучей гораздо больше. Например, лучи знаменитого кратера Тихо уходят до края видимого диска Луны. Известно, что яркость лучей регулярно усиливается к полнолуннию, а затем ослабевает. Природа их, по-видимому, такова. При ударном образовании большого метеоритного кратера огромное количество материала поверхности выбрасывалось на значительное расстояние и

образовывало вторичные кратеры. Их цепочки и представляют венец «лучей». Наиболее вероятная причина того, что «лучи» светлые, — это так называемый космический загар — приобретение темной окраски поверхностью планет, лишенных атмосферы, под действием длительного облучения протонами солнечного ветра. Увеличение яркости к полнолуннию объясняется особым строением материала кратеров в «лучах»: дно в мелких порах освещается Солнцем только тогда, когда оно высоко стоит над горизонтом. (Кстати, кратер с лучами на рис. 2.7, расположенный немного севернее экватора, получил имя известного исследователя планет и одного из авторов проекта «Маринер-10», Дж.Койпера. Другим деталям рельефа Меркурия присвоены имена писателей, музыкантов, художников, поэтов... Выбирая названия для образований на поверхности Меркурия, комиссия Международного Астрономического Союза решила остановиться на именах людей искусства. На карте Меркурия можно встретить имена Баха, Толстого, Шекспира, Бетховена и других.)

Сходство рельефа и реголита Луны и Меркурия велико, но все же поверхность последнего несет много своеобразия. Вся видимая часть Луны покрыта огромными низинами — «морями». На той стороне Меркурия, которая сегодня известна, «морей» (равнин или «бассейнов») вообще нет (рис. 2.7), только кратеры разных размеров. Единственное, но очень большое кратерное «море» — это Равнина Жары (или Планития Калорис, или Равнина Зноя), которую можно видеть на другой стороне того же полушария (рис. 2.7), у самого терминатора. Рис. 2.8 — это взгляд назад с уходящего «Маринера-10». Таким образом, Луна, где «морья» занимают такие большие пространства, значительно отличается от известной сегодня стороны Меркурия.

На Меркурии встречается несколько необычная деталь рельефа поверхности — эскарп. Это уступ высотой 2 — 3 км, разделяющий два, в общем ничем не отличающихся района. Протяженность таких обрывов составляет сотни и тысячи километров. Один из них — уступ Дискавери (Открытие) — тянется от 56° ю.ш., 38° в.д. до 50° ю.ш., 36° в.д. Местами он пересекается крупными кратерами или сам пересекает их (рис. 2.10). Эскарпы, образовались, когда происходило сжатие Меркурия, повлекшее за собой сдвиги и наплзание отдельных участков его коры. Такое явление неизвестно на Луне, но в несколько ином виде встречается на Земле.

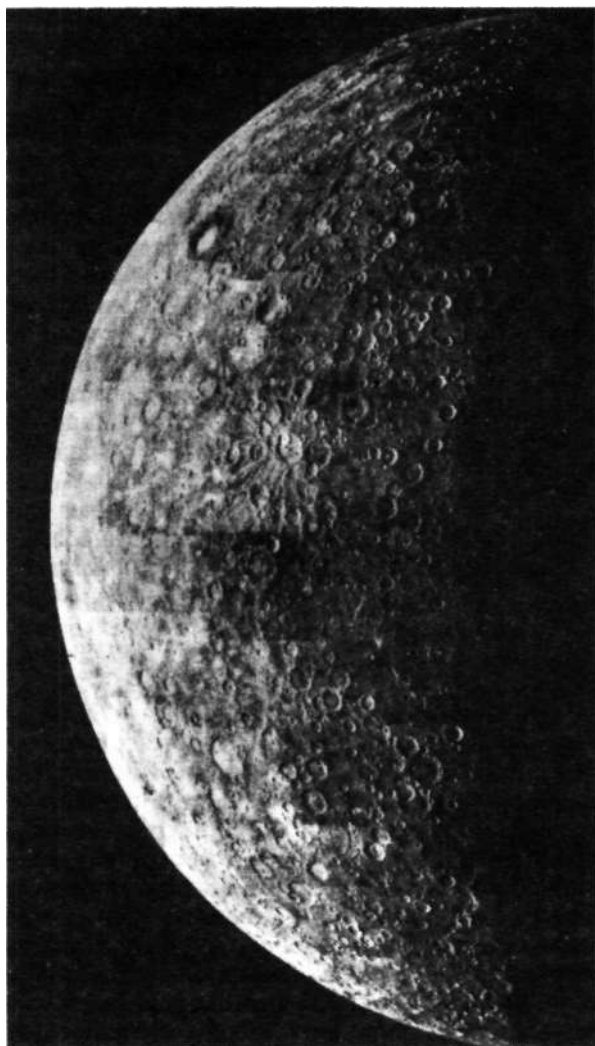


Рис. 2.7. Часть освещенного полушария Меркурия, обращенная к приближавшемуся аппарату. Кратер с лучами (немного выше центра) получил имя известного исследователя планет Дж.Койпера. Он был одним из руководителей проекта «Маринер-10» и скончался за два месяца до того, как аппарат достиг цели. Все остальные образования на поверхности Меркурия получают имена писателей, композиторов, художников. Снимок NASA. Угол фазы около 100°

Высота деталей рельефа Меркурия была оценена по длине отбрасываемых теней. Высоты гор меньше, чем на Луне, что тоже, вероятно, связано с большим ускорением свободного падения. Они достигают 2–4 км. Наибольшая высота лунных Скалистых гор составляет 5,8 км.

Похоже, что чаши некоторых кратеров, образованные ударом крупного метеоритного тела, потом были заполнены лавой. На одном из снимков видно, что из застывшей поверх-

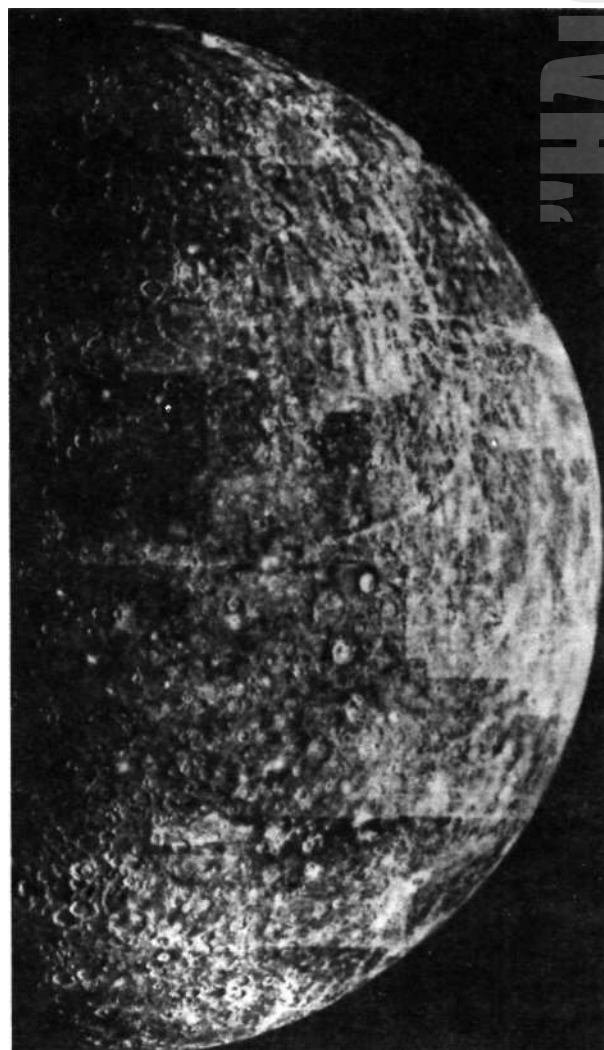


Рис. 2.8. Другая часть того же полушария Меркурия. Угол фазы около 78°. Кроме кратеров с лучами на этом снимке в центре, на терминаторе видно единственное известное пока на Меркурии море — Равнина Жары. Снимок NASA

ности выступает целый часток холмов (рис. 2.11). Это еще раз подтверждает, что оба процесса — метеоритная бомбардировка и излияния лавы — происходили одновременно. Обращаясь снова к лунным аналогиям, такое же образование, но больших размеров, можно видеть на обратной стороне Луны (кратер Айткен диаметром 130 км, рис. 2.12).

Метеоритные и вулканические образования на поверхности Меркурия вызывают воспоминания о специалистах докосмической эры, которые еще в 60-х годах XX в. скрещивали

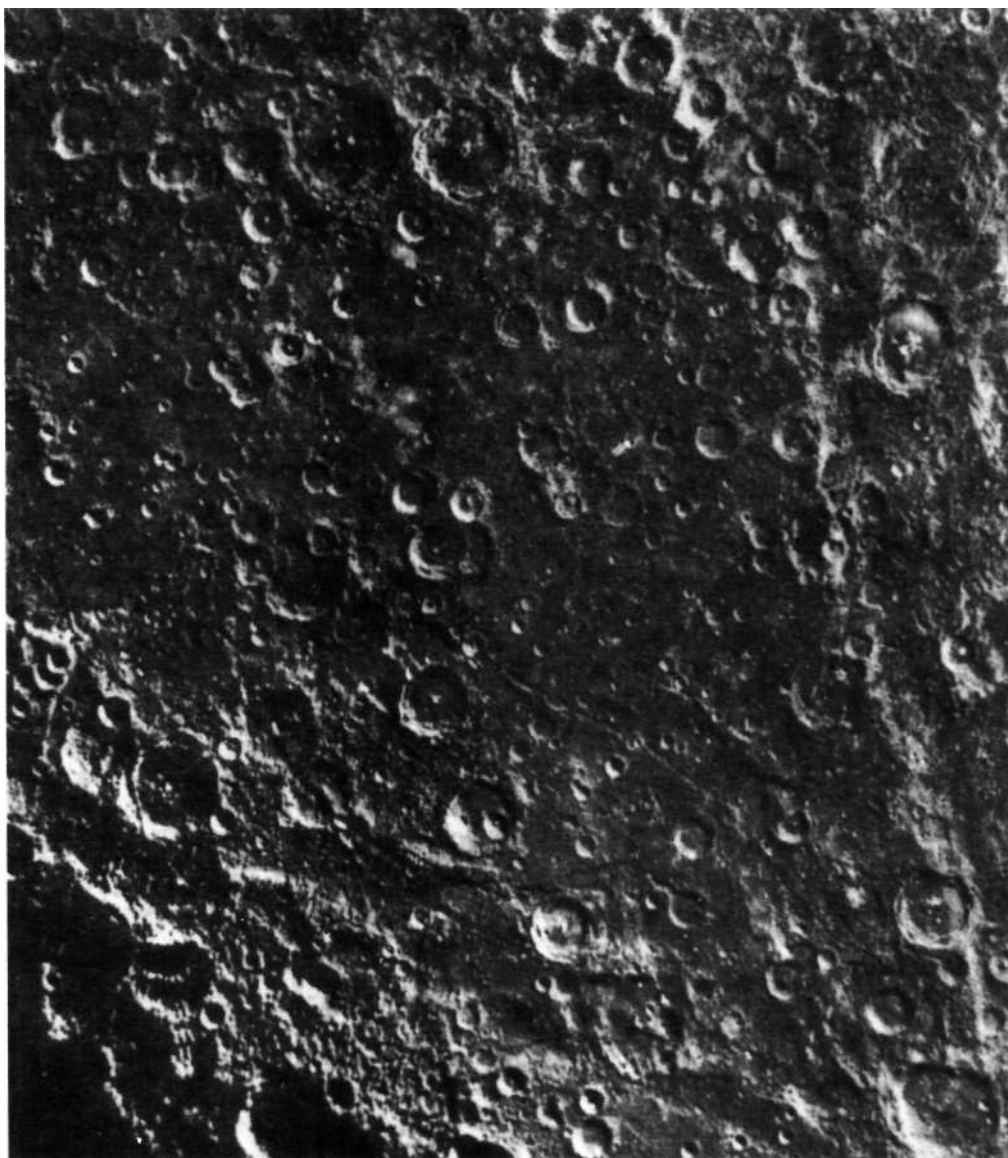


Рис. 2.9. Район вблизи южного полюса Меркурия с межкратерными равнинами. Диаметр кратера (вверху посередине) около 65 км. Снимок NASA

свои копыта в нескончаемом споре: какова природа лунных кратеров? Метеоритная или вулканическая? Каждая сторона приводила убедительные доказательства своей правоты. Большой лунный кратер — цирк Варгента — до краев заполнен затвердевшей лавой; при ударных же экспериментах тела, летящие с очень большой скоростью, образуют на мишени точное подобие метеоритных кратеров. Ныне считается твердо установленным, что подавляющая часть лунного, меркурианского и марсианского кратерного рельефа, а также рельеф большинства спутников планет-гигантов, обра-

зован в ударных взрывных процессах. Об этом говорит характер мелких частиц реголита, так называемых брекчий. Однако и проявлений вулканизма нашлось немало: именно такие процессы образовали рельеф, представленный на рис. 2.11 и 2.12. По-видимому, разрушение грунта на большую глубину облегчалось жидкой лавой, путь к поверхности.

Интересно отметить, что как темное дно некоторых кратеров, так и вообще вся поверхность Меркурия лишена ярких цветовых оттенков. В общем измерения показывают, что светлые области имеют небольшой избыток

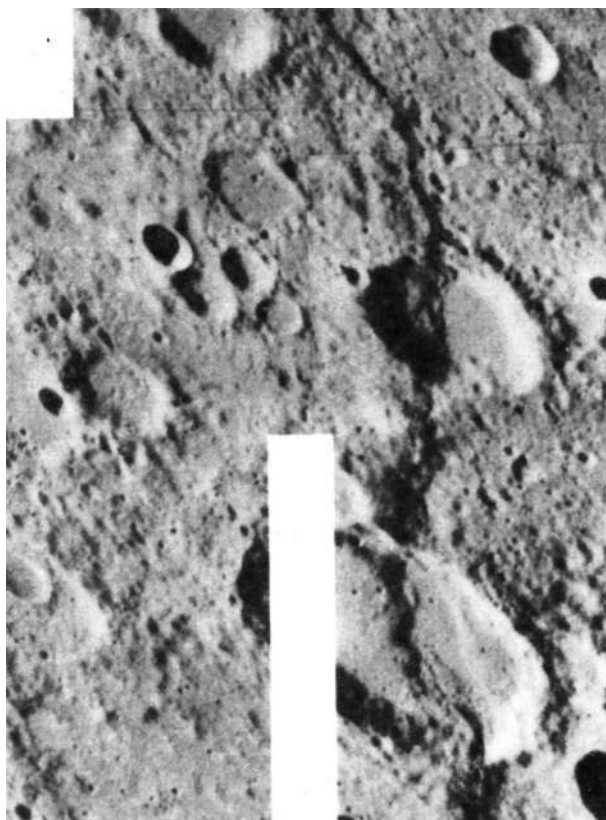


Рис. 2.10. Эскарпы (уступы) на поверхности Меркурия. В центре снимка уступ, обрывающийся вправо, высотой 2—3 км. Снимок NASA

красного цвета — таков кратер с лучами на рис. 2.7. В то же время другой кратер с лучами несколько синее фона. В целом меркурианский пейзаж и виды Луны практически неотличимы как в черно-белом, так и в цветном вариантах. Как выглядел бы меркурианский пейзаж в цвете, можно увидеть на фото 1 на вклейках. Это не Меркурий, это Луна, а над нею Земля. Отражательные свойства поверхности Луны несколько ниже (т.е. Луна темнее) из-за относительно большой площади «морей», покрытых темными морскими базальтами. Ее горные районы, с которыми сходна поверхность Меркурия, сложены анортозитовыми и крипноритовыми породами.

Равнина Жары

Один из самых интересных районов Меркурия — это уже упоминавшаяся Равнина Жары, единственное известное «море» на планете (пока неизвестно, что скрывается на другой стороне Меркурия). В отечественной литературе Равнину Жары иногда называют Равниной Зноя. Насколько можно судить по снимкам «Маринера-10», это бассейн в виде правильного круга; диаметр его превышает 1300 км. По периферии бассейн окружают концентрические кольцевые валы, которых на рис. 2.13 можно насчитать 4—5. Некоторые из них достигают 2 км в высоту. Происхождение этого огромного бассейна и концентрических кольцевых валов связывают с ударом гигант-

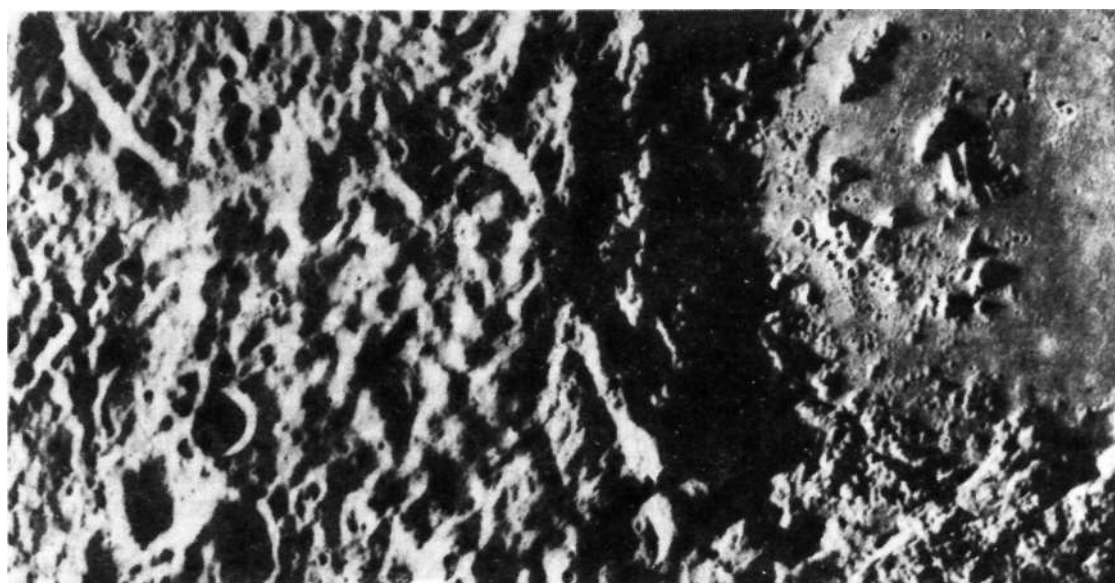


Рис. 2.11. Поверхность Меркурия. Справа видна часть кратера диаметром около 100 км. Похоже, что отдельные хребты на его дне выступают из затвердевшей лавы. Однако сам кратер имеет ударное (метеоритное) происхождение. Снимок NASA



Рис. 2.12. Кратер Айткен (Aitken) на обратной стороне Луны ($16,6^\circ$ ю.ш., 173° в.д.) также имеет центральную горку над гладким дном кратера (сравните с рис. 2.8). Снимок с «Зонда-8», 1970 г.

ского метеоритного тела (размерами, возможно, с небольшую планету). По-видимому, столкновение произошло в конце пика метеоритной бомбардировки, около 3,9 млрд лет назад, когда процесс кратерообразования уже шел на убыль, но все еще был интенсивным. Об этом говорит относительно малое количество кратеров в центральных частях Равнины Жары, где сравнительно ровная поверхность испещрена развитой системой трещин (рис. 2.14). Разрешение на этом снимке, полученном в третьем сближении, очень высокое, самые мелкие детали соответствуют участкам размером всего 50 м. По-видимому, удар при столкновении небесного тела с Меркурием был настолько сильным, что кора планеты в этом месте была пробита на огромную глубину, а сквозь разрывы в коре и мантии поднялись потоки лавы. Ее застывание и образовало сетку своеобразных трещин на рис. 2.14 и концентрические кольцевые валы.

В Солнечной системе есть еще одно небесное тело, примерно тех же размеров, что и Меркурий, которое тоже несет следы катаст-

рофического соударения. Это спутник Юпитера Каллисто с кратерным морем Валгалла (рис. 2.15), где место соударения окружают полтора десятка кольцевых валов диаметром до 2500 км.

Если на обратной стороне Меркурия не окажется чего-либо подобного, можно будет утверждать, что Равнина Жары родилась в самой большой катастрофе в период образования поверхности планеты. Кратеры на территории Равнины Жары обладают двумя особенностями. Во-первых, их мало, во-вторых, они хорошо сохранились (рис. 2.13 и 2.14). Это позволяет утверждать, что основные этапы кратерообразования к моменту возникновения Равнины Жары были уже пройдены.

Именно с Равниной Жары удивительным образом связано движение Меркурия. Точка, которой отмечено положение планеты на рис. 2.3, — это и есть Равнина Жары. В перигелии Солнце стоит над нею почти в зените, нагревая поверхность до очень высокой температуры. Но в следующее прохождение перигелия Равнина Жары находится уже на

ночной стороне, а к Солнцу обращен диаметрально противоположный район планеты. «Приливный горб», если именно он вызывает резонансное движение, может находиться как раз в Равнине Жары. Как это ни парадоксально, происхождение рельефа противоположной стороны планеты специалисты склонны также связывать с образованием Равнины Жары. Предполагается, что мощные сейсмические волны, которые возникли в момент столкновения, прошли сквозь всю планету и сфокусировались в ее диаметрально противоположной точке. В результате этого сейсмического удара за короткие мгновения возникли трещины, поверхность раскололась и вздыбилась хаотическим нагромождением многокилометровых блоков на высоту 1–2 км (правая верхняя часть

рис. 2.16). Возможно, в эти же мгновения возникли крупные кратеры, которые также можно видеть в правой верхней части рис. 2.16. Вполне вероятно, что в то время Меркурий обладал атмосферой. Можно представить себе, какими грохотом, ужасающими столбами пламени и дыма и целыми морями огнедышащей лавы сопровождалась эти события. Вероятно, следы этих катаклизмов и представлены на рис. 2.13, 2.14, 2.16.

Реголит Меркурия

Как уже говорилось, из спектрофотометрических измерений и аналогии с материковыми районами Луны следует, что состав поверхностного слоя реголита Меркурия — это анортозиты и крип-нориты. Но в отличие от Луны



Рис. 2.13. Равнина Жары. На снимке видна вся центральная часть Равнины Жары (диаметр 1300 км) и несколько кольцевых валов

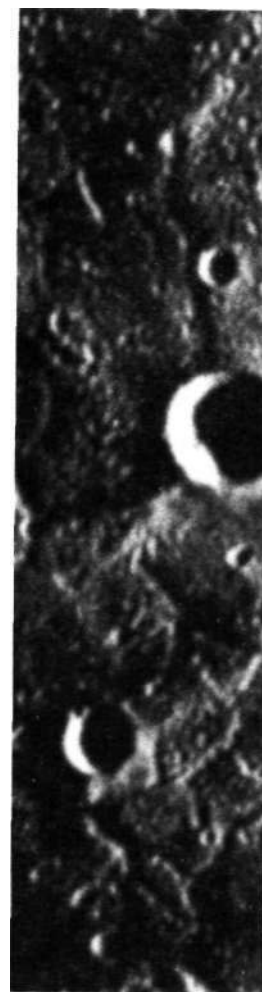


Рис. 2.14. Поверхность Меркурия в районе Равнины Жары. Различаются трещины шириной от 0,5 до 8 км. Наилучшее разрешение до 50 м. Снимок NASA

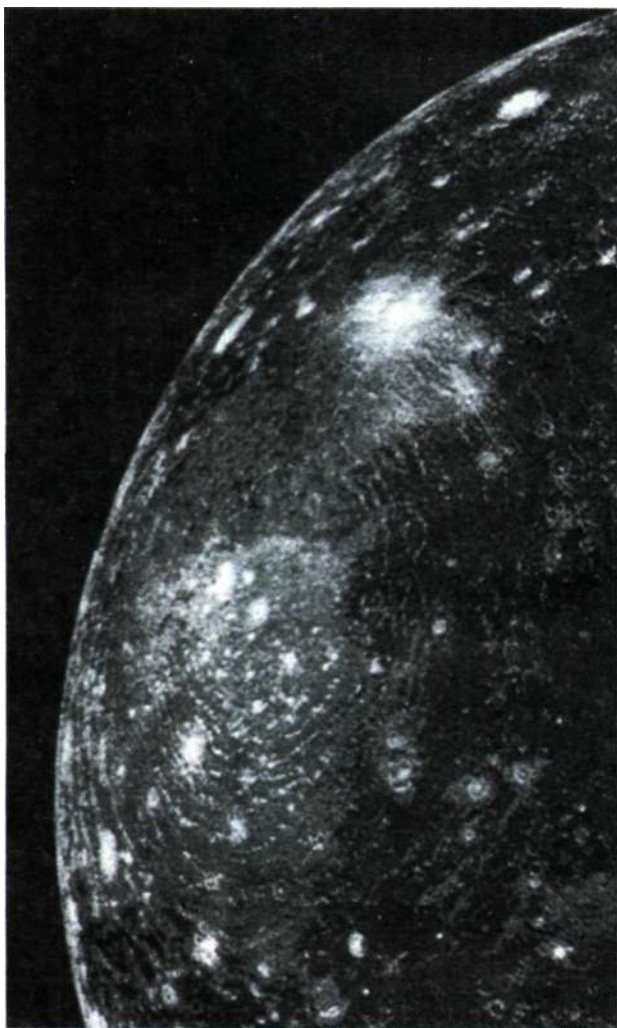


Рис. 2.15. Кратер Валгалла с концентрическими кольцевыми трещинами (спутник Юпитера Каллисто). Снимок NASA.

здесь он подвергается непрерывной термоциклической обработке.

Мощность радиации, которую Солнце посылает на 1 м^2 поверхности Меркурия, расположенной перпендикулярно солнечным лучам, составляет в среднем $9,15 \text{ кВт}$. В перигелии эта мощность возрастает до 11 кВт/м^2 . (Средняя мощность, которую при тех же условиях получает Земля, составляет $1,37 \text{ кВт/м}^2$.) К тому же поверхность Меркурия темная, и только 12–18% падающего света отражается в пространство, а остальное поглощается. Это приводит к тому, что в подсолнечной точке, где Солнце в зените, из падающей на 1 м^2 мощности до 8 кВт идет на нагрев поверхности. Температура поверхности за длинный мер-

курианский день поднимается очень высоко и достигает 620 К . В перигелии температура поднимается еще выше, до 690 К . (Это — температура в районе Равнины Жары и ее антиподов.) И наоборот, в афелии температура снижается до 560 К . Глинистые породы, встречающиеся на Земле, при таких значениях температуры необратимо теряют воду — обжигаются. Однако до очень высокой температуры разогревается только поверхностный слой. А он сильно измельчен и имеет поэтому низкую теплопроводность и служит прекрасной теплоизоляцией. Данные радиоастрономии показывают, что уже на глубине нескольких десятков сантиметров температура постоянная, $345\text{—}365 \text{ К}$. С другой стороны, низкая теплопроводность приводит к тому, что после захода Солнца поверхность Меркурия очень быстро остывает (рис. 2.17). Уже через 2 ч температура падает до 130 К , а ночью может достичь 90 К . Именно эти значения температур и были получены с борта «Маринера-10» в 1974 г.

Измерения температуры поверхности вдоль исследованных трасс позволяют определить физические свойства пород, из которых сложена поверхность планеты. Если днем на фоне нагретой поверхности обнаружен участок более холодный, но обладающий, как показывает фотометрия, такими же отражательными свойствами, а поверхность сухая, как у Меркурия и Луны, то это означает, что происходит отток тепла в глубину. Про подобный участок говорят, что он обладает повышенным коэффициентом тепловой инерции, которая определяется плотностью материала и его и коэффициентами теплоемкости и теплопроводности. Например, холодным будет скальный массив, окруженный тем же материалом, но в сильно раздробленном состоянии. Ночью же, наоборот, раздробленный материал быстро остынет, излучив свои небольшие запасы тепла, скала же будет ярко светиться в инфракрасных лучах. Такие участки тоже были обнаружены «Маринером-10». Их немного, что говорит об однородности поверхности планеты. Интересно отметить, что одна из подобных деталей на ночной стороне планеты совпадает с компактной областью повышенного радиоотражения.

После всего, что сказано выше о высоких дневных температурах на Меркурии, кажется невероятным сообщение о гигантских отложениях льдов в его полярных районах. Такое открытие было сделано опять-таки с помощью наземной радиолокации в начале 90-х годов. В районах северного и южного полюсов обнаружены многочисленные пятна размером от 50 до 150 км с присущими льду радиоотражательными свойствами (сильное деполяризованное

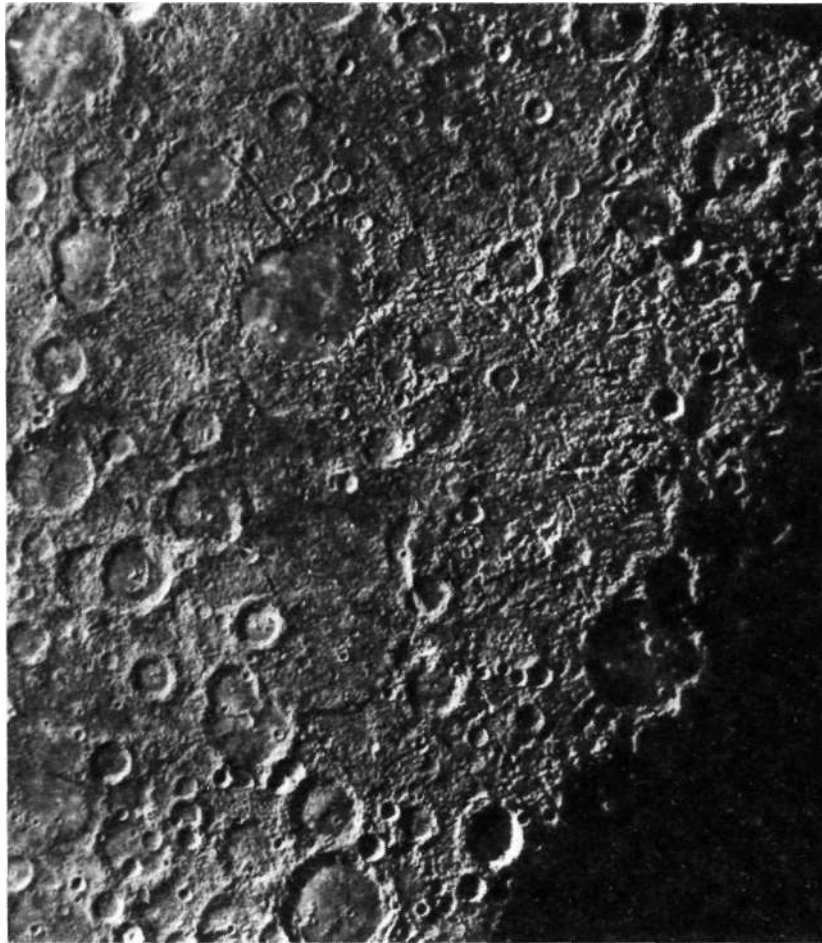


Рис. 2.16. Район необычного рельефа находится точно напротив Равнины Жары на противоположной стороне планеты. Согласно одной из гипотез, этот рельеф образовался в результате своеобразного «эффекта отдачи» — сейсмической фокусировки колебаний, возникших при образовании Равнины Жары. Снимок NASA

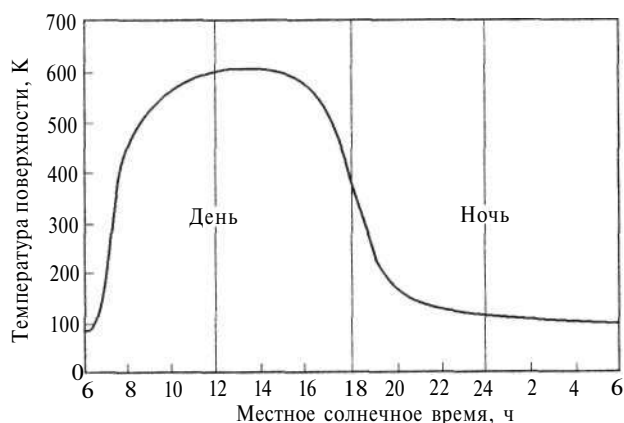


Рис. 2.17. Характер изменения температуры поверхности Меркурия в течение солнечных суток (на экваторе)

отражение). По-видимому, лед покрыт тонким слоем раздробленного теплоизолирующего рего-

лита, но главное, благодаря чему льды сохранились, — это стабильное положение полярной оси планеты. Из-за этого Солнце никогда не заглядывает в неглубокие полярные кратеры, расположенные выше $82\text{--}84^\circ$ широты. Расчетная температура здесь постоянно лежит около $60\text{--}62\text{ К}$. В таких условиях испарение льда происходит очень медленно.

Как же возникли эти ледяные поля? Неужели на Меркурии некогда существовали океаны и плотная атмосфера? Полярные льды могут полностью изменить наши представления об истории этой планеты.

Строение тела планеты

Строение коры, мантии и ядра Меркурия относятся к наиболее актуальным вопросам физики этой планеты. Если представление о системе сферических оболочек, окружающих центральное ядро, справедливо для такой массивной

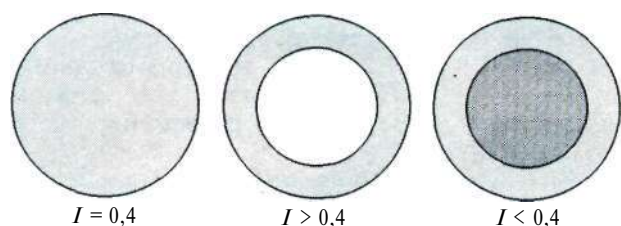


Рис. 2.18. Если плотность небесного тела не зависит от глубины, безразмерный момент инерции I составляет 0,4. У тел планетных размеров плотность увеличивается с глубиной. Значение I для Меркурия близко к 0,324

планеты, как Земля, то тела с малой массой могут иметь другое строение. Например, иначе устроена Луна. Уже первыми космическими аппаратами на орбите ее спутника была установлена неоднородность распределения масс в ее коре. Появилось новое понятие — «масконы». Оказалось, что внешние слои Луны до глубины нескольких сотен километров неоднородны. Масконы проявляют себя неоднородностями и в общем поле тяготения. Поскольку поле проявляется в микроускорениях движения аппарата на орбите спутника планеты, некоторые сведения о строении недр дает наблюдение за его движением. Тщательные измерения позволяют найти весьма важный параметр — безразмерный момент инерции небесного тела. Его смысл иллюстрирует рис. 2.18. Безразмерный момент складывается как сумма моментов инерции всех элементов тела (которые выража-

ются произведением квадрата радиуса на массу элемента). Если плотность тела постоянна и одинакова в каждой его части, полный безразмерный момент инерции, просуммированный по всему шару, составит 0,4. Для пустотелого шара безразмерный момент будет намного больше, чем 0,4. Наконец, если внутри шара находится более плотное ядро (например, металлическое), момент будет меньше 0,4. Таким образом, анализируя микроускорения в движении аппарата, удастся не только зарегистрировать масконы, но даже получить некоторые сведения о том, насколько возрастает к центру плотность планеты. Одновременно привлекаются теоретические и экспериментальные данные о поведении материалов при высоких давлениях и рассчитывается модель строения планеты.

В центре Земли плотность внутреннего ядра достигает $10,5 \text{ г/см}^3$, а плотность оболочки (коры и мантии) в 2—3 раза меньше. Безразмерный момент для Земли составляет 0,3309, что безошибочно указывает на массивное металлическое ядро. Совсем другие результаты были получены из анализа гравитационного поля Луны. Первые определения дали значение 0,401, что как будто указывает на более высокую плотность коры, чем центральных частей небесного тела. И хотя по уточненным данным момент равен 0,391, это все-таки несомненно говорит о том, что весь материал Луны имеет плотность, близкую к средней,

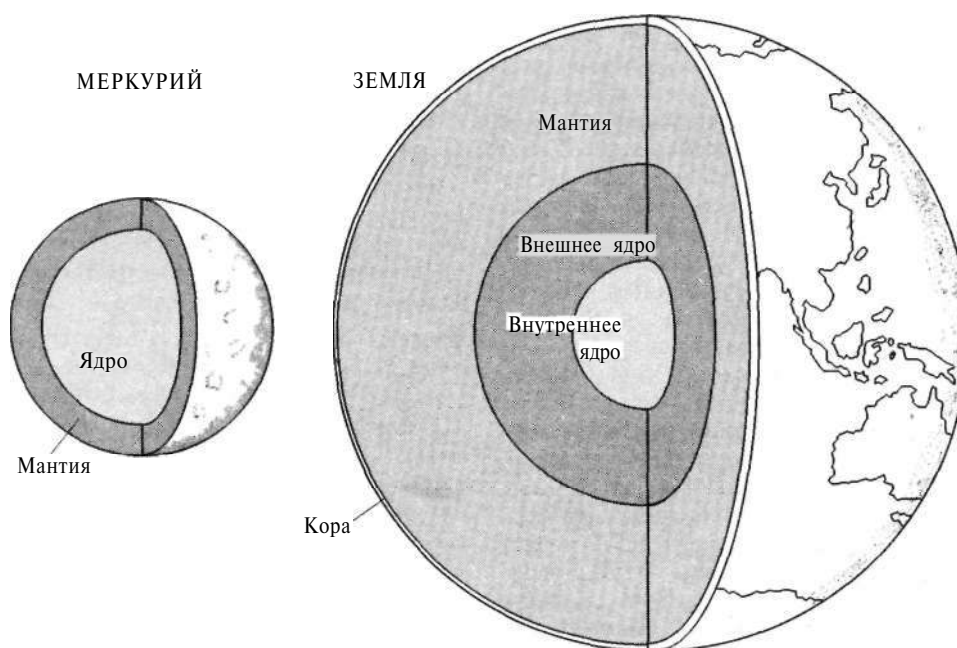


Рис. 2.19. Схема внутреннего строения Меркурия. Радиус металлического ядра достигает 74% радиуса планеты. На рисунке показана также упрощенная схема строения Земли

3,33 г/см³. Породы поверхности Луны, действительно имеют плотность 3,0—3,3 г/см³. Таким образом, если Луна и имеет ядро, оно очень маленькое, причем, по некоторым данным, имеет неправильную форму.

Земля имеет наибольшую массу (и размеры) среди планет земной группы. Поэтому никто не ожидал, что Меркурий может иметь еще меньший безразмерный момент инерции: 0,324. Следовательно, массивное железное ядро Меркурия относительно больше, чем у Земли (рис. 2.19).

Таким образом, Меркурий не удастся однозначно отнести ни к типу Земли, ни к типу Луны. Поверхность, однотипная с лунной, а ядро еще более массивное, чем у Земли. Оно занимает около 50% объема планеты. Над ним расположена силикатная оболочка толщиной 600 км. Поскольку плотность поверхностных пород должна быть того же порядка, что и у Луны (т.е. 3,0—3,3 г/см³, чтобы получить среднюю плотность 5,44 г/см³), железное ядро необходимо. Предположение о том, что вследствие очень высокого давления в центре планеты силикатные породы могут уплотняться и даже переходить в металлоподобное состояние, не подтвердилось.

Экзосфера Меркурия

С помощью «Маринера-10» у Меркурия было, наконец, обнаружено подобие атмосферы. Ее правильнее называть экзосферой, по аналогии с верхними, весьма разреженными этапами плотных атмосфер других планет. Догадки о том, что эта атмосфера подобна крайне разреженной атмосфере Луны, оказались правильными. Как известно, существование или отсутствие атмосферы у планеты определяется рядом обстоятельств. Прежде всего, это сила тяготения. Чем меньше радиус планеты и чем она массивнее, тем больше ускорение свободного падения. (Масса Меркурия в 2 раза меньше, чем масса Марса, но ускорение свободного падения одинаково на поверхности обеих планет. Причина — в различии их радиусов.) Чем больше тяготение, тем надежнее планета удерживает легкие газы. Очень важно, какова молекулярная или атомная масса газа. Чем она меньше, тем труднее удерживать газ. Таковы водород и гелий. Огромную роль играет температура внешней части атмосферы (экзосферы). С повышением температуры скорость частиц может достичь второй космической скорости. Тогда частица навсегда покидает планету. (Именно таким путем Земля ежедневно теряет около 100 т легкого водорода, но

практически полностью сохраняет запасы кислорода.) Другие важные механизмы потерь (нетепловая диссипация) для Меркурия не играют роли из-за крайней разреженности его атмосферы.

Близость Меркурия к Солнцу, а следовательно, и высокая температура дневной стороны экзосферы, а также малая масса планеты, определили быструю потерю его первичной атмосферы. Одним из первых, вместе с водородом, обычно убегает гелий. Но оказалось, что одна из основных составляющих нынешней атмосферы Меркурия — именно гелий. Причина в том, что гелий непрерывно притекает в разреженную атмосферу Меркурия вместе с плазмой солнечного ветра. Плазма эта очень разрежена, но и меркурианская атмосфера тоже. Давление у поверхности планеты примерно в $500 \cdot 10^9$ раз меньше, чем у поверхности Земли. Атмосфера Меркурия подобна текущей реке в том отношении, что она непрерывно утекает в межпланетное пространство, но потери ее постоянно восполняются. Каждый атом гелия, захваченный Меркурием, находится в его атмосфере в среднем 200 дней, главным образом на ночной стороне планеты, после чего покидает ее. (До полета «Маринера-10» астрономы искали у Меркурия совсем другой газ — углекислый. Он не был зарегистрирован приборами космического аппарата, но предельная чувствительность их была известна. Поэтому можно утверждать, что верхний предел концентрации углекислого газа составляет не более $40 \cdot 10^9$ молекул в столбе атмосферы над 1 см² поверхности.)

Кроме гелия, в атмосфере Меркурия найдено ничтожное количество водорода. Его примерно в 50 раз меньше, чем гелия. Другие газы не были обнаружены. Предполагая, что они все-таки там присутствуют, специалисты оценивают общее максимальное количество атомов и молекул газа в атмосфере как не более $2 \cdot 10^{14}$ над 1 см² поверхности. Подобная степень разрежения пока земной вакуумной технике недоступна. Атомы и молекулы газов в такой атмосфере движутся по баллистическим траекториям и встречаются столь редко, что никакие реакции между ними невозможны. Опускаясь на поверхность, они приобретают скорость, зависящую от ее температуры. Поэтому на ночной стороне Меркурия скорость атомов газа значительно меньше, чем на дневной. В результате в вертикальном столбе атмосферы ночью содержится в 30 раз большее число атомов гелия, чем днем. Но и при таких концентрациях сами понятия температуры и

давления лишены смысла. (Как уже говорилось, примерно такую же «атмосферу» имеет Луна, а ее принято приводить как пример безатмосферного небесного тела.)

После «Маринера-10» прошло почти 20 лет, когда в составе меркурианской атмосферы неожиданно были обнаружены пары щелочных металлов, натрия и калия, примерно в соотношении 25:1, в ничтожных, но спектроскопически измеримых количествах (до $5 \cdot 10^9$ атомов калия и до $100 \cdot 10^9$ атомов натрия над 1 см^2 поверхности). Эмиссии в линиях натрия и калия прослеживаются на больших высотах над планетой, причем их интенсивность непостоянна. По некоторым данным испарение щелочных металлов происходит из коры планеты, с глубины до 10 км, причем наблюдалось повышение их концентрации над Равниной Жары. Положение еще больше усложняется тем, что отмечена связь этих эмиссий с солнечной активностью. Присутствию паров щелочных металлов в экзосфере Меркурия пока нет исчерпывающих объяснений, но можно заметить, что из-за большого эксцентриситета его орбиты в коре планеты рассеивается значительная приливная энергия, что обязательно должно вызывать ее разогрев. В главе о Юпитере читатель встретится с подобными же газовыми извержениями паров натрия с поверхности спутника Ио. Предполагается, что небольшие газовые вулканы (фумаролы) могут быть и на Меркурии.

Магнитное поле Меркурия

Кроме гелия, плазма солнечного ветра содержит огромное количество свободных электронов и протонов различных энергий. Достигая планеты, потоки частиц сталкиваются с ее магнитосферой. Магнитное поле убывает с расстоянием постепенно, но все же можно указать расстояние, где начинается взаимодействие солнечной плазмы с магнитосферой. Происходит это там, где давление магнитного поля достигает значения, равного газодинамическому давлению плазмы. Обе эти величины переменные. Именно вдоль этой границы расположен слой, по которому течет ток. Впереди слоя набегающая плазма образует ударную волну, в которой она сильно разогревается. (В случае Земли, эти события разыгрываются примерно на расстоянии 70 тыс. км от планеты, со стороны Солнца.)

Магнитное поле Земли определяет также существование у нее радиационных поясов большой мощности и протяженности. Прежними исследованиями было установлено, что мед-

ленно вращающаяся Луна практически лишена магнитного поля. Тем более удивительным было обнаружение ударной волны и магнитного поля вблизи Меркурия. Правда, после первого пролета «Маринера-10» нельзя было категорически утверждать, что обнаруженное магнитное поле есть дипольное поле самой планеты. Существуют сложные механизмы внедрения (имплантации) магнитного поля Солнца, перенесенного плазмой солнечного ветра, в магнитосферу планеты. Но предположение о поле самой планеты лучше объясняло наблюдаемые явления. Во время третьего сближения «Маринера-10» было подтверждено, что поле действительно принадлежит планете. Его напряженность на экваторе достигает $35 \cdot 10^{-4}$ Гс, а у полюсов $70 \cdot 10^{-4}$ Гс. Это примерно 0,7% от напряженности земного магнитного поля. Наклон оси диполя к оси вращения Меркурия 12° (у Земли 11°). Направление магнитных диполей у Меркурия и Земли одинаково.

Строго говоря, представление магнитного поля Меркурия дипольным приближением условно. Даже в коротких сближениях с ним «Маринера-10» были обнаружены указания на возможное присутствие недипольных составляющих. А при сравнении измерений в первом и третьем сближениях напряженность поля различалась в 2—3 раза. Значит ли это, что поле планеты нестабильно? При движении аппарата внутри магнитосферы планеты были обнаружены всплески потоков заряженных частиц и резкие изменения напряженности поля. Среди других оставшихся необъясненными явлений «Маринер-10» позволил установить, что внутри магнитосферы электронная концентрация составляет менее $0,1 \text{ см}^{-3}$. Это намного меньше, чем в окружающем магнитосферу Меркурия пространстве.

Магнитное поле Меркурия — это приготовленный самой природой «чистый» эксперимент. Отсутствие атмосферы в сочетании с заметным собственным полем планеты позволяет исследовать явления обтекания магнитосферы солнечным ветром в условиях, которые не реализуются больше ни у одной планеты Солнечной системы.

Механизмы, создающие магнитное поле Земли и планет, относятся к наиболее актуальным научным проблемам. Поле не остается постоянным. Его напряженность в разных точках Земли одновременно и убывает, и возрастает. Магнитные полюса не остаются строго на одном месте. В истории Земли были периоды, когда магнитное поле убывало до нуля и даже когда полюса неоднократно

менялись местами. Магнитное поле Земли реагирует на явления на Солнце, с которым оно связано еще не до конца понятным образом. В последней трети XX в. появились важные работы, в которых получила развитие известная идея о связи магнитного поля Земли с ее вращением и движениями в ее жидком металлическом ядре. Это — гипотезы, в которых разрабатываются модели «планетарного магнитного динамо». Согласно одной из них, к главным условиям существования поля относится несоосность магнитного диполя с осью планеты. К сожалению, торжество этой гипотезы было недолгим. У одной из планет-гигантов ось диполя и ось вращения оказались практически параллельными.

Несомненно, что возникновение магнитного поля на любых планетах подчинено общим правилам. Однако какой вывод можно сделать, зная, что:

- у Земли большая масса, быстрое вращение и поэтому (?) есть сильное магнитное поле;
- у Венеры большая масса, медленное вращение и нет магнитного поля или оно крайне слабое;
- масса Марса в 10 раз меньше, чем у Земли, у него быстрое вращение и, кажется, есть очень слабое магнитное поле;
- масса Луны очень мала, медленное вращение и нет магнитного поля;
- наконец, что у Меркурия масса вдвое меньше, чем у Марса, медленное вращение, но ЕСТЬ магнитное поле?

Существование магнитного поля у Меркурия, согласно представлениям теории, должно быть связано с жидким состоянием его ядра, на которое приходится, по разным оценкам, 50—62% всей массы планеты. Вместе с тем, некоторые расчеты показывают, что за время, которое прошло от образования планеты до наших дней, жидкое вначале ядро должно было затвердеть. А в твердом ядре магнитное поле возбудиться бы не могло. Более того, на его остывание хватило бы и значительно меньшего времени, всего 1,5—2,0 млрд лет. Но объяснение, как считают специалисты, кажется найдено. По-видимому, Меркурий — это особый случай. Предполагается, что в его металлическом ядре сосредоточено большое количество серы. А благодаря легированию серой железо-никелевого сплава значительно снижается температура его затвердевания и ядро может сохранить свое жидкое состояние.

Тем не менее, многие противоречия остаются неразрешенными. В 1996 г. была предложена новая гипотеза, объясняющая как само существование, так и нестабильность магнитно-

го поля Меркурия. Она опирается на большой эксцентриситет его орбиты и уже упоминавшийся интенсивный разогрев коры в приливном рассеянии энергии. В гипотезе предполагается, что основная часть ядра — твердая, но его внешняя часть и мантия периодически подплавляются на определенных участках орбиты. Тогда напряженность поля действительно должна испытывать периодические годовые колебания. В том же 1996 г. появилось сообщение о том, что магнитное поле аналогичного характера и интенсивности обнаружено у других медленно вращающихся небесных тел, более или менее близких к Меркурию по размерам и массе. Это спутники Юпитера Ганимед и, кажется, Европа. Исключения становятся правилом?

Новая миссия к Меркурию — как она видится 20 лет спустя после «Маринера-10»

Интерес к началу интенсивных исследований Марса в свое время немало стимулировался надеждой найти какие-то формы жизни на этой планете. На Луне найти жизнь никто не ожидал, тем не менее перед полетом к ней космических аппаратов проводилась их стерилизация, чтобы не занести туда земные микроорганизмы и не исказить картину возможной жизни на Луне. Меры оказались излишними; никаких микроорганизмов на Луне не оказалось. Можно с уверенностью сказать, что то же относится и к Меркурию; там условия для существования жизни еще менее приемлемы, чем на Луне.

Меркурий привлекает другими возможностями. По-видимому, в недалеком будущем его посетят сложные автоматические аппараты, которые, возможно, опустят зонды на его поверхность и проведут научные исследования, объектом которых будет не только Меркурий, но и Солнце.

В первые десятилетия исследований космоса наземная служба Солнца, наряду с другими заботами, обеспечивала пилотируемые полеты информацией о тех явлениях на Солнце, которые были опасны для людей, находящихся в космосе. Таковы, например, вспышки на Солнце, которые повышают до опасных пределов дозу радиации в окрестностях Земли. Солнечная патрульная аппаратура, установленная на Меркурии, может по радиoliniи заблаговременно посылать на Землю более исчерпывающую информацию. Но наиболее существенна другая задача, которая под силу такому аппарату. Это изучение физики Солнца. Здесь предстоит сделать очень многое, поскольку из-за технических сложностей полета к

Солнцу реализация таких проектов (например, УЛИСС) в конце XX в. еще только началась. При несомненной связи многих явлений на Солнце с явлениями на Земле и других планетах подробности процессов на Солнце и в окосолнечном пространстве еще во многом неизвестны.

Прямой полет к Солнцу остается невозможным и теперь: при орбитальной скорости Земли 30 км/с, ракеты на химическом топливе в состоянии погасить лишь 17–18 км/с. Решением проблемы полета к Солнцу (и Меркурию) стал гравитационный маневр космического аппарата, о чем уже говорилось выше.

Техника гравитационного маневра значительно продвинулась за последние годы. Разработаны методы многократных маневров, которые были блестяще реализованы в миссиях «Вояджер» и «Галилей». Солнце уже не так недостижимо, как раньше. В одном из новых проектов (Солнце/Меркурий) предусматривается многократное посещение планеты в афелии орбиты с постепенным снижением высоты перигелия в каждом витке орбиты, благодаря чему будет возможно исследование Солнца с последовательно уменьшающихся расстояний. Так, согласно одному из расчетов, каждый гравитационный маневр у Венеры может снижать перигелий на 15 солнечных радиусов. Что же касается Меркурия, то в отличие от «Маринера-10», новым проектам будет доступна для наблюдений вся поверхность этой планеты.

Изучение поверхности планет, проводимые на них научные измерения, в конечном счете — понимание природы планет неизбежно связаны с проблемой их происхождения. Здесь очень много неясного. Гипотеза их формирования из газопылевого облака сейчас общепринята. Но о том, какие процессы происходили 4,5 млрд лет назад при формировании планет, известно немного. Одна из проблем — это источники тепла для образования жидкой лавы, заполнявшей ударные кратеры на Меркурии и на Луне. Анализ лунных пород показывает, что возраст таких застывших лав достигает 4 млрд лет. Это говорит об очень высокой скорости, с которой эти планеты прошли гравитационную дифференциацию, разделившую сравнительно легкие легкоплавкие и тяжелые компоненты. На это ушло всего несколько сотен миллионов лет. Как уже говорилось, лавовые излияния происходили одновременно с формированием кратерированной поверхности планеты. Таким образом, в это время в недрах планеты уже имелись резервуары расплавленной лавы. Однако, хотя в гравитационной дифференциации и выделяется много энергии, для ее начала температура

планеты уже должна быть достаточно высокой. Но для того, чтобы разогреть такую гигантскую массу, как планета, нужно очень много тепла. И вопрос сводится, по существу, к тому, чтобы найти такие физические процессы, которые в состоянии не просто выделить много тепла, но выделить его быстро.

Высокая температура разогретых недр планеты группы Земли объясняется выделением тепла при распаде радиоактивных изотопов тория, урана, калия и других элементов. После завершения гравитационной дифференциации эти элементы оказались сосредоточенными в основном в мантии планеты. Процесс их распада продолжается уже 4,5 млрд лет. Относительное содержание радиоактивных изотопов известно. Поэтому можно подсчитать, что на разогрев для начала гравитационной дифференциации Меркурия при известной скорости выделения тепла должно было уйти 1–1,5 млрд лет. Поэтому на стадии формирования поверхности он еще не мог быть достаточно разогретым теплом радиоактивного распада. Нельзя предположить также, что тогда было во много раз больше радиоактивных элементов или другая скорость их распада: закон постоянства периода полураспада действует неутомимо. Тем не менее, в период формирования Луны и Меркурий, очевидно, уже были очень горячими. Еще одна гипотеза — попытка объяснить их быстрый разогрев интенсивной метеоритной бомбардировкой — тоже опровергается расчетами. Излучаемый планетой в единицу времени поток тепла настолько велик, что метеоритная бомбардировка могла бы компенсировать его только в том случае, если бы планета формировалась за немногие тысячи, а не за 200 млн лет. Но сейчас это представляется совершенно невероятным. Проблема становится еще более запутанной, если учесть, что разные планеты в эпоху формирования имели, по-видимому, разные температуры. Различия в температурах протопланетного облака и протопланетных тел на разных расстояниях от Солнца в период формирования планет должно было определить разное содержание благородных (инертных) газов в их атмосферах, что и наблюдается. Но даже самые завышенные оценки показывают, что исходные температуры материала, из которого формировались планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля с Луной и Марс), были далеки от точки плавления.

Источником тепла протопланетных тел, конечно, было Солнце. В расчетах предполагается, что температура каждой частицы пылевого облака, обращающегося вокруг Солнца, была равновесной при обмене излучением

между частицей, Солнцем, облаком и космосом. Это означает, что температура частицы должна быть такой, чтобы излучаемый ею поток энергии (главным образом в инфракрасном диапазоне) в точности равнялся поглощаемой ею энергии солнечной радиации. Излучаемая энергия уходит во все стороны космического пространства, а поглощаемая приходит только с одной — от Солнца. Как известно, излучаемая энергия пропорциональна четвертой степени температуры тела. Поэтому с ростом температуры излучение растет так быстро, что на разогрев частицы до плавления не хватает энергии, получаемой от Солнца, даже на расстоянии орбиты Меркурия. Чтобы как-то объяснить все эти противоречия, высказывались предположения о том, что когда-то Солнце могло излучать больше энергии, чем теперь. Но все данные науки говорят о том, что за несколько последних миллиардов лет его излучение не изменилось больше, чем на 5%. Не меняется оно и в нашу эпоху. (Как известно, поток энергии от Солнца так и называется: «солнечная постоянная».) А в пору юности Солнца его излучение было даже процентов на 30 меньше. Следовательно, гораздо обоснованнее была бы теория, в которой используется солнечная постоянная нынешней или близкой к ней величины (как уже говорилось, для

Меркурия это около 9 кВт/м^2). Вместе с тем, астрономические наблюдения показывают, что расположенные вокруг некоторых звезд пылевые оболочки (или, возможно, пылевые диски) имеют довольно высокие температуры в своей внутренней части, но точная оценка затруднительна. Во всяком случае, вполне вероятно, что это — зарождающиеся планетные системы.

Со времени полета «Маринера-10», когда были получены основные сведения о поверхности Меркурия, прошло много лет. Появилось значительное число научных работ, в которых постепенно вырисовывались наиболее важные проблемы, связанные с Меркурием (и были предложены эксперименты для их возможного решения). Вот некоторые из них.

Изучение рельефа Меркурия позволило выделить несколько характерных его типов. По-видимому, наиболее древним является насыщенный рельеф — изрытые равнины, покрытые бесчисленным количеством перекрывающихся метеоритных кратеров, где удар каждого метеоритного тела приходится на участок, уже многократно изрытый такими же кратерами. Оценка, сделанная, как уже говорилось, на основе аналогий с хорошо исследованной поверхностью Луны, доказывает, что возраст такой насыщенной поверхности соответствует $4 \cdot 10^9$

годам, что совпадает с пиком плотности метеоритной бомбардировки ($\sim 3,9$ млрд лет). Последующих столкновений с крупными метеоритными телами было недостаточно для полного разрушения прежних следов. Однако они, хотя и в меньшем количестве, продолжали выпадать и позднее. Необходимые эксперименты — определение возраста реголита Меркурия и изучение морфологии рельефа.

Количественные оценки показывают, что и в самом процессе формирования Меркурия из протопланетных тел (планетезималей) много неясного. При столкновении такого тела с поверхностью планеты происходит выброс вещества — продуктов взрыва. Обломки движутся по баллистическим траекториям и выпадают на поверхность планеты, образуя вторичные кратеры. Но если энергия первичного выброса очень велика, скорость обломков может превысить значение второй космической скорости. Тогда выпадение планетезималей может привести уже не к росту, а к уменьшению массы планеты. Недавно было показано, что при той скорости, которой обладали протопланетные тела вблизи орбиты Меркурия, энергия ударов была настолько велика, что выпадение метеоритного вещества должно было приводить к уносу продуктов выброса и к уменьшению массы протомеркурия. Об одном из возможных объяснений этого парадокса речь будет ниже. По-видимому, в период затухания метеоритной бомбардировки, как и на предыдущей стадии, продолжались местные излияния лавы, но общего плавления поверхности не происходило, хотя местные размягчения могли существовать. К этому периоду относится образование гигантской Равнины Жары и других менее четко выраженных равнин. Целесообразны сейсмические эксперименты на поверхности планеты, включая сейсмическое зондирование.

Совсем другое происхождение, как предполагается, имеют эскарпы. Уже говорилось о высокой средней плотности Меркурия ($5,44 \text{ г/см}^3$), близкой к земной ($5,52 \text{ г/см}^3$). Такая плотность может быть только у планеты с массивным металлическим ядром. Согласно одному из имеющихся расчетов, масса железоникелевого ядра Меркурия составляет 0,62 всей его массы, а радиус ядра достигает 1840 км. Таким образом, под поверхностью лунного типа скрыты недра планеты, более похожей на Землю или Венеру. Выделение подобного ядра в процессе гравитационной дифференциации (когда «тонули» тяжелые элементы) должно было привести к сильному (на 700°) разогреву и плавлению недр планеты с уменьшением ее радиуса на 17 км. По-видимому, эти события произошли в столь давнее время, что их следы

на поверхности Меркурия не сохранились. Дальнейшее плавление мантии, согласно расчетам, привело к дополнительному уменьшению радиуса на 2 км и соответствующему сжатию коры. Именно в этом процессе напознания друг на друга отдельных районов и возникли эскарпы.

Пока нет ответа на вопрос, что происходило дальше. Как говорилось выше, магнитное поле Меркурия почти несомненно свидетельствует о том, что его ядро и по сей день сохраняется в жидком состоянии. Но расчеты показывают, что если первичное выделение энергии произошло так быстро, то за прошедшие после того 3,8 млрд лет ядро и мантия неизбежно должны были остыть до температуры затвердевания, если только недра Меркурия не содержат необычно большое количество радиоактивных элементов или серы. Однако такой состав недр планеты, резко отличающийся от состава Земли, Луны и метеоритов, в свою очередь, потребовал бы дополнительных объяснений. Учет таких источников тепла, как рассеяние энергии в довольно значительных приливных эффектах, мало изменяет положение. Альтернативное же объяснение требует, чтобы в истории планеты когда-то произошел весьма сильный дополнительный разогрев недр. Противоречия между существованием магнитного поля Меркурия и его предполагаемой термической историей рассматриваются ныне во многих научных работах, но исчерпывающего объяснения не находят. Значительный прогресс могли бы обеспечить магнитометрические измерения. Наконец, небольшой зонд-радиомаяк, сброшенный в какую-либо из полярных областей, мог бы обеспечить длительные наблюдения для измерения вынужденной либрации и нахождения полярного безразмерного момента инерции. Эти параметры дают ценную информацию о строении планеты, в частности, о ее внешнем ядре.

В заключение следует упомянуть об одной любопытной гипотезе. Еще в XIX в. было высказано предположение о том, что Меркурий может быть потерянным спутником Венеры (рис. 2.20). Однако до проведения строгих расчетов к этой идее специалисты относились скорее как к курьезу. В 70-х годах XX столетия была создана математическая модель эволюции орбиты такого гипотетического спутника с массой Меркурия. Результаты оказались следующими. Спутник, который первоначально находился на орбите с большой полуосью около 400 тыс. км (у Луны 385 тыс. км) должен был вызвать огромное приливное рассеяние энергии, как в собственном теле, так и в теле Венеры. Такие потери должны были вызвать плавление коры у обоих тел и затормозить их вращение. Процесс должен был завершиться за несколько сотен миллионов лет неизбежной потерей спут-



Рис. 2.20. Был ли Меркурий когда-либо спутником Венеры? Рисунок автора

ника с орбиты, высота которой должна была за это время увеличиться до 420 тыс. км. В дальнейшем Венера и потерянный спутник должны были неоднократно сближаться, причем были возможны вторичные захваты последнего. Если исходить из постулированного Альфвенем принципа изохронизма, энергия, которая была потеряна Венерой в приливном рассеянии, эквивалентна энерговыделению Солнца за 4 часа (!).

Как ни фантастична эта гипотеза на первый взгляд, ее сторонники указывают, что она непринужденно объясняет потерю вращательного момента Венерой и Меркурием; ранний разогрев коры обоих тел; значение интеграла Якоби для Меркурия, удовлетворяющего орбите Венеры, и, наконец, формирование Меркурия на орбите Венеры с дальнейшим переходом на нынешнюю его орбиту, где его формирование невозможно. Необходимы более точные теоретические расчеты и математическое моделирование.

Г Л А В А 3

ПОЛНАЯ ЧУДЕС ВЕНЕРА

Здесь нет привычной голубизны земного неба. Высоко над поверхностью Венеры раскинут огромный оранжевый купол облаков. Самые нижние его слои находятся на высоте 48—49 км, — так высоко, что с поверхности не видны какие-либо подробности их структуры, за исключением, может быть, тонких полос (вроде земных перистых облаков), расположенных чуть ниже 48 км. Когда местное время приближается к 6 ч и наступает утро, рассветные лучи Солнца озаряют одну половину облачного купола и слегка подсвечивают другую. Наверное, это очень красиво, если смотреть с поверхности планеты. Облака становятся все светлее, яркость небосклона очень медленно выравнивается. На Земле проходит день, другой. Через 5 земных суток местное время на Венере прибавится на 1 ч, через 10 суток на 2 ч. Солнечные сутки на Венере очень длинные; весь год планеты состоит из двух (точнее, 1,91) солнечных суток. Поэтому так долго длится рассвет. Однако восход Солнца — понятие, не известное природе Венеры. Прямой луч Солнца не способен пробиться сквозь 20-километровую толщу сернокислотного тумана, который мы по традиции называем облаками Венеры. Пока наблюдения не показали ни одного, даже самого маленького, сквозного разрыва в облаках. (Интересно, как развивались бы понятия земной астрономии, если бы и наше небо было вечно затянуто сплошными тучами?)

...Местное время приближалось к полудню, когда аппарат «Венера-9» со скоростью около 11 км/с вошел в атмосферу планеты. Весь аппарат охватило яркое пламя. Огромные перегрузки обрушились на все его приборы и системы. Но это длилось недолго. Скорость понемногу упала. Гром, который сопровождал движение космического аппарата после входа его в атмосферу Венеры, стал постепенно затихать. Пламя вокруг его сферической оболочки, раскаленной трением об атмосферу, померкло. Через несколько секунд легкий взрыв сбросил

крышку сферы. За аппаратом потянулся небольшой тормозной парашют. Затем раскрылись три купола основного парашюта. На стропях слегка покачивался аппарат необычной формы. Вокруг расстился необозримый океан облаков...

В этих строках, похожих на начало фантастического рассказа, говорится о самых реальных событиях, которые происходили в небе Венеры ранним утром 22 и 25 октября 1975 г. Событиям этим предшествовали многие годы и столетия изучения Венеры. «...На Венере всегда темно, жарко, пыльно и ветренно», — так писал известный советский астроном В.В.Шаронов в 1964 г. Не будем, однако удивляться наивности ученых недавнего прошлого: своими работами они подготовили будущие свершения. Появились космические аппараты, предназначенные для изучения планеты, о которой за всю историю науки удалось узнать до обидного мало. Ученые СССР прошли большой путь к этим дням. Начиная с «Венеры-4» в 1967 г. 14 аппаратов спускались в атмосфере планеты и непосредственно исследовали ее. За 18 лет, с 1967 по 1985 гг., о Венере удалось получить намного больше данных, чем за всю историю астрономии, и прежде всего благодаря аппаратам серии «Венера». Весьма сложные задачи стояли в 1982 г. перед «Венерой-13» и «Венерой-14», которыми впервые были получены четкие цветные изображения поверхности планеты в точках посадки. На рис. 3.1 представлен телевизионный снимок поверхности планеты в точке посадки, как ее увидел аппарат «Венера-13». Еще через 3 года, в 1985 г., «ВЕГА-1 и -2» вывели в атмосферу Венеры аэростаты.

Дальнейшее развитие науки позволило увидеть топографию Венеры в глобальном масштабе. Для этого последующие спутники планеты «Венера-15 и -16» были оснащены особым радиолокатором, который позволил картировать более 30% поверхности северного полушария с разрешением до 1 км. Эксперимент с радио-

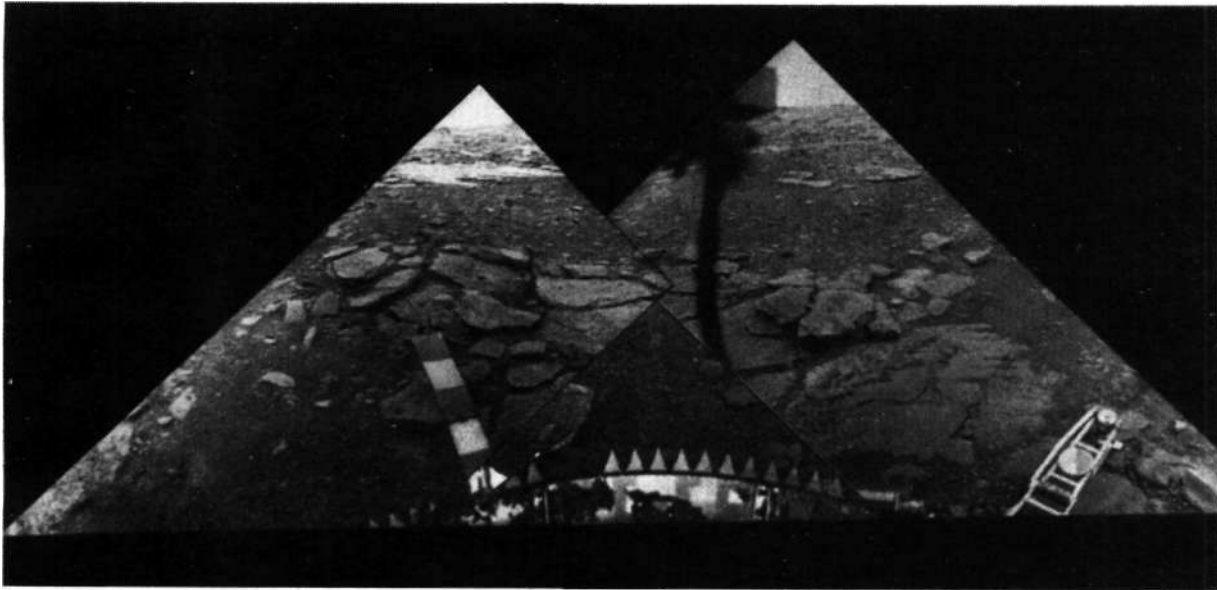


Рис. 3.1. Фрагмент одной из панорам, переданных «Венерой-13» с поверхности планеты

локатором бокового обзора был затем повторен на американском аппарате «Магеллан», который работал на орбите спутника Венеры с 1990 по 1993 гг. и картировал всю поверхность планеты, причем разрешение достигало 120 м. Рекордную длительность работы имел аппарат «Пионер-Венера», выведенный на орбиту спутника Венеры в 1978 г. С его помощью была составлена первая рабочая карта значительной части планеты.

Орбита, масса и период вращения Венеры

Венера — вторая от Солнца планета. Она занимает особое положение среди других пла-

нет земной группы. Еще недавно ее называли двойником Земли. Однако чем дальше продвигалось изучение Венеры, тем меньше оставалось у нее черт «двойника», несмотря на сходство в размерах и массе. Венера находится в 1,38 раза ближе к Солнцу, чем Земля. Продолжительность ее года составляет 224,7 земных суток. Эксцентриситет орбиты Венеры очень мал и составляет 0,0068, орбита почти круговая; среднее расстояние от Солнца составляет 108,1 млн км. Наклон орбиты к плоскости эклиптики $3,5^\circ$. Венера — ближайшая к Земле планета, в максимальном сближении ее отделяет от нас только 40 млн км. Свет проходит

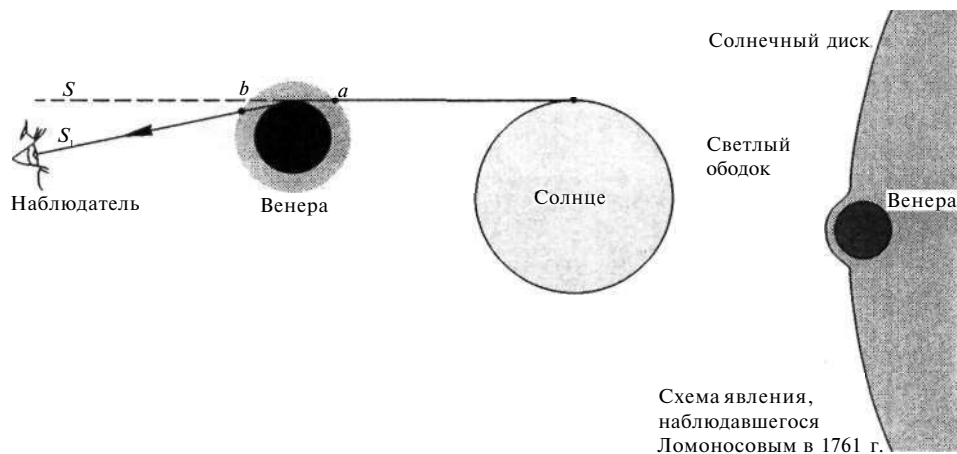


Рис. 3.2. Схема явления, которое М.В.Ломоносов наблюдал в 1761 г. При прохождении Венеры по диску Солнца, что случается очень редко, вокруг выступающего края планеты появляется тонкий светлый ободок

это расстояние за 2 мин 12 с. Но, к сожалению, в этот период мы видим только ночную сторону планеты. Спутников у нее нет.

По уточненным с помощью космических аппаратов данным масса Венеры составляет $48,7 \cdot 10^{26}$ г, или 0,815 массы Земли, а ее радиус равен 6052 км, что также лишь немногим меньше среднего радиуса Земли (6371 км). Ускорение свободного падения у поверхности планеты 887 см/с^2 . Средняя плотность Венеры ($5,24 \text{ г/см}^3$) незначительно отличается от средней плотности Земли ($5,52 \text{ г/см}^3$). Такое сходство между двумя планетами позволяет предположить, что и внутреннее строение Венеры похоже на строение Земли.

В своем орбитальном движении планета иногда оказывается на линии Солнце — Земля, и тогда ее можно видеть как маленькую черную точку, пересекающую солнечный диск. В 1761 г. М.В.Ломоносов, наблюдая такое прохождение, обнаружил, что в момент контакта с Солнцем вокруг противоположного края планеты вспыхнул яркий ободок. Такая же

картина повторилась, когда Венера сходила с солнечного диска. Вот как об этом писал Ломоносов: «...Появился на краю Солнца пупырь, который тем явственнее учинился, чем ближе Венера к выступлению приходила».

На рис. 3.2 показано положение Венеры вблизи края диска Солнца и яркий ободок, а

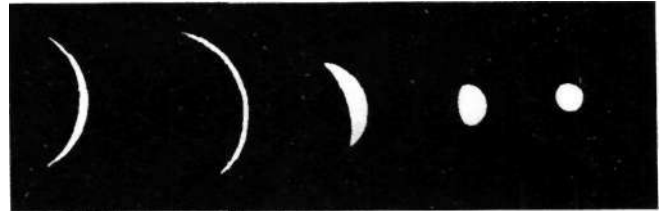


Рис. 3.3. Фазы Венеры, которые когда-то поразили Галилея. Угол фазы, близкий к 0, соответствует наибольшему удалению планеты. В отличие от Земли, вид которой из космоса позволяет наблюдать и облака, и поверхность планеты, в визуальной и ближней инфракрасной частях спектра Венера лишена каких-либо деталей. Виден лишь облачный слой — глубокий океан тумана. По внешней границе облаков диаметр Венеры лишь на 4% меньше диаметра Земли

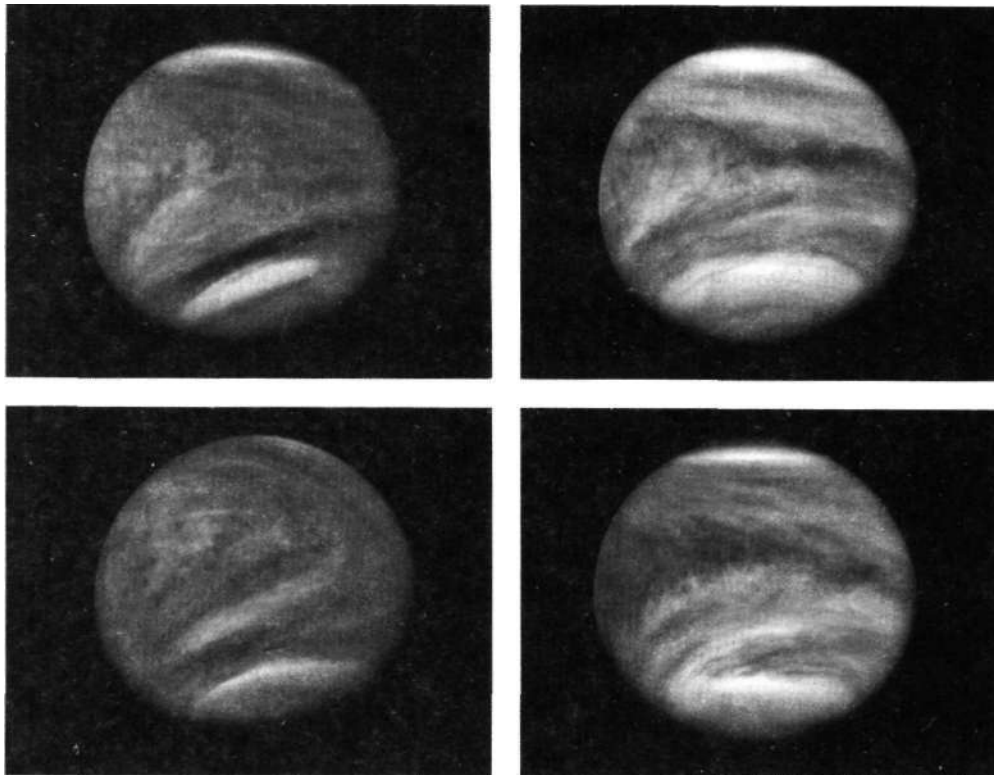


Рис. 3.4. Снимки поверхности облачного слоя Венеры, сделанные в ультрафиолетовых лучах. Спиральные полосы, сходящиеся в центре, образуют *V*-образную фигуру, наблюдавшуюся с Земли. На рисунке приведены 4 последовательных изображения облачного слоя Венеры, которые показывают периодичность его движения. Интервалы между снимками 23, 67 и 53 ч. Снимки сделаны с помощью аппаратуры спутника «Пионер—Венера». Снимок NASA

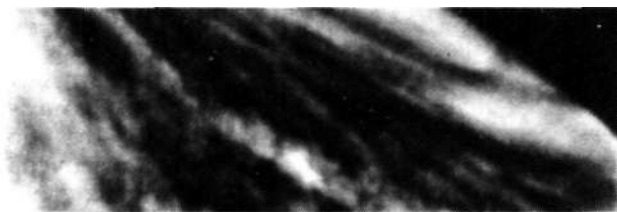


Рис. 3.5. Поверхность облачного слоя в ультрафиолетовых лучах («Венера-9»). Анализ снимка показывает, что и светлые, и темные образования находятся на одних и тех же высотах и взаимодействуют между собой

также схема этого явления. Луч света, распространяющийся в направлении OS , преломляется в верхних слоях атмосферы планеты на участке ab , изменяет направление и достигает глаза наблюдателя S_1 . Ломоносов именно так

и объяснил это явление и сделал вывод, что Венера окружена плотной атмосферой: «Сие ничто иное показывает как преломление лучей солнечных в Венериной атмосфере», — писал он. Впоследствии эта атмосфера принесла астрономам много хлопот — она оказалась значительно плотнее, чем можно было предположить.

В телескоп Венера выглядит, чаще всего очень ярким серпом, который меняет фазы, подобно Луне (рис. 3.3). На серпе Венеры нет никаких четких деталей.

Изучая Венеру, астрономы постепенно поняли, что видят облачный покров планеты, и стали терпеливо искать в нем разрывы. Но разрывов не находили, несмотря на пристальные и длительные наблюдения. Лишь в 1927 г. путем фотографирования планеты в ультрафиолетовых лучах удалось различить странный нечеткий узор, который периодически появляется на облачном слое.

Но о самой поверхности планеты никаких реальных данных не было. Более того, оставалась неизвестной даже длительность суток на Венере. В 1975—1979 гг. были получены серии новых ультрафиолетовых фотографий (рис. 3.4, 3.5). Их анализ дал неожиданный результат: характерное сочетание полос и пятен на облачном слое повторялось каждые 4 дня, смещаясь в сторону, противоположную направлению вращения Земли и других планет. Следовало ли из этого, что продолжительность суток на Венере составляет 100 ч? Вместе с тем многие астрономы придерживались мнения, что планета вращается синхронно, т.е. они считали, что Венера всегда обращена к Солнцу одной и той же стороной, а на другой стороне царит вечная ночь.

Период вращения находит радиолокация

С 1961 г. в США и СССР были начаты радиолокационные исследования Венеры. Использовалась мощная наземная аппаратура, которая позволяла получить небольшую, но измеримую мощность импульса, отраженного поверхностью далекой планеты. В 70-х годах по остаточным разностям сигналов, отраженных правой и левой сторонами вращающейся планеты, период вращения Венеры был определен окончательно; он составляет $243,0 \pm 0,1$ земных суток (небольшое уточнение: $243,0185 \pm 0,0001$ сут по данным КА «Магеллан»), что практически совпадает с резонансным периодом системы Земля — Венера (243,16 сут). Сложение двух движений, вокруг оси и вокруг Солнца, приводит к тому, что солнечные сутки на Венере длятся 116,8 земных суток, причем Солнце в этом странном мире восходит на западе. Период повторения нижних соединений Венеры (ее максимальных сближений с Землей) составляет 584 земных суток; легко видеть, что за это время на планете проходит ровно 5 солнечных суток. Это означает, что в каждом нижнем соединении Венера обращена к Земле одной и той же стороной. Причины такой синхронизации, как уже говорилось, до конца не ясны, так как приливные силы в системе очень слабые. Направление вращения — по ходу часовой стрелки, если глядеть с северного полюса. Рассвет здесь тоже необычный, он занимает несколько земных суток. Смена времен года на Венере отсутствует, поскольку наклон полярной оси не превышает 3° .

Определить период вращения очень помогли две яркие (в радиолучах) области на Венере, которые давали четкие максимумы при спектральном анализе отраженного радиоимпульса. Временно этим областям присвоили названия «Альфа» и «Бета». Но, как это часто бывает, временные названия закрепились, и теперь они украшают карту Венеры, напоминая об истории открытия ее рельефа. Как мы увидим ниже, и Альфа, и Бета относятся к главным достопримечательностям Венеры.

Резонансный период вращения Венеры — загадка из загадок.

По-видимому, важно, что приливные явления в атмосфере планеты, в отличие от приливов в океане, порождают эффект, обратный тому, что дают приливы в твердом теле планеты. По некоторым данным, для Венеры эти явления близки по величине. Возможно, что в этих условиях начинают играть особенно существенную роль масконы — протяженные участки коры планеты, имеющие повышенную (иногда пониженную) плотность.

Есть определенные указания на то, что когда-то Венера вращалась столь же быстро, как и другие планеты. С другой стороны, не все ученые единодушны в том, что в потере вращательного момента главную роль играло длительное воздействие слабых возмущений. Многие склонны искать какие-то катастрофические события в прошлом Венеры. Если исходить из принципа изохронизма, утверждающего, что начальные периоды вращения всех планет были близки между собой и составляли 5–8 ч (что более или менее сохранилось у астероидов и планет-гигантов), то для торможения Венеры нужны были очень сильные воздействия. При затормаживании должна была выделяться огромная энергия — более 10^{37} эрг. Это гигантская энергия. Чтобы лучше представить себе ее масштаб, заметим, что огромному по сравнению с Венерой Солнцу для выделения такой же энергии требуется почти 4 ч.

Среди гипотез, объясняющих торможение приливными воздействиями Солнца и планет на Венеру, есть довольно экзотическое предположение, что Венеру затормозил некогда существовавший у нее массивный естественный спутник. Да какой! У нашей Земли очень большая Луна (фото 1 на цветной вклейке); такими спутниками располагают в Солнечной системе только планеты-гиганты. Часто даже говорят, что Земля и Луна — двойная планета. Недавние открытия показали, что еще одна двойная планета, более тесная, чем Земля, находится на окраине Солнечной системы. Согласно гипотезе, двойной планетой была и Венера, у которой диаметр спутника лишь немного не «дотягивал» до ее радиуса, а масса — до 7% массы планеты. Куда же делся этот спутник? Это Меркурий (рис. 3.6), который, согласно предположению, оторвался от Венеры под действием приливных сил — слишком велика оказалась его масса. Такая гипотеза высказывалась разными авторами. На память об этом событии, утверждали авторы гипотезы, Меркурий сохранил очень вытянутую орбиту, а также, как стало известно в последние годы, резонансный период относительно Земли. Собственно, предположения о роли спутника в торможении Венеры появились уже после определения ее периода вращения. Поначалу эта гипотеза служила объяснению некоторых особенностей орбиты Меркурия. Впрочем, серьезными доказательствами ее авторы не располагали.

В 1976 г. группа ученых из США решила разделаться с этой гипотезой раз и навсегда. Для этого с помощью быстродействующей ЭВМ был поставлен модельный математический экс-

перимент, в котором вычислялась эволюция орбиты Меркурия, помещенного вначале на орбиту спутника Венеры. Но, вопреки ожиданиям авторов, модельный эксперимент не только не опроверг предположения о возможном убегаании Меркурия, но показал, что оно неизбежно должно было произойти за очень короткое в космогонических масштабах время — менее 500 млн лет. Этому предшествовало постепенное увеличение радиуса орбиты Меркурия. Благодаря приливному взаимодействию обеих планет одна часть энергии вращения Венеры (и Меркурия) расходовалась на разогрев их недр, другая — на увеличение большой полуоси орбиты спутника. Когда расстояние между ними достигло примерно 460 тыс. км, создались условия для убегаания Меркурия через одну из особых точек его орбиты. Такие точки называются лагранжевыми; в случае спутника Венерыгодились две из них — первая и вторая. Перед убегаанием период орбиты Меркурия должен был составлять около 40 сут. Таким образом, все это довольно близко к периоду обращения нашей Луны (1 месяц) и расстоянию до нее (385 тыс. км). Но масса Луны гораздо меньше. Из расчетов следовало, что расставание Венеры и Меркурия могло быть неокончательным: возможны были вторичные неустойчивые захваты при последующих сближениях.

В течение предшествовавших 500 млн лет (или менее) приливы в теле Венеры из-за воздействия в 4,5 раза более массивного, чем наша Луна, спутника выделяли очень много тепловой энергии в коре и недрах Венеры. Должны были происходить сдвиги коры и быстрая дегазация недр планеты. «Перед нами, — пишут авторы модельного эксперимента, — возникает горячая планета с плотной, горячей атмосферой, огромными горами и очень медленным вращением...».

Если предположить, что начальный эксцентриситет орбиты Венеры был в 10 раз больше нынешнего, начальное положение больших полуосей орбит планет совпадает. Развивая свою идею, авторы ее приходят к выводу, что такая трактовка ранней истории Венеры и Меркурия объясняет целый ряд фактов, в частности резонансный, но не синхронный период обращения Меркурия вокруг Солнца ($3/2$ периода вращения), потерю момента вращения Венеры и Меркурия, отсутствие спутников у этих планет и другие. Добавим, что находит свое решение также проблема формирования Меркурия в критических условиях чересчур высоких скоростей движения протопланетных тел на орбите Меркурия.

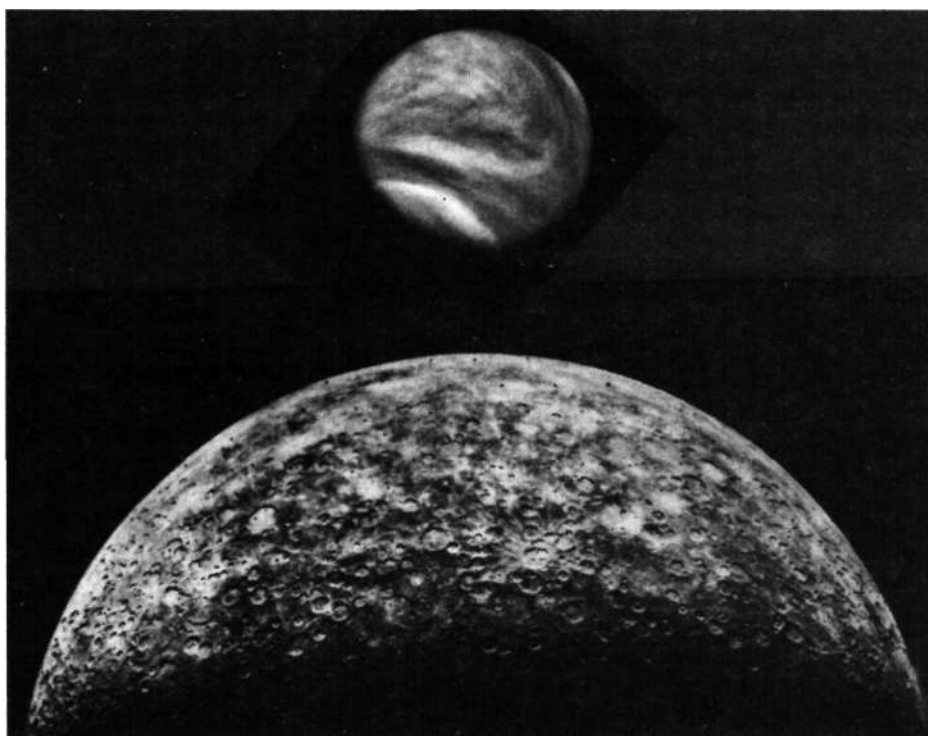


Рис. 3.6. Существует гипотеза о потерянном спутнике Венеры, который стал планетой Меркурий. Благодаря большой массе спутника приливное рассеяние энергии в литосфере обоих небесных тел могло быть очень значительным. Такая гипотеза могла бы объяснить многое, но она пока остается только гипотезой

В этом модельном эксперименте были исследованы только определенные периоды ранней истории двух планет. Если в дальнейших расчетах будет подтверждено, что события могли развиваться именно таким образом, термическая история и эволюция Венеры и Меркурия получат совсем новое освещение.

Работа, о которой мы только что рассказали, позволила познакомить читателя еще с одним новым инструментом астрономии — с программами для быстродействующих ЭВМ, составленными на основе методов небесной механики. С помощью ЭВМ по этим программам удастся выполнить настолько большой объем вычислений, что они охватывают миллионы и сотни миллионов лет и позволяют проследить события, разворачивающиеся очень медленно. Таким методом недавно был промоделирован процесс формирования планет из облака протопланетных тел и было показано, что закономерности строения Солнечной системы, например разделение планет на две большие группы, устойчиво наблюдаются в подавляющем большинстве случаев.

Но вернемся к измерениям периода вращения Венеры. Как это ни странно, прежние измерения скорости движения облаков, из

которых был получен четырехсуточный период вращения, тоже оказались правильными — к такому выводу привели наблюдения движения облаков. Только этот период относится к облачному слою, а не к твердой поверхности планеты.

«Венеры» штурмуют Венеру

Затяжной истории бесплодных (если не считать радиолокации) попыток заглянуть под облачный покров планеты пришел конец с началом запуска к ней автоматических межпланетных станций — «Венер» и «Маринеров». Уже с 1967 по 1975 гг. СССР запустил 7 космических аппаратов серии «Венера». Два пролетных аппарата в этот же период запустили к Венере США. Каждый полет приоткрывал таинственный покров, под которым скрывалась планета.

В октябре 1967 г. космический аппарат «Венера-4» при спуске в атмосфере планеты провел научные измерения и впервые установил состав атмосферы. Это было большим триумфом молодой советской космической техники. Максимальное давление, на которое были рассчитаны датчики «Венеры-4», составляло 7,2 бар. Этого оказалось мало: на высоте

23 км, когда давление достигло 17,6 бар, аппарат разрушился. Но сопоставление полученных «Венерой-4» данных о высоте и давлении с радиозатменными сведениями о движении аппарата «Маринер-5», который прошел вблизи Венеры через 1 сут, позволило рассчитать давление у поверхности планеты: около 100 атм. Многим специалистам эта величина показалась неправдоподобно высокой. «Венера-5 и -6» имели более прочную конструкцию и работали до высоты около 17 км, когда давление достигло 27 бар. Первыми поверхности планеты достигли «Венера-7» (рис. 3.7) и



Рис. 3.7. Аппарат «Венера-7» на поверхности планеты, 1970 г. Сигналы с поверхности Венеры поступали 23 мин

«Венера-8», рассчитанные на давление 180 и 120 бар соответственно. На «Венере-8» были зарегистрированы огромные значения давления и температуры (93 бар и 477 °C, 1972 г.). Интересно заметить, что впервые предположение о столь высоких температурах и давлениях на Венере впервые были высказаны еще в 1942 г. на основе чисто теоретических соображений. Но специалисты, проектировавшие первые «Венеры», к этой оценке отнеслись недоверчиво. В моде была другая гипотеза; допускалось, что вся планета покрыта океаном, а кое-кто из астрономов даже утверждал, что видят блики от отраженного водой солнечного света на облаках планеты. Трудно поверить, но «Венера-4» даже была оснащена сделанным из сахара специальным замком, который должен был освободить антенну в случае посадки на воду.

Аппараты «Венера» включали орбитальный отсек, на котором также были установлены научные и служебные приборы, и спускаемый аппарат. Приближаясь к планете, «Венеры» получали команды на отделение спускаемого аппарата от орбитального отсека. После выполнения своей задачи орбитальный отсек разрушался в верхних слоях атмосферы, а спускаемый аппарат, оснащенный специальным покрытием, тормозился и затем спускался на парашюте.

Большими днями советской космической программы стали 22 и 25 октября 1975 г., когда «Венера-9 и -10» вышли на орбиты первых искусственных спутников планеты, а их спускаемые аппараты передали первые изображения ее поверхности. На борту спутников наряду с комплексом научной аппаратуры имелся сканирующий ультрафиолетовый телефотометр, который передавал изображения облачного слоя в тех районах, где проводились измерения яркости, контрастов, спектров и других его параметров. На этих изображениях (см. рис. 3.5) снова можно было видеть уже знакомые светлые спиральные полосы.

Природа этих полос, заметных только в ультрафиолетовых лучах, все еще остается не вполне понятной. Одна из возможных интерпретаций фотометрических измерений на «Венере-9 и -10» заключалась в том, что на основном слое облаков, который кончается на высоте примерно 70 км, лежит слой дымки толщиной 8–12 км. Эта дымка прозрачна (и не видна) для всех длин волн длиннее 350 нм (ближний ультрафиолетовый диапазон). В ультрафиолетовых лучах она сильно рассеивает свет. Нижний слой, наоборот, сильно поглощает ультрафиолетовые лучи. Вначале предполагалось, что светлое — это полосы дымки, темные — разрывы в ней, сквозь которые виден нижний темный слой. Однако дальнейший анализ снимков, подобных рис. 3.5, показал, что дело обстоит более сложно. Здесь темные полосы образуют структуру антициклона (это северное полушарие Венеры). Темные полосы пересекают светлые и деформируют их, что указывает на их явную взаимосвязь. Они находятся в одном и том же интервале высот. Тогда пестрота снимка отражает неравномерное распределение присутствующих в атмосфере газообразных соединений, вызывающих поглощение в ультрафиолете. Для длин волн от 330 до 370 нм — это сернистый газ; для более коротких волн — возможно, разные формы (аллотропы) серы. Но окончательных данных пока нет. На уровне верхней границы облаков весь слой находится в быстром движении и завершает один оборот вокруг планеты за

4—5 сут. Именно таков период, с которым повторяется рисунок ультрафиолетовой фигуры.

Дальнейшие исследования шаг за шагом расширяли представления о Венере. Ученые легко могут назвать наиболее актуальные задачи для того или иного научного направления. Вопрос, однако, в том, можно ли создать достаточно легкие, компактные и экономичные приборы, которые позволят провести соответствующие эксперименты. Мало того, физические условия и особенности окружающей среды на Венере предъявляют свои дополнительные (и очень тяжелые) требования: такие, как стойкость к высоким температурам (до 470 °C) и давлениям (достигающим 95 атм). В каждом новом эксперименте приходится отталкиваться от опыта уже выполненных полетов, максимально использовать найденные удачные решения. Иными словами, сложность эксперимента определяет его место (и очередность) в цепи исследований.

Логика такой очередности подчинялась научной актуальности задачи. Вначале необходимо было провести рекогносцировочные полеты с определением как основных параметров атмосферы (давление, температура), так и главной ее составляющей (углекислый газ, 96%). С помощью следующих аппаратов стало возможным провести более детальный анализ состава и строения атмосферы и облачного слоя. Одновременно исследовалась динамика атмосферы. Далее пришло время изотопного анализа малых составляющих и «вылавливания» экзотических компонентов газовой и аэрозольной среды. Их содержания составляют лишь миллионные и миллиардные доли. Одновременно следовало понять, как они возникают в атмосфере, каков их кругооборот, если они химически активны. Вместе с этими экспериментами можно было провести первые исследования таинственной, никогда прежде не виденной поверхности планеты. Начать пришлось с подробных телевизионных изображений малых участков и глобального радиолокационного картирования планеты. (Кстати, развитие наземной радиолокационной техники позволяет теперь выполнить часть такой работы без использования космических аппаратов.) Результаты этих исследований показали ряд необычных свойств поверхности и самого рельефа Венеры. Вероятно, это следствие особенностей строения ее коры и мантии.

Кстати, ученым необходимы сведения о внутреннем строении планеты и ее коры. Источником же таких экспериментальных сведений может быть только сейсмика, пассивная или активная. Но такие эксперименты требуют уже весьма сложной и долгоживущей в ус-

ловиях Венеры аппаратуры. Техника космических исследований сейчас только подходит к решению этой проблемы.

Состав и строение атмосферы

Составу атмосферы Венеры посвящено большое число научных работ. Еще в 1965 г. в одном из научных обзоров в качестве ее вероятного состава указывались 60% азота и 40% углекислого газа. Предполагалось также, что облака состоят из ледяных или пылевых силикатных частиц, а возможно, и из замерзшего формальдегида. Истина оказалась далекой от этих предсказаний.

Главную составляющую атмосферы — углекислый газ — «Венера-4» в 1967 г. установила непосредственно. Его 96,5%. Под туманоподобными облаками, которые, как это теперь известно, занимают интервал высот от 49 до примерно 75 км, — огромный газовый океан, состоящий в основном из раскаленного углекислого газа. Свет проникает в глубины газового океана Венеры, но рассеяние света так велико, что различить сквозь него поверхность планеты невозможно.

Углекислотная атмосфера планеты очень плотна. Если 1 м воздуха на уровне моря у нас имеет массу 1,3 кг, то у поверхности Венеры 65 кг, т.е. выше в 50 раз. Это только в 14 раз меньше плотности воды. В такой атмосфере было бы трудно быстро двигаться. Масса этого газового океана составляет $0,5 \cdot 10^{24}$ г, что вполне сравнимо с массой земных океанов ($1,37 \cdot 10^{24}$ г).

Однако с высотой быстро падают давление, плотность, температура (рис. 3.8). На высоте 30 км — это 9,4 бар, 10 кг/м³ и 222 °C, на высоте 65 км — 0,09 бар, 0,2 кг/м³ и -30 °C. Выше 150 км атмосфера Венеры из-за высокого молекулярного веса уже более разрежена, чем атмосфера Земли на тех же высотах. Еще выше, где влияние турбулентного перемешивания невелико, диффузия вызывает изменение состава венерианской атмосферы: более массивные молекулы углекислого газа остаются внизу, преобладают атомарный кислород и угарный газ (250—320 км). Еще выше резко возрастает относительное содержание гелия и водорода (хотя, конечно, падает по абсолютной величине). Угарный газ, кислород и водород образуются за счет разрушения (диссоциации) молекул углекислого газа и водяного пара жестким ультрафиолетовым излучением Солнца в стратосфере планеты. С высоты 700 км начинается чисто водородная корона (от 1000 до 10 000

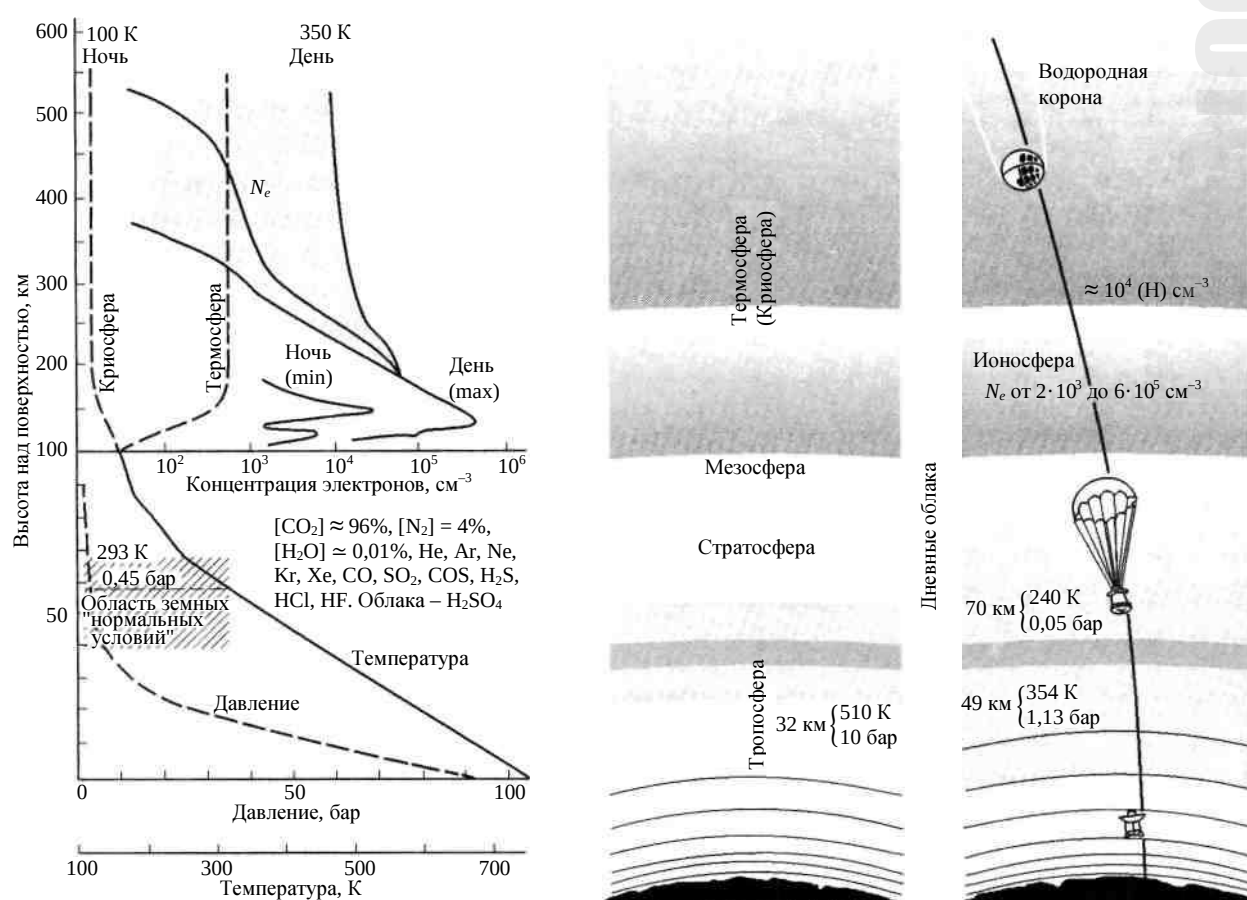


Рис. 3.8. Зависимость температуры и давления от высоты в атмосфере. Вверху показана дневная и ночная концентрации электронов в ионосфере. Справа — схема положения основных этажей атмосферы Венеры

атомов на 1 cm^3), которая постепенно переходит в межпланетную среду.

Плотность и температура короны и расположенной ниже криотермосферы сильно зависят от солнечной активности, но температура почти не зависит от высоты; выше примерно 160 км температура в подсолнечной точке близка к 300 K при минимуме и 450 K при максимуме солнечной активности. На той же высоте в противоположной точке планеты (ночью) температура падает до 100 K (отсюда название «криотермосфера»). Относительно высокие дневные температуры криотермосферы объясняются поглощением коротковолновой (ультрафиолетовой) части солнечной радиации. Немного ниже температура падает до 200 K, где на высоте 120 км находится нижняя граница ионосферы. Максимальная концентрация электронов в ионосфере приходится на высоту 140 км. Она достигает днем $5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$, а ночью снижается примерно в 50 раз. О природе ночной ионосферы Венеры ученые спорят.

В одной из гипотез предполагается, что в образовании ночной ионосферы значительную роль могут играть микрометеориты. У ионосферы Венеры есть еще одна особенность: поскольку у планеты отсутствует собственное магнитное поле, плазма солнечного ветра воздействует на нее непосредственно, снижая верхнюю границу дневной ионосферы до 300—500 км (см. рис. 3.8).

Вернемся теперь к составу нижней атмосферы. Что входит в оставшиеся 3,5%? Вторая главная составляющая — азот. Почти все 3,5% на него и приходятся. Поскольку плотность атмосферы Венеры намного выше земной, по абсолютному содержанию это даже в 5 раз больше, чем в нашей атмосфере. Причина этого более или менее ясна; из-за высокой температуры поверхности почти весь азот находится в атмосфере. Основные и малые составляющие атмосферы показаны на рис. 3.9.

Солнечная система образовалась около 4,5 млрд лет назад; во всяком случае, именно тогда

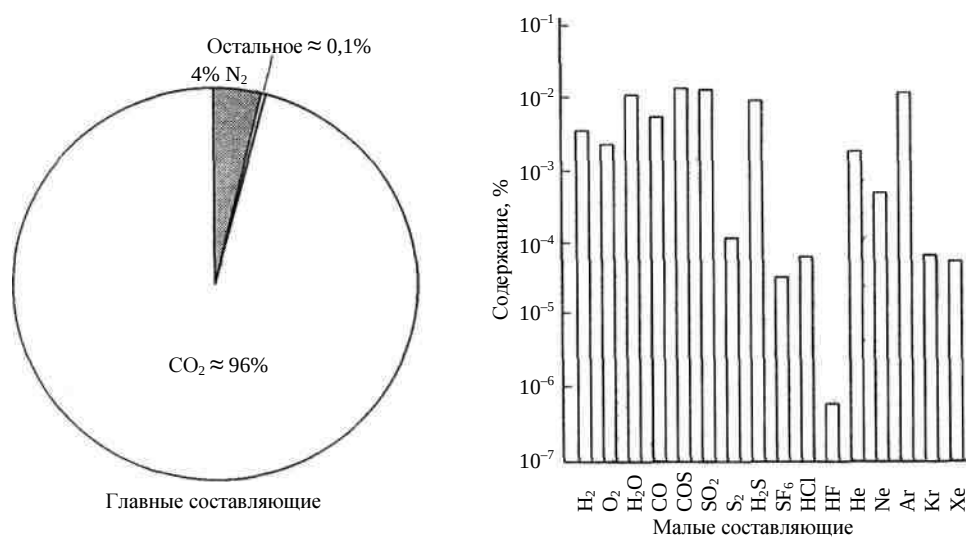


Рис. 3.9. Состав атмосферы Венеры. Справа — малые составляющие

формировались протопланеты. Солнце было только что образовавшейся звездой, окруженной протопланетной туманностью. Условия, в которых формировались различные планеты, были неодинаковыми, что сказалось впоследствии на их составе и особенностях эволюции. История образования планет чрезвычайно сложна. Протопланетное вещество имело разную температуру на разных удалениях от Солнца. Более легкие газы покидали центральную часть туманности и скапливались на периферии протопланетного облака; испарялись легкоплавкие летучие вещества в одной его части и конденсировались в другой; газообразные вещества отчасти поглощались крупинками твердого материала, отчасти захватывались формирующимися протопланетами. И хотя несомненно, что все тела Солнечной системы прошли через стадию формирования, узнать какие-либо подробности чрезвычайно трудно. По-видимому, именно различие условий формирования привело к большой разнице в содержании воды на Земле и Венере: для Земли это $1,37 \cdot 10^{24}$ г, или $2,3 \cdot 10^{-4}$ от ее массы (фото 2), а для Венеры лишь $3 \cdot 10^{-9}$ или около того. Если бы температура у поверхности Земли была не $20^\circ C$, а более $370^\circ C$, океаны Земли испарились бы и давление водяного пара в атмосфере достигло бы огромного значения — 260 бар. Вместе с тем на Венере парциальное давление водяного пара не превосходит 3 мбар. Заманчиво попытаться объяснить дефицит воды на планете большой скоростью диссипации — «убеганием» водорода с критического уровня атмосферы (рис. 3.10) с одновременным связы-

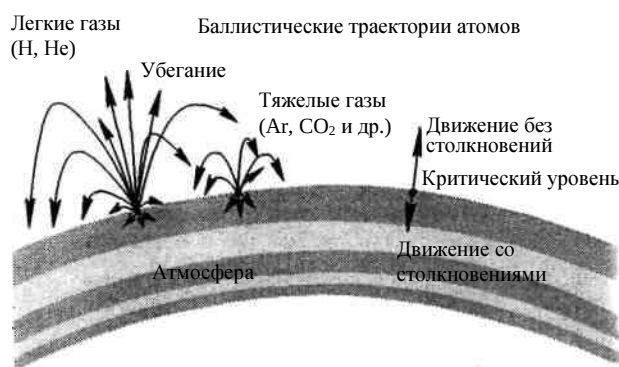


Рис. 3.10. Потери водорода («убегание» с критического уровня) для Венеры и Земли

ванием кислорода в процессах окисления коры. (Подразумевается, что молекула водяного пара разрушена под действием ультрафиолетового солнечного излучения.) Однако расчеты показывают, что при всех разумных предположениях о температуре на критическом уровне потери не могли составить более 1/10 земных запасов воды. По-видимому, следует искать другую причину. Не проходила ли между будущими орбитами Венеры и Земли граница удержания льда и воды в протопланетных частицах? Если же нет, то куда делась вода?

Анализ содержания водяного пара в атмосфере Венеры дает сильно различающиеся результаты. Значит ли это, что концентрация пара в тропосфере планеты, где выполнялись измерения, несколько меняется (например, в зависимости от времени суток)? В 1978—1982 гг. в экспериментах на спускаемых аппа-

ратах «Пионер — Венера» и «Венера-13 и -14» наблюдалась странная зависимость концентрации пара от высоты над поверхностью, относительно высокая у нижней границы облаков, до 0,02%, и в 10 раз меньше у поверхности. Поскольку тропосфера планеты хорошо перемешивается, была предложена гипотеза о том, что где-то «наверху» есть источник водяного пара, поглощаемого поверхностью. Чтобы такой механизм работал, должен существовать восходящий поток, который в связанном виде переносит воду обратно. Пока теоретики переливали эту воду туда и обратно, выяснилось, что это — ошибка экспериментов. Концентрация водяного пара в атмосфере Венеры составляет примерно $(3-4) \cdot 10^{-5}$ во всей тропосфере, от поверхности до облаков.

Следует заметить, что неподтвержденные сведения о существенно большем, чем указано выше, количестве водяного пара не согласуются с наблюдаемым действием «парникового эффекта». Суть последнего заключается в следующем. Заметная доля солнечной радиации достигает поверхности и поглощается ею (и атмосферой). Поскольку температура планеты остается постоянной, такая же энергия излучается в инфракрасном тепловом диапазоне. Но в этой части спектра углекислый газ с примесью паров воды малопрозрачен, причем прозрачность сильно зависит именно от концентрации водяного пара. Поэтому температура поверхности и нижних слоев атмосферы должна быть так высока, чтобы сохранился баланс между получаемой и излучаемой энергиями. Температура поверхности как раз соответствует концентрации пара около $2 \cdot 10^{-5}$; если бы она стала большей, непрозрачность для инфракрасных лучей значительно возросла бы и температура поверхности стала бы еще выше.

Редко бывает, чтобы космический эксперимент дал исчерпывающий ответ на поставленный вопрос. На первый взгляд точное измерение изотопного состава инертных газов (аргона, неона, криптона и ксенона; гелий в эксперименте 1982 г. не анализировался) — это как раз исчерпывающий ответ. В самом деле, содержание этих изотопов можно хотя бы в принципе найти с высокой точностью. Это вопрос сложности аппаратуры и реальной достижимости тех или иных ее параметров. Именно такие измерения были выполнены на «Венере-13 и -14» с помощью масс-спектрометра, который и отличался высокой сложностью. Конечная цель этих измерений, однако, гораздо сложнее: найти и объяснить космогонические причины значительных различий изотопных отношений для Венеры, Земли и других планет.

Изотопный состав инертных, или благородных, газов представляет особый интерес для науки о происхождении планет. Инертные газы не вступают в химические реакции с поверхностью или другими газами. Если не считать гелия, они достаточно тяжелы, чтобы за всю историю Венеры сохраниться в том же количестве, в каком планета получила их при своем образовании. Здесь, впрочем, надо сделать одну оговорку. Некоторые изотопы благородных газов образовались позже — по мере распада радиоактивных элементов, содержащихся в коре планеты. Таков аргон-40, который образуется при распаде радиоактивного изотопа калия-40, и ксенон-129 — продукт распада иода-129. Такие изотопы инертных газов называются радиогенными (например, аргон-40), а доставшиеся планете на стадии ее формирования — первичными, или космогенными (например, аргон-36 и -38).

Изотопные соотношения для земной атмосферы хорошо известны. Заметным научным событием было сообщение об изотопных соотношениях на Марсе, значительно отличающихся от земных. Венера преподнесла еще один сюрприз: соотношение изотопов в ее атмосфере не похоже ни на земные, ни на марсианские значения. Вместе с тем количество аргона в атмосфере Венеры равно 0,01%, что близко к абсолютному его содержанию в земной атмосфере, где его доля близка к 1%. Изотопный состав земного аргона такой: 0,996 приходится на радиогенный аргон-40 и лишь 0,004 на аргон-36 и аргон-38. «Венера-11 и -12» в 1978 г. установили, что на Венере изотопный состав совсем другой: первичных изотопов столько же, сколько аргона-40 (0,42; 0,08 и 0,50 для аргона-36, -38 и -40 соответственно). Этим соотношением (рис. 3.11) планета говорит что-то важное. Можно предположить, например, что при формировании атмосфера ее была обогащена первичными изотопами. Сразу же появились работы, в которых на основе этих данных делалась попытка восстановить физические условия при формировании всей земной группы планет. Но это — весьма сложная задача. Измерения на новых аппаратах показали, что «неземные» соотношения наблюдаются и для других инертных газов — неона, криптона, ксенона. Содержание их в атмосфере Венеры оказалось близким к 10^{-5} для неона и немного меньше 10^{-6} для криптона и ксенона (см. рис. 3.9). Удивительно большим оказалось содержание гелия. На высотах около 130 км его примерно в 150 раз больше в венерианской атмосфере, чем в земной.

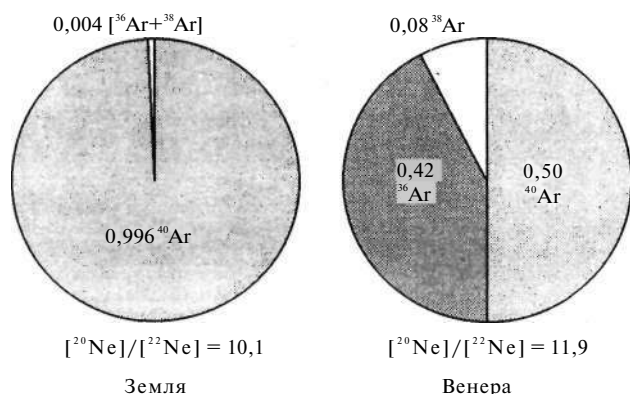


Рис. 3.11. Сравнение изотопного состава некоторых благородных газов для Земли и Венеры

Сведения о других малых составляющих противоречивы. Твердо установлено присутствие сернистого газа SO_2 (содержание $2 \cdot 10^{-5}$) и в малых количествах сероводорода H_2S и сероокиси углерода COS . Не подтвердились сообщения о кислороде и водороде. Из наземных спектральных измерений, приведенных еще в 1967 г., известно также, что в атмосфере Венеры имеется угарный газ ($5 \cdot 10^{-5}$), соляная ($4 \cdot 10^{-7}$) и плавиковая (10^{-8}) кислоты. Концентрации указаны по отношению к углекислому газу. В последних космических экспериментах зарегистрировано присутствие каких-то экзотических газов, возможно, это соединения фосфора или фтора и серы.

Таким образом, общим для атмосфер Земли и Венеры остается только азот. В остальном состав их совершенно непохож. Причину этого ученые видят в разных путях эволюции планет. Возможно, именно с особенностями эволюции Венеры связана ее нынешняя бедность водой. Немного позже мы еще вернемся к новым данным о предполагаемой истории водного дефицита.

Будь наш глаз способен воспринимать инфракрасное излучение с немного более длинной волной, чем у красного света, понятия «ночная тьма», наверное, не существовало бы. Ночью в атмосфере Земли сильно светят молекулы гидроксила OH . Энергия ультрафиолетового солнечного излучения, захваченная некоторыми молекулами, прежде всего водяным паром, вызывает их диссоциацию и появление на больших высотах гидроксила и атомарных кислорода и водорода. Из-за разреженности атмосферы и редких столкновений между частицами атомарный кислород «живет» на этих вы-

сотах очень долго, по несколько суток. В конечном счете ряд последовательных реакций и обмен захваченной энергией между участниками реакций приводит к ее высвечиванию в полосах гидроксила. Это сильное излучение формируется на высотах 70—100 км и служит хорошим инструментом для исследования нашей атмосферы.

Для Венеры этот уровень несколько выше основного облачного слоя, поэтому если бы такое излучение там было, его легко можно было бы наблюдать со спутника. И в самом деле, в 1975 г. «Венера-9 и -10» обнаружили свечение ночной стороны планеты, которое объясняется сходными процессами. Хотя ночь на Венере и длится 59 сут, но на уровне верхней границы облаков она только в 4—5 раз длиннее земной. Что же светится в атмосфере Венеры? Это не мог быть гидроксил: не совпадали длина волны и время высвечивания. В каждом сближении с планетой регистрировался целый «частькокол» спектральных полос в сине-оранжевой части спектра. Полосы явно образовывали какую-то систему, но в справочнике ее не было. В дискуссию советских ученых включились их зарубежные коллеги. Наконец, в лабораторном эксперименте был найден ответ: такая система полос излучается молекулярным кислородом в условиях необычайно сухой атмосферы. Поэтому обнаруженные на Венере полосы никогда не наблюдаются на Земле.

Найденное свечение слишком слабо, чтобы его можно было наблюдать с Земли. А такое предположение высказывалось, потому что с давних пор некоторые астрономы сообщали о своих удивительных наблюдениях свечения ночной стороны планеты. Так как у Венеры нет естественных спутников, на ночной стороне могла светиться только атмосфера. Однако опубликованные спектры, полученные в наземных наблюдениях этого свечения, оказались настолько трудными для расшифровки, что специалисты так и не пришли к общему мнению, что именно светится в атмосфере планеты. К тому же оказалось, что убедительно повторить эти наблюдения никому не удастся, даже авторам. Так они и остаются непонятными по сей день. Зато теперь известно, что Венера светится в ближнем инфракрасном диапазоне, 1—2,5 мкм. Свечение исходит из нижних, раскаленных слоев атмосферы и пробивается сквозь поглощающее одеяло углекислого газа атмосферы в узких спектральных полосах, «окнах» его прозрачности. В них удастся зарегистрировать части полос, излучаемых упоми-

навшимися выше малыми составляющими (CO , SO_2 , H_2S и COS).

Познакомимся теперь с удивительными облаками Венеры, которые с ураганной скоростью несутся на 60-километровой высоте.

Странный ветер Венеры

Значительная часть атмосферы Венеры находится в движении, поэтому ее состав, как и состав земной атмосферы, остается постоянным до высоты примерно 130 км именно благодаря ее турбулентному перемешиванию. Сильные ветры участвуют и в общем движении атмосферы, ее динамике, создавая так называемую суперротацию — быстрое вращение средних слоев атмосферы, в том числе облачного слоя, над медленно вращающейся планетой, направленное в сторону ее вращения. Об этом уже говорилось. (Напомним, что направление вращения обратно земному.) Следы этого движения, скорость которого достигает 100 м/с, видны как спиральные полосы, спускающиеся от полюсов к экватору на рис. 3.4. На рис. 3.4 и 3.5 (это снимки в ультрафиолетовых лучах) хорошо видна структура верхнего яруса облаков, которую так долго пытались понять астрономы. Движение облаков с 4-суточным периодом определяется особенностями динамики атмосферы Венеры. «Тепловая машина», создающая быстрое вращение облачного слоя над медленно вращающейся планетой, сейчас является предметом специальных исследований.

Для определения скорости и направления ветра на разных высотах применялись разные приемы. В наземных астрономических наблюдениях анализировались разность доплеровских сдвигов в спектральных полосах света, отраженного правой и левой сторонами планеты. Это очень трудные измерения, поэтому результаты часто получались разными. С началом эпохи аппаратов «Венера» ученые стали извлекать данные о скорости ветра из частоты радиосигнала, посылаемого передатчиком спускающегося в атмосферу Венеры зонда.

В результате движения Венеры относительно Земли возникает значительный доплеровский сдвиг частоты, на который накладываются небольшие дополнительные сдвиги из-за скорости, с которой ветры Венеры уносят спускающийся аппарат. Так постепенно набралась целая коллекция данных о ветрах в разных районах планеты, причем получалось, что скорость зональных (направленных вдоль параллелей) ветров вблизи экватора достигает 100 м/с на высотах около 60 км и плавно снижается с уменьшением высоты (рис. 3.12). На уровне 30–40 км на дневной стороне

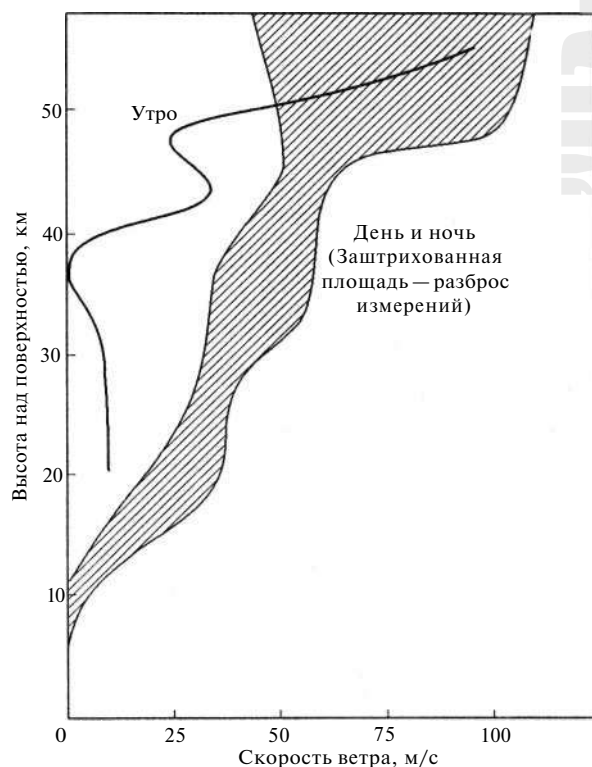


Рис. 3.12. Ураганный ветер (до 100 м/с) наблюдается лишь на больших высотах. На поверхности скорость ветров составляет примерно 0,5 м/с и меньше

планеты она обычно не превышает 60 м/с, а на ночной стороне — несколько меньше. Полученные результаты как будто указывали на долготные и широтные зависимости, но для этого понадобился новый инструмент исследований. Таким инструментом стал аэростат.

Аэростат — действительно весьма эффективное средство исследований динамики атмосферы. В июле 1985 г. советские аппараты «ВЕГА-1 и -2», пролетая мимо Венеры, доставили в ее атмосферу два сравнительно небольших, диаметром по 3,4 м, аэростата. Аэростат «ВЕГИ-1» начал свое движение на 8° севернее экватора, а «ВЕГИ-2» — на 7,5° южнее. В течение 2 сут аэростаты свободно плавали в атмосфере, на высоте 53–54 км, посылая радиосигналы на Землю. Под сферической оболочкой, наполненной гелием, была подвешена легкая гондola с научной аппаратурой и радиопередатчиком на длину волны 18 см с мощностью всего 5 Вт. В сущности, это ничтожная мощность (примерно в 10 раз меньше мощности автомобильной фары). Для приема радиосигнала на Земле пришлось использовать 20 самых крупных радиотелескопов наземной сети, охватывающей весь мир, в том

числе находившихся в СССР (Евпатория и Уссурийск), в Мадриде, в Голдстоуне (США) и Канберре (Австралия). Радиопередатчики аэростатов обладали очень высокой стабильностью частоты, что отчасти компенсировало их малую мощность. Уже известным читателю методом радиоинтерферометрии (см. начало этой главы) определялись не только все составляющие скорости аэростатов (с точностью до 20 см/с), но и их положение на Венере в пределах 10 км! По принятым на Земле сигналам можно даже было видеть, как раскачивается от ветра гондola аэростата.

Зональные ветры уносили аэростаты к западу вдоль экватора. Начало их дрейфа, примерно у 180° долготы, пришлось на 0 ч 20 мин и 0 ч 30 мин венерианского времени для первого и второго аэростатов соответственно. За время дрейфа они пролетели 11 600 и 11 100 км, пересекли утренний терминатор и продолжили свое движение на освещенной стороне. Но энергии в батареях уже оставалось мало, и через 2 ч после терминатора радиопередатчики перестали работать, хотя аэростаты, вероятно, еще долго плавали в атмосфере, поскольку за время работы потери гелия составили всего 0,5%. Средняя горизонтальная скорость их движения составила 69 и 66 м/с, на 5–10 м/с больше прежних оценок для высоты 53 км, что указывало на значительную изменчивость атмосферной динамики (вспомним погодные изменения на Земле). Высота полета не оставалась постоянной. Вначале изменения высоты не превышали 100 м, причем скорость вертикальных движений была около 2 м/с. В 3 ч 30 мин местного времени такие движения на аэростате «ВЕГИ-2» были наиболее интенсивными. Затем, уже на дневной стороне планеты, под действием сильного порыва вертикальной составляющей ветра, до 15 м/с, аэростат быстро опустился на 2 км. Интересно, что под ним, глубоко в атмосфере, в это время находилась высокая гора в центре «континента» — Земли Афродиты. Отметим, что значительные вертикальные составляющие ветра, измеренные «ВЕГАМИ», стали важным результатом эксперимента.

Вернемся теперь к рис. 3.12. Выше верхней границы облаков (70 км и более) скорость ветров быстро падает. Она уменьшается также в глубь атмосферы, где увеличивается плотность газа. Наибольшую кинетическую энергию несут потоки газа в интервале 16–32 км. Ниже 10 км скорость ветра — единицы метров в секунду, а у поверхности — не более 1 м/с. Измерения скорости ветра выполняются как измерением дрейфа при спуске аппарата по его доплеровским изменениям частоты передатчи-

ка, так и непосредственными методами на поверхности планеты. В последнем случае результаты «Венеры-9 и -10» составили 0,4–0,7 и 0,8–1,3 м/с, а «Венеры-13 и -14» 0,5–0,6 и 0,37 м/с соответственно.

Следует помнить только, что при высокой плотности атмосферы эти скорости эквивалентны примерно в 7 раз большим земным ветрам. По-видимому, этого все-таки недостаточно, чтобы пыль поднималась с поверхности. Все фотометрические и нефелометрические (связанные с определением мутности) измерения неизменно показывают, что ниже облачного слоя атмосфера представляет собой чистую, незамутненную газовую среду, особенно ниже 30 км. Когда «Венера-9», «Пионер—Венера» и «Венера-12» опустились на поверхность, покрытую слоем пыли, и подняли пыль в «воздух», приборы это сразу же отметили как помутнение атмосферы. Такое же явление вызвала посадка «Венеры-13» в 1982 г. Однако подробной радиолокационной съемкой с аппарата «Магеллан» все же удалось обнаружить большое число образований на поверхности планеты, которые имеют эоловую (образованную ветром) природу, о чем рассказывается ниже.

Зональные ветры ураганной скорости (до 300 км/ч и более) охватывают широты до 40–45°. Дальше их скорость уменьшается, а в приполярных областях динамика атмосферы резко изменяется. Здесь, по крайней мере у северного полюса, расположен так называемый полярный вихрь, который, по-видимому, включает в себя нисходящие потоки газа. Они увлекают за собой облачный слой, поэтому в полярном районе «крыша облаков» понижена. Период вращения полярного вихря короче экваториального и близок к 2,7 сут.

В целом, все без исключения результаты показывают, что атмосфера движется только в западном направлении, обгоняя твердое тело планеты (суперротация). С этим связан следующий парадокс.

Масса атмосферы составляет 10^{-4} , или ощутимую часть всей массы планеты. Между атмосферой и поверхностью есть какое-то небольшое трение. Тогда, вращаясь в одну и ту же сторону из века в век, атмосфера (каковы бы ни были причины ее быстрого вращения) должна передавать поверхности часть своего вращательного момента. Иными словами, атмосфера должна разгонять твердое тело планеты. С другой стороны, мы знаем, что на самом деле вращение Венеры заторможено. Но, может быть, именно сейчас мы присутствуем при ускорении ее вращения? Похоже, что нет: период ее вращения настолько близок к

резонансному относительно Земли, что трудно усмотреть в этом случайность. Таким образом, следует искать ответ не на один, а на два вопроса: как работает суперротация (некоторые теоретические соображения уже имеются) и почему атмосфера не ускоряет вращения планеты.

Облака Венеры и их инфракрасное тепловое излучение

Когда спускаемый аппарат «Венера-8» впервые оснастили фотометром, было еще неизвестно, светло ли днем на поверхности планеты. Все предшествующие аппараты опускались на ночной стороне, где заведомо темно и фотометрировать нечего. Такой выбор геометрии посадки определялся требованиями «радиовидимости» аппаратов с Земли в период сближения с Венерой, когда и проводились исследования. Радиоволны — единственное, что соединяет аппараты с Землей. В дальнейшем чаще всего стали использовать схему с двумя аппаратами: один исследует невидимую с Земли сторону планеты, другой ретранслирует его слабые сигналы на далекую Землю направленным лучом. «Венера-8» в какой-то мере была компромиссом: 22 июля 1972 г. она опустилась вблизи утреннего терминатора в точке с местным временем около 6 ч 25 мин. До ее полета было распространено мнение, что облака Венеры очень плотные. Многие ученые считали даже вполне возможным, что на поверхности планеты царит вечная ночь. Спускаемый аппарат этой станции прошел сквозь очень протяженную толщу венерианских облаков, которые простирались от 70 до 35 км. Облака такой протяженности могут поглотить очень много света; величина поглощения зависит от оптических свойств рассеивающей среды и прежде всего от того, консервативно ли рассеяние, т.е. сохраняется ли свет при рассеянии, или поглощается.

Спуск «Венеры-8» в районе утреннего терминатора дал такой ответ: на поверхности светло, освещенность составляет сотни люкс (примерно величина искусственного освещения на рабочем месте). Но особенно подробные измерения освещенности и детальные исследования строения облаков в дневной зоне были выполнены в 1975—1982 гг. новым поколением спускаемых аппаратов (от «Венеры-9» до «Венеры-14») и «Пионер—Венерой» в 1978 г. По мере спуска от уровня 70 км освещенность постепенно падает. Но даже на поверхности она остается еще очень высокой. Днем там примерно так же светло, как на Земле в

пасмурный день со сплошной (но не грозовой) облачностью.

Облака Венеры совсем не похожи на мощную облачность Земли. Они скорее напоминают туман, когда предметы, удаленные на несколько километров, становятся невидимыми. Кажущаяся плотность объясняется только большой протяженностью этого облачного слоя.

На высоте от 67 до 49 км аппараты прошли сквозь относительно плотные ярусы облаков с периодически меняющейся концентрацией частиц, в среднем 300 в 1 см^3 . От 49 до 32 км идет безоблачная атмосфера с единичными частицами в 1 см^3 . Эти данные несколько отличаются от результатов, полученных в 1972 г. Во всяком случае, нижняя граница облачности, которую «Венера-8» утром зафиксировала на высоте 32 км, в 1975 г. отсутствовала. Резкую границу аппарата отмечают выше, на уровне 48—49 км. Возможно, слой облаков имеет разную толщину в дневной, утренней и ночной частях и разную структуру, но пока это еще не подтверждено. В пользу же такого предположения говорят некоторые инфракрасные измерения и различия внешних деталей облачного слоя утром и вблизи полудня, где толщина облачного слоя может уменьшаться. Об этом как будто свидетельствуют некоторые фотографии облачного слоя.

Значит ли это, что попытки увидеть с помощью наземных телескопов поверхность планеты сквозь разрывы облаков могли увенчаться успехом? К сожалению, нет. Под толстым слоем облаков находится глубочайший океан сильно сжатого углекислого газа. Газ настолько плотен, что и без облаков сильно рассеивает свет. Если облака ослабляют его всего в 2—3 раза, то подоблачная атмосфера еще раз в 10. Вероятно, даже с высоты 25 км поверхность не видна.

Уже говорилось о том, что над облаками Венеры (и, вероятно, в их верхних слоях) в небольших количествах присутствуют сильнейшие кислоты: соляная HCl и плавиковая HF . В условиях крайне сухой атмосферы Венеры — это просто фтористый и хлористый водород. Поначалу этот факт казался загадочным, но дальнейшие исследования принесли еще более удивительные результаты. Белые облака Земли, как хорошо известно, состоят из мелких капель воды. Многие особенности нашей атмосферы определяются этими каплями. Однако приписать ту же природу венерианским облакам не удавалось. Во-первых, наземные измерения показывали, что количество водяного пара там очень невелико, около $2 \cdot 10^{-5}$ или меньше.

Во-вторых, поляризметрические измерения позволили найти коэффициент преломления частиц в облаках Венеры, который составил 1,44 (для воды он равен 1,33). Наконец, данные той же поляриметрии говорят о жидких каплях. Но температура в верхней части облаков составляет $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, что исключает жидкую воду.

Из чего же состоят венерианские облака? Только в 1973 г. ученые смогли указать химическое соединение, которое отвечает всем данным наземной астрономии. Верхний ярус венерианских туманоподобных облаков, расположенный в интервале высот от 57 до 75 км, — это мельчайшие капли с оптическими свойствами 80%-ной серной кислоты. Их диаметр очень мал, 0,4—2 мкм. На высоте 65—67 км таких частиц около 300 в каждом кубическом сантиметре (300 см^{-3}).

Обобщенные данные, полученные многочисленными советскими «Венерами» и американской «Пионер—Венерой» дают следующую схему строения облаков (рис. 3.13). Имеются три слоя — верхний, средний и нижний — и очень тонкие слоистые облака под самой их нижней границей.

Аппараты прошли 2—3 таких слоистых облака. Основные же слои — аморфные (бесструктурные). Концентрация двухмикронных капелек в верхнем слое (70—90 км) убывает с увеличением высоты практически до нуля, но более мелкие частицы, около 0,4 мкм, присутствуют здесь в большом количестве. Вероятно, здесь они и образуются из газовой фазы. Основная часть материала облачной среды находится в двухмикронных каплях, хотя мелких частиц намного больше и присутствуют они во всех частях облаков. Состав и тех и других одинаковый — концентрированная серная кислота с какими-то примесями.

На рис. 3.13 приведена суммарная концентрация частиц, но из них на двухмикронные приходится примерно 1/10 приведенного количества. Все эти частицы — жидкие, о чем свидетельствует их сферическая форма. В нижней части среднего слоя, около 51 км над поверхностью планеты, и в нижнем слое, около 49 км, количество двухмикронных частиц возрастает. Кроме них, по данным «Пионер—Венеры», здесь есть также твердые частицы размером до 5—8 мкм с концентрацией до 50 см^{-3} . Предполагается, что это мелкие кристаллики, возможно, сера кристаллической структуры. Кристаллики более крупные малочисленны. Интересно, что в отечественном нефелометрическом эксперименте на аппаратах от «Венеры-9» до «Венеры-14» наблюдались в

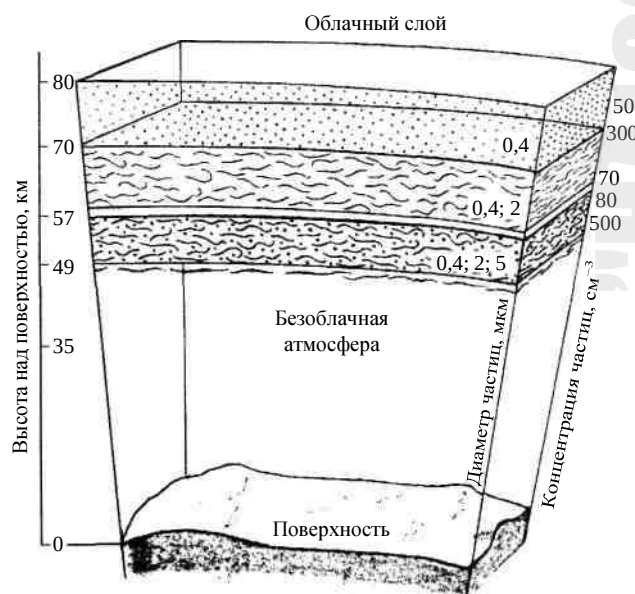


Рис. 3.13. Схема строения туманоподобных облаков Венеры. Облака состоят из трех слоев, отличающихся размерами и концентрацией частиц. Под нижней границей облачного слоя (49 км над поверхностью) аппараты «Пионер—Венера» и «Венера-13, -14» обнаружили слоистые образования, похожие на земные перистые облака

основном двух- и пятимикронные частицы, но не крупнее. Что же касается совсем мелких, их прибор не «чувствовал». В рентгенофлуоресцентном эксперименте на «Венере-13 и -14» удалось доказать: сера действительно входит в состав частиц, что согласовывалось с гипотезой о серной кислоте. Сейчас это уже не гипотеза, а экспериментальный факт. Имеются данные о возможном присутствии фосфора в некоторых частицах.

Наибольшая концентрация как крупных, так и мелких частиц (до 400 см^{-3} и более) относится к нижнему слою, от 48 до 51 км. Ниже 48 км концентрация частиц резко падает (до $2\text{—}10\text{ см}^{-3}$), причем это снова самые мелкие капельки диаметром около 0,2 мкм, хотя, возможно, и другой природы. На высоте 31—32 км и они исчезают; ниже атмосфера, по-видимому, не содержит аэрозолей.

Нижняя граница облаков 48—49 км обладает какими-то критическими для капелек свойствами. Температура здесь близка к $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, а давление 1,1 бар. Тонкие, от десятков до сотен метров, слоистые облака состоят из тех же частиц (0,3—0,4 мкм). Различимость — «дальность видности» (есть такое метеорологическое понятие) — в тумане, который мы по традиции называем облаками Венеры, составляет 1—2 км. Лишь из-за большой протя-

женности слоя, более 20 км, он окажется плотным.

Измерения температуры верхнего слоя облаков с аппаратов «Венера-9 и -10» показали, что она близка к точке фазового перехода жидкость — твердая фаза для серной кислоты с концентрацией 75—80%. Не исключено, что этот фазовый переход играет какую-то роль в положении верхней границы облаков. Их природа тесно связана с физическими условиями у поверхности планеты, прежде всего с высокой ее температурой. Именно она определяет состав и атмосферы, и облаков.

Верхние слои облачного покрова Венеры практически непроницаемы для инфракрасного теплового излучения планеты. Это своеобразное «одеяло» планеты. Излучение самих облаков в космос почти полностью определяет тепловой баланс (некоторую роль играет также излучение мезосферы в углекислотной полосе 15 мкм). Измерение потока теплового излучения Венеры — давняя проблема наземной астрономии, она насчитывает около 50 лет.

Интересно отметить, что эффективная температура (температура абсолютно черного тела, при которой оно излучает столько же энергии, как и реальное исследуемое тело) теплового излучения у Венеры ниже, чем у Земли. (Это излучение измеряется со спутников Венеры, а до 1975 г. измерялось астрономами с Земли.) С другой стороны, поверхность самой планеты очень горяча. Здесь нет противоречия: тепловое излучение планеты, которое уходит в космос, создается верхней частью очень протяженного основного облачного слоя.

Еще по наземным измерениям инфракрасного теплового излучения Венеры было известно явление, которое носит название «потемнение к краю». По законам физики тело, поглощающее излучение в каком-то спектральном интервале, само излучает в этих же длинах волн. Полная мощность, излучаемая единицей поверхности тела, определяется четвертой степенью температуры и коэффициентом излучения или обобщенной характеристикой — эффективной температурой тела. Измеряя инфракрасное тепловое излучение облаков Венеры, можно найти их яркостную температуру (аналог эффективной температуры для узкого спектрального интервала). Естественно, это излучение формируется в довольно толстом слое, где на пути луча набирается достаточно частиц и они закрывают собой более глубокие слои. Про такой слой говорят, что его оптическая толщина составляет единицу. На уровне верхней границы основных облаков температура падает с высотой примерно на 35 градусов на каждые 10 км. Поэтому высоко располо-

женный слой будет излучать с более низкой яркостной температурой, чем слой, расположенный ниже. Если два луча исходят из облачного слоя, один нормально к поверхности, а другой под малым к ней углом, яркостные температуры, найденные по излучению, будут различаться: луч, вышедший нормально к поверхности, пришел от более глубоких горячих слоев, наклонный же прошел путь, соответствующий единичной оптической толщине в холодных высоких слоях. Поэтому интенсивность (и яркостная температура) на краю планеты будет намного ниже, чем в центре, что и называется «потемнением к краю». (Это же явление хорошо известно в физике Солнца: на снимках центральная его часть всегда ярче краев.)

Уже первые инфракрасные измерения с «Венеры-9 и -10» показали, что «потемнение» на Венере обладает какими-то особенностями. Искусственные спутники Венеры начинали измерения в вечерней и заканчивали их в послеполуденной зоне. Если в дневной части все измерения подтверждали теорию, то в вечерней наблюдалось странное повышение яркостной температуры. Со временем становилась доступной всё большая часть ночной стороны планеты. Сомнений не оставалось: дневная сторона заметно холоднее ночной! Постепенно вырисовывалась тепловая асимметрия Венеры: ночная сторона излучает на 15—20% больше тепла, чем дневная. Поначалу это показалось парадоксальным. Вспомним, однако, что венерианские облака сильно поглощают ультрафиолетовое (и инфракрасное) излучение Солнца. Это приводит к их разогреву и выносу части излучающей среды в более холодную надоблачную зону. Казалось, так можно объяснить наблюдаемый парадокс. Но более глубокий анализ показал, что дело обстоит сложнее. Минимальные температуры, 232 К, отмечаются в 16 условных часов местного времени (1 венерианский час — 5 земных суток). В полдень температура выше, 239 К, а ночью 244 К.

Все эти измерения относились к поясу от экватора до примерно 50° северной и южной широты. Дальнейшие исследования показали, однако, более сложное распределение неоднородностей теплового излучения Венеры. Оказалось, что яркостная температура приполярных областей намного, на 10—20 градусов выше экваториальных. Такие особенности связаны с характером циркуляции газа атмосферы. Раньше, еще с «Пионер—Венеры» удалось найти другую интересную закономерность, которую иллюстрирует рис. 3.14. Здесь тон тем светлее, чем интенсивнее излучение. Оказалось, что

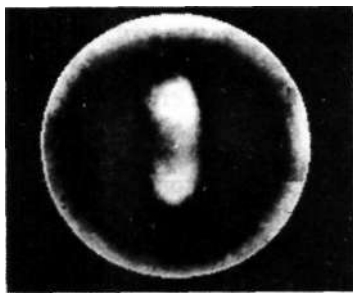


Рис. 3.14. По измерениям с аппарата «Пионер—Венера» удалось установить, что северный приполярный район дает пониженное излучение. Если бы глаз человека мог видеть инфракрасное тепловое излучение, с близкого расстояния Венеру можно было бы увидеть такой, как показано на этом рисунке

вокруг полюса имеется холодный «воротник» (темный). Над самим полюсом с периодом 2,7 сут вращается двухлопастный вихрь, своеобразный «диполь», диаметром около 3000 км. Этот диполь представляет собой устойчивые разрывы в холодной излучающей среде, образующей «воротник».

Детальные радиометрические измерения показали, что сферическое альbedo Венеры близко к 0,77, как и давали наземные измерения. Иными словами, планета поглощает лишь 23% падающей на нее солнечной радиации, в то время как Земля — почти 67%. Если учесть, что потоки солнечной энергии для Земли и Венеры относятся как 1:1,9, различие получается не таким уж большим: Земля поглощает в 1,5 раза больше энергии, а с учетом немного большего диаметра — в 1,6 раза.

Полученные превышения ночной яркостной температуры над дневной, вероятнее всего, связаны с фотохимическими процессами образования сернокислотных частиц в стратосфере Венеры — надоблачной части атмосферы в пределах 70—90 км. Не вызывает сомнения, что рождение и разрушение аэрозольных частиц облаков находятся в динамическом равновесии с окружающей средой. Измерения показывают, что размеры капель в венерианских облаках удивительно однородны, в отличие от земных облаков. Стоит обратить внимание на эту странную особенность Венеры. Это значит, что мы видим слой из недавно образовавшихся частиц, иначе однородность их размеров была бы нарушена в процессе столкновений и слияний частиц. Так как мы наблюдаем наиболее внешнюю часть облачного покрова, напрашивается вывод, что эти частицы падают откуда-то сверху, где они образуются. Из чего же рождается этот сернокислотный дождь?

От экватора и до широт примерно $\pm 50^\circ$ верхняя граница облаков нерезкая. На высоте 90 км концентрация частиц падает до единиц на кубический сантиметр. Зато нижняя граница, наоборот, выражена очень четко. Ученые считают, что в этом выражаются свойства сернокислотного аэрозоля. С некоторым преувеличением можно сказать, что в метеорологии сухой атмосферы Венеры соединения серы играют ту же роль, что вода в метеорологии Земли.

В атмосфере планеты спектроскописты давно искали сероокись углерода COS, которая, как ожидалось, в фотохимических превращениях в стратосфере рождала в конечном счете мельчайшие сернокислотные капли. Сероокись в количествах $3 \cdot 10^{-5}$ действительно была обнаружена, но ученые к ней заметно охладели. Теперь их гораздо больше интересует сернистый газ SO₂. Дело в том, что в условиях

Венеры SO₂ оказался более подходящим сырьем для переработки в серную кислоту. Считается, что ход реакций таков: сернистый газ, которого довольно мало, около $3 \cdot 10^{-5}$ от количества углекислого газа, в присутствии мощного ультрафиолетового излучения Солнца в надоблачной атмосфере фотолитически окисляется кислородом в серный ангидрид SO₃; кислорода тоже очень мало, вместе с окисью углерода CO он возникает при фотолизе углекислого газа CO₂ (фотодиссоциации); серный ангидрид SO₃ тут же взаимодействует с небольшим имеющимся количеством водяного пара и дает серную кислоту. Ее количество невелико, но вполне достаточно для существования облачного слоя планеты. Процесс образования сернокислотного тумана очень медленный, за весь венерианский день образуется всего 25 капелек диаметром 1,5 мкм на 1 см³, но такое количество частиц уже хорошо объясняет наблюдаемые явления. Одна из гипотез такова. Утром стратосфера прозрачна, но к полудню в ней появляется уже довольно много частиц. Так как температура на их уровне ниже, чем на уровне излучающих облаков, идущее снизу тепловое излучение заметно ослабляется этой средой. Наибольшая концентрация частиц достигается к 16 условным часам, что и приводит к появлению минимума температуры. Ночью, когда «выключен» основной механизм этого процесса, небо снова становится прозрачным и яркостная температура достигает максимального значения. Таким образом, измеряемые

температуры оказываются связанными с рождением и составом аэрозольных частиц.

Как ни малы эти частицы, они постепенно опускаются вниз, как и капли мелкого дождя на Земле, при этом они иногда сталкиваются и сливаются. Коагуляция приводит к слияниям в результате теплового (броуновского) движения частиц, коалесценция — в результате столкновения частиц при их падении с разными скоростями. Благодаря этому они постепенно укрупняются. Тогда, казалось бы, из облаков должен идти дождь серной кислоты? В том-то и дело, что нет! Тот самый угарный газ CO , «осколок» молекулы CO_2 , у которого отняли атом кислорода, тут как тут. При высокой температуре нижних слоев атмосферы серная кислота разрушается, а угарный газ реагирует с серным ангидридом, разрушает его и оставляет взамен углекислый и сернистый газ. Еще ниже остатки угарного газа отнимают у части сернистого газа последние атомы кислорода, а в атмосферу выделяется газообразная сера.

Если проанализировать, как изменяется спектр солнечного излучения на разных высотах (по мере спуска аппарата в атмосферу), можно определить концентрацию того или иного поглощающего вещества. Такие кривые, полученные на «Венере-11 и -12» в 1978 г., показаны на рис. 3.15. В сине-зеленой части спектра, у 450—550 нм, на кривых, полученных на малых высотах, наблюдается глубокий провал. Лабораторные измерения дают основание предполагать, что провал, возможно, определяется именно парами серы. Таким образом, все перечисленные газообразные вещества действительно участвуют в превращениях серы. Разумеется, действительность сложнее изложенной схемы: в атмосфере присутствуют и многие другие вещества.

Наличие в атмосфере серной, соляной и плавиковой кислот, несомненно, связано с высокой температурой поверхности. Общее количество серной кислоты в атмосфере Венеры вполне соответствует обилию серы в вулканических газах и на поверхности. Серная кислота в очень незначительных количествах появляется и в атмосфере Земли, но быстро растворяется в воде и выпадает с осадками. Интересно отметить, что в начале 70-х годов в атмосфере Земли на высотах 20—35 км был обнаружен очень легкий слой сернокислотных частиц. На единицу объема их приходится в 50—100 раз меньше, чем в облаках Венеры, размеры частиц меньше раз в 10, а концентрация кислоты достигает 90%.

Содержание углекислого газа в земной атмосфере составляет 0,032% (около $2,5 \cdot 10^{18}$ г). Но главные его запасы растворены в Мировом океане, где его в 55 раз больше, чем в атмосфере. Постоянный обмен углекислым газом между океаном и атмосферой демпфирует изменения его концентрации в атмосфере. Во много раз больше углекислоты содержат осадочные породы Земли: $3,6 \cdot 10^{23}$ г. Но здесь обмен с атмосферой затруднен. Если для полного кругооборота углекислого газа в системе атмосфера — океан достаточно 5—10 лет, то для обмена с осадочными породами нужно время, в миллионы раз большее.

Распространена гипотеза о том, что роль такого аккумулятора углекислого газа на Венере может брать на себя сама поверхность планеты, с которой углекислый газ вступает в реакции. На Земле эти реакции идут медленно из-за низкой температуры, но тоже существуют. Наоборот, на Венере их скорость должна быть очень велика. Равновесие с углекислым газом определяется обратимыми реакциями, в частности с волластонитом — минералом, который способен как поглощать, так и отдавать в атмосферу углекислый газ при небольших изменениях температуры. Однако в самое последнее время появились работы, авторы которых сомневаются в существовании таких минералов на поверхности Венеры (и такого обмена углекислотой с поверхностью).

При сходстве в составе, массе и размерах на поверхности Земли в 10^4 — 10^5 раз больше воды, чем в атмосфере Венеры. Это очень странно. Наиболее вероятное объяснение сухости венерианской атмосферы опять-таки связано с высокой температурой у ее поверхности. Состав атмосферы Венеры (как и других планет земной группы), вероятно, определился на довольно поздней стадии ее формирования. Начало вулканической деятельности привело к появлению первичной атмосферы из паров воды и углекислого газа в отношении примерно 5:1; во всяком случае, таково это отношение для Земли. В среднем, конечно. Современный вулканизм характеризуется, например, следующими числами:

Извержение	Водяной пар	Углекислый газ	Сернистый газ
Этна	49 %	23 %	26 %
Эртале (Ert'ale)	78	11	7
Килауэа	52	31	15

Выше мы уже рассказывали о том, что в атмосфере углекислого газа в смеси с водяным

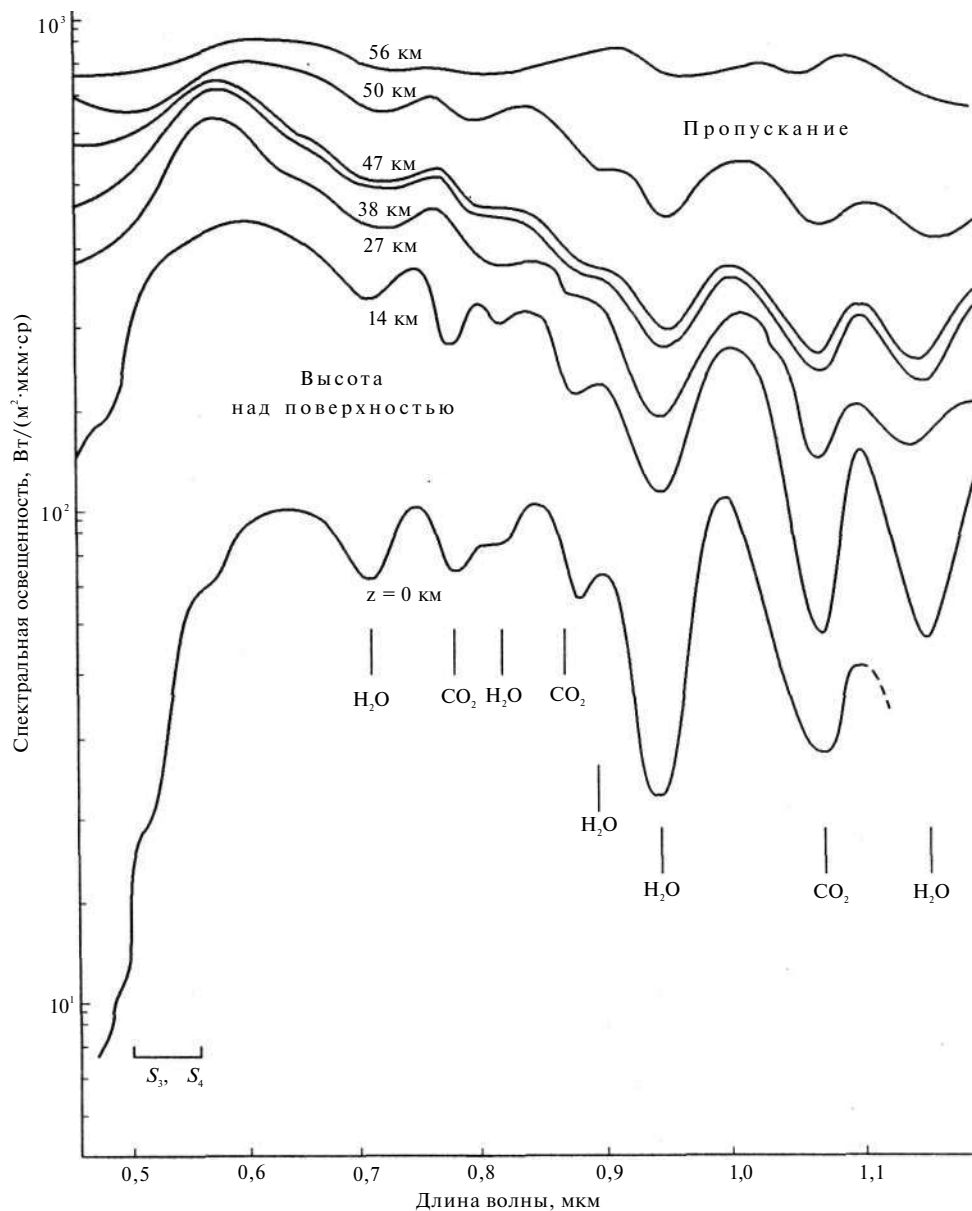


Рис. 3.15. По мере спуска аппарата спектральный состав света изменяется. Приведены кривые для семи высот, от 0 до 56 км. Указаны газообразные вещества, ответственные за наблюдаемое поглощение («Венера-11 и -12»)

паром солнечные лучи достигали поверхности и поглощались ею. Но если при этом планета не становилась горячее, если она находилась в тепловом равновесии, вся поглощенная энергия снова излучалась в космос, но уже в другом, инфракрасном диапазоне, 3–15 мкм, с максимумом излучения у 4–6 мкм. Но именно в этом диапазоне атмосфера перехватывает значительную часть излучения. В конечном счете равновесие восстанавливается, но уже с несколько повышенной температурой у поверхности. По-видимому, и начальная температура

«первозданной» Венеры из-за ее сравнительной близости к Солнцу была относительно высока, но описанный эффект еще больше ускорял выделение из поверхности воды и углекислого газа. Согласно одной из гипотез, все это привело к тому, что моря и океаны на планете не смогли образоваться из-за высокой температуры, а вся вода уходила в атмосферу, еще больше усиливая парниковый эффект, который сильно зависит от концентрации водяного пара. По-видимому, этому процессу сопутствовала быстрая потеря планетой водорода, который

убегал в космос из горячей атмосферы. Воды в атмосфере Венеры почти не осталось, а то немногое, что есть, прочно связано серной кислотой. (Заметим, что есть и другие «сценарии» потери планетой воды. К одному из них мы еще вернемся.)

Четыре взгляда на поверхность Венеры

С тех пор как посветлело небо и начался венерианский день, прошло 30 земных суток. Но здесь еще только наступил полдень. Высокое светлое небо Венеры, вечно затянутое облачной пеленой, мягким красноватым светом освещало поверхность планеты. Над крутым склоном, густо усеянным камнями, порывами дул несильный ветер. Этот ландшафт, похожий на некоторые горные склоны Земли, никогда еще не доводилось увидеть человеку. Впрочем, не только этот склон. Загадочная поверхность Венеры всегда была скрыта от его пытливых глаз. Но именно в это время шел отчет последних минут перед раскрытием тайны.

Высоко в небе появилась черная точка. Она приближалась. Вот уже можно различить детали сложного аппарата. С глухим звуком аппарат опустился на камни. Отброшены штанга измерительных приборов и крышка телевизионной камеры. Автомат включил камеру и прожекторы, которые слегка подсветили камни сбоку. Невидимые радиосигналы впервые понесли телевизионное изображение с поверхности другой планеты. Через несколько минут видеосигнал, ретранслированный первым искусственным спутником Венеры, достиг Земли и был принят в Центре дальней космической связи СССР, на расстоянии более 50 млн км от Венеры. Прошло еще несколько часов и изображение поверхности планеты в месте посадки аппарата «Венера-9» люди увидели на первых полосах газет и на экранах телевизоров. Это произошло 22 октября 1975 г. Спустя 3 дня вторую панораму передал аппарат «Венера-10». В те памятные октябрьские дни 1975 г. одна из лабораторий Центра дальней космической связи СССР не могла, конечно, вместить всех желающих. Именно здесь должно было произойти «главное чудо». И вот в динамиках раздался голос руководителя эксперимента: «Идет изображение. Видны детали на поверхности планеты. Качество картинки хорошее...» Сигналы с поверхности Венеры, где аппарат всеми заложенными в него силами боролся с огненным дыханием планеты, поступали около часа. Вскоре еще мокрая «картинка» была вывешена для всеобщего обозрения. Люди толпились вокруг, мешали друг другу. Бумага подсыхала и скручивалась. Ее приклеили к

стеклу... Звездные часы ученых и конструкторов! Каждый понимал, что решена задача небывалой сложности, подобно которой человеку еще никогда не случалось преодолеть...

Первое телевизионное изображение, которое пришло из пучины газового океана Венеры (и которое было первым изображением, когда-либо полученным с другой планеты), показало нагромождение камней на склоне горы. «Венера-9» опустилась на восточный склон горного массива Бета, уже известного ученым по радиолокации. Спуск и посадка прошли успешно; телевизионная камера успешно передавала панорамное изображение места посадки. Но если бы тогда руководители эксперимента знали, куда садится аппарат, у них прибавилось бы седых волос. Спустя несколько лет у ученых появились основания полагать, что Бета — вулканический массив, причем один из крупнейших в Солнечной системе. Более того, по некоторым признакам, он может и сейчас находиться в активном состоянии. Впрочем, тогда все это было неизвестно.

На панораме (рис. 3.16), которая охватывает угол 180° , видны камни, которые разбросаны по всему полю снимка. Размеры камней — от самых мелких до метровых глыб, нагромождение которых уходит до самого горизонта. Между камнями виден рыхлый грунт. На Земле такие каменные осыпи можно встретить у подножья разрушающихся скал. Хотя такой скалы нет в пределах видимости аппарата, но он стоит на крутом склоне: приборы показали, что наклон составляет 30° . Первое, что можно было сказать, — аппарат стоит на склоне венерианской горы, по которой иногда сыпятся камни. Горы высотой в несколько километров уже тогда были обнаружены на Венере как наземной радиолокацией, так и при анализе радиосигналов спутников Венеры, отраженных поверхностью планеты.

Анализ состава грунта показал, что в нем содержится 0,3% калия, $0,6 \cdot 10^{-4}\%$ урана и $3,6 \cdot 10^{-4}\%$ тория. Содержание других элементов не исследовалось. Вместе с другими данными такой состав свидетельствует о глубокой геохимической дифференциации коры Венеры; он более или менее характерен для базальтоидов.

Положение оси камеры было выбрано так, чтобы основная часть передаваемого сюжета относилась к поверхности, а горизонт захватывался лишь краями панорамы. Характерный выпуклый вид поверхности присущ широкоугольным оптическим системам и даже носит специальное название: искажения типа «рыбий глаз». Если читатель посмотрит прямо, затем



Рис. 3.16. 22 октября 1975 г. в 7 ч утра по московскому времени с поверхности Венеры впервые было передано изображение. На склоне разбросаны многочисленные каменные глыбы. Это каменная осыпь, где опущилась «Венера-9», расположенная в 2200 км от равнины, показанной на рис. 3.17. Большие камни в левой части изображения, напоминающие раковины, имеют, по-видимому, слоистую структуру. В левом верхнем углу снимка видны малоконтрастные пятна. Вероятно, это следующие склоны горы



Рис. 3.17. Утром 25 октября 1975 г. «Венера-10» опущилась на плоскую каменную плиту на невысоком обширном плоскогорье экваториального района планеты. В нижней части снимка — часть аппарата, выше видна крышка телефотометра и прибор для измерения плотности грунта. Каменные плиты разбросаны по всему полю снимка. Поверхность плит в левой части снимка светлее, чем в правой. Вероятно, небо слева было более светлым, чем справа. Широкая темная полоса в центральной части — аппаратный дефект, связанный с расположением здесь светлой крышки телефотометра

направо и налево, он сам убедится, что именно так выгнута линия горизонта, но мы этого не замечаем.

Горизонт на рис. 3.16 сразу же привлёк внимание какой-то необычной близостью. В углах горизонт состоит из близких камней (по оценкам, на расстоянии 40—100 м). Так как телевизионная камера находилась на высоте около 1 м, на равнине горизонт должен был бы отстоять на 3,5 км. К тому же в условиях плотной атмосферы должна наблюдаться сильная рефракция — искривление лучей света, которые в результате преломления должны уходить далеко за горизонт (рис. 3.18). Иными словами, горизонт должен быть дальше, чем на Земле. Вероятно, ночью извергающийся вулкан можно было бы видеть с довольно больших расстояний, причем из-за сильного рассеяния света извержения должны выглядеть нечеткими бесформенными пятнами. Было высказано предположение, что днем, в условиях низко расположенной точки наблюдения, главную роль может играть так называемая аномальная рефракция. Дневной свет поглощается очень темной поверхностью, что вызывает ее нагревание и одновременно повышение температуры приповерхностных слоев атмосферы. По расчетам, небольшого повышения температуры было бы достаточно, чтобы возникла рефракция с обратным знаком. В результате, луч света отклонился бы вверх, вместо того чтобы уходить за горизонт, а линия горизонта придвинулась бы к наблюдателю. В дальнейшем было показано, что этого не происходит. Телевизионные камеры «видели»

нормальный горизонт, а на рис. 3.16 — скорее всего, хребет холма, за которым кажется, что-то еще можно видеть (в левом углу рисунка). Какие-либо детали различить там невозможно, но было высказано предположение, что это — следующий склон горы. Новые, очень похожие в этом отношении панорамы «Венеры-13 и -14» доказали в 1982 г. справедливость этого предположения. Но пока вернемся к рис. 3.16.

Откуда взялись камни, почему разрушается гора? Этот снимок обошел многие журналы мира. Он позволил ученым сделать заключение о тектонической активности коры планеты. В самом деле, эти камни не могут быть очень старыми образованиями. И вот почему: за достаточно длительное время они все-таки разрушаются под действием ветра и небольших изменений температуры. Ветры у поверхности обычно не превосходят 1 м/с. Но из-за большой плотности атмосферы Венеры ветер силой в 5 м/с — то же самое, что земной ураган. Зато здесь отсутствуют изменения температуры, которые на Земле вместе с водой и ветром относительно быстро разрушают ее рельеф. На Венере отличие дневной температуры у поверхности от ночной не превышает, по расчетам, одного градуса: это своеобразный природный термостат. Что же касается дождей, то выше 374 °C вода не существует в жидкой фазе при любом давлении. Поэтому на поверхности ее нет. Следовательно, «свежие» обломки типа тех, что видны на рис. 3.16, могли возникнуть, скорее всего, в результате действия каких-то внутренних сил, например «венеротрясений».

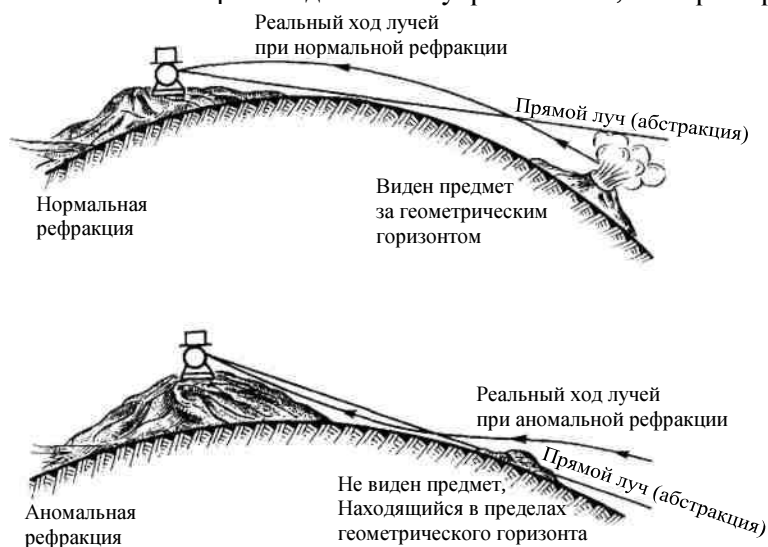


Рис. 3.18. Эффект «далекого горизонта» возникает из-за рефракции — отклонения луча света, проходящего горизонтально над поверхностью планеты

Отметим также, что на первой панораме Венера, возможно, показала нам один из своих не самых типичных видов рельефа, а наиболее типичные прибрежья для «Венеры-10 и -13». Что ж, тем интереснее этот рисунок.

Затем пришло время более сложных задач и более совершенных аппаратов, но научный подвиг «Венеры-9» и ее создателей навсегда остался первым. Безжизненный и отчасти разрушенный высокими давлениями и температурой аппарат «Венера-9» и сейчас стоит на склоне горного массива Бета, в точке с координатами 32° с.ш. и 291° в.д.

Рельеф в месте посадки «Венеры-10» был не скоро отождествлен с имеющимися земными аналогами. Причина, по-видимому, в недостаточном разрешении снимка. Этот аппарат опустился вдвое ближе к экватору, на расстоянии 1700 км от первого, в точке 16° с.ш. и 291° в.д., на обширную каменную плиту у южного склона Беты (рис. 3.17).

Кое-где плита расколота, но части ее не смещены. Впадины заполнены, по-видимому, мелкой щебенкой. Измерения говорят о составе грунта, близком к базальту (0,3% калия; $0,5 \cdot 10^{-4}\%$ урана и $0,7 \cdot 10^{-4}\%$ тория). Каменные плиты разбросаны по всему полю снимка. Похоже, что поверхность плит в левой части панорамы слегка поблескивает, вероятно, небо с этой стороны светлее. Общий характер поверхности — равнина. Аппарат стоял на плите практически без наклона.

На первый взгляд, панорамы «Венеры-9» и «Венеры-10» очень непохожи. Именно к такому мнению поначалу пришли специалисты. В первом случае — горный склон, во втором — равнина. Но вот как развивались события дальше.

Пока продолжался анализ данных «Венеры-9 и -10», в советских лабораториях готовились новые эксперименты. Исследование поверхности планеты в 1982 г. на аппаратах «Венера-13 и -14» было значительно расширено. Впервые был проведен анализ состава грунта: в нем были обнаружены такие элементы, как магний, алюминий, кремний, кальций и др. Телевизионные камеры передали изображение всего ландшафта, окружающего аппараты, причем разрешение, которое давали новые телекамеры, достигало 11 угловых минут: каждое панорамное изображение состояло из 1000 телевизионных строк и передавалось по несколько раз, в том числе с разными световыми фильтрами, что позволило получить натуральный цвет в условиях естественного освещения поверхности планеты. В отличие от рис. 3.16 и 3.17 намного большим стало и число

переданных полутонов. Все эти технические усовершенствования дали великолепные результаты, показанные на последующих рисунках.

Аппараты опустились намного южнее Беты, в 750 и 1350 км южнее экватора: «Венера-13» — примерно в 1600 км и «Венера-14» — в 2700 км к востоку от центра несколько меньшего по размерам, чем Бета, горного массива Феба, расположенного на той же долготе.

Словно для того чтобы рассеять недоумение ученых, на снимках «Венеры-13» планета «показала крупным планом» поверхность, очень похожую на ту, что видна на панораме «Венеры-10». Сходство их очевидно, хотя расстояние между двумя точками посадки составило 2820 км (координаты района «Венеры-13»: 7°38' ю.ш., 303°28' в.д.). На рис. 3.19 показан этот пустынный пейзаж. Изображение состоит из двух частей; каждое охватывает по 180° с одной из сторон от аппарата. Как и прежде, оси камер наклонены на 50° к вертикали, что позволило увидеть много подробностей (на ограниченной площади) в центре снимка и получить изображение участков с меньшим разрешением вплоть до горизонта на краях панорамы. В поле каждой из камер находятся некоторые детали аппарата. На панораме 1-й камеры внизу виден посадочный буфер с зубчатым аэродинамическим устройством. Во время посадки выброшенный грунт попал на буфер и частично закрыл надпись «СССР». Выше буфера на грунте лежит сброшенная крышка телекамеры. С крайней левой частью буфера соединена круглая рамка антенны прибора «Гроза» (рис. 3.19, верхняя часть). Размеры этих деталей такие: полуцилиндрическая крышка имеет диаметр 190 и высоту 120 мм; между гребнями зубцов 50 мм; диаметр антенны 250 мм. Панорама, переданная 2-й камерой (рис. 3.19, нижняя часть) включает прибор для измерения механических свойств грунта (его кронштейн похож на лестницу-стремянку) и такую же крышку телекамеры. На чистой от пыли поверхности буфера виден пятиугольник — это барельеф Ленина. Тогда было принято ставить такие значки на космических аппаратах. В правой части обеих панорам находится трехцветная палитра для контроля правильности цветопередачи. О ней речь будет дальше.

Самые мелкие детали грунта на снимке имеют размер 3 мм. Раздробленный грунт в центре состоит из мелких частиц и камешков до 50 мм. Здесь же видны каменные плиты протяженностью 0,5–2 м, такие же, как на рис. 3.17. Возможно, рис. 3.19 показывает наи-

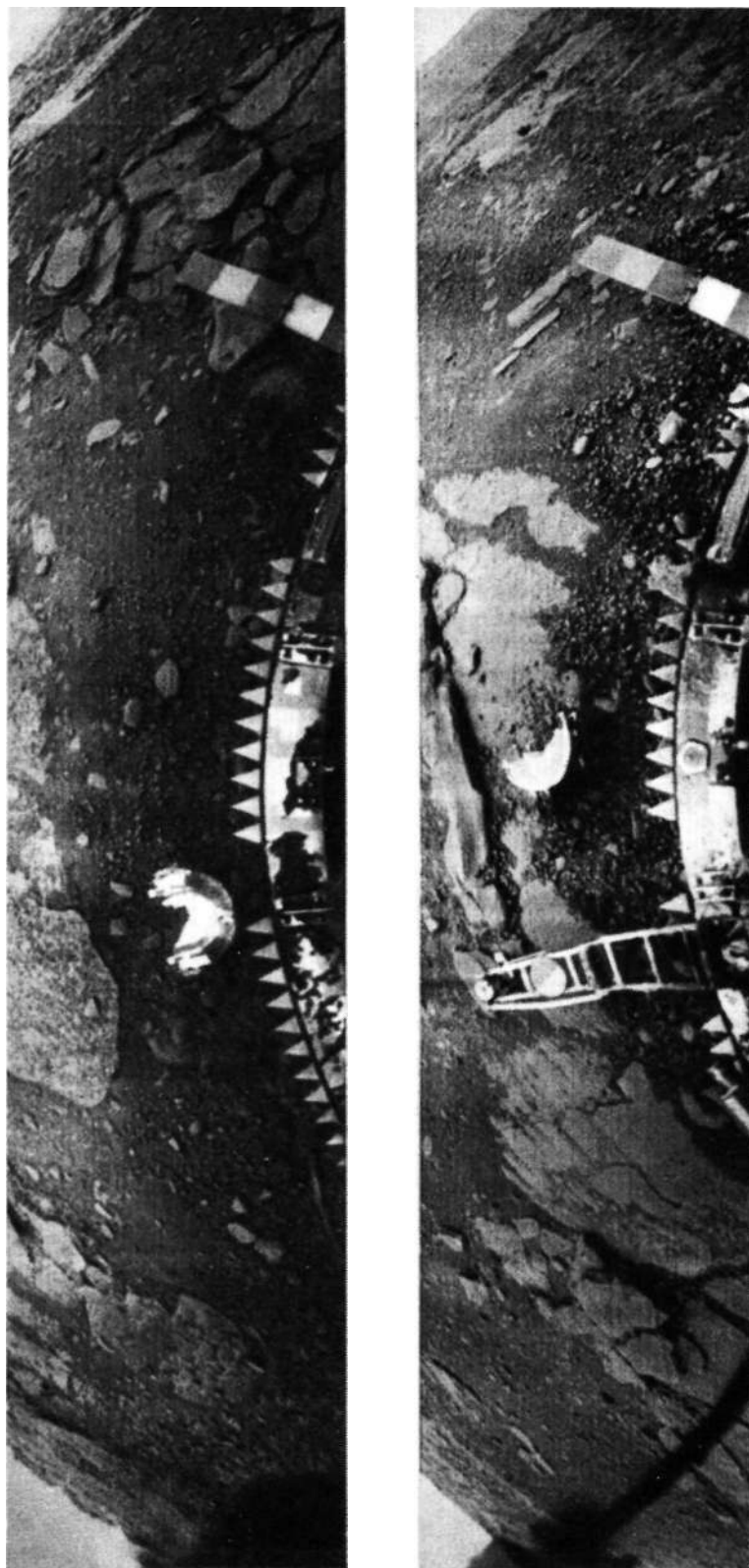


Рис. 3.19. Две панорамы, переданные «Венерой-13» 1 марта 1982 г., показывают рыхлый грунт, возможно, покрытый местами сцементированной коркой. Предполагается, что это продукт вулканических извержений — химически выветренная лава или вулканический пепел. Грунт похож на тот, что виден на панораме «Венеры-10»

более распространенные на Венере пейзажи. Геологи считают, что каменные плиты — это выходы коренных скальных пород, обладающие заметной слоистостью; край камней на первой панораме (справа) имеет вид уступов. Поверхность плит носит следы выветривания (бугорки и ямки на плитах). На второй панораме поверхность каменной плиты покрыта узкими параллельными полосами, которые свидетельствуют о структуре камней, на 50—100 мм выступающих над поверхностью.

По поводу происхождения мелкого грунта специалисты спорят. Часть его, несомненно, — продукты разрушения каменных плит. Вид рыхлого грунта говорит о большом возрасте поверхности, хотя геологи затрудняются назвать какие-либо числа. Из-за раздробленности грунт заметно темнее плит; по-видимому, он включает и пылевую фракцию, которая образовала пылевое облако в момент посадки. Разумеется, трудно однозначно судить о природе поверхности на основании только имеющихся снимков. Некоторые специалисты утверждают, что поверхность здесь может представлять собой результаты химического выветривания базальтовых лав. Об этом, кажется, говорит состав поверхности. Грунт может также содержать вулканические пеплы, а некоторые тонкие каменные плиты могут быть сцементированной (литифицированной) коркой таких пеплов. Коротко говоря, не исключено, что поверхность в районе посадки «Венеры-13» носит следы недалеких вулканических извержений. В дискуссиях специалистов-геологов высказывалось и

другое мнение: что на снимке рис. 3.19 мы видим туфы базальтового состава, а не излившиеся на поверхность лавы. Словом, мнений много.

Чтобы представить себе, какими увидит человек поверхность и горизонт планеты, следует совместить правую часть одной из панорам с левой частью другой. Строгое выполнение такой операции требует подетального преобразования геометрии изображения на компьютере; тогда панорама превращается в «бумеранг» с поднятыми вверх концами. Однако удовлетворительный и вполне наглядный результат дает даже механическое совмещение краев панорам на рис. 3.1, 3.20 и 3.21. (Внизу центральная часть на этих снимках заполнена подходящими частями из других мест тех же панорам, так как это краевая зона, не захваченная камерой. Всерьез ее принимать не следует.)

Благодаря такому преобразованию изображение меняется почти неузнаваемо. Привычное положение линий горизонта показывает, что их на рис. 3.20 по крайней мере две, а специально обработанные снимки правой части рис. 3.20 дают даже три линии горизонта. Аппарат опустился на холмистую равнину. За первой, ближней линией горизонта виден склон следующего холма и даже, в левой части, некоторые его детали. Темный предмет сверху средней части — фотометр, с помощью которого получен спектр на рис. 3.15. Горизонтальный характер плит продолжается из одной половины рисунка в другую. Это хорошо видно



Рис. 3.20. Краевые части панорам позволяют восстановить неровную линию близкого горизонта, как его увидел бы человек. Обратите внимание на второй склон, видимый за горизонтом первого снимка

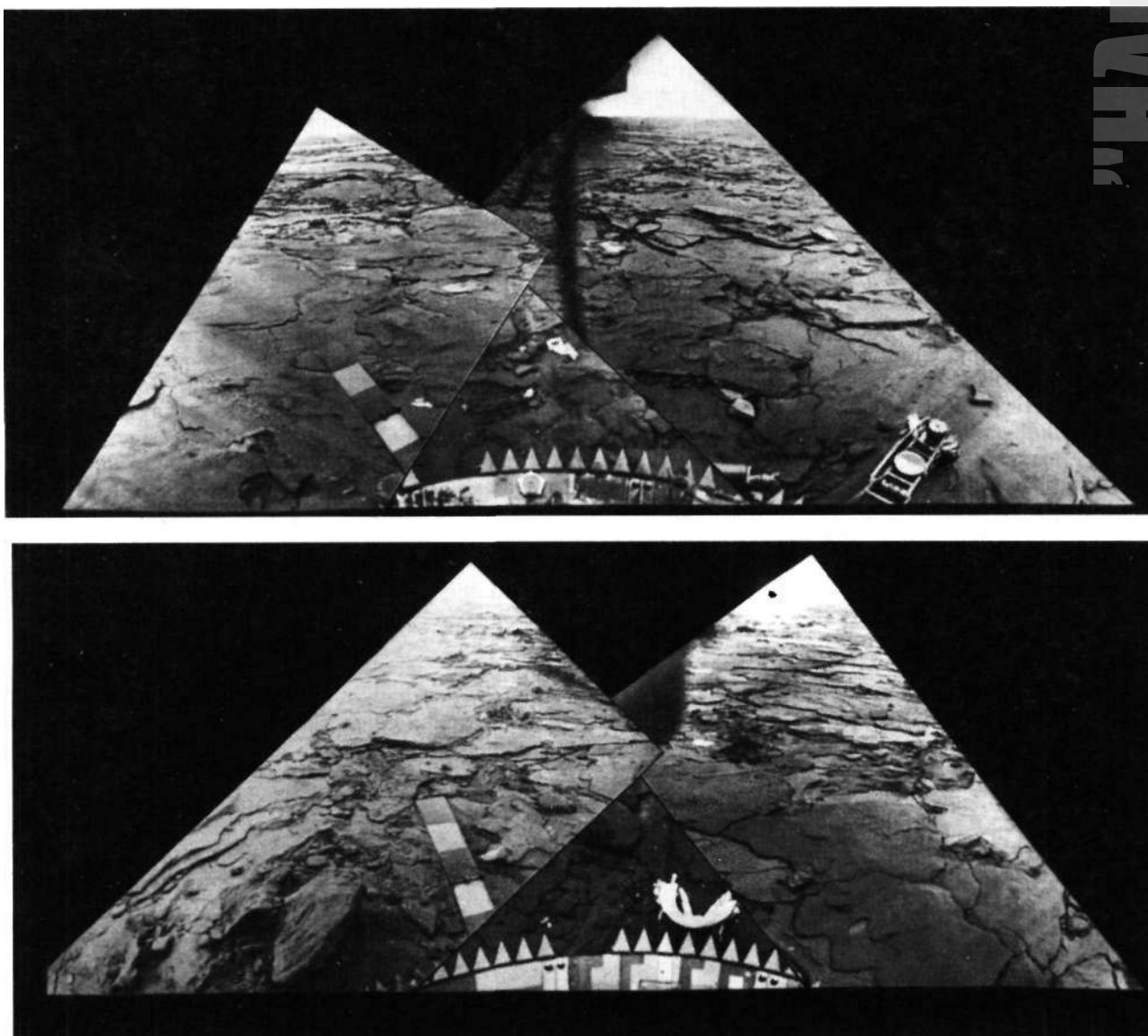


Рис. 3.21. Два снимка с горизонтом (противоположные стороны от аппарата «Венера-14»). Поверхность представляет уходящие к ровной линии горизонта плиты различных размеров

на рис. 3.1, где показана противоположная часть того ландшафта. Каменные плиты разбросаны неподалеку от аппарата. Их размеры — полметра и более. Этот снимок напоминает не только рис. 3.17, но и рис. 3.16 (вид вблизи «Венеры-9») и показывает близкое родство ландшафтов на рис. 3.16 и 3.20: та же разрушенная поверхность, только немного меньше камней. Таким образом, однотипный ландшафт видели три «Венеры» из четырех (рис. 3.16, 3.17 и 3.19). Это рыхлый грунт и выходы коренных пород, которые изломаны в куски каким-то неизвестным процессом.

На фото 3 показана правая часть рис. 3.20 в цвете. Здесь дальний склон окрашен в яркий желто-зеленый цвет, в то время как ближняя часть того же района имеет бурые и оранжево-зеленоватые оттенки. Значит ли это, что дальний склон действительно чем-то окрашен? Вовсе нет. Такой оттенок вызывает рассеяние света в атмосфере, которая у поверхности планеты в 50 раз плотнее земной.

Цветные оттенки полосы дальнего склона, а также особенности рельефа и поверхности, представленные на фото 5, 6, и даже такие

подробности, как тени на них, позволяют сделать некоторые интересные заключения.

Красивый голубой цвет неба Земли (фото 4) — результат рэлеевского рассеяния света молекулами газа атмосферы. Рассеяние обратно пропорционально 4-й степени длины волны; поэтому наше небо, строго говоря, больше фиолетовое, чем голубое. Но фиолетовых лучей в спектре Солнца значительно меньше, да и чувствительность глаза к ним невелика; вот мы и видим голубое небо. На Венере рэлеевское рассеяние действует во много раз сильнее. Кроме того, синие лучи поглощаются некоторыми газообразными соединениями в атмосфере. Лишь незначительная часть синих и голубых лучей достигает поверхности. Из-за высокой плотности атмосферы сильно рассеиваются зеленые и даже желтые лучи. Поэтому небо над горизонтом там имеет яркий желто-зеленый оттенок. Это венерианский эквивалент земного голубого неба. Именно такое желто-зеленое небо можно видеть на цветных панорамных изображениях, полученных посадочными станциями «Венера-14» и особенно «Венера-13», где из-за неровностей рельефа виден склон следующей долины. Солнечное освещение на всех снимках, полученных с «Венеры-13» и «-14», соответствует условиям позднего утра. Местное время было около 10 ч.

Цветные палитры, которые читатель уже видел на наших снимках, доставили ученым много хлопот: цвета получились не теми, что ожидалось. Красные, зеленые и синие поля должны были давать опорные уровни цветопередачи, причем их цвет должен был остаться неизменным в атмосфере Венеры при 470 °С. Были подобраны редкие и дорогие краски, и вся технология передана на завод. Но когда телевизионные снимки были, наконец, получены с Венеры, что-то оказалось не так, цвета палитры были какими-то слишком бурыми, даже после учета спектрального состава освещения на планете. Пошли слухи, что на заводе, узнав, сколько стоят эти специальные краски, кто-то решил заменить их более дешевыми (которые, конечно, высоких температур не выдержали бы). На самом деле никто краску не заменял; просто ее свойства все-таки изменились в реальных условиях Венеры...

Две другие, совсем не анекдотичные истории, произошли с крышками телевизионных камер (телефотометров). Три такие белые крышки, в виде полуцилиндров, лежат на грунте, как можно видеть на снимках. А вот четвертая... Прибор для измерения механических свойств грунта, распрямляясь, вонзил свой пробник именно в крышку телефотометра, что

можно видеть справа на рис. 3.21,верху. Другого места на Венере для него не нашлось!

Уникальные телевизионные эксперименты до сих пор никто не повторил. Но число панорам могло бы быть вдвое большим. Почему-то считалось очень большим секретом, что цветные телекамеры стояли и на «Венере-11» и «-12», но, к сожалению, изображения они не смогли передать, потому что не отстрелились эти самые крышки. При посадке сработали сто раз проверенные пирозамки, но крышки не отделились. Лишь потом удалось установить, что причиной оказались необычные химические реакции, возникшие в условиях Венеры.

Кстати, испытания научных приборов на стойкость к условиям Венеры доставляют массу хлопот. Однажды, при подготовке эксперимента для «Венеры-9» и «-10», после испытаний, в камере не оказалось помещенного туда прибора. Как выяснилось, специальный, чрезвычайно стойкий сплав, из которого был сделан его корпус, полностью сгорел в условиях, имитирующих воздействие планеты.

По-видимому, оранжевое небо Венеры с поверхности планеты представляет собой очень эффектное зрелище. Характерные оттенки поверхности определяются прежде всего потоком оранжевого света, льющегося сверху. Сама поверхность, которая состоит, как уже говорилось, главным образом из базальтоидов, не богата оттенками. Как и на Земле, основную окраску грунту придают соединения железа: двухвалентный ион железа дает зеленоватый тон, трехвалентный — красноватый. Панорама, полученная с «Венеры-13» (фото 5), — главным образом черные, красноватые, зеленоватые и бурые тона. В качестве возможного аналога венерианской поверхности на Земле специалисты называли окрестности вулкана Толбачик на Камчатке, сильное извержение которого произошло в 1975 г. Однако цвет вулканической породы у Толбачика отличается от цветов на фото 5 и 6 из-за различий в спектральном составе освещения.

Немного забегаая вперед, приведем состав поверхности Венеры в весовых процентах для трех точек посадки (включая «ВЕНУ-2», 1985 г.), найденный рентгенофлуоресцентным методом.

В грунте Венеры примерно половину составляет кремнезем (SiO₂).

Исходя из состава, породу в месте посадки «Венеры-13» отнесли к довольно редким на Земле толеитовым базальтам, которые можно встретить, например, на Гавайях. Эксперимент, с помощью которого определялся состав грунта, был одним из самых сложных. В условиях

Венеры, при 89,5 бар и 465 °С, бурильный станок вырезал из поверхности пробу грунта, а специальная транспортирующая система перенесла пробу в шлюз. Затем была откачана атмосфера над пробой, и грунт поступил в камеру анализа. Здесь его облучили два радиоизотопных источника из железа-55 и плутония-238. Гамма-излучение источников активировало пробу грунта, и по характерному вторичному излучению того или иного элемента был отождествлен его элементный состав. Несмотря на крайнюю сложность прибора, его масса составила всего 8 кг. Он позволил отождествить элементы с атомными номерами от магния до железа.

Окислы	«Венера-13»	«Венера-14»	«ВЕГА-2»
SiO ₂	45,1	48,7	46,5
Al ₂ O ₃	15,8	17,9	16
MgO	11,4	8,1	11,5
CaO	7,1	10,3	7,5
FeO	9,3	8,8	8,6
K ₂ O	4,0	0,2	0,1
MnO	0,2	0,16	0,14
TiO ₂	—	—	0,2
SO ₃	—	—	4,7
(Cl)	—	—	0,3

1 марта 1982 г., когда были получены панорамы с «Венеры-13» (рис. 3.19; фото 5), сигналы с поверхности планеты принимались 127 мин. Аппарат передал 11 последовательных изображений, которые очень мало отличаются друг от друга. Небольшие изменения прежде всего указывают, что условия освещения за это время менялись. Например, контрасты изображения самой станции значительно изменились за 70 мин. Очевидно, плотность облаков и яркость облачного купола не оставались постоянными. Другое изменение касается количества грунта, выброшенного на поверхность посадочного буфера (первая панорама на рис. 3.19). Этот снимок соответствует 60-й минуте работы аппарата на поверхности. Если проследить более ранние и поздние изображения, можно увидеть, что количество грунта постепенно уменьшалось. Причина может быть лишь одна: ветер. Мелкие частицы ветер сдувал, оставляя следы за выступающими деталями аппарата. Измерения показали, что скорость ветра вокруг «Венеры-13» была от 0,5 до 0,6 м/с, а иногда немного больше. В результате крупинки грунта до 4 мм, а также более мелкий материал постепенно исчезли с посадочного буфера.

Почти вдвое меньшей была скорость ветра в месте посадки второй станции — «Венеры-

14». Вид поверхности в этом районе (13°15' ю.ш., 310°09' в.д.) совершенно не похож на все предыдущие снимки. На рис. 3.21 и 3.22 мы видим ровную поверхность, образованную наложением горизонтальных плоских плит небольшой толщины, иногда до 12 слоев. Местами плиты растрескались, но сыпучего грунта здесь почти нет. Детали аппарата те же, что и у «Венеры-13», поэтому будем называть, как и прежде, первой панораму, на которой на посадочном буфере видна надпись «СССР» (см. рис. 3.22), а второй — с развернутым кронштейном измерителя плотности грунта. Лишь на центральной части посадочного буфера на второй панораме можно заметить небольшие полосы пыли, вытянутые слева направо, наверное, из-за ветра.

Кстати, определение скорости ветра при спуске аппарата выполняется радиотехническими методами. А на поверхности в 1982 г. она определялась несколько необычным способом — с помощью микрофона. Микрофон предназначался для регистрации шума, создаваемого системами самого аппарата, работа которых могла помешать анализу микросейсмиков — очень слабых колебаний грунта (которые на Земле возникают, например, под действием волнения океана). Такой эксперимент также выполнялся на этих аппаратах. Выяснилось, однако, что, кроме ожидавшихся звуков, микрофон воспринимал на поверхности также какой-то слегка меняющийся шум. Было высказано предположение, что шум вызывается ветром, который обтекает арматуру микрофона. Микрофон поместили в аэродинамическую трубу и измерили, при какой скорости ветра возникает найденная величина шума. В пересчете на условия Венеры скорость составила всего 0,37 м/с. Этого хватит лишь на перемещение самых мелких частиц, не более 2 мм.

Мелкий грунт виден также в трещинах и впадинках между плитами, но на плитах его нет; поверхность очень темная (покрытая с внутренней стороны белой стеклотканью крышка телефотометра намного светлее любой детали на поверхности). Предполагается, что слоистый камень правее центра на второй панораме рис. 3.22 был отломан во время посадки. Если это действительно так, его излом показывает свежую поверхность. Размер камня около 400 мм.

Цветная панорама (фото 6), как в случае «Венеры-13», имеет широкое темное пятно в центре, чего нет на черно-белых снимках. Это объясняется тем, что аэродинамический щиток аппарата (его верхняя часть, рис. 1.3) затенял близкие к нему участки поверхности. Но это

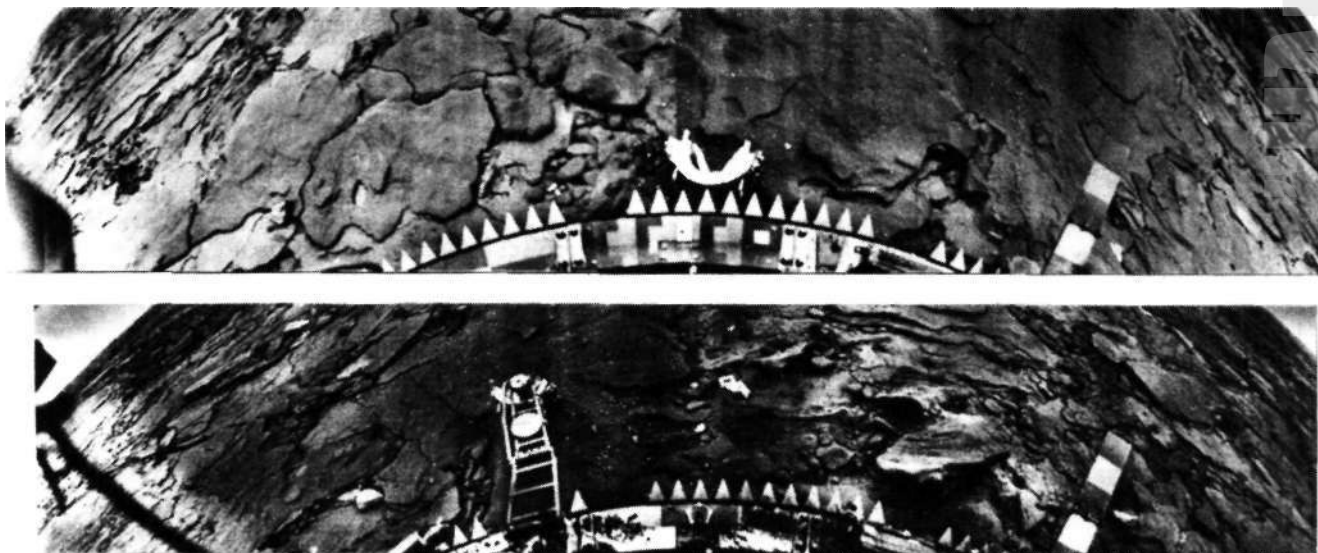


Рис. 3.22. Две панорамы «Венеры-14» (5 марта 1982 г.). Поверхность особого типа; она напоминает осадочные породы, но может быть и тонким слоем затвердевшей лавы. Поверхность горизонтальная

сказалось в основном на цветных панорамах, потому что при работе в черно-белом режиме система автоматической регулировки чувствительности компенсировала изменения яркости. Скальная поверхность на рис. 3.22 светлее, чем на рис. 3.19 и фото 5, и не имеет следов выветривания в виде мелких ямок.

В левой части первой панорамы рис. 3.22 сквозь отверстие в темной поверхности видна более светлая плита нижнего слоя. Было высказано предположение, что грунт на рис. 3.22 представляет собой затвердевшие слои горизонтально растекавшейся во время вулканических извержений лавы. Однако другие специалисты возразили, что по горизонтальной поверхности лава далеко не растечется, что на Земле таких тонких слоев затвердевшей лавы не бывает и что поверхность при этом получается неровной, в отличие от ландшафта рис. 3.22. Но в дальнейшем сходный вулканический пейзаж на Земле все же удалось найти. Тем не менее группа специалистов-геологов выступает с другой гипотезой, состоящей в том, что этот рельеф возник в процессах накопления осадков (седиментации), когда осаждение последовательных слоев происходило с большими интервалами времени. Предполагается, что пыль выбрасывалась в атмосферу вулканами, а затем медленно осаждалась на поверхность, где слеживалась и спекалась. Рассматриваются и другие гипотезы, даже такая, согласно которой ландшафт, переданный с «Венеры-14», — это дно древнего и давно исчезнувшего океана Венеры, в водах которого происходили процессы осаждения. И хотя эта гипотеза противоречит

всем данным об отсутствии воды на Венере, обратим на нее внимание, чтобы позднее вернуться к ней еще раз.

В нескольких местах панорам, полученных «Венерой-14», имеются какие-то непонятные образования, вроде бесформенных кучек размягченной массы. На второй панораме такие предметы находятся у самого конца цветной контрольной палитры (рис. 3.22), а также дальше и правее. Такое же образование есть и в левой части первой панорамы, где такой предмет выделяется цветом. Крайние части хорошо видны на рис. 3.21, где эти части совмещены. На обеих частях рис. 3.21 видна также ровная линия горизонта, без каких-либо вторых контуров. Удаленная часть панорамы имеет характерный зеленовато-желтый оттенок (фото 6), но не такой яркий, как на дальнем склоне фото 3.

Все это еще раз подтверждает, что аппарат стоит на удивительно плоской равнине, в то время как и «Венера-9», и «Венера-13» опустились в холмистой местности. Состав поверхности в новой точке отнесен к океаническим базальтам. Более высокие температура и давление (743 К и 93,5 бар) по сравнению с величинами, полученными на «Венере-13» (738 К и 89,5 бар), указывают, что район «Венеры-14» находится на 0,7 км ниже.

Растрескавшаяся поверхность на рис. 3.16, 3.19, 3.22 указывает на возможные сейсмические явления. Попытка зарегистрировать такие явления впервые была предпринята на новых аппаратах. Разумеется, было бы наивным надеяться застать «венеротрясение» за

1—2 ч активного существования аппарата на поверхности планеты. Приборы были рассчитаны на регистрацию микросейсм. Измерения на «Венере-14» выполнялись в течение почти часа после посадки аппарата. Примерно в середине этого периода отмечены два очень слабых толчка грунта (микросейсм). Сам аппарат помех не создавал. Причиной их наряду с реальными очень удаленными сейсмическими явлениями мог быть порыв ветра в удаленной долине. Но на «Венере-13», опустившейся 1 марта 1982 г. на расстоянии 950 км от будущего района посадки «Венеры-14», микросейсм не отмечены. Амплитуда этих колебаний была небольшой, порядка нескольких микрометров. Согласно данным для Земли, микросейсм такой амплитуды соответствуют удаленности источника не более 3000 км. На таком примерно расстоянии от «Венеры-14» находились районы Бета и Феба, которые относятся к вулканическим образованиям.

Так выглядит поверхность, которую Венера долго скрывала. Но, кроме панорам, переданных аппаратами «Венера», уже появились карты поверхности планеты, полученные без помощи телескопов, телевизионных или фотографических камер. Информацию о поверхности Венеры принес сам радиосигнал, посланный с Земли или с космического аппарата радиолокатором, а затем отраженный поверхностью планеты.

Увидеть невидимое

Наземную планетную радиолокацию, которая позволяет получить изображение поверхности далекой планеты, можно отнести к главным чудесам техники конца нашего века. По существу, радиофизики независимо от оптиков пришли к принципам голографии. Но если в оптике голограмма получается как бы «сама собой», в радиофизике ее реконструируют. Удивительная техника планетной радиолокации дала ученым карты распределения радиоотражательных свойств по поверхности планеты, а для многих деталей даже карты рельефа. Длина волны радиолокатора в миллионы раз больше, чем у световых волн. Поскольку с увеличением длины волны разрешение, которое дает система, падает, кажется очевидным, что переход от оптики к радиоволнам для Венеры бесперспективен. Но это не так. Разумеется, реальная «зоркость» одиночного радиотелескопа невелика. Но у радиоволн есть преимущества: во-первых, они свободно проникают сквозь облака и достигают поверхности Венеры; во-вторых, радиотелескопы можно объединять, создавая интерферометр с тре-

буемым угловым разрешением, недоступным оптическим телескопам.

Но и это не все. Главное в том, что параметры посылаемого радиолокатором импульса точно известны. Поэтому дополнительно появляется возможность измерить все характеристики отраженного сигнала: время задержки, частотный и фазовый сдвиги. Для обычного света это невозможно. Дальнейшая обработка сигналов может быть построена по-разному. Более того, различными могут быть даже методы регистрации сигнала. Например, точно зная период вращения планеты и положение оси ее вращения, можно воспользоваться тем, что в разные дни в период сближения с Землей планета «подставляет» радиолокатору не одну и ту же точку. Их можно выделить, пользуясь тем, что задержка радиосигналов, отраженных разными образованиями на поверхности, будет неодинаковой. Есть и более сложные приемы, которые позволяют обойтись одним большим радиотелескопом. В другом методе используется несколько точек приема. Подобный принцип удобно проиллюстрировать на примере трехлучевого интерферометра.

Выше мы рассказывали, как остаточные разности в доплеровском сдвиге частот позволили измерить скорость вращения Венеры. Но возможности радиолокационного метода исследования планет этим не исчерпываются. Дополним радиолокационную систему несколькими приемными антеннами, разнесенными, например, на сотни километров (рис. 3.23). Аппаратура должна быть оснащена сверенными точнейшими часами — стандартами времени, погрешность хода которых составит не более 1 с за 300 лет. Направления, в которых каждая приемная антенна будет «видеть» планету, не одинаковы, хотя разница не может превосходить 60 угл. с, — таков наибольший угол, под которым видна Венера. Поэтому не весь сигнал, одновременно принятый разными антеннами, будет исходить из одних и тех же зон на поверхности Венеры. И наоборот, сигнал, отраженный какой-то зоной, достигнет разных антенн в разные моменты времени. Остается только сравнить все сигналы (для этого и нужны сверхточные часы), разобраться, что откуда пришло, каковы сдвиги, — и можно рисовать карту радиоотражений для поверхности планеты. Для этого нужно составить систему уравнений и решить ее.

В одной из таких работ, выполненных американскими учеными, количество уравнений в системе составило много тысяч. Тем не менее задача была решена. Так в начале 70-х годов появилась первая радиокарта. Она

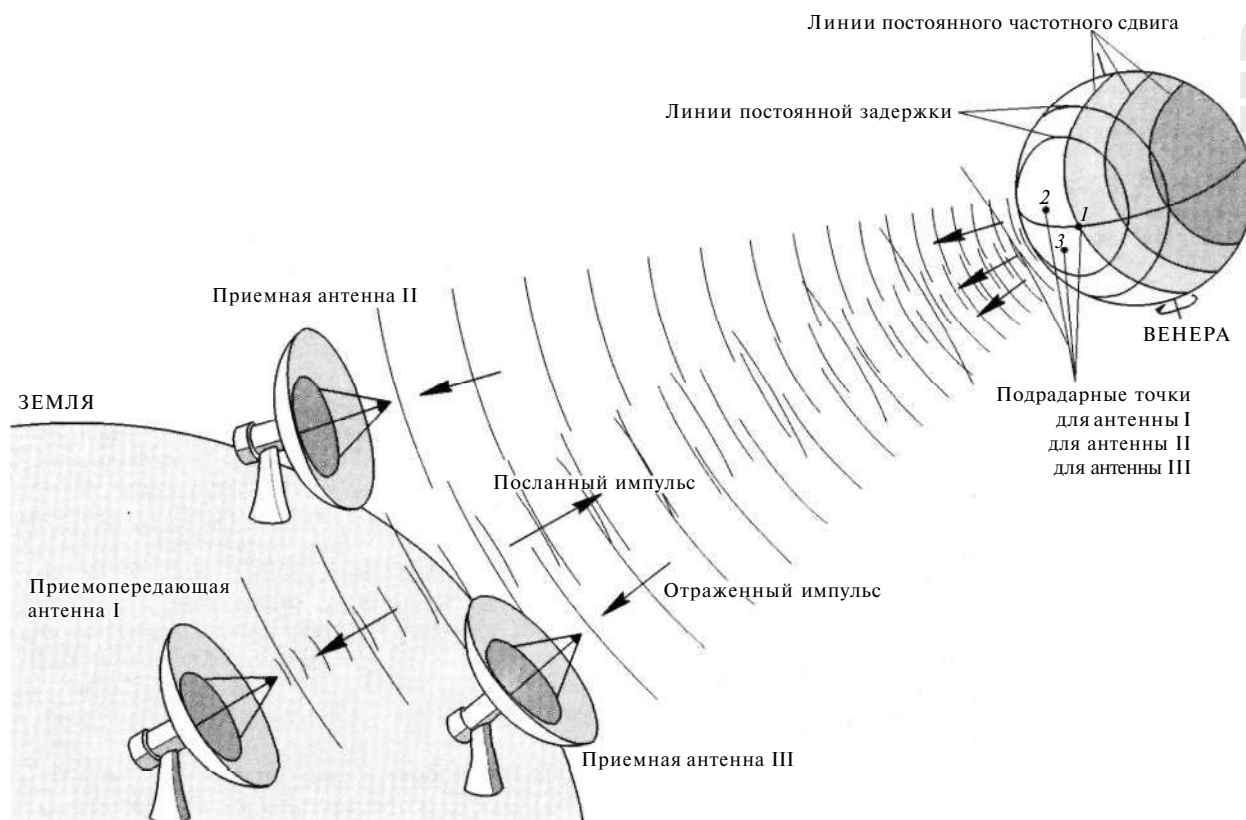


Рис. 3.23. Более сложная, чем приводилась на рис. 2.2, схема радиолокации позволяет не только найти период вращения, но и получить радиоизображение планеты

давала распределение коэффициента радиоотражения, который, в принципе, прямо не связан с темными и светлыми районами поверхности. Карта впервые позволила увидеть кое-что из того, что находится под облаками. Тогда-то две самые заметные области и получили временные названия Альфа и Бета. До 1979 г. от Альфы вели отсчет долгот. Наземные радиолокационные исследования Венеры наиболее удобно проводить в нижнем соединении (противостоянии Земли для Венеры), когда планета наиболее близка к Земле (и видна узким серпом в обычный телескоп). Наоборот, в верхнем соединении планета слишком далека от нас. Поэтому первая наземная радиолокационная карта могла охватить только одно полушарие планеты (точнее, 30% всей ее территории).

Перед бортовой радиолокацией такие ограничения не стоят. В 1978—1979 гг. с борта спутника «Пионер—Венера» была проведена радиоальтиметрия — картирование рельефа поверхности планеты. Метод этот малопроизводителен, и разрешение получилось невысоким (около 100 км, а в экваториальной области

лучше). Топографические карты были невыразительными, так как Венера оказалась равнинной планетой. Чтобы усилить выраженность рельефа, на глобусе Венеры (фото 7) равнины представлены голубым, неглубокие впадины — синим, обширные возвышенности — зеленым, горы — желтым, высочайшие вершины — красным. Глобус построен по данным альтиметрии «Пионер—Венеры»; на основе тех же данных составлена карта (фото 8), где показаны координаты объектов. Карта построена в меркаторской проекции, поэтому экваториальные районы сжаты (как земля Афродиты), а высокоширотные увеличены (как земля Иштар). Карта и глобус схематичны. Подробности появились с новым мощным инструментом космических исследований — радиолокатором бокового обзора.

Принцип его действия еще сложнее, чем у наземного интерферометра. Такие локаторы были установлены на советских «Венере-15 и -16», выведенных в 1983 г. на полярные эллиптические орбиты (с перигентром вблизи Северного полюса планеты). За время своей работы аппараты картировали за каждый виток

орбиты одну полосу шириной 150 км и длиной в четверть окружности планеты. Из таких полос, которые можно видеть, например, на рис. 3.30, и построены карты. В общей сложности было картировано 66% территории северного полушария Венеры, включая район Северного полюса (фото 9). Но прежде чем обратиться к топографии Венеры, поясним, какой изощренный инструмент представляет локатор бокового обзора.

Схема его работы показана на рис. 3.24. Аппарат движется от Северного полюса с орбитальной скоростью около 10 км/с, постоянно посылая так называемый фазомодулированный радиолуч к поверхности. Он «освещает» площадь примерно 150×50 км и принимает отраженный сигнал. Подчеркнем, что локатор сам освещает своим лучом участок поверхности. Предположим, что в пределах такого пятна есть всего две отражающие точки. По мере движения аппарата доплеровский сдвиг частоты от каждой из них будет изменяться от положительного через ноль к отрицательному, а время задержки (из-за разных расстояний), абсолютное значение сдвига и фазовые соотношения будут разными. После математической обработки можно указать, где находилась каждая из точек, связав их с мгновенным положением аппарата. Представим себе теперь, что точек много. Структура отраженного сигнала станет настолько сложной, что для расшифровки понадобится компьютер. Наконец, если отдельных точек нет, а отражает вся поверхность, как это и происходит на самом деле, размеры одиночного элемента, который еще можно выделить, будут определяться рядом параметров локатора и программой обработки.

Длина волны радиолокатора была 8 см, длина антенны 6 м, ширина 1,4 м, а высота полета аппарата во время съемки от 1000 до 2000 км. Если выполнить несложные вычисления, выяснится, что наименьшие детали, которые аппарат мог бы обнаружить на поверхности Венеры, были близки к 15 км. На самом деле разрешение достигало 1 км. Для этого применялась хитрость под названием «синтезированная антенна». Это значит, что сигналы, принятые в разных точках вдоль отрезка пути аппарата в 70 м, анализировались одновременно. В результате было достигнуто рекордное разрешение (около 1 км), которое в обычном случае потребовало бы антенны размером в 70 м.

Изложенный принцип локации обладает одной особенностью: аппарат не может разделить рельеф, находящийся справа и слева от трассы. Поэтому антенна была отклонена вбок

на 10° от вертикали. Отсюда название — «локатор бокового обзора».

Легко видеть, что успех эксперимента зависит также от математической обработки данных. Обработку можно выполнить на борту и передать на Землю уже окончательный результат или же передать всю полученную информацию на Землю и здесь провести обработку. В первом случае на борту должна иметься весьма сложная ЭВМ, во втором нужно передавать очень много информации. В случае «Венеры-15 и -16» использовались оба варианта. При построении изображения фото 9 применен первый из них, на последующих рисунках — второй; здесь достигалось высокое разрешение до 1 км. Зернистость, присущая изображениям с когерентным источником (например, лазерным), устранялась осреднением нескольких изображений одного и того же района.

Еще большее разрешение, до 120 м, было получено локацией с аппарата «Магеллан», который работал на орбите спутника Венеры с 1990 по 1994 г. На «Магеллане» также был установлен радиолокатор бокового обзора, подобный тому, что показан на рис. 3.24.

Географические достопримечательности Венеры

Воспользуемся глобусом и картой Венеры (фото 7, 8), чтобы познакомиться с планетой в целом. Если бы можно было охладить раскаленную Венеру и залить ее поверхность водой до «нулевого» уровня, т.е. до 6051,6 км по радиусу, 92% ее поверхности скрылось бы под неглубоким океаном. Над воображаемой водной поверхностью выступали бы только три массива: в северной, восточной и западной частях планеты. На фото 7, 8 самые глубокие низины показаны густым синим, а «нулевой» уровень — сине-зеленым тоном.

Рельеф Венеры характеризуется равнинными районами, горами и низменностями. По аналогии с Землей горные районы Венеры можно называть материками. Их суммарная площадь невелика. К ним относятся три большие области: земля Иштар (фото 7, слева, вблизи Северного полюса), где расположены плато Лакшми и высочайшие на Венере горы Максвелла (центр 63° с.ш., $2,5^\circ$ в.д.); крупнейший материк земля Афродиты, простирающийся в южном полушарии примерно вдоль 10-й параллели (фото 7, в середине и справа, и фото 8); область Бета (центр 30° с.ш., 283° в.д., на левом краю фото 7, слева), склоны которой известны еще по снимкам «Венеры-9 и -10». Горные районы Венеры похожи на

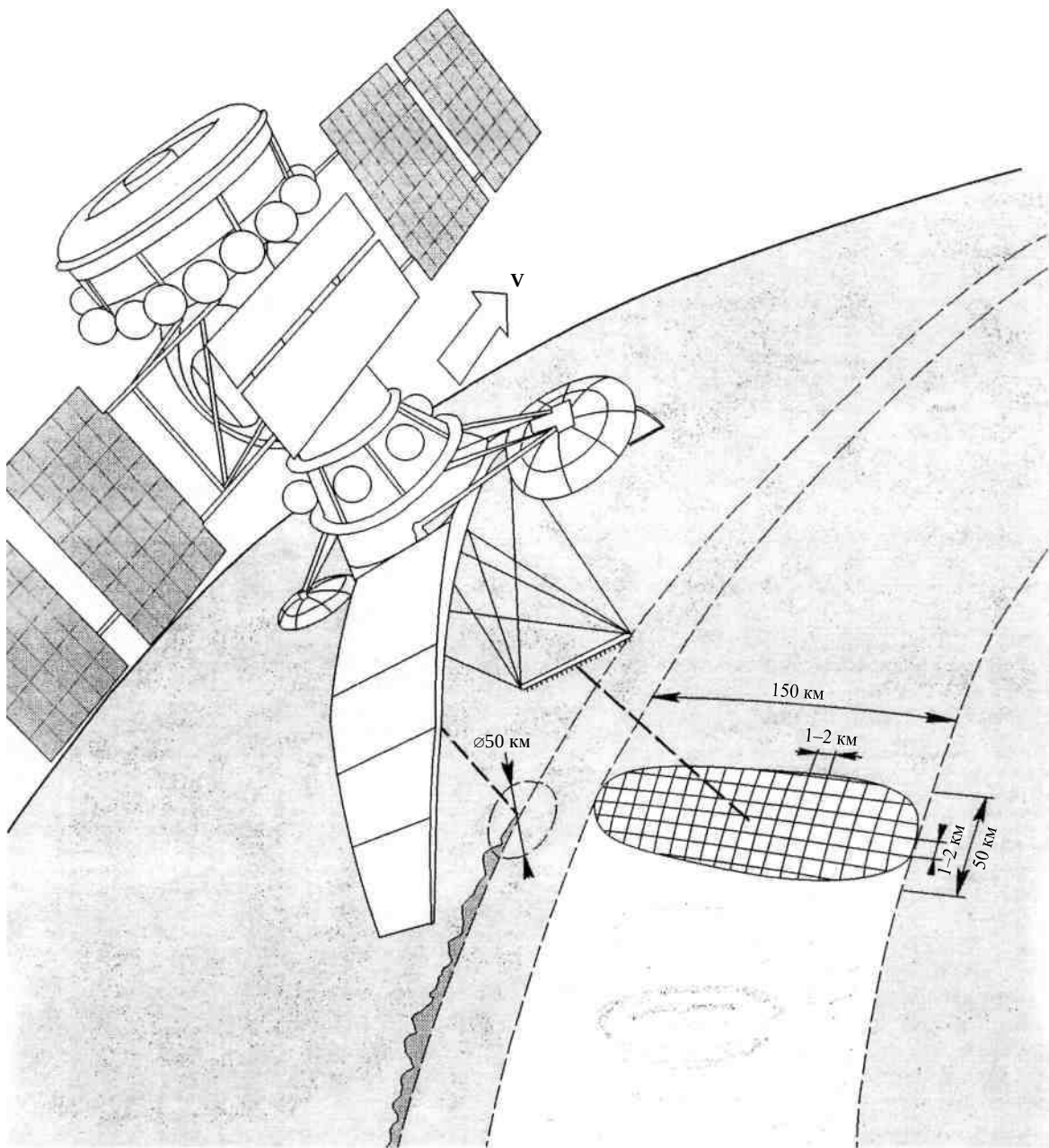


Рис. 3.24. Схема картирования поверхности Венеры с помощью радиолокатора бокового обзора («Венера-15 и -16»). Благодаря специальному методу обработки данных размеры главной антенны (в виде сектора) как бы увеличиваются в 12 раз, а разрешение на поверхности достигает 1 км. Две малые антенны относятся к радиоальтиметру (высотометру), с помощью которого получены профили высот

горные районы Земли, но занимают всего 8% поверхности планеты.

Несколько большую площадь имеют низменности: 27%. Сюда относится низменность Атланта (центр 63° с.ш., 163° в.д., фото 8, справа от земли Иштар), представляющая большую равнину диаметром 2500 км, углуб-

ленную почти на 2 км относительно среднего уровня, а также некоторые другие районы. Низменности концентрируются в двух пересекающихся поясах, очертания которых напоминают букву «Х», вытянутую на 10 тыс. км. Один дугообразный пояс, протянувшийся почти на 8000 км, окаймляет область Бета (левая

часть фото 8). Остальная поверхность находится на промежуточных высотах и представляет собой волнистые равнины, вероятно, вроде тех, что мы видели на снимках «Венеры-13». В северо-восточной части земли Афродиты, южнее низменности Аталанта, имеется ряд многочисленных горных цепей высотой 1,5—2 км, расположенных с интервалом около 1000 км.

Анализ высот рельефа указал на существенные различия свойств поверхностей Венеры и Земли: если для Земли зависимость распределения площадей по высотам имеет два четких максимума, у значений радиуса 6366 и 6371,5 км, то у Венеры лишь один максимум — у 6051,6 км (рис. 3.25). Такое различие только на 25 % можно объяснить тяжестью земных океанов, которые вызывают некоторое понижение океанического дна. Главная причина двухмодальности Земли заключается в глобальной тектонике плит.

Большая часть коры Венеры очень древняя; в пользу этого говорит сравнение кривых распределения метеоритных кратеров по размерам для Земли и Венеры. Возможно, кора Венеры отличается большей стабильностью, в то время как Земля потеряла большую часть древней коры в процессе ее переработки. По своей геологической истории Венера и Земля весьма различны.

За несколько последних десятилетий большую популярность завоевали новые представления о движениях плит, составляющих кору земного шара. Срединно-океанические хребты, трансформные разломы, зоны субдукции — все это характерные черты Земли, связанные с такими движениями. Есть ли их признаки у Венеры? Аналогов линейных срединно-океанических хребтов пока не найдено, как и не обнаружено зон субдукции — мест, где литосферные плиты сближаются, наползают друг на друга, и одна из них погружается в мантию. Тектоника плит на Венере не обнаружена, хотя найдены крупные зоны тектонических проявлений, которые возможно, объединены в заметную глобальную систему. В целом тектоническая деятельность на Венере, по-видимому, менее активна, чем на Земле, но локальные ее проявления очень заметны, например земля Иштар, о которой речь будет ниже.

В нашем коротком путешествии по Венере мы не сможем охватить всю планету, но наиболее типичные и самые интересные районы читатель сможет увидеть на снимках.

Напомним, что первые образования на Венере, которые стали известны ученым по наземной радиолокации, — Альфа и Бета. Структура Альфы (25° ю.ш., 0° в.д., центр на

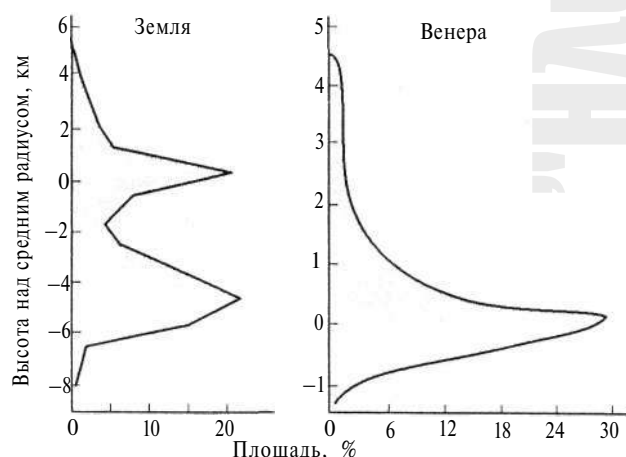


Рис. 3.25. Сравнение распределения поверхности по высотам для Венеры (кривая с одним максимумом) и Земли (два максимума)

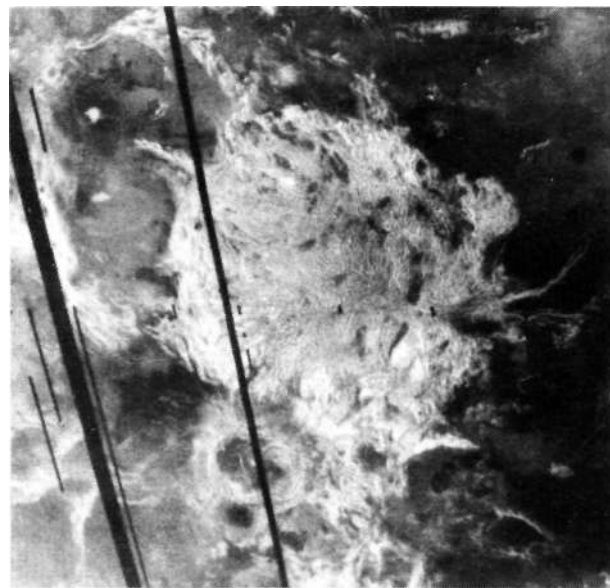


Рис. 3.26. Область Альфа, расположенная на Равнине Лавинии. Радиолокационный снимок охватывает площадь примерно 2400×2400 км. Темные полосы — отсутствие данных на момент составления снимка. Внизу — кратер Ева, от которого к востоку отсчитываются долготы на Венере. Снимок NASA

фото 7 слева и рис. 3.26), размерами около 1300 км, — волнистое плато с небольшим понижением в центре. Альфа относится к очень старой части коры Венеры.

Кстати, о названиях. Венера — единственная (если не считать Земли) планета с именем женского рода. Когда понадобились имена для карты Венеры, было решено, что всем, за одним исключением, элементам рельефа, районам и

«особым точкам» на карте планеты будут присваиваться только женские имена: исторические, поэтические, мифологические, принадлежащие народам востока и запада, севера и юга. И в этом отношении, как и в других, Венера — планета уникальная. В частности, уточнение структуры области Альфа позволило для нулевого меридиана выбрать небольшой, но заметный кратер. Какое женское имя предложили бы вы, читатель, для начала координат? Ева, конечно! Если считать Альфу и Бету также женскими именами, название «горы Максвелла», о которых речь впереди, остается единственным исключением.

Рельеф области Альфа образован, как считают специалисты, многократным и длительным процессом сжатия, создавшим сложно ориентированную складчатость поверхности. Альфа возвышается до 2,5 км над окружающей местностью (с юга это равнина Лавинии). Плато имеет сравнительно крутые склоны, в среднем 5—10°, и сильно раздробленную поверхность. За время существования Альфы, достигающее, возможно, 1 млрд лет, процессы сжатия образовали систему пересекающихся долин и гряд. Такой рельеф получил название «тессера». На рис. 3.27 крупным планом пока-

зан участок Альфы размером 125 × 150 км. Такие же тессеры встречаются в других районах планеты.

К юго-западу от Альфы, в точке 55° ю.ш., и 320° в.д. находится кратер диаметром 300 км и глубиной 1 км, для которого наиболее вероятно ударное происхождение. Ему присвоено имя Лизе Мейтнер, известного австрийского физика. В противоположную от Альфы сторону, у 15° с.ш. и 15° в.д., находится возвышенность — патера Сапфо (имя античной поэтессы), по-видимому, вулканического происхождения.

Наибольший из «континентов», или «материков», — земля Афродиты, расположенная в экваториальной области, имеет протяженность около 18 тыс. км и охватывает долготы 60—120° (фото 7,е). В широтном направлении она простирается от 10° с.ш. до 45° ю.ш. (более 5000 км), а ее восточная оконечность Атла тянется до 30° с.ш. Площадь континента по уровню 6052,2 км составляет 41 млн км², что близко к площади Африки. В сумме континенты Венеры занимают лишь 5—7% территории, в зависимости от того, по какому превышению над средним уровнем считать.

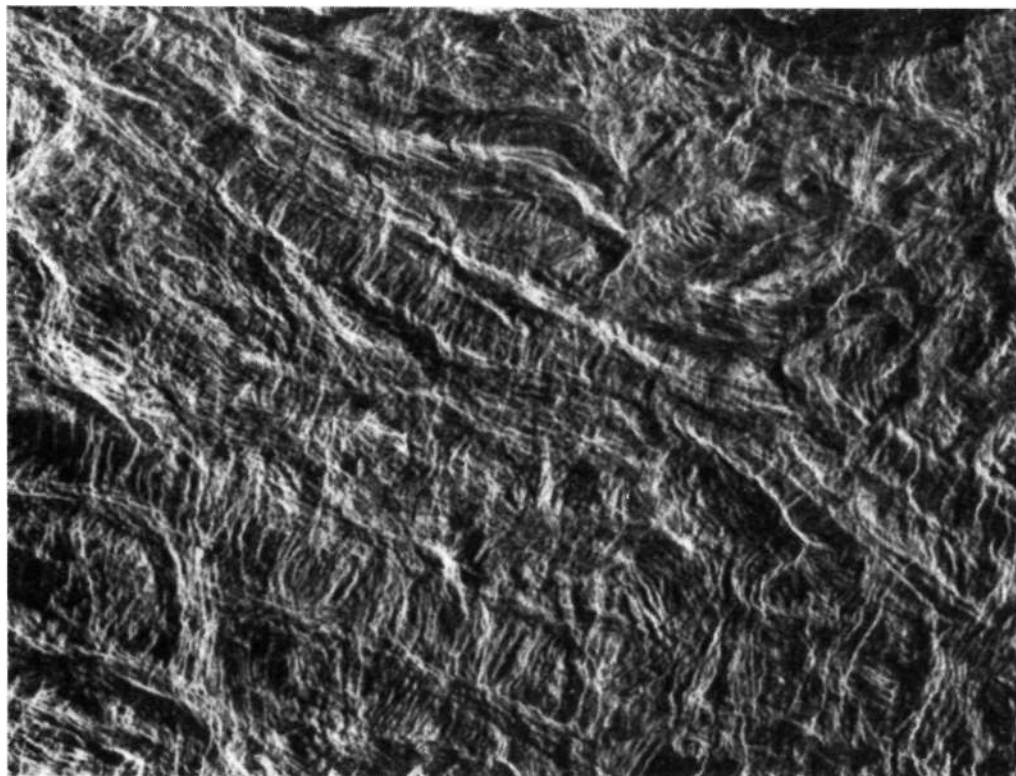


Рис. 3.27. Рельеф области Альфа на Венере (24,2° ю.ш., 1,7° в.д.). Это, вероятно, один из самых древних районов поверхности планеты. Снимок NASA

На рис. 3.28 представлен вид планеты с долготой центрального меридиана 180° (восточная часть земли Афродиты). Здесь расположено большое число ярких в радиолучах кольцевых



Рис. 3.28. Вид полушария Венеры с долготой центрального меридиана 180° . Снимок NASA

образований. Их глубина невелика, всего сотни метров. На южной окраине земли Афродиты находится необычное образование — каньон Артемиды (юго-западная часть рис. 3.28). Это что-то вроде огромного кратера-фантома диаметром около 2600 км сравнительно правильной формы, с сильно разрушенным двойным валом и ярким в радиолучах пятном в центре (34° ю.ш., 135° в.д.). Рифтовая система каньона Артемиды напоминает сильно разрушенный срединно-океанический хребет на Земле. В восточной части земли Афродиты, у 155° в.д., находится глубокая протяженная долина, каньон Дианы (рис. 3.28, левее и ниже центра).

На рис. 3.29 представлена обширная равнина Седны. Площадь, охваченная этим снимком «Венеры-15 и -16», по долготе — более 2500 км, по широте — около 2000 км. Горный район в верхней части снимка пока рассматривать не будем. По многим признакам специалисты относят центральную и южную части равнины Седны к вулканическим образованиям. Вероятно, она похожа на базальтовые равнины Марса и Луны. Непосредственный анализ состава пород, проведенный юго-западнее, у массивов Бета и Феба, указал именно на разновидность базальтов. Интересные образования можно видеть у 357 -го меридиана,

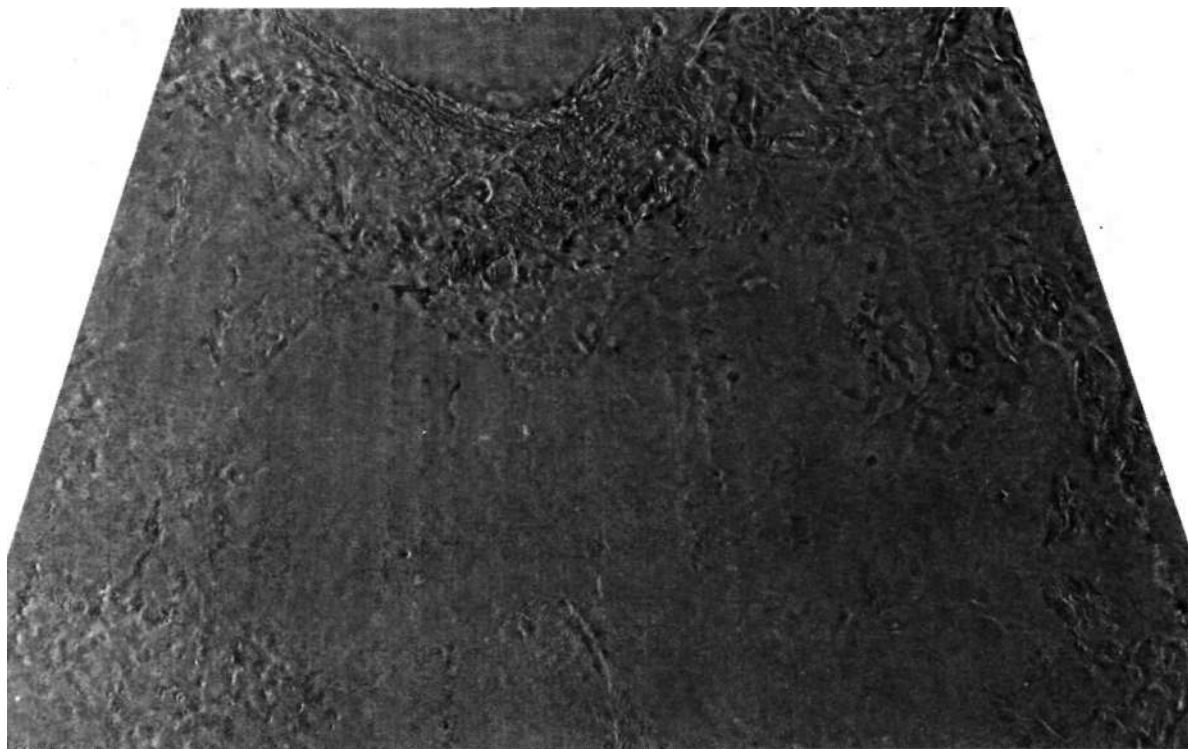


Рис. 3.29. Равнина Седны. Из работ А.Базилевского, О.Ржиги и др. по данным «Венеры-15 и -16» (Тут потеряна сетка координат. Взять координаты из рис. 3.39 и фото 8. *Прим. ред.*)

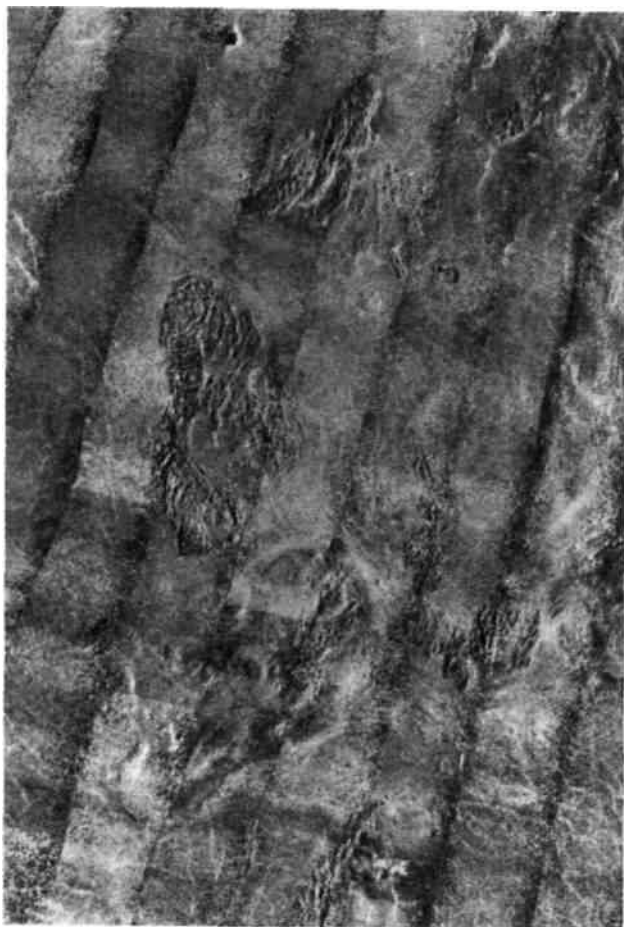


Рис. 3.30. В некоторых районах над сравнительно ровной поверхностью равнины Седны выступают останцы — своеобразные острова, оставшиеся от рельефа предшествующей эпохи. Из работ А.Базилевского, О.Ржиги и др.

между 40 и 46° с.ш. Это горные районы протяженностью 300 и 200 км, оставшиеся над залитой вулканическими продуктами равниной. Они, видимо, представляют собой останцы — остатки более раннего рельефа (рис. 3.30). Северо-западнее, у 48—52° с.ш., 350—353° в.д., находится светлый «язык» неправильной формы, который специалисты относят к древним лавовым излияниям, а точка у 51,5° с.ш., 353° в.д. может быть вулканической кальдерой. Основная часть равнины Седны — это холмистые равнины, которые читатель уже видел на наших панорамах.

«Равнины» Седны и Гиневры можно лишь условно считать плоскими. На них встречается большое разнообразие рельефа. Гряды, вытянутые с северо-запада на юго-восток и разделенные интервалами примерно в 1 км (рис. 3.31), представляют рельеф в районе 30° с.ш., 333° в.д. Размер участка 37 × 80 км.

Во многих районах Венеры встречаются кратеры несомненно метеоритного происхождения. Так, в 2000 км к западу от Альфы, на равнине Лавинии, расположена группа из трех больших ударных кратеров диаметром от 37 до 50 км. По-видимому, они имеют общее происхождение, когда большое метеоритное тело



Рис. 3.31. Странный рельеф на южной границе равнин Седны и Гиневры. Размеры участка 37 × 80 км. Снимок NASA.

распалось в атмосфере на три крупных обломка, которые с большой скоростью врезались в поверхность планеты. Высокая раздробленность материала валов кратеров увеличивает эффективность отражения радиоволн, поэтому валы кажутся светлыми. И наоборот, темный фон указывает на относительно гладкую поверхность окружающей равнины (рис. 3.32).

Метеоритные кратеры были обнаружены в самых разных районах планеты; они сравнительно равномерно распределены по поверхности. На радиолокационных снимках «Магеллана» найдено около 850 таких образований с диаметрами от 1,5 до 280 км.

Существование этих кратеров на поверхности Венеры рождает множество вопросов. Прежде всего, плотная атмосфера рассеивает импульс, которым обладает метеоритное тело. Поэтому основное число метеоритных кратеров должно было образоваться в очень отдаленную

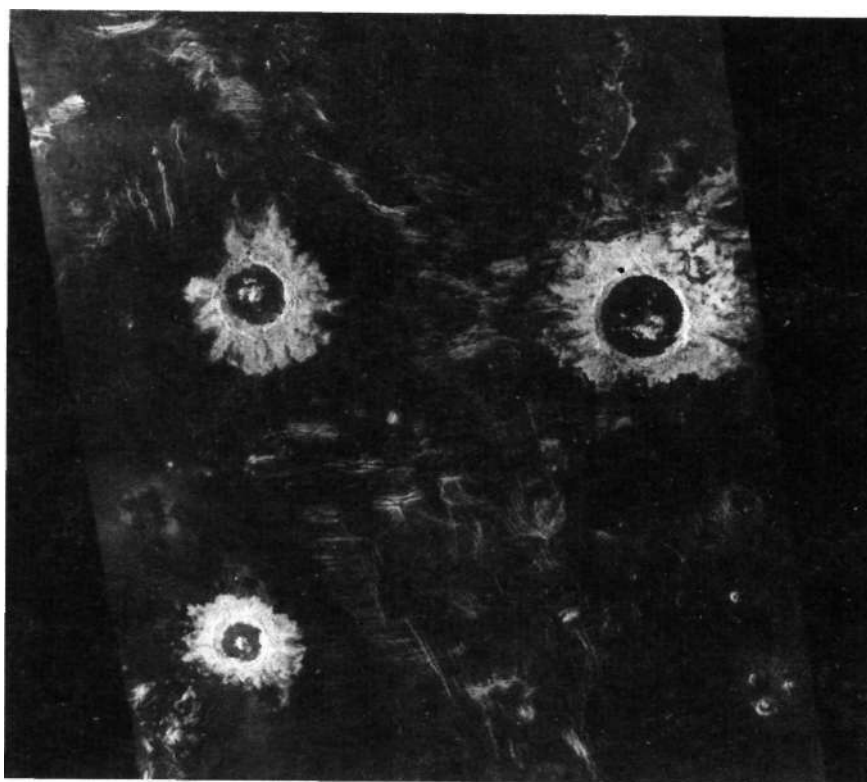


Рис. 3.32. В области Лавиния радиолокационной съемкой с аппарата «Магеллан» обнаружены три огромных метеоритных кратера, по-видимому, общего происхождения. Меньшие кратеры в нижней правой части рисунка — вулканы, размерами от 1 до 12 км. Снимок NASA

эпоху, когда масса атмосферы была значительно меньше. С другой стороны, известно, что разрушение кратеров почти отсутствует на Луне и Меркурии, а на Марсе, с его разреженной атмосферой, идет очень медленно. Зато на Земле метеоритные кратеры приходится искать, как говорят, днем с огнем: они быстро разрушаются под действием воды, ветра и изменений температуры.

Таким образом, если считать, что рельеф Венеры сохранился с очень давних времен, на ней должны существовать особые условия. Впрочем, недавно было показано, что очень большие метеоритные тела с массой $2 \cdot 10^{11}$ г и больше могут пробить атмосферу Венеры даже теперь. Но таких тел очень мало. По результатам, полученным с «Магеллана», было установлено, что метеоритные кратеры Венеры похожи на молодые ударные кратеры на Земле, но гораздо старше; они отражают события последних 500 млн лет. Многие удары сопровождались обильными лавовыми излияниями; таков кратер Изабелла (рис. 3.33). Следы намного более ранних событий на поверхности планеты не сохранились. Во всяком случае

похоже, что полмиллиарда лет назад усиление вулканизма на Венере значительно обновило ее поверхность. Ныне вулканы планеты выбрасывают около $0,5 \text{ км}^3$ лавы в год, что близко к таким же данным для Земли.

Данные «Магеллана» позволили уверенно разделить ударные (метеоритные) и вулканические формы. Еще недавно вокруг возможного вулканизма Венеры велись ожесточенные научные дискуссии. Некоторые сугубо научные статьи начинались странными заголовками, вроде «Живая или мертвая?», а их авторы рьяно доказывали, что Венера — мертвая (застывшая и лишенная вулканизма) планета.

Вулканизм Венеры сейчас уже не гипотеза, а установленный научный факт. Вулканы планеты — это чаще всего сравнительно небольшие образования, обычно около 20 км в диаметре, хотя имеются и куда большие объекты. Размеры более 150 вулканических объектов превышают 100 км, а общее их число больше 1600. Формы многих из них настолько необычны, что для них пришлось вводить специальную классификацию и особые названия. Среди них «короны» (концентрические

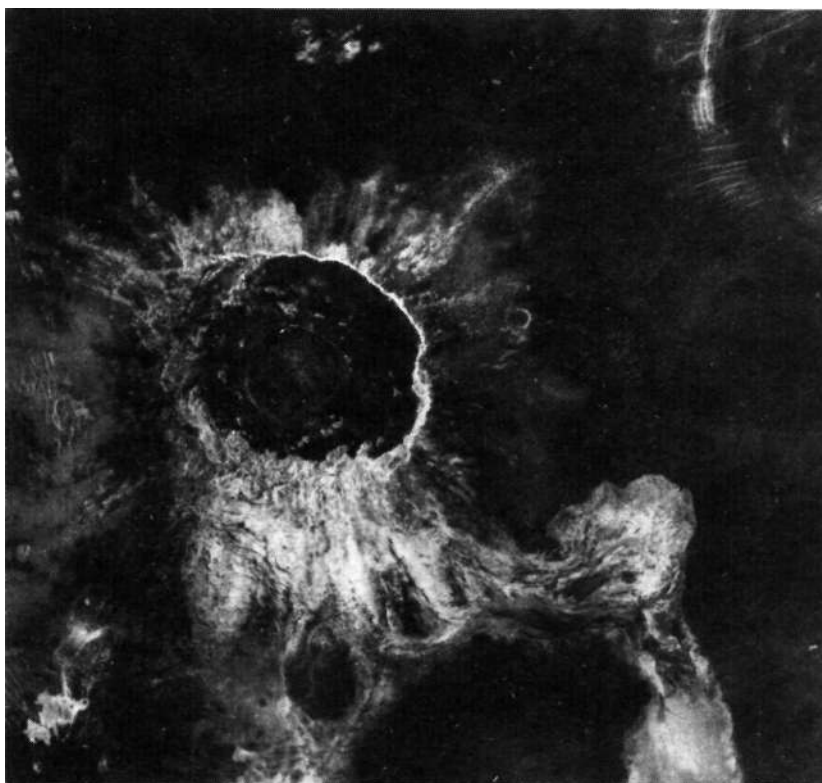


Рис. 3.33. Кратер Изабелла с потоками продуктов извержений. Съемкой с аппарата «Магеллан» в 1991 и 1992 гг. на поверхности Венеры было обнаружено огромное количество подобных свидетельств вулканической деятельности. И хотя пока еще технически трудно установить, что эти извержения происходят и сейчас, было бы очень странно, если бы они почему-то вдруг прекратились в наши дни. Снимок NASA

валы), «арахноиды» (радиальные структуры с концентрическими валами; от греческого «арахнэс» — паук), извилистые лавовые каналы, достигающие в длину 1000 км и более, и другие. Все данные указывают на присутствие огромных резервуаров лавы под поверхностью планеты. Специалисты относят вулканизм Венеры к восходящим мантийным потокам и системе «горячих пятен». В отличие от земного он распределен практически глобально (в то время, как на Земле концентрируется вдоль границ плит). Несколько повышена плотность вулканов в районах Бета—Атла—Темис, охватывающих вблизи экватора около 20% территории планеты. Ученые предполагают, что здесь сосредоточен наиболее интенсивный современный вулканизм.

Среди разнообразных форм можно встретить очень многочисленные конусы или купола (например, юго-западная часть рис. 3.34). Такая или сходная форма присуща наибольшему числу вулканов Венеры. Внимание исследователей привлекли необычные, совершенно круглые образования, с плоской, а иногда проваленной вершущкой и очень крутыми склонами.

Семь таких образований с диаметрами, в среднем, около 25 км вытянуты в линию (рис. 3.34) — вероятно, вдоль глубокой трещины, сквозь которую поднималась магма. Они расположены у восточного края Альфы, который виден на том же рисунке, и напоминают толстые блины с крутыми краями; так их и назвали (pancake domes). Предполагается, что они образовались при излияниях очень вязкой лавы, которая медленно растекалась и застыла. Один из самых больших «блинов» диаметром 65 км и другой, поменьше, читатель может увидеть в объемном изображении, если у него есть стереоскоп: рис. 3.35 представляет стереопару снимков этого вулканического образования. Крутые склоны здесь видны особенно четко.

Читатель помнит, что подоблачная часть тропосферы Венеры почти во всех измерениях была незапыленной. Вулканы же Земли во время извержений часто выбрасывают огромные тучи пыли, которая покрывает толстым слоем окрестные районы. Извержения такого типа называются пирокластическими. Более редкий — взрывной вулканизм в этом смысле еще

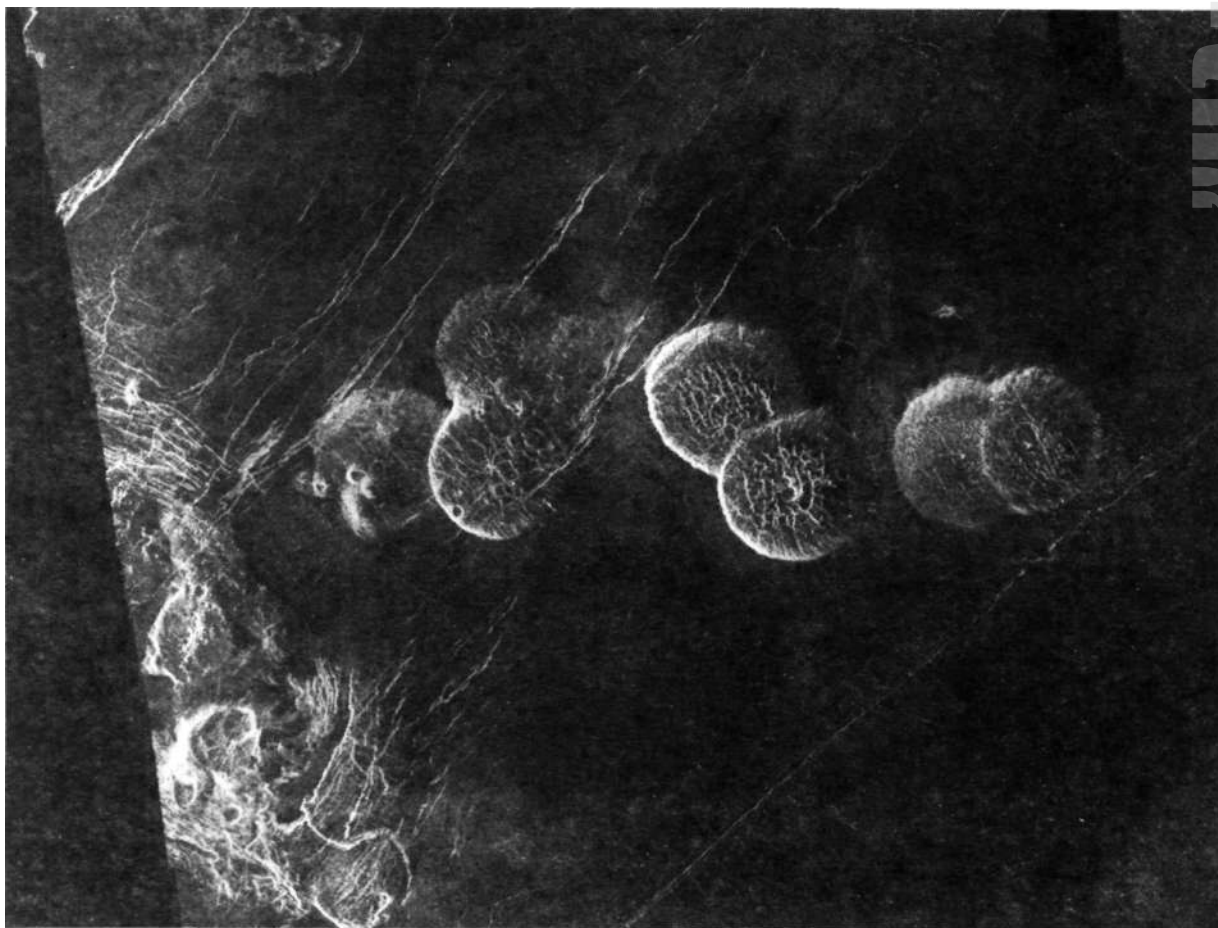


Рис. 3.34. Семь круглых холмов диаметром около 25 км и высотой немного меньше километра, расположенные в точке 30° ю.ш., 11,8° в.д. на равнине вблизи области Альфа, были определены как очень толстые и медленно растекающиеся лавовые потоки. Подобные образования известны и на Земле. Снимок NASA

опаснее. Что же касается Венеры, то пирокластические извержения могли бы сослужить ученым неплохую службу. Дело в том, что подробности динамики атмосферы планеты пока еще далеко не ясны. Кроме суперротации атмосферы, о чем уже рассказывалось, существует ее циркуляция в меридиональном направлении, описываемая в простейшем случае так называемой ячейкой Хэдли. Упрощая, можно сказать, что массы газа поднимаются в экваториальной области, перемещаются к полюсам и опускаются в районе полярных воротников. Эти движения накладываются на суперротацию. Естественно, цепь должна где-то замыкаться; поэтому можно ожидать, что у поверхности должен дуть ветер, переносящий газ в обратном направлении. Об этом косвенно говорит постоянство температур на одном и том же уровне в разных широтных зонах.

Напомним, что динамика атмосферы на уровне облачного слоя исследовалась с помощью аэростатов. А у поверхности для определения направлений господствующих ветров пригодились бы пирокластические извержения, поскольку направление последних видно по следам отложений на грунте материала, выбрасываемого вулканом. И такие следы на поверхности планеты все же удалось найти, причем не только от вулканов.

На рис. 3.36 можно видеть светлый «хвост», направленный к югу от небольшого кратера, с диаметром 3 км по основанию (ширина полосы изображения 40 км). Предполагается, что хвост — это отложения грубого материала, выброшенного в процессе взрывного извержения. Отложения мелкой пыли с помощью аппарата «Магеллан» было бы найти значительно труднее, так как длина волны его радиолокатора достаточно велика. Хвост тянется при-

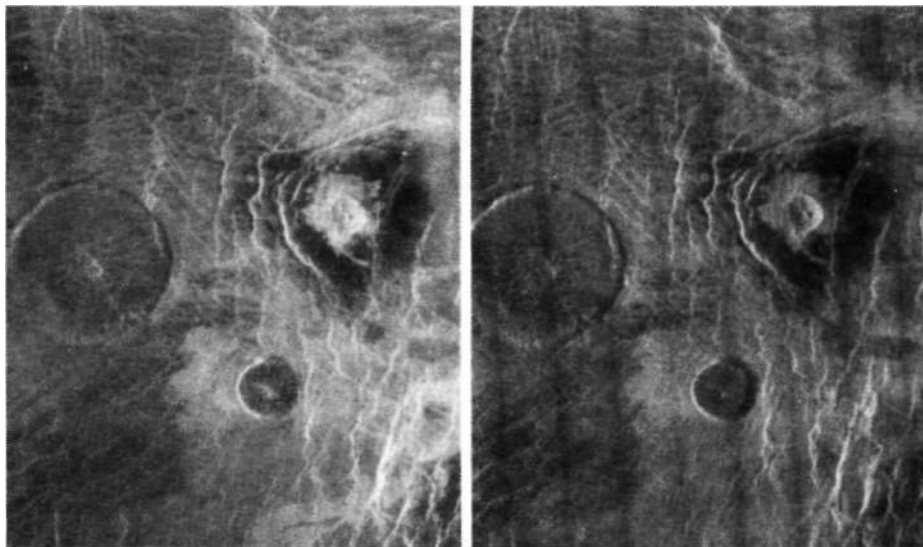


Рис. 3.35. Два изображения одного из самых крупных вулканических «блинов» с диаметром 65 км образуют стереопару. Если читатель использует стереоскоп, он сможет увидеть объемное изображение. Снимок NASA

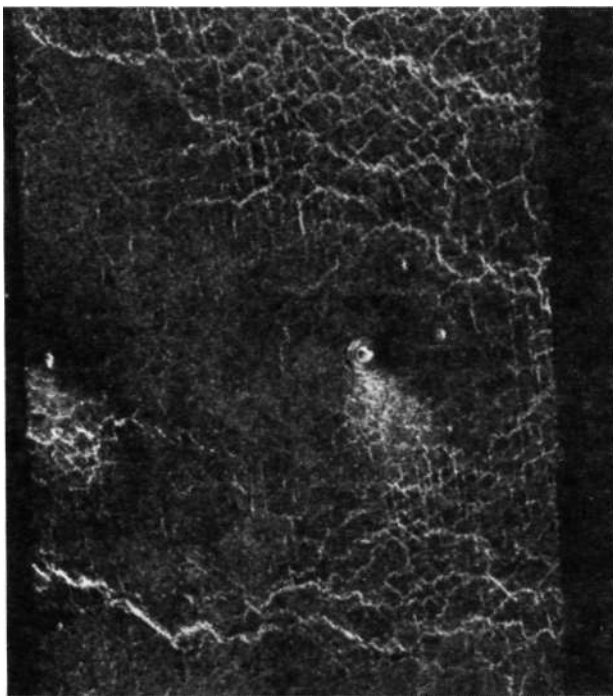


Рис. 3.36. «Хвосты» за некоторыми вулканическими объектами, вероятно, представляют собой отложения из взрывных вулканических выбросов на поверхности планеты. Следы отложений видны на расстоянии до 15 км от кратера поперечником около 3 км, направлены примерно к югу и, возможно, указывают направление господствующих ветров. Горы Ушас, ширина полосы 40 км. Снимок NASA

мерно на 10 км (немного отклоняясь к востоку), но прослеживается и дальше, где слой отложений становится тонким. По-видимому,

подобный же объект находится слева, на краю рисунка, хотя сам кратер не виден. Найдены и другие образования с «хвостами».

Однако ставить точку в истории о хвостах рано. «Господь Бог коварен, но не злонамерен», — сказал однажды А.Эйнштейн, имея в виду сложные природные явления и их конечную постижимость. Вскоре на снимках «Магеллана» были обнаружены другие объекты с «хвостами», но ориентированными не в широтном, а в долготном направлении (рис. 3.37), к западу. Их оказалось много (более 50), причем значительная их часть обведена с востока широкой дугой в виде параболы. Размеры парабол вблизи кратера — от нескольких сотен до 2000 км. Чаше дуга темная, иногда светлая. Вид самих кратеров не оставлял сомнений в их ударном происхождении (рис. 3.38). Оказалось, что дуги — сравнительно молодые образования; они нигде не перекрываются другими элементами рельефа, причем параболы всегда открыты к западу, а их апекс смещен к востоку относительно ударного кратера. Дальнейшими исследованиями был установлен своеобразный механизм образования дуг. При ударе достаточно массивного метеоритного тела о поверхность фонтан обломков, пыли и газа выбрасывается на огромную высоту, где их подхватывает суперротирующая атмосфера. Падая обратно, обломки, камешки, пыль встречают сопротивление атмосферы, которое зависит как от размера частиц, так и от высоты, от которой в свою очередь зависит плотность газа. На падение с высоты 50 км обломкам размерами в 1–2 см требуется 2 ч, а пыли — гораздо

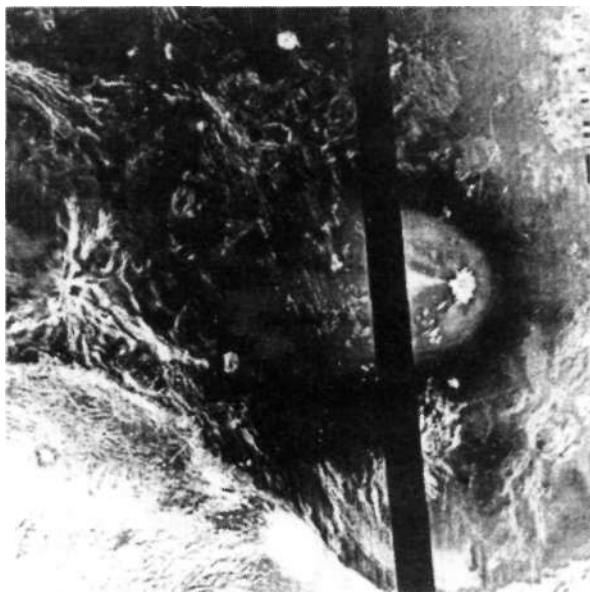


Рис. 3.37. Метеоритный кратер со светлыми отложениями и темной параболической дугой. Из работы Д.Кемпбелла и др.



Рис. 3.38. Метеоритный кратер, подобный рис. 3.37 с широкой темной параболической дугой. Из работы Д.Кемпбелла и др.

больше. Накладывающееся движение атмосферы приводит к тому, что выпадающие продукты выбросов строго «фильтруются» по размерам и положению и в результате образуют параболический пояс, открытый к западу. Результаты модельных расчетов дали картину распределения выпадения обломков, во всех деталях повторяющую снимки. Расчеты показали, что существенное влияние на вид парабол оказывают масса, скорость и направление движения метеоритного тела, а также ряд других обстоятельств. Обломки должны взлетать на высоту до 60 км, а толщина слоя выпавших обломков может достигать 2 м и более.

Но вернемся к нашей экскурсии по планете.

С севера к равнине Седны примыкает второй по величине материк Венеры — земля Иштар. Ее площадь около 8,5 млн км (примерно площадь Австралии). В широтном направлении земля Иштар тянется на 13° (2500 км), в долготном — до 8000 км, от 300 до 80° в.д.

Земля Иштар — своеобразный геоморфологический заповедник, объединяющий совершенно несходные элементы рельефа: обширное высокогорное плато Лакшми (рис. 3.39) вулканического происхождения, горы Максвелла, примыкающие к нему с востока, и расположенный на восточной оконечности материка район особого рельефа.

Плато Лакшми расположено на высоте 3—4 км (2—3 км над окружающим районом).

Оно вдвое больше земного Тибета. На его поверхности можно видеть несколько крупных вулканических кальдер. Наиболее крупные — это Сакаджавейя (64,5° с.ш., 336° в.д.) и Коллет (66° с.ш., 323° в.д.) размерами около 100 и 160 км. По ряду признаков эти плоскодонные кальдеры близки к щитовым вулканам (вулканы с малой крутизной склонов, текучая лава которых растекается на большие расстояния). Результаты миссии «Магеллан» подтверждают такую классификацию. Вероятно, толщина лавового покрова плато не везде велика; на периферии (72° с.ш., 328° с.ш.) виден объект, который может быть останцем более раннего рельефа.

На рис. 3.40 Коллет — центр вулканических излияний — показана более крупным планом. Здесь же видны фрагменты горного обрамления плато Лакшми: горы Акны в левой части рисунка и горы Фрейи в его верхней части. Они поднимаются до 3,5 км над уровнем плато, причем крутизна внешних склонов гор в несколько раз меньше, чем внутренних, где усредненная крутизна достигает 6—12°. Горы Акны и Фрейи относятся к складчатым образованиям, причем образование гор и плато связаны между собой. С юга плато открывается уступом Весты (рис. 3.41) — понижением, в отличие от его северной и западной границ. Уступ Весты — северная часть района, показанного также на рис. 3.29, ограниченного с юга уступом Ут, с общим понижением в 3 км

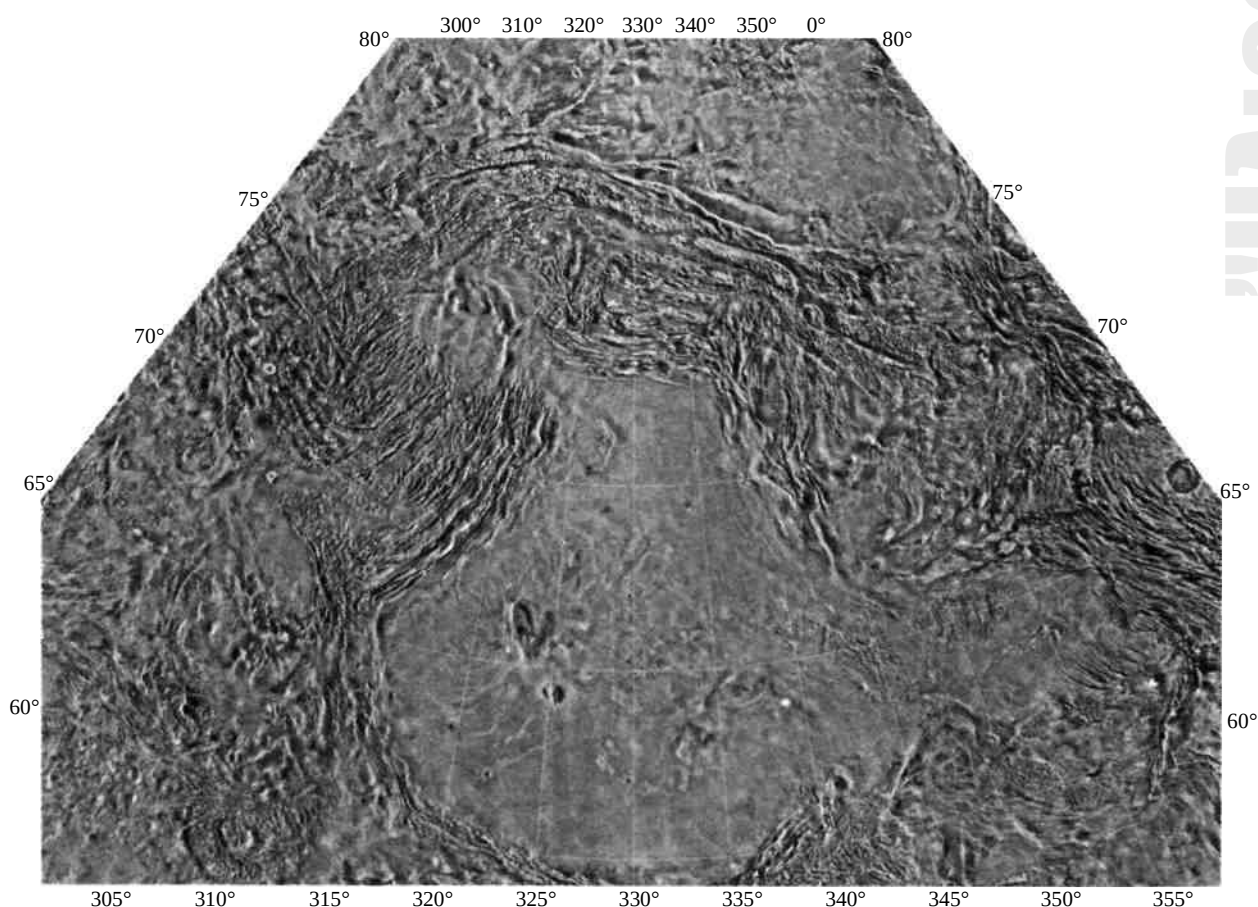


Рис. 3.39. Общий вид плато Лакшми. Масштаб: 1 см $\approx$ 100 км. Из работ А. Базилевского, О. Ржиги и др.

и более. Благодаря наклонному падению луча радиолокатора кажется, что рельеф освещен косыми лучами Солнца.

Рельеф горных районов земли Иштар чрезвычайно сложен. В качестве примера на рис. 3.42 приведен небольшой фрагмент гор Фрейи (центральная часть рис. 3.39), координаты 72° с.ш., 342° в.д. Рельеф представляет сильно разрушенный купол размерами около 100 км. Разрушение происходило, по-видимому, под действием растягивающих усилий, хотя в целом складчатая природа гор Фрейи скорее говорит о процессах сжатия.

Ученые пока не пришли к общему мнению о тектонических процессах образования земли Иштар, другая достопримечательность которой — горы Максвелла, примыкающие к плато Лакшми с востока. (Имя Джеймса Максвелла было предложено для высочайших гор Венеры в 1970 г., до принятия конвенции о женских именах, и отражало роль радиофизики в исследованиях Венеры.)

Горы Максвелла, показанные на рис. 3.43, находятся в центральной части Земли Иштар. На западе можно видеть выступающий язык плато Лакшми (сравните с рис. 3.39, где кратер патера Клеопатры виден на правом срезе снимка). Центральная часть горного массива находится на уровне 7 км над плато, причем крутизна склона с западной стороны очень велика (рис. 3.44); даже усредненная по радиоизмерениям она достигает 18° . Во многих отношениях горы Максвелла напоминают горы Акны и Фрейи: такая же складчатость рельефа с типичной шириной складок 10—20 км. Высочайшая часть гор находится в 50 км от их подножья со стороны плато, а с восточной стороны плавное понижение достигает уровня плато только на расстоянии 400 км от вершины. Вершина массива находится на уровне 11 км над средней поверхностью 6051,6 км, вблизи нулевого меридиана (63° с.ш., $2,5^\circ$ в.д.). Кратер патера Клеопатры с диаметром внешнего вала 100 км находится на 300 км к



Рис. 3.40. Горное обрамление плато Лакшми: горы Фрейи (вверху) и горы Акны (слева). Горы Фрейи продолжаютс и к востоку, за пределами снимка. Из работ А.Базилевского, О.Ржиги и др.

северо-востоку, в точке с координатами 66° с.ш., 10° в.д. и на 5 км ниже вершины. Уже из кривой альтиметрии (рис. 3.45) видна сложная форма кратера. Внутри большого кратера находится еще один, внутренний, диаметром 50 км и глубиной 1 км относительно дна внешнего. Общая их глубина 2,5 км.

Какова природа этого кратера? Если он метеоритный, то как «сумел» метеорит, причем очень большой, угодить почти точно в высочайшую вершину? Этому противоречит и несомненная связь рельефа с удаленностью от кратера (рис. 3.44). Если же это вулканическая кальдера, то почему она находится в стороне от вершины? Противники вулканической гипотезы также указывают на отсутствие радиальных лавовых потоков, но оказалось, что такой же вид имеет вулкан Пакка в Кении.

Наиболее подробное изображение этого странного образования было получено с по-

мощью аппарата «Магеллан» (рис. 3.46). Оно позволило установить, что патера Клеопатры действительно представляет собой неразрушенный ударный кратер гигантских размеров. На его северо-восточном склоне виден прорыв вала, через который лава вытекала и заливала всю восточную часть района. Излияние лавы могло быть следствием вскрытия ее резервуаров при ударе метеоритного тела. Возможно также, что при ударе расплавились горные породы, что

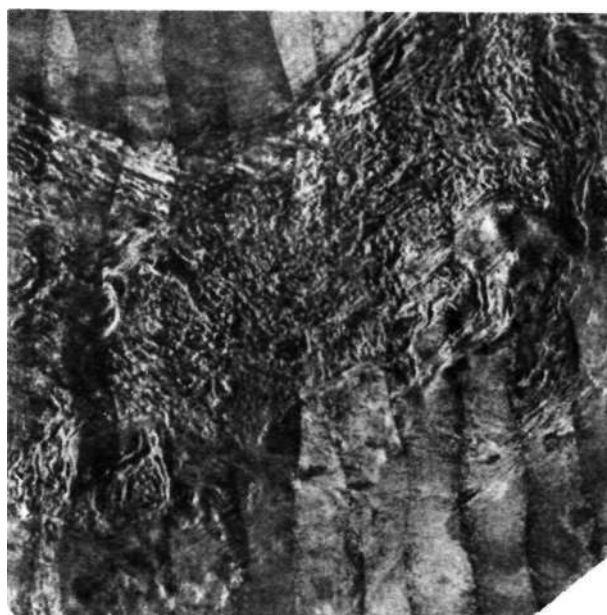


Рис. 3.41. Уступ Весты и уступ Ут (в нижней части рисунка). Из работ А.Базилевского, О.Ржиги и др.

вызвало извержение. Во всяком случае, альтиметрические измерения показывают, что ныне кратер пустой.

Еще до «Магеллана» рельеф района был исследован с помощью наземной радиолокации (рис. 3.47). Здесь тоже хорошо видна двойная структура паты Клеопатры. Из-за высокой широты гор Максвелла (это примерно широта Архангельска) локация этого района затруднена. Напомним, что ось Венеры почти перпендикулярна к плоскости орбиты (наклонение $2,6^\circ$), поэтому радиовидимость поверхности практически не имеет сезонных изменений. При локации наземная станция находилась всего в $25\text{--}27^\circ$ над горизонтом плато Лакшми, которое на рис. 3.47 выглядит почти черным. Сигнал возвращался только от сильно рассеивающего района гор Максвелла.

Ученые полагают, что тектоническая активность района земли Иштар относится к прошлому. Несмотря на трудности возраст плато



Рис. 3.42. Небольшой участок восточного вала плато Лакшми — гор Фрейи. Сильно разрушенный купол. Площадь 125×125 км, координаты 72° с.ш., 342° в.д. Снимок NASA

Лакшми и прилегающих районов был оценен, и оценка составила 500—1000 млн лет. Это подтверждает, что метеоритные кратеры на Венере сохраняются до 500 млн лет, в то время как на Земле они разрушаются за несколько миллионов лет.

Перенесемся теперь на 4000 км к юго-западу, где находится область Бета. Ее изображение (рис. 3.48) также получено наземными радиометодами. Здесь показано распределение значений коэффициента радиоотражения, который зависит как от физических свойств грунта, так и от фактуры поверхности. Неровности, сравнимые с длиной волны, вызывают повышение отражательной способности.

Размеры показанного участка близки к 1000 км. Весь массив Бета состоит из двух сходных по размерам частей, показанных здесь горы Реи (вверху) и горы Тейи (внизу); они видны как темные пятна. Специалисты указывают, что с большой вероятностью можно считать Бету огромным щитовым вулканом. Лучи, которые отходят в стороны, — это, вероятно, следы лавовых потоков, простирающихся на большие расстояния. Однако тяну-

щаяся вниз светлая полоса — это, скорее всего, разлом поверхности. Черное пятно на светлом фоне горы Тейи, — по-видимому, вулканическая кальдера на вершине массива. Высота массива Бета достигает 4—5 км над уровнем, соответствующим среднему радиусу планеты (6051,6 км). Исходя из видимых разрушений, специалисты считают гору Реи старым образованием, а гору Тейи более молодым. Некоторые даже склонны подозревать существование современного вулканизма именно в районе Беты, для чего есть некоторые основания.

По-видимому, литосфера у Венеры устроена проще, чем у Земли; очень небольшие положительные аномалии силы тяжести отмечены над возвышенностями, отрицательные — над низменностями. Именно с анализом гравитационных аномалий и связан поиск молодых вулканов на Венере. Среди них могут быть и действующие. Вулканическое происхождение области Бета подтверждается еще и тем, что над нею зарегистрировано значительное возмущение поля, достигающее 60 мгал ($1 \text{ гал} = 1/980$ ускорения свободного падения на Земле). На Земле подобные аномалии встреча-

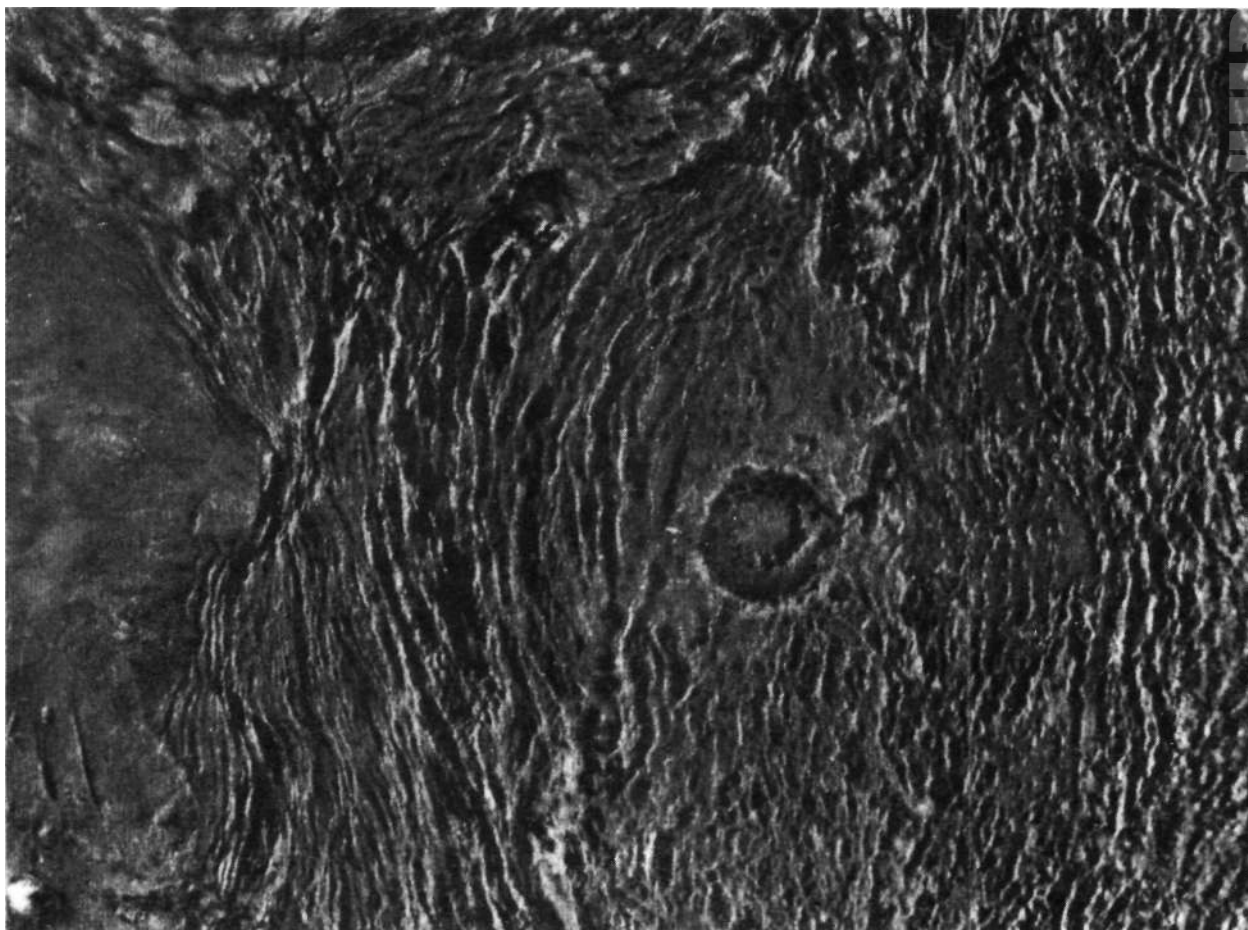


Рис. 3.43. Горы Максвелла — высочайшая вершина Венеры. На восточном склоне массива находится большой метеоритный кратер — патера Клеопатры

ются над молодыми (но не обязательно действующими) вулканами.

Далеко к югу от Беты тянется двойной хребет (его начало видно на рис. 3.48). Вид восточного склона Беты нам известен: здесь опустились «Венера-9» и «Венера-10». И хотя радиолокация дает и для этого района умеренные оценки крутизны склонов, панорама с «Венеры-9» указывает на довольно крутой откос — до 30° .

Разрешение на снимках рис. 3.47, 3.48, полученных без помощи космических средств, достигает 10 км. Таким образом, радиолокационные изображения благодаря использованию изоширенной наземной техники позволили осуществить то, о чем так долго мечтали астрономы: увидеть поверхность Венеры.

Несколько слов о северном полярном районе, вид которого приводится на фото 9. Через Северный полюс планеты проходит невысокий горный хребет — гряда Денницы, продолжа-

ющийся двумя отрогами к югу вдоль долготы 210° в.д. (верхняя часть рисунка). На широте $80\text{—}82^\circ$ с.ш. и долготе 320° в.д. находятся северные отроги горного рельефа Земли Иштар. Примерно у параллели 84° с.ш. и у 75 и 285° в.д. расположены крупные метеоритные кратеры.

Стоит упомянуть об одном интересном результате сопоставления рельефа южного полушария с данными о коэффициенте радиоотражения. Несколько севернее кратера Лизе Мейтнер расположены две протяженные низменности размерами около 700 км. Радиоальbedo этих низменностей очень низкое и, насколько можно судить, однородное, похожее на отражение от зеркально-гладкой поверхности. Один из авторов карты рельефа сказал: «Я не могу назвать их замерзшими прудами, но мы видим районы, которые очень гладкие». Можно было бы пойти дальше и высказать другое предположение: а не озера ли это? Если

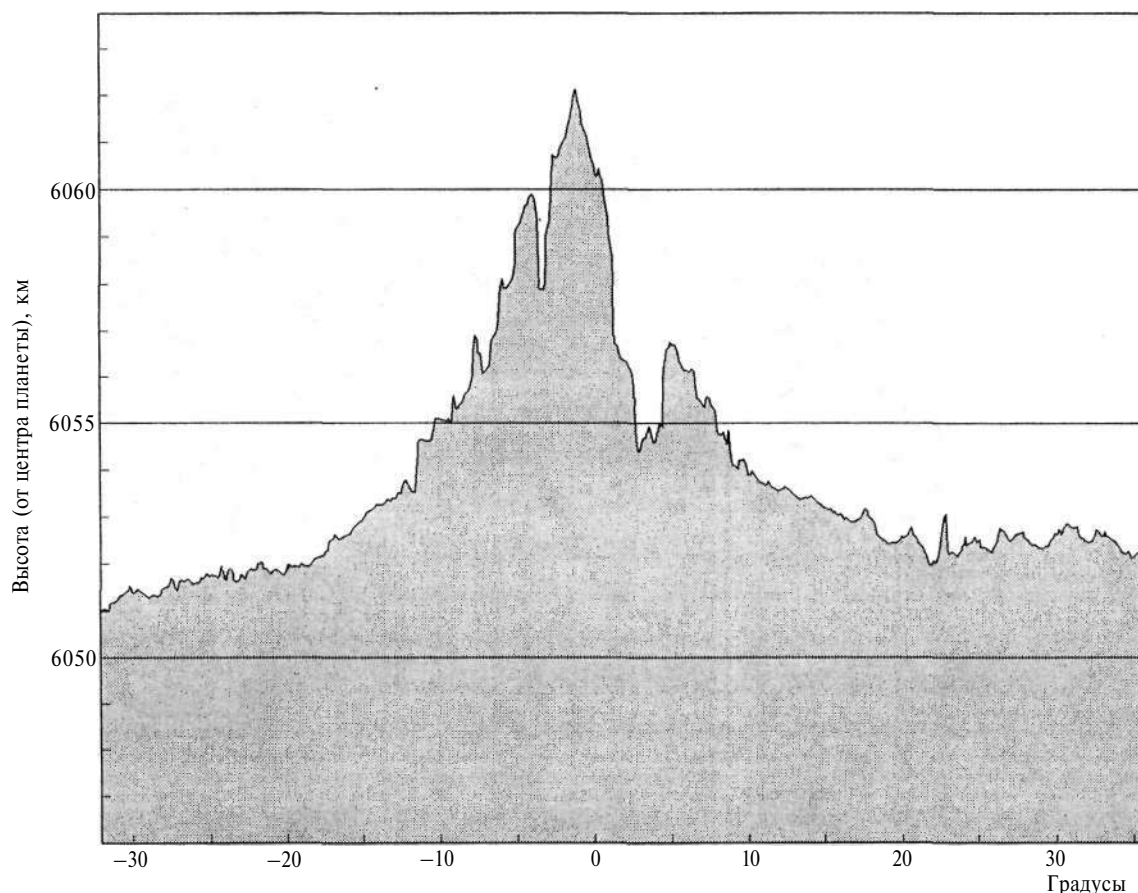


Рис. 3.44. Рельеф гор Максвелла по данным радиоальтиметрии «Венеры-16». Кратер патера Клеопатры находится на восточном склоне (провал справа от наивысшей точки). Из работ А.Базилевского, О.Ржиги и др.

так, их поверхность действительно должна заметно отличаться от окружающего рельефа и быть гладкой, во всяком случае в масштабе радиоволн. Однако чем могут быть заполнены озерные впадины на Венере при температуре 460°C ? Для этого годятся только легкоплавкие соли (так как легкоплавкие металлы химически активны и в атмосфере углекислого газа сгорают). Важно только, чтобы давление насыщенного пара для них было низким и испарение шло медленно. Более вероятно, впрочем, что это затвердевшие продукты извержений.

Парадокс устойчивости рельефа

По-видимому, специалистам понадобится немало времени, чтобы разобраться в том, что есть что на Венере. Само по себе существование на ее поверхности высоких гор еще недавно казалось сомнительным. В самом деле, материал, из которого сложена кора Венеры, по составу близок к базальту. Об этом говорят как измерения аппаратов серии «Венера», так и заключения по анализу рельефа: предпола-

гается, что участки коры планеты, не имеющие метеоритных кратеров, сложены более «молодыми» базальтами. Если исходить из принципа изостазии, то высокие горы должны плавать на более плотной мантии за счет корней из материала относительно малой плотности, например толстого слоя базальта. (Так устроены горы Земли.) Часто для наглядности авторы приводят здесь аналогию с плавающим айсбергом (рис. 3.49). Однако в случае Венеры температура поверхности (460°C) близка к температуре на глубине примерно 15 км в земной коре (на Земле это около раздела Мохоровичича). А на уровне нижней части корней горных массивов на Венере, если градиент температур там такой же, как на Земле, базальт должен размягчаться. Следовательно, высокие горы за непродолжительное время должны, казалось бы, «утонуть» в литосфере планеты. Но этого, как видим, не происходит. Как объяснить это чудо?

С другой стороны, у Венеры нет глобальных проявлений тектоники, что также требует

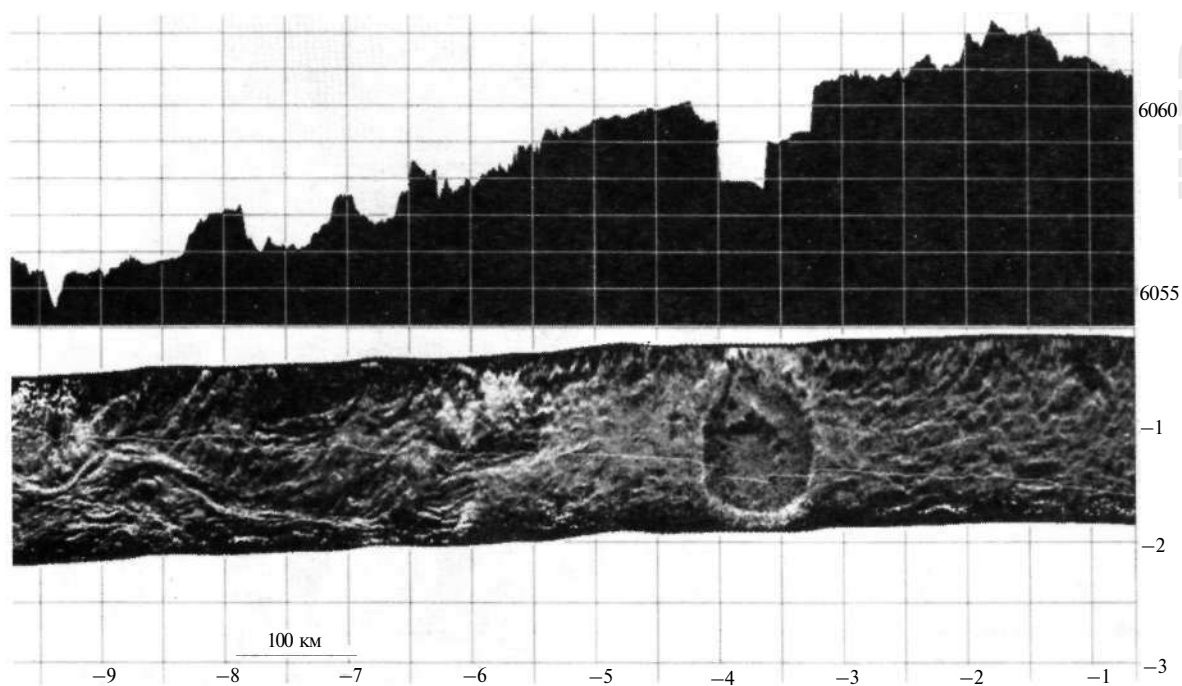


Рис. 3.45. Высотный разрез через патеру Клеопатры указывает на глубину кратера более 2,5 км («Венера-16»). Из работ А.Базилевского, О.Ржиги и др.



Рис. 3.46. Наиболее подробные сведения о кратере патера Клеопатры дала радиолокационная съемка с аппарата «Магеллан» в 1991 г. Тем не менее, природа этого образования остается не вполне понятной

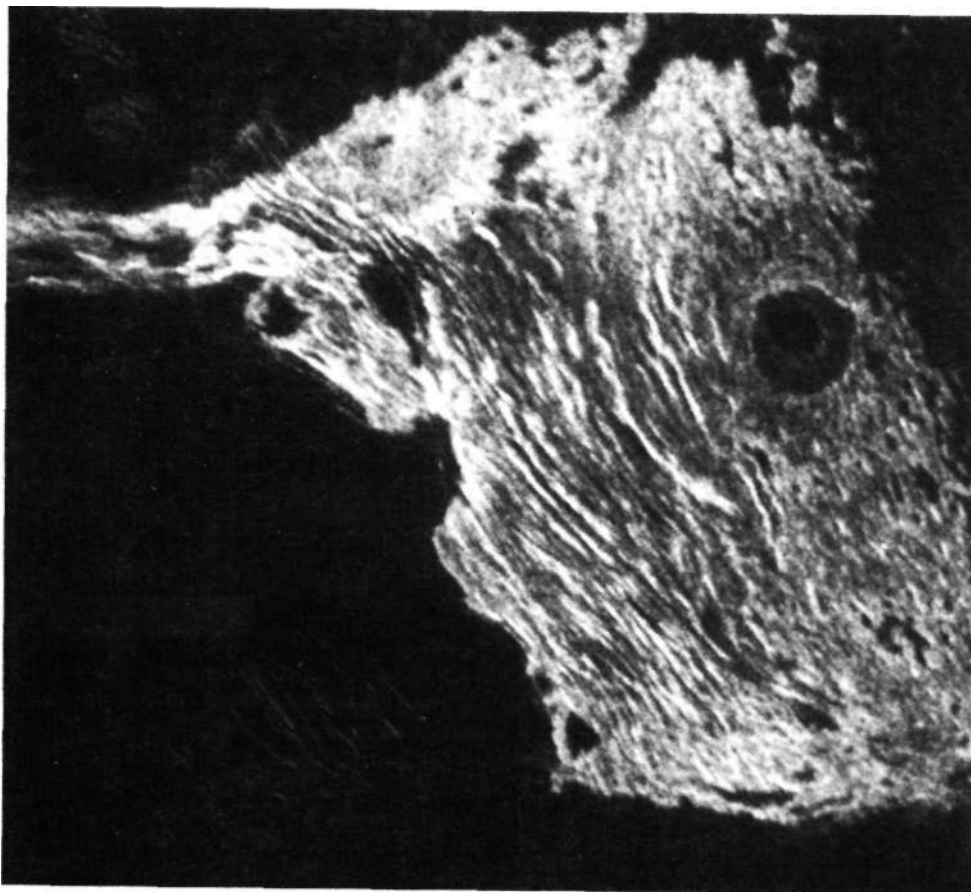


Рис. 3.47. Первое наземное радиолокационное изображение гор Максвелла, полученное с помощью крупнейшего радиотелескопа в Пуэрто-Рико на волне 12,6 см. Из работ Д.Кэмпбелла и его сотрудников

объяснений, если исходить хотя бы из подобия Венеры и Земли.

Можно высказать предположение, которое достаточно просто объясняет как прочность литосферы Венеры, так и ограниченность ее тектоники. Сформулируем ограничения: материал литосферы, нагрузка на нее, ее теплопроводность и температура у поверхности известны. Как сделать, чтобы она выдержала вес горных массивов? С инженерной точки зрения решение очевидно: необходимо увеличить толщину свода литосферы, иными словами, сдвинуть «вниз» уровень размягчения коры. А для этого неизбежно потребуются уменьшить градиент температуры в коре, что, в свою очередь, требует уменьшения (причем значительного уменьшения) потока тепла, поступающего снизу. Тогда твердая литосфера будет очень толстой, температура вглубь будет нарастать медленно, а горы будут прочно стоять на поверхности, как дом на скальном грунте. Более того, если поток тепла из глубин существенно меньше, чем у Земли (где он

составляет $1,5 \text{ мккал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$), конвекция в мантии должна быть слабой, а ее тектонические проявления ограниченными.

Однако сразу же придется сделать несколько замечаний к предложенной гипотезе. Распространение теплового потока из недр к поверхности — процесс очень медленный, сравнимый с возрастом самой планеты. Проходя через кору, эта часть потока создает падение температуры, определяемое теплопроводностью коры. Значительная часть тепла, что сегодня проходит сквозь кору Земли, родилась на очень ранней стадии ее истории. Тогда малый градиент для Венеры должен означать, что она почему-то или растеряла свои запасы тепла на ранней стадии, или их было у нее заметно меньше, или, наконец, что существуют другие механизмы оттока тепла. Другая часть потока создается распадом радиоактивных элементов, рассеянных в литосфере (главным образом ураном, торием и калием-40) и частично в мантии. Измерения на аппаратах «Венера» пока-

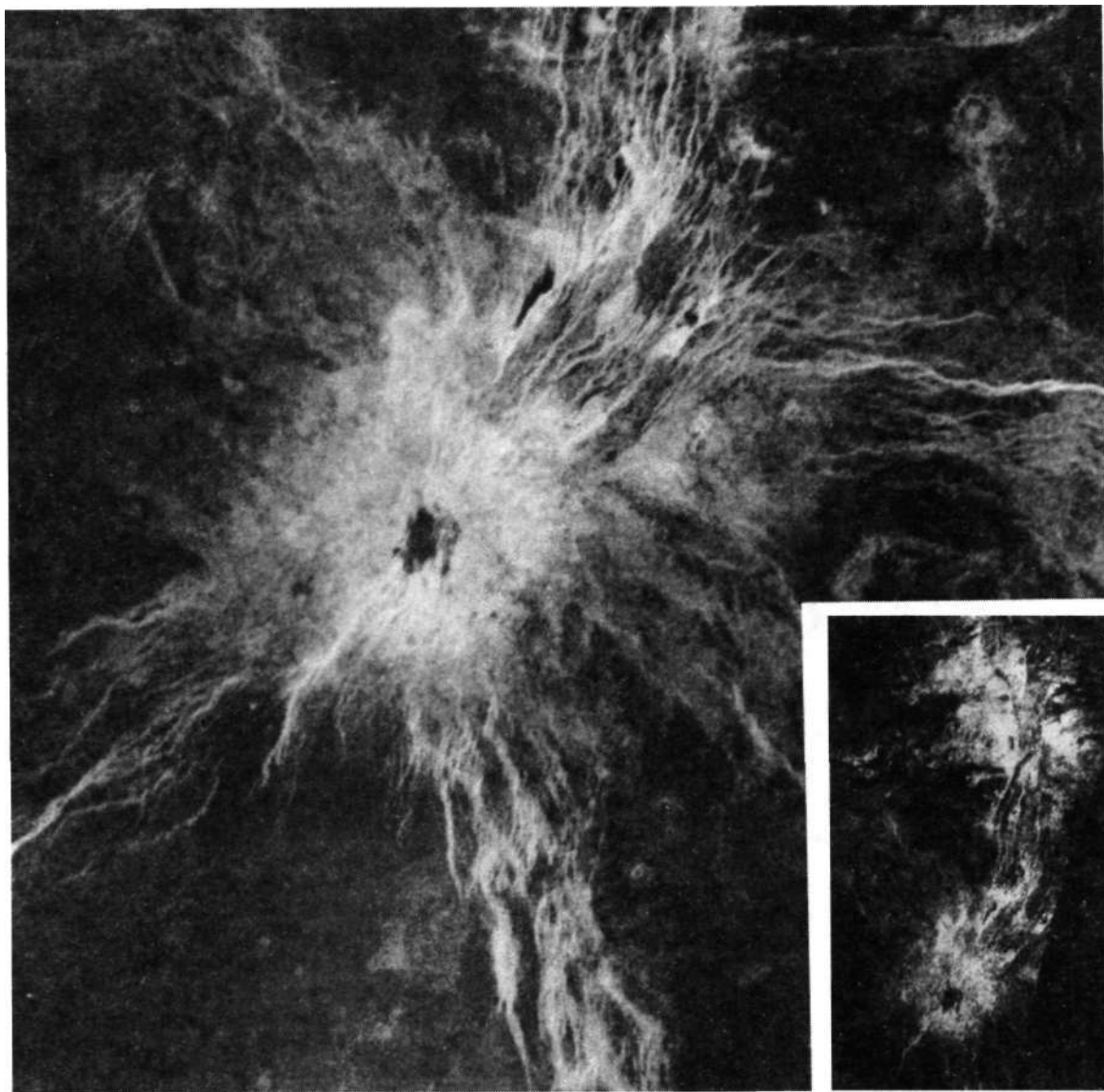


Рис. 3.48. Горы Тейи. На врезке — радиолокационное изображение массива Бета, полученное с помощью методов наземной радиолокации группой Д.Кэмпбелла. Бету специалисты относят к относительно молодым щитовым вулканам

зали, что они действительно содержатся и в коре Венеры. Впрочем, некоторые специалисты считают, что там может быть меньше калия-40. Тогда поток от радиоактивного распада и в самом деле окажется мал, у Венеры будет толстая литосфера и слабая тектоническая деятельность. Возможны и другие объяснения этого парадокса, к которому нам придется еще раз вернуться в разделе о тепловых потоках.

Итак, даже предварительный анализ рельефа Венеры указывает на большие различия в геологической истории Земли и Венеры. Тектонические явления на последней не носят глобального характера. Во многих местах сох-

ранилась древняя кора. Не исключено, что поступление в атмосферу малых газообразных составляющих происходит за счет вулканической активности. Литосфера Венеры, несмотря на высокую температуру поверхности, способна удерживать огромные тектонические сооружения. Несмотря на весьма плотную атмосферу сохранились (и более или менее широко распространены) ударные метеоритные кратеры. Впрочем, может быть, сохранились именно благодаря плотной атмосфере?

Кроме геологических различий, есть, по-видимому, различия в составе. Если бы хими-

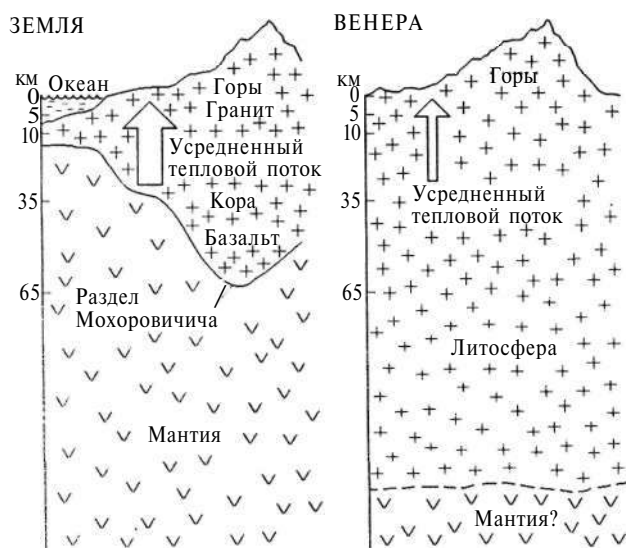


Рис. 3.49. Две гипотезы о строении литосферы Венеры. Прочная толстая литосфера требует, чтобы тепловой поток сквозь нее был невелик. (Есть и другая версия, которая предполагает, что изостатически нескомпенсированные массивы поддерживаются динамическим напором восходящих потоков в мантии.)

ческий состав обеих планет совпадал полностью, средняя плотность Венеры составляла бы $5,34$ вместо $5,24$ г/см³. Что же касается плотности поверхности (от 2 до $2,9$ г/см³), то она близка к плотности поверхностных пород Земли.

«Электрический дракон» Венеры

Расскажем теперь об одном загадочном явлении, которое устойчиво наблюдается на Венере. Природа его остается не вполне понятной. Результаты космического эксперимента редко носят абсолютно однозначный характер и чаще указывают на более сложную, чем представлялось, физику исследуемого явления. Именно так развивались события в исследованиях электрической активности атмосферы Венеры.

До недавних пор отсутствовали сведения о существовании гроз на других планетах, хотя такие предположения высказывались. Например, была попытка объяснить некоторые виды необычного радиоизлучения Юпитера чудовищными молниями в его атмосфере. И хотя, как будет сказано ниже, разряды таких молний на Юпитере, происходят, но радиоизлучение имеет все же другое происхождение.

По мере углубления знаний о составе атмосферы Венеры возник вопрос о том, откуда берутся некоторые ее малые составляющие.

Было высказано предположение, что их происхождение связано с электрическими разрядами в атмосфере — молниями. Напомним, что под действием молний в земной тропосфере образуются озон, окислы азота и даже циан.

Известно также странное явление, о котором с давних пор сообщали астрономы: иногда ночная сторона Венеры слегка светится. Нельзя ли объяснить это свечение большим количеством молний в атмосфере планеты? Несложный расчет показывает, однако, что для этого молний должно быть очень много. Над всей Землей вспыхивает около 100 молний в секунду. Если на Венере их в тысячи раз больше, свечение действительно можно видеть с Земли. Но есть ли молнии на Венере?

Для регистрации электрических разрядов на «Венере-11 и -12» имелся миниатюрный прибор «Гроза» — радиоприемник-спектроанализатор диапазона длинных и сверхдлинных волн, высокой чувствительности и широкого динамического диапазона: ведь эксперимент готовился вслепую, без каких-либо исходных данных. Ранним утром 21 декабря 1978 г. «Венера-12» опускалась в атмосферу планеты. Через 9 мин после включения прибора появился первый пакет примерно из сотни разрядов, еще через 8 мин — второй. Если бы не слишком частые импульсы, можно было бы сказать, что это похоже на очень далекую земную грозу. По мере приближения аппарата к поверхности амплитуда регистрируемых радишумов стала падать, а после посадки снизилась до уровня шумов самого приемника. На 32-й минуте после посадки была зарегистрирована большая группа импульсов — единственная за все 110 мин работы прибора на огнедышащей «земле» Венеры. Дальше надо было ждать 4 дня до следующей «Венеры». Поскольку слабые разряды могли образоваться и в результате электризации аппарата при его движении в атмосфере со скоростью до 10 м/с, обнаруженное явление могло быть, как говорили в старину, артефактом.

Утром 25 декабря по такой же точно трассе, практически в том же районе планеты опускается «Венера-11». Но насколько больше теперь напряженность поля и как непохожи регистрируемые явления! Вот развивается сильнейшая электрическая буря, каждую секунду происходит $20—30$ мощных разрядов. Через несколько минут явление завершается, а на очереди следующее. Если можно сравнить спектральные характеристики разрядов с земными атмосферными помехами, источник удален на тысячи километров. Примерно на высоте 14 км группы импульсов приобретают необычный вид. Не

исключено, что регистрируется излучение источника с малыми угловыми размерами.

С помощью специальных приборов на «Венере-11 и -12» в декабре 1978 г. не только были обнаружены многочисленные электрические разряды в атмосфере, но и установлены некоторые их особенности. Оказалось, что при тех же энергиях в разряде венерианские молнии значительно более многочисленны, чем земные. При спуске количество разрядов, принятых прибором «Гроза», достигало нескольких десятков в секунду (рис. 3.50). Комментируя это явление, журналы писали о «грозовой феерии» на Венере, где отдельные вспышки молний должны следовать друг за другом, как кинокадры.

Дальнейшие события напоминали развитие действия в детективной повести. Открытие молний в экспериментах на «Венерах» сразу же привело к появлению серии работ, подтвердивших эти наблюдения. Через 3 дня, 28 декабря 1978 г., с борта «Пионер—Венеры» удалось принять весьма низкочастотное электромагнитное излучение, также отождествленное с электромагнитным излучением молний. Однако в этом случае зарегистрировать излучение было намного сложнее. Схема, приведенная на рис. 3.51, обобщает все имевшиеся измерения. Дело в том, что, в отличие от «Венер», приемник был установлен на спутнике, орбита которого проходит выше основных слоев венерианской ионосферы, экранирующей приемник от излучения. Но авторам эксперимента удалось доказать, что при определенном направлении случайного магнитного поля, «вмороженного» в ионосферу Венеры, излучение все же проходит сквозь ионосферу. Это довольно трудные измерения, но и таким способом молнии на планете были зарегистрированы много раз.

Поначалу казалось естественным, что молнии должны возникать в облаках, хотя изме-

рения с «Венер» скорее указывали на какой-то сравнительно небольшой по размерам объект. Предположив, что это удаленная гроза, пришлось допустить, что венерианские грозы дают в десятки раз больше молний, чем земные. Была рассчитана яркость ночных облаков, которая определялась бы подсвечивающими их изнутри молниями. Вскоре даже появилась статья, в которой сообщалось, что в 1975 г. с борта искусственных спутников Венеры удалось наблюдать несколько световых вспышек в облаках. Но другой прибор на тех же спутниках «Венера-9 и -10» таких вспышек не обнаружил (лишь в 1995 г. появилось сообщение, что вспышки молний на Венере удалось наблюдать наземными астрономическими средствами). Затем был опубликован ряд теоретических работ о развитии электрических явлений на Венере. Аппарат «Пионер—Венера» был специально перепрограммирован и в течение нескольких месяцев искал световые вспышки на ночной стороне планеты. Как ни странно, вспышки не появлялись, хотя радиоприборы аппарата продолжали принимать характерные «трески» венерианских молний.

Что-то было не так. Некоторые теоретики стали говорить, что в облаках Венеры слишком мала масса материала, чтобы накопился большой заряд и возникла молния. Далее, проведенный анализ высотной зависимости напряженности низкочастотного поля, полученной на четырех аппаратах, от «Венеры-11» до «Венеры-14», показал: возможно, что источник импульсов находился на небольших высотах, но не в облаках. Особенности рефракции радиоволн в атмосфере планеты таковы, что высокое положение источника должно, грубо говоря, давать высокую напряженность поля на больших и низкую — на малых высотах в атмосфере. Но «Гроза» указывала на рост напряженности с уменьшением высоты аппара-

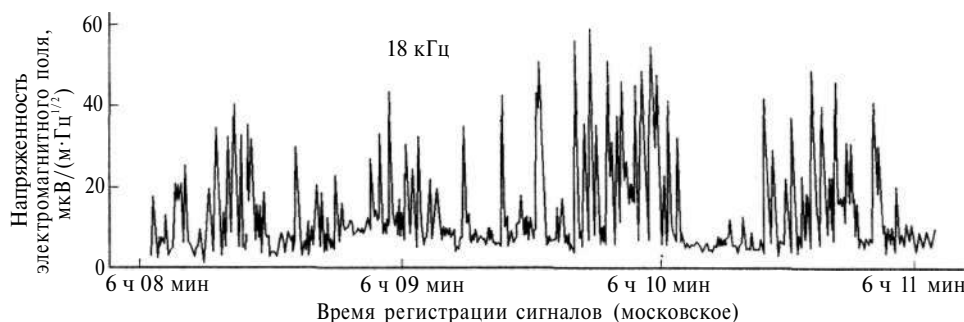


Рис. 3.50. Электромагнитные импульсы, принятые прибором на борту аппарата «Венера-11» 25 декабря 1978 г. Каждый пик соответствует электрическому разряду

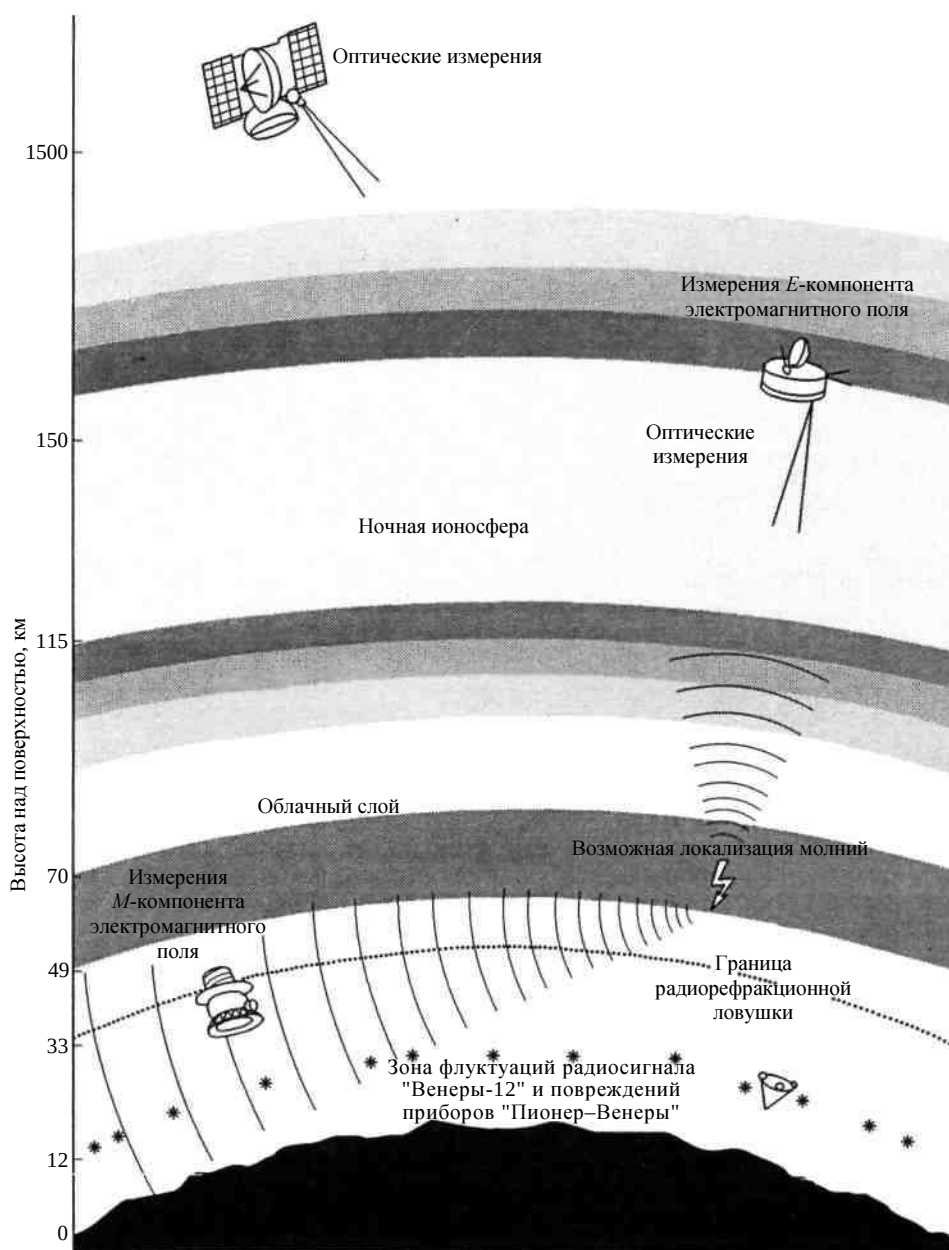


Рис. 3.51. Схема, обобщающая наблюдения электрических явлений в атмосфере Венеры. Кроме электромагнитных импульсов молнии в облаках должны создавать световые вспышки. Импульсы были обнаружены, вспышки — нет. Спускаясь в атмосфере, зонды аппарата «Пионер—Венера» испытали неизвестное электрическое воздействие на высоте около 12 км

та, что соответствует низко расположенному источнику поля.

Вскоре после первых наблюдений (1978 г.) поступили сообщения о загадочных явлениях, происходивших с четырьмя американскими зондами на высотах около 12 км (т.е. глубоко под нижней границей облаков). Еще раньше отмечалось, что радиосигнал с некоторых советских аппаратов в этой зоне испытывал резкие флуктуации фазы, словно «Венеры»

проходили сквозь слой плотной плазмы. Но существование плазмы на этих высотах необъяснимо с точки зрения теории. Вместе с тем у всех зондов «Пионер—Венеры», опускавшихся в разных районах планеты, на высоте около 12,5 км были повреждены датчики температуры и другие устройства. Лабораторные исследования приборов-двойников показали, что наиболее вероятной причиной разрушения датчиков мог быть внешний электрический разряд.

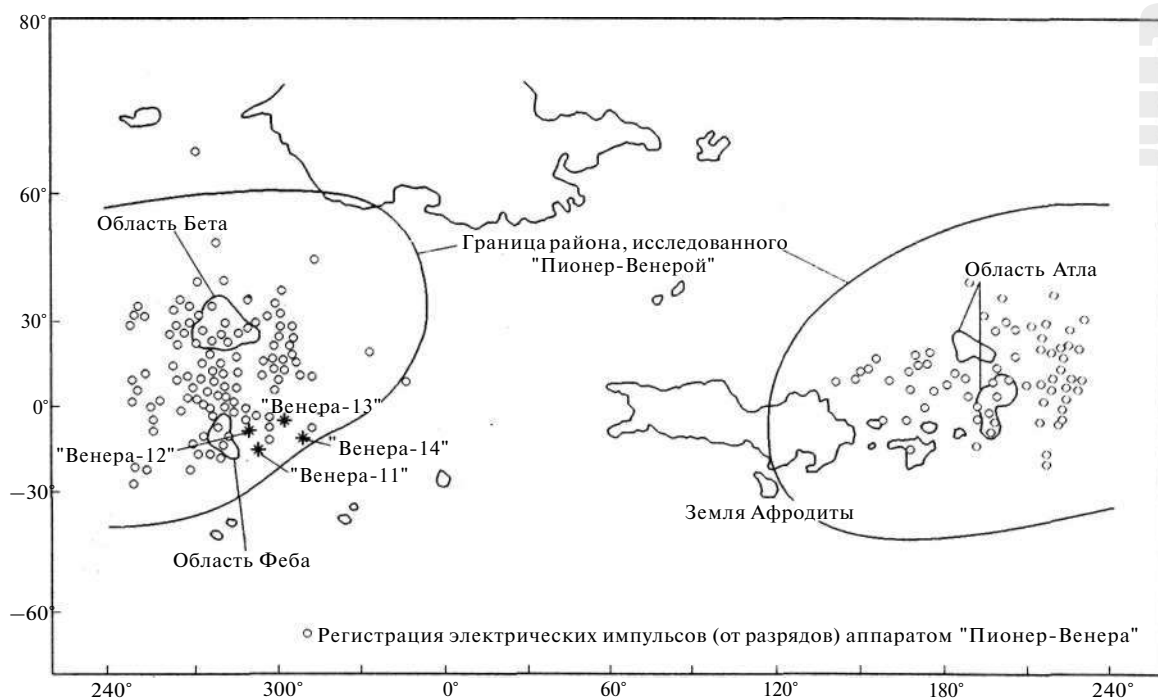


Рис. 3.52. Электрические разряды группируются вокруг некоторых особых районов на Венере. Среди них — области Беты, Фебы и Атлы. Из работы Ф.Скарфа и др.

Если учесть, что зонды в это время разделяли многие тысячи километров, напрашивается вывод, что электрически активная зона в атмосфере имеет глобальную протяженность. Природа электрической активности на этих высотах остается совершенно непонятной. Впрочем, не исключено, что подобное чем-то явление известно и на Земле. Оно называется «гром с ясного неба»: имеются научные данные о разрядах молний в безоблачную погоду. Но природа таких молний не изучена. В общем, вопрос остался открытым.

Показанный на рис. 3.51, вверху справа, прибор для исследования электрической активности атмосферы Венеры принимал электромагнитные импульсы на борту спутника «Пионер — Венера» в течение многих лет. Из-за влияния ионосферы и по некоторым другим причинам импульсы можно было принимать только над ночной стороной планеты, причем нижнюю точку орбиты аппарат проходил на высоте всего 150 км. Ионосфера позволяла принимать лишь очень небольшую часть импульсов, когда случайно ориентированное локальное магнитное поле было направлено между аппаратом и точкой разряда. Иными словами, требовалось совпадение положения аппарата и во времени, и в пространстве с той

точкой, куда приходила волна, распространявшаяся сквозь ионосферу в так называемой моде вистлера, хорошо известной радиолюбителям на Земле. Поскольку в эксперименте «Гроза» импульсы после посадки аппаратов практически не принимались, было сделано предположение, что низкочастотные радиоволны в атмосфере Венеры распространяются не на очень большие расстояния. Тогда район, в котором принят импульс, можно грубо считать районом его возникновения. И вот оказалось, что импульсы действительно концентрируются в нескольких районах планеты (рис. 3.52), в том числе у горных массивов Бета и Феба, которые геологи относят к вулканическим, и в восточной части Земли Афродиты. Дальнейшее исследование электрической активности планеты на «Пионер—Венере» продолжались еще много лет. Удалось установить, что распределение областей возникновения электромагнитных волн гораздо сложнее, чем это показано на рис. 3.52, построенном по первым результатам «Пионер—Венеры» (1978—1980 гг.). А в феврале 1990 г. аппарат «Галилей» на своем сложном пути к Юпитеру сблизился с Венерой. Его научные приборы тут же зарегистрировали уже знакомые электромагнитные всплески, идущие от планеты. И в этом эксперименте был сделан

прежний вывод: эти импульсы рождаются в мощных электрических разрядах на планете. Но где? К сожалению, эксперимент не позволял определить, откуда приходят импульсы, хотя область Феба была в пределах видимости. Именно вблизи Фебы, немного к востоку от нее, в 1978 и 1982 гг. опустились аппараты «Венера-11»—«Венера-14». Возможно, «Венера-11» угодила в одну из самых активных областей; во всяком случае, остальные аппараты отметили напряженность поля, раз в 10 меньшие, чем «Венера-11».

Однажды обозреватель журнала «Sky and Telescope» сопоставил топографию этих районов с данными гравитационной съемки. Оказалось, что наблюдается корреляция районов регистрации электромагнитных импульсов с местами расположения гравитационных аномалий. На Земле такие аномалии сопутствуют молодому вулканизму. Напрашивался вывод, что молнии на Венере, может быть, связаны не с облаками, а с возможными вулканическими извержениями.

Что могло бы означать такое совпадение? Обратимся к известным на Земле явлениям. Молнии другой природы, чем грозовые, часто сопутствуют вулканическим извержениям. На фото 10 приведена красивая фотография клубка молний над вулканом Сакура-джима (южная Япония, 1987 г.). В 1975 г. во время мощного извержения вулкана Толбачик на Камчатке вокруг вулканического жерла и столба выбрасываемых пара и пыли наблюдались многочисленные молнии. Особенно сильные электрические явления отмечались очевидцами во время недавнего извержения на острове Св. Елены. Вероятно, многим помнится исполованное молниями небо на картине Брюллова «Последний день Помпеи». По сравнению с земными венерианские извержения должны сопровождаться более интенсивными электрическими явлениями из-за высокой плотности атмосферы. С другой стороны, ожидается, что сильные и продолжительные извержения действительно должны наблюдаться на Венере.

Еще раз о тепловых потоках. Недра Венеры и поиск ее магнитного поля

Сделанный выше вывод опирается на цепь довольно логичных предположений, часть которых мы уже рассматривали в предыдущем разделе. Прежде всего, допускается, что тепловыделение в результате распада радиоактивных элементов в коре обеих планет более или менее одинаково. Тем самым подразумевается, что усредненный тепловой поток через поверхность планеты должен быть, как уже го-

ворилось, близким к $1,5 \text{ мккал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Вот как природа решила эту проблему на Земле. Благодаря конвекции в мантии тепловой поток выносится на поверхность главным образом через «горячие точки». Для Земли это в основном срединно-океанические рифты, в меньшей степени вулканы, а на литосферу приходится еще меньше. Но на Венере, где рифты немногочисленны и не имеют глобальной протяженности, основной вынос тепла может происходить лишь в извержениях вулканов. На первый взгляд возможен и более простой уже упоминавшийся способ: диффузия тепла сквозь кристаллическую кору благодаря молекулярной теплопроводности. Но для Венеры этот механизм, по-видимому, может играть лишь второстепенную роль. Об этом уже говорилось выше: при большом потоке существование высоких гор на планете стало бы невозможным. Чтобы объяснить этот парадокс, и предложены постоянно извергающиеся вулканы. Однако многие специалисты сомневаются в том, что этого достаточно.

Анализ гравитационных аномалий на Венере указывает на какие-то необычные процессы в литосфере. Аномалии оказываются большими, чем для массивов того же масштаба на Земле. Возможно, в «горячих» точках лава выдавливается на поверхность из мантии и динамически поддерживает тем самым вулканические массивы. Заметим, что Максвелл, Бета и восточная часть Афродиты (район Атлы, фото 8), которая подозревается как район действующих вулканов, вероятно, не единственные, а просто самые большие (и потому известные нам) примеры такого рода. Словом, гипотеза об извергающихся вулканах почти всем хороша. Пока у нее есть только один важный изъян: сильные извержения на Земле сопровождаются значительным запылением атмосферы. Но приборы показывают, что пыли в тропосфере Венеры практически нет. Выше мы уже рассказывали о некоторых исключениях, представленных на рис. 3.36—3.38. Но в основном атмосфера Венеры чиста. Можно, конечно, предположить, что из-за малой скорости ветра у поверхности пыль выпадает у места извержения и не разносится на большие расстояния. Скорость ветра в местах посадки аппаратов «Венера-13 и -14» действительно невелика: 0,55 и 0,37 м/с соответственно. Если радиус наиболее мелких частиц близок к 0,1 мм, а высота столба извергающихся пыли и газа не превышает нескольких километров, частицы выпадут на расстояниях не более нескольких десятков километров от места извержения. На больших расстояниях атмосфера могла бы остаться

незапыленной. Разумеется, более строгий анализ явления может дать выводы, несколько отличающиеся от приведенных выше. Но интерпретация панорам с «Венеры-14», кажется, не противоречит гипотезе о выпадении пыли из атмосферы.

Здесь следует хотя бы упомянуть еще один аспект вулканизма Венеры. С космических аппаратов наблюдалось внезапное резкое обогащение верхней части облачного слоя мельчайшими аэрозольными каплями. Имеются давние сообщения о том, что подобное явление иногда наблюдалось с Земли, например в 1957 г. Для образования избытка аэрозоля что-то должно было резко увеличить концентрацию сернистого газа. Было высказано предположение, что причина — в гигантском вулканическом извержении. Конечно, было бы очень наивно полагать, что количество сернистого газа в атмосфере может быть существенно обогащено каким-то извержением. Для этого понадобились бы многие миллионы лет. Все проще. Сернистого газа сколько угодно в подоблачной атмосфере. В гигантском извержении, вроде Тамборы (1815 г.), выделяется огромное количество тепла, которое разогревает прилегающие слои атмосферы и образует настолько мощную конвекцию, что восходящие потоки атмосферы выносят вполне достаточное количество сернистого газа в надоблачную атмосферу. Там он перерабатывается в серную кислоту и образует избыток аэрозоля. Подтверждается такое объяснение не только внезапностью обогащения, но и постепенным, в течение нескольких лет, уменьшением концентрации аэрозоля.

Чтобы подтвердить (или опровергнуть?) гипотезу о значительной роли вулканизма в

происхождении венерианского рельефа, необходимы сведения о внутреннем устройстве планеты, прежде всего о строении ее литосферы. Но пока об этом известно очень мало. Сведения о строении недр планеты опираются главным образом на теорию. Безразмерный момент инерции для Венеры, по-видимому, лишь незначительно больше, чем у Земли. Пока он точно не найден; обычно принимается значение 0,333. Ядро планеты несколько меньше, чем у Земли (рис. 3.53). На него приходится примерно 12% массы (у Земли 16%). Внутреннее строение, как можно видеть из рисунка, очень похоже на строение Земли, хотя литосфера может быть более толстой, но и в этом теоретики не единодушны. Заметим лишь, что все эти данные пока основываются только на теоретических расчетах.

С внутренним строением Венеры и особенностями ее вращения связана и проблема магнитного поля планеты. Точнее — проблема отсутствия магнитного поля, что выделяет ее из планет земной группы. В самом деле, у Меркурия есть довольно сильное поле, около $4 \cdot 10^{-3}$ Гс. Поле около $5 \cdot 10^{-4}$ Гс имеется, по-видимому, и у Марса. Из исследованных планет самыми сильными магнитными полями обладают планеты-гиганты и... Земля. У Венеры и Земли близки размеры, средняя плотность, вероятно, строение недр. Почему же у Венеры практически нет магнитного поля? По одной из современных теорий, величина напряженности дипольного магнитного поля планеты зависит от прецессии полярной оси, угловой скорости вращения и ряда других параметров. Слабое дипольное поле Венеры следует из теории. Беда только в том, что последние измерения указывают на напряженность, еще

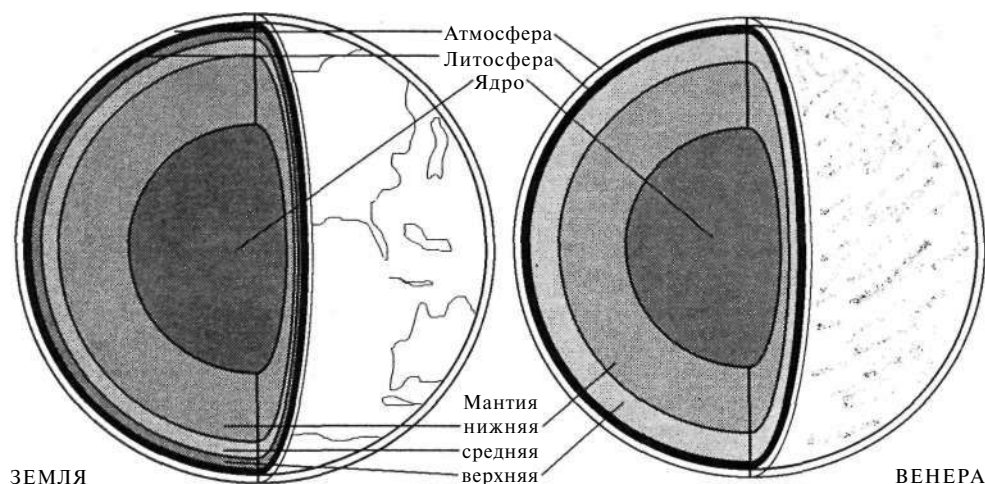


Рис. 3.53. Схемы внутреннего строения Венеры и Земли

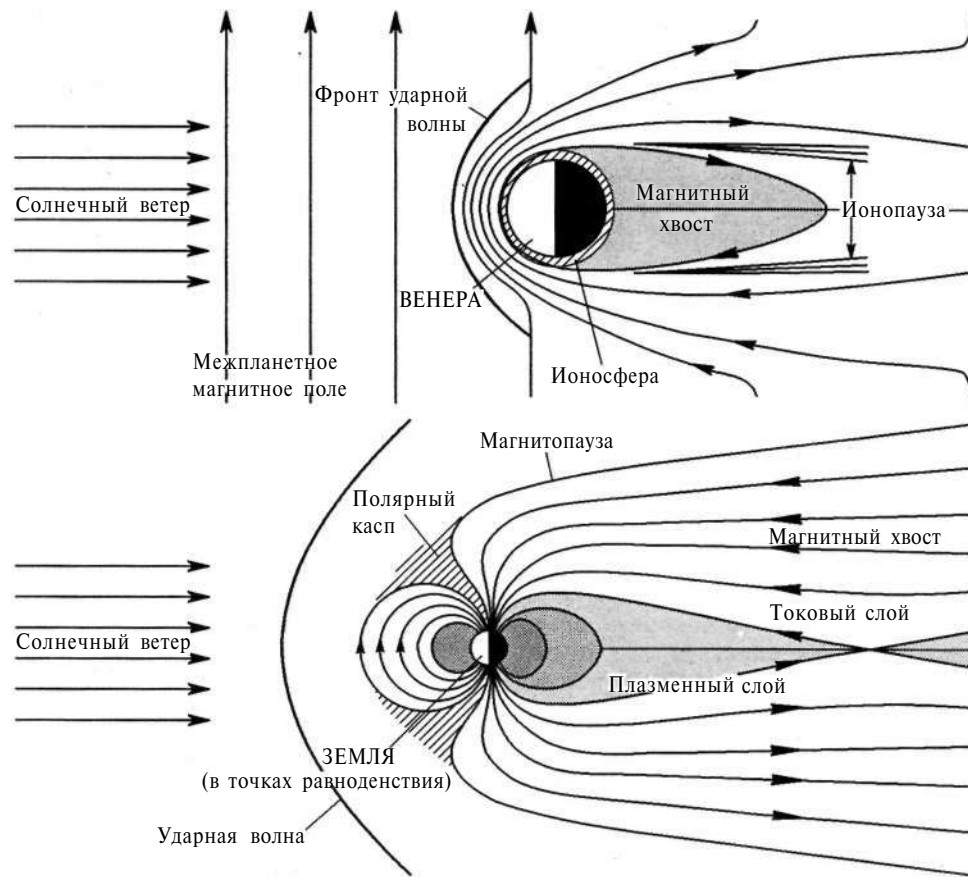


Рис. 3.54. Магнитосфера «немагнитной» планеты Венеры. Хотя дипольного магнитного поля у планеты нет, напряженность наведенного поля достигает 20—40 нТл (нанотесла, или сотых тысяч долей гаусса) на уровне ионосферного максимума. Это поле ориентировано хаотически. Совершенно другой вид имеет магнитосфера Земли

по крайней мере в 10 раз более низкую, чем предсказывает теория.

Читатель может спросить, как согласуется это с приводившимся выше рассказом о регистрации разрядов в атмосфере с помощью аппаратуры «Пионер—Венеры», когда радиоволны очень низких частот распространялись сквозь ионосферу вдоль магнитного поля. Дело в том, что существуют интересные механизмы, благодаря которым в ионосфере Венеры наводится, индуцируется, небольшое магнитное поле. На рис. 3.54 показано, как межпланетное магнитное поле захватывается и сжимается планетой. Межпланетное магнитное поле с напряженностью, составляющей поблизости от Венеры около 10 нТл, или 10^{-4} Гс, взаимодействует с движущейся в нем ионосферой планеты. Ионосфера — проводник, поэтому движущееся поле наводит в ней электрические токи, которые, в свою очередь, возбуждают магнитные поля. Наиболее важную роль играют местные нео-

днородности межпланетного магнитного поля. Благодаря им в ионосфере возбуждаются вихревые токи, вызывающие местные магнитные поля, ориентированные случайно. Поэтому, хотя общего дипольного поля у Венеры нет, ионосфера ее пронизана хаотическими магнитными полями небольшой напряженности, в среднем 15—20 нТл. Взаимодействие таких полей с плазмой солнечного ветра искривляет линии межпланетного магнитного поля и даже вызывает ударную волну. В зависимости от солнечной активности положение ударной волны меняется, но в среднем она находится на высоте около 2000 км над поверхностью Венеры со стороны Солнца. Несколько подробнее с этими понятиями удобно познакомиться на примере магнитосферы Земли, показанной на том же рис. 3.54. Однако земная магнитосфера с ее сильным магнитным полем устроена иначе.

Радиационные пояса Земли, тесно связанные с ее магнитным полем, были открыты с началом космических исследований. Несколько

позже удалось изучить структуру магнитосферы. Вопреки названию, магнитосфера имеет очень сложную, совсем не сферическую форму, определяемую ее взаимодействием с межпланетным магнитным полем и солнечным ветром, которые «привязаны» друг к другу. Солнечный ветер представляет собой крайне разреженные потоки плазмы, $1\text{--}3\text{ см}^{-3}$, причем через 1 см^2 на уровне орбиты Венеры за 1 с проходит около 100 млн частиц. Плазма эта возникает благодаря испарению солнечной короны. В основном это ионы водорода и немного ионов гелия.

Плазма солнечного ветра имеет высокую температуру, от 10^3 до 10^5 К. В целом она электрически нейтральна, так как в ней присутствует столько же электронов, сколько и положительных ионов. Потоки ветра — гиперзвуковые; на уровне Земли их скорость составляет 350 км/с, а иногда и 1400 км/с. На расстоянии около 15 радиусов Земли с солнечной стороны плазма солнечного ветра встречается с магнитным полем Земли, которое для ионов и электронов является препятствием. Напряженность земного поля увеличивается с приближением к Земле. В точке, где давление магнитного поля уравнивает динамический напор солнечного ветра, возникает ударная волна, температура плазмы в которой резко возрастает. За ударной волной, ближе к планете, линии магнитного поля деформируются (рис. 3.54).

Вся магнитосфера Земли заполнена ее собственным магнитным полем. Область внутри ударной волны, а также возникающий с противоположной стороны магнитный хвост планеты и образуют магнитосферу. Внутри нее находится плазмосфера, включающая радиационные пояса. Она состоит из частиц, захваченных солнечным ветром и, в меньшей степени, из теряемых Землей. Граница плазмосферы проходит на высоте 15—20 тыс. км, где концентрация резко падает. В магнитосфере Венеры все эти явления значительно ослаблены. Интересно отметить, что эти магнитные и плазменные полости ни в какие телескопы не видны не только человеку, но и приборам.

Практически единственным средством исследований здесь остаются космические аппараты, движущиеся сквозь них и «наощупь» регистрирующие эти эфемерные образования, которые оказывают такое заметное влияние на погоду нашей планеты.

Дейтерий: так ли это было?

О дефиците воды в атмосфере Венеры и о том, что теоретики испытывают затруднения с поиском механизма, который позволил планете потерять такую уйму водорода, здесь говорилось много. Есть несколько наиболее распространенных объяснений водного дефицита. Главное из них состоит в том, что такого количества воды, как на Земле, Венера никогда не имела, хотя вулканы Земли исправно выбрасывают по 5 молекул воды на каждую молекулу углекислого газа начиная с самых древних времен. Более того, состав первичной атмосферы уже тогда в значительной мере определил пути эволюции поверхности планеты, да и самой атмосферы. Предполагается, что температура поверхности Земли, когда ей было всего 100—500 млн лет, была близка к 0°C . (Мы называем такую атмосферу первичной, хотя планеты земной группы еще раньше обладали, по-видимому, водородно-гелиевой, солнечной по происхождению, атмосферой. По ряду причин она была потеряна на очень ранних этапах истории этих планет.) Благодаря этому выделявшийся водяной пар конденсировался, а вода образовала водоемы. На Венере из-за большого притока солнечной радиации конденсация воды практически не происходила, потому что в атмосфере углекислого газа с примесями водяного пара имелся сильный парниковый эффект. Парниковый эффект постоянно усиливался из-за увеличения количества водяного пара в атмосфере. Считается даже, что рост температуры при этом шел настолько быстро, что условия насыщения (конденсации) воды не выполнялись никогда. Иными словами, парниковый эффект был самоусиливающимся (самовозбуждающим), в результате чего климатическая машина Венеры пошла «вразнос». Процесс остановился, когда все небольшое количество воды оказалось в атмосфере, а дальше диссипация водорода привела к некоторому ослаблению парникового эффекта.

Не вдаваясь в некоторые тонкости, отметим, что эта гипотеза опирается на малое содержание воды в исходном материале, из которого образовалась планета.

Сторонники другой гипотезы утверждают, что на обеих планетах воды было поровну и что Венера как-то растеряла ее запасы. Как? Одни ищут химический механизм, который связал воду в коре планеты, другие все-таки склонны допустить, что температура на критическом уровне была намного выше нынешней, благодаря чему целый океан водорода был потерян Венерой.

Добавим сюда загадочную прочность литосферы планеты, странный вид поверхности на рис. 3.27, возможную потерю спутника, сопровождавшуюся торможением вращения планеты, катастрофическими событиями на ней, быстрым разогревом и дегазацией коры... А что, если океаны все-таки были?

Сторонники гипотезы «о потерянных океанах» недавно предложили метод ее экспериментальной проверки. Для этого предлагается исследовать изотопный состав нынешней небогатой примеси водяного пара в атмосфере Венеры. Как показано на рис. 3.10, в результате различий в массе атомы легкого (обычного) изотопа водорода должны были легче покидать атмосферу, чем вдвое более массивный дейтерий (хотя и он диссипировал значительно легче, чем гелий). Это должно было приводить к постепенному обогащению венерианской воды дейтерием, причем довольно заметному обогащению. За время существования планеты, как показали расчеты, относительное содержание дейтерия должно было возрасти в 200 раз! Что же дали измерения?

На «Венерах» содержание дейтерия не измерялось. А на «Пионер—Венере»... Это как раз та ситуация, когда в тщательно продуманную программу исследований вмешивается какая-то, практически невероятная, случайность и все идет совсем не так, как запланировано. Физики называют подобные ситуации следствием закона Мерфи — Чизхолма. Сам закон формулируется кратко, но выразительно: «все, что может испортиться, — портится». В случае масс-спектрометра «Пионер—Венеры», как утверждают, работало 1 следствие упомянутого закона: «Все, что не может испортиться, портится тоже». Проба анализируемого газа поступала в прибор сквозь капилляр; так как капельки в облаках Венеры имеют микронные размеры, они не мешали работе масс-спектрометра. Но где-то в облачном слое, когда зонд «Пионер—Венеры» спустился в атмосферу планеты, неизвестно откуда взявшаяся относительно крупная капля попала во входное отверстие и наглухо запечатала его от всей остальной атмосферы. В результате все последующие измерения уже давали только состав самой капли (которая, как и следовало ожидать, оказалась серной кислотой). Полученные данные были обработаны, опубликованы. Прошло 3 года, пока кто-то не сообразил: «Эврика, да ведь в серной кислоте тот же водород!» Срочно были проанализированы старые материалы и вот сенсация: обогащение дейтерием, кажется,

действительно есть. Опубликованная статья называлась: «Венера была мокрой» (и вызвала как скрытое, так и откровенное недоверие).

Какой же сценарий разыграла природа на Венере, если это сообщение соответствует истине? Один из сценариев таков. И углекислый газ, и водяной пар выбрасывались вулканами как на Земле, так и на Венере. Венера вскоре после формирования, в пределах 500 млн лет, тоже обзавелась океанами. Но существование океанов было на грани возможного. Дальше поток солнечной радиации несколько возрос (об этом говорят расчеты эволюции Солнца), и океаны стали быстро испаряться. Парниковый эффект стал самосусливающимся, а давление водяного пара в атмосфере поднялось до 260 бар. Эта добавка к давлению углекислого газа (90 бар) разогнала парниковый эффект до фантастических температур, 1500 К у поверхности! Породы расплавились и обратились в полужидкую кашу. Водород «убегал» в космос, а свежая магма выходила на поверхность и реагировала с кислородом, который насытил всю кору до глубины 400—500 км. Когда практически весь водород был растерян и давление водяного пара упало до 15 бар, температура стала падать. Но это уже была совсем другая планета, — планета без воды.

В далекие школьные годы автор этих строк увлекался химией и однажды был пожалован ключами от химической лаборатории. Как это было интересно! Реакция получения синтетического каучука, серебряного зеркала, гремучего иодистого азота... Но самым интересным должен был стать втайне вынашиваемый эксперимент: что, если смешать все имеющиеся реактивы, а потом смесь сильно нагреть? Надо ли говорить, что когда едкий дым заволок все школьные помещения и пришлось прекратить занятия, научные интересы экспериментатора остались непонятыми...

Примерно так же природа поступила на Венере, причем разбираться в этом эксперименте придется долго. В изучении Венеры еще предстоит сделать очень многое. Тем не менее уже теперь ясно, насколько значительно могут различаться физические условия у поверхности весьма сходных по массе и составу планет, которые к тому же получают примерно одинаковое количество солнечной радиации. Сведения о столь похожей (и вместе с тем непохожей) планете представляют значительный интерес и для анализа возможных путей эволюции нашей Земли.

Г Л А В А 4

КРАСНЫЕ ПЕСКИ МАРСА

...Механический манипулятор погрузился в красный грунт Марса. Грунт был совсем мягким, из мелкого легкого песка, на глади которого от прикосновения манипулятора и под действием ветра образовались змеистые трещины. В песке встречались довольно крупные камни, мешавшие движению ковша манипулятора. Вся равнина вокруг аппарата также была усеяна кусками ноздреватых камней, вроде вулканического туфа, и гладкими массивными глыбами неправильной формы. Камни выступали из моря красного песка, вся поверхность которого была покрыта песчаными дюнами разных размеров. Большой валун, метра в два длиной, находился слева от аппарата. На его вершущке лежала шапка из мелкой красной пыли — след недавно прошедшей пылевой бури. За небольшой впадиной, на краю которой стоял аппарат, виднелась зубчатая линия горизонта. Впадина была углублением кратера, а горизонт — его валом.

Высоко в небе, розовом от тонкой, неоседающей пыли, стояло яркое Солнце. Был разгар марсианского лета в северном полушарии; температура воздуха поднялась до -20°C . Манипулятор приблизил ковш с песком ко входной воронке анализатора автоматической биологической лаборатории. За операцией тщательно следил объектив телекамеры, которая по радиопереемности посылала на Землю одно изображение за другим. Грунт из ковша высыпался в грузозаборник. Автоматы включили аппаратуру для поиска микроорганизмов в песчаном грунте Марса. На земном календаре стояло 22 июля 1976 г. Аппарат «Викинг-1» приступил к выполнению своей наиболее сложной задачи...

Физические условия на отдельных планетах, закономерности, которыми определяются различия в этих условиях, образование и эволюция планет и планетных атмосфер и многие другие проблемы в последние 25 лет получили новое освещение. Развитие космических исследований планет стало невиданным

источником новых и гораздо более точных данных о планетах, чем прежние наземные наблюдения. Очень много сведений получено о Марсе — планете, которая с незапамятных времен привлекала особенно пристальное внимание как ученых, так и любителей астрономии.

Исследование Марса с помощью космических средств полно драматизма. Марс интенсивно изучался средствами наземной астрономии. Поэтому нет другой планеты, представления о которой изменились бы так радикально в результате полетов всего нескольких космических аппаратов. В самом деле, американский «Маринер-9», советские «Марсы», 2-й, 3-й и 5-й из которых стали спутниками этой планеты, несколько пролетных аппаратов и два американских «Викинга» открыли новый Марс. Уже вскоре после первых запусков искусственных спутников Земли, когда в 1959 г. к Луне устремился первый в истории науки и техники космический зонд с неофициальным названием «Мечта», стало ясно, что Марсу недолго осталось ждать. В 1961 г. была запущена автоматическая межпланетная станция «Венера-1», а в 1962 г. — «Марс-1». И хотя этот аппарат не достиг цели, он послужил созданию других, более совершенных устройств.

Второе открытие Марса

Новые данные, полученные с помощью космических аппаратов, направленных к Марсу, настолько не походили на прежние представления о нем, что понадобилось несколько лет, чтобы ученые не только смогли интерпретировать их, но и свыклись с ними. В 1965 г. «Маринер-4» во время сближения с Марсом передал на Землю несколько снимков, на которых можно было видеть кратеры, подобные лунным. Снимки были нечеткими, но сомнений не оставалось: на Марсе много метеоритных кратеров. Через 4 года пролетные аппараты



Рис. 4.1. Район Марса вблизи южной полярной шапки. Темная граница — терминатор. Большое количество кратеров покрывает поверхность планеты. Внизу справа — белая полярная шапка. Весна в южном полушарии. Размеры участка 1800 × 1300 км. Снимок «Маринера-7», 1969 г.

«Маринер-6 и -7» передали новые изображения поверхности Марса, многие из которых совсем не похожи на Луну. Таков снимок района вблизи южного полюса (рис. 4.1). Светлые области здесь несомненно связаны с конденсацией или с выпадением каких-либо осадков из атмосферы.

Дальнейшие исследования постепенно вытеснили старые представления. Ныне мы можем совершить мысленное путешествие на Марс, пользуясь довольно надежными сведениями о физических условиях на этой планете и подробными картами ее рельефа.

Недавно исполнилось 100 лет с тех пор, как итальянский астроном Скиапарелли в 1877 г. оповестил астрономический мир об открытии на Марсе «каналов». Отметим: он не утверждал, что «каналы» имеют искусственное происхождение. Слово «каналы» в его тексте следовало перевести как «проливы».

На карте, составленной по его наблюдениям 1877—1888 гг. (рис. 4.2), каналы и выглядят как проливы. Однако несколько позднее талантливый и очень энергичный американский астроном Лоуэлл, который искренне верил в искусственность марсианских каналов, сумел заразить своим энтузиазмом не только значительную часть коллег-ученых и большое число любителей астрономии, но и людей, весьма от нее далеких. Вероятно, не только недостаточная информированность многих людей в те далекие времена была причиной того, что недоказанная научная гипотеза быстро овладела умами человечества. Кто-то сказал, что независимо от

специальности каждый считает себя авторитетом по меньшей мере в вопросе о внеземных цивилизациях. Возможно, это был именно такой случай. Газеты и журналы тех времен полны самых удивительных сообщений о Марсе. Теперь, через столетие, трудно понять, что откуда бралось. Марсиане страдают от жажды на безводной планете; марсиане из последних сил создают глобальные ирригационные сооружения, марсиане экономят последние капли воды... Когда страсти были в разгаре, говорят, был организован сбор средств в помощь несчастным марсианам. Утверждают, что на постройку ракеты, которая якобы должна была доставить воду на Марс (и это в XIX веке!) была собрана немалая сумма, после чего и сборщики и сами собранные средства исчезли таинственным образом.

Кстати, волна домыслов о Марсе захватила и начало XX в. Вся информация черпалась из печати или устных выступлений, так как ни радио, ни телевидения тогда не было. В литературных памятниках той эпохи марсиане занимают видное место. «Война миров» Г.Уэллса, «Аэлита» А.Н.Толстого и много других произведений посвящено марсианам — добрым или безжалостным, мудрым и вымирающим. Появление радио придало марсианским фантазиям оттенок достоверности. Известна паника, которая возникла в 30-х годах в США, когда по радио передавался хорошо поставленный радиоспектакль по роману Г.Уэллса. Репортажи корреспондентов «с места посадки марсиан» были восприняты, как говорится, «на полном серьезе». К появлению марсиан публика была вполне подготовлена. Интересно, что марсиане остались и в литературе второй половины XX в. Это лиричные «Марсианские хроники» Р.Брэдбери, приключения Лакки Старра среди бесплотных марсиан у А.Азимова, таинственные марсианские хищники у А. и Б. Стругацких и другие. Но все это — литература уже другого характера, скорее, стандартные декорации, населенные проекциями земных проблем. Но мы отвлеклись.

Как бы там ни было, но и ныне у многих людей с представлениями о Марсе связано понятие «каналы», которое давно следует заменить каким-то другим, более отвечающим современным данным об этой планете. По существу, за последние 25 лет произошло второе открытие Марса. И новый Марс оказался вовсе не похожим на ту воображаемую планету, которую мы знали под этим названием. Интересно, что в изучении Марса наземными средствами застой возник, в общем, задолго до начала космических исследований. Вероятно, это связано с тем, что всеобщий интерес к

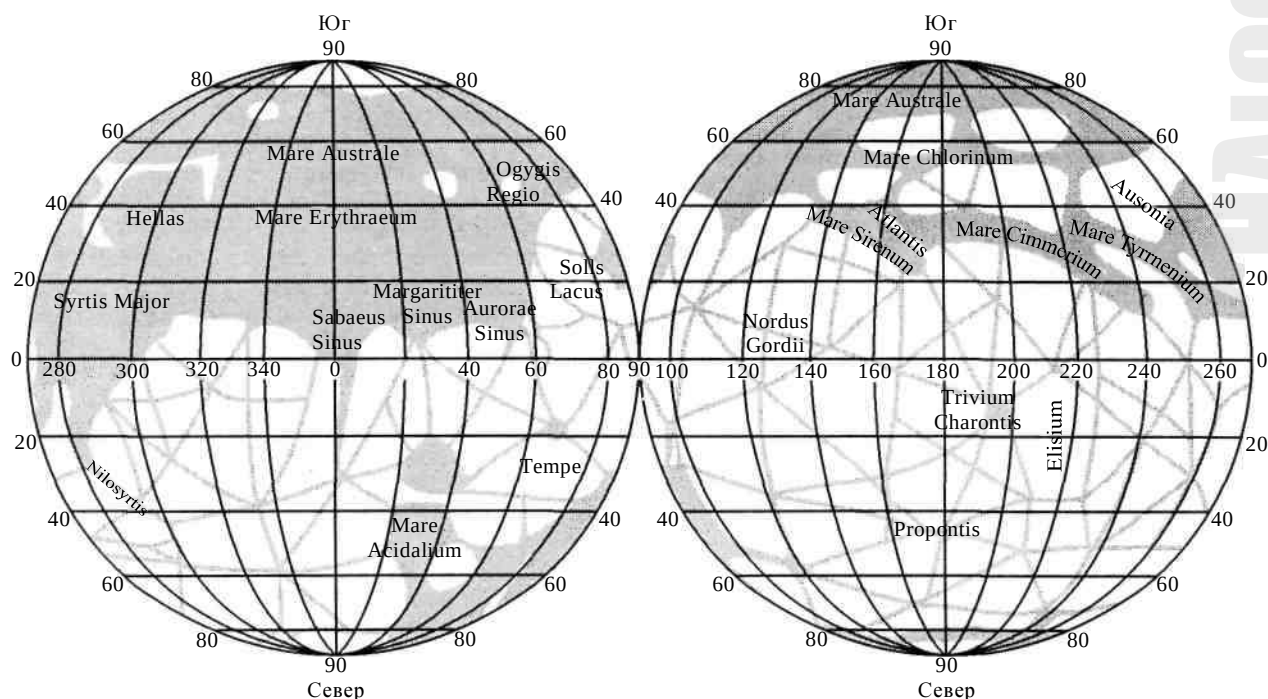


Рис. 4.2. «Каналы» Марса, показанные на карте Скиапарелли, основанной на наблюдениях 1877—1888 гг.

Марсу стимулировал его изучение; в результате здесь средства наземной астрономии были в основном исчерпаны раньше, чем для других планет. Лишь совершенствование наземной радиолокации и появление спектроскопии сверхвысокого разрешения (фурье-спектроскопии) давали новые результаты.

Если расположить в ряд по размерам Землю, Марс и Луну, легко заметить, что размеры каждого последующего небесного тела в этом ряду вдвое меньше предыдущего (рис. 4.3). Средний диаметр Марса составляет 6775 км. Его масса ($6,44 \cdot 10^{26}$ г) значительно меньше массы Земли ($59,83 \cdot 10^{26}$ г) и составляет 0,108 последней. Из массы и среднего радиуса следует, что ускорение свободного падения у поверхности Марса составляет 372 см/с^2 , или 38% земного. Полезно отметить, что оно совпадает с ускорением у поверхности Меркурия. Средняя плотность Марса ($3,94 \text{ г/см}^3$) заметно меньше, чем у Земли ($5,52 \text{ г/см}^3$).

Традиционные астрономические наблюдения позволили получить довольно много сведений о Марсе. Например, продолжительность солнечных суток на планете была установлена наземными средствами. Она мало отличается от земных: 24 ч 39,5 мин. В телескоп и на

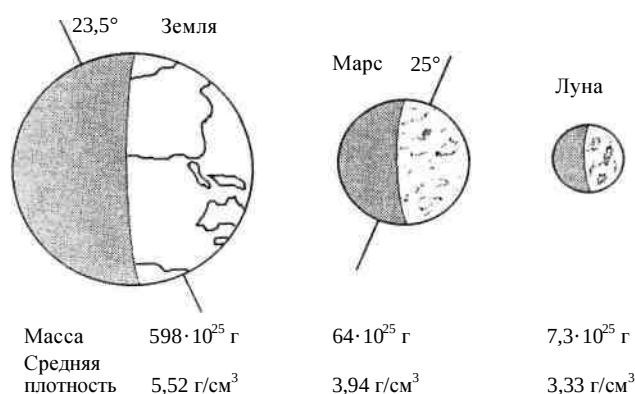


Рис. 4.3. Сравнительная схема размеров Земли, Марса и Луны

фотографиях Марс предстает небольшим размытым диском оранжевого цвета (фото 11), на котором хорошо заметны три типа деталей: протяженные оранжевые области, за которыми долго сохранялось название «пустыни», более темный экваториальный пояс и белые полярные шапки. Поверхность, как правило, хорошо видна сквозь очень разреженную атмосферу планеты. Иногда в атмосфере появляются легкие облака — белые, голубые и желтые (пылевые). Конечно, в телескоп можно различить только крупные детали, чаще всего не

менее 500 км: слишком далек от нас Марс. Астрономы прошлого века, у которых не было никакой надежды дожить до поры космических аппаратов, тешно напрягали зрение, всматриваясь в маленький оранжевый диск.

С началом космических исследований Марс снова оказался в центре внимания. Из всех планет он стал первым (после Земли), у кого появились искусственные спутники. Из внешних планет орбита Марса наиболее близка к орбите Земли (рис. 4.4). Каждые 780 дней

сближению с Землей соответствует также приближение Марса к Солнцу. Вытянутость орбиты планеты характеризуется эксцентриситетом, равным для орбиты Марса большому значению: 0,093. Среднее расстояние от Солнца — большая полуось орбиты Марса — составляет 228 млн км. Эксцентриситет указывает, что действительное расстояние до Солнца может быть больше или меньше большой полуоси на 21 млн км. Из-за этого энергия, получаемая планетой от Солнца, в течение

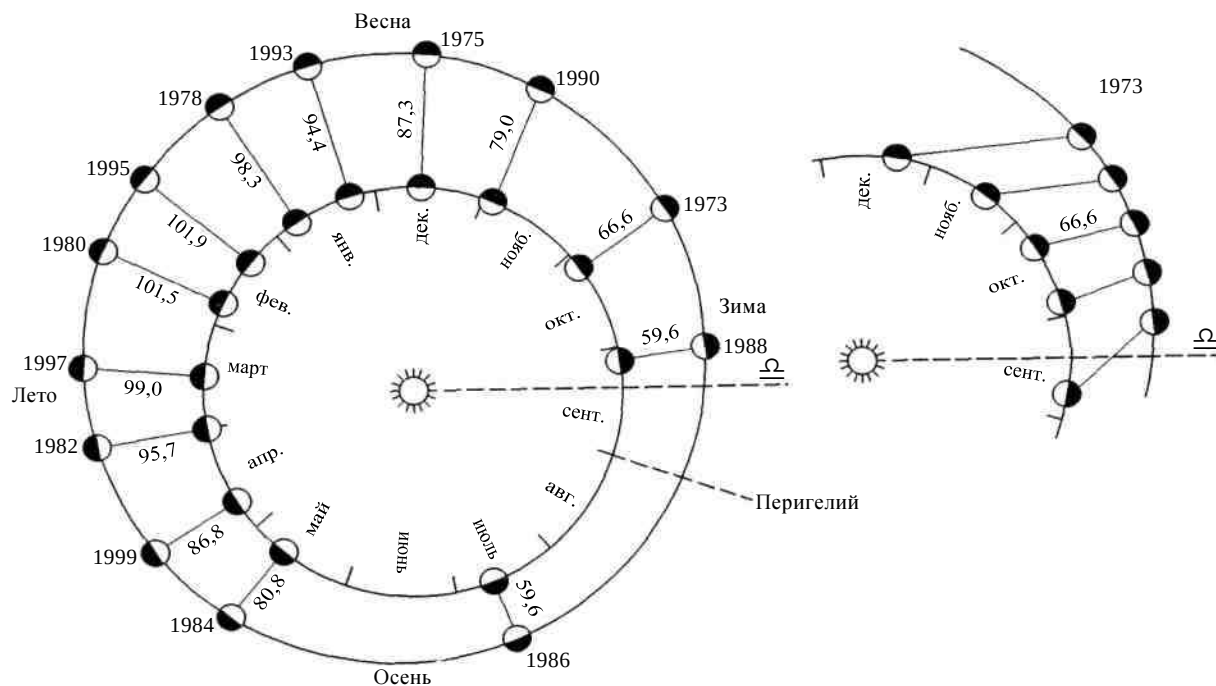


Рис. 4.4. Орбита Марса обладает большим эксцентриситетом. Поэтому при среднем расстоянии 228 млн км планета то удаляется от Солнца дополнительно на 21 млн км, то на столько же приближается к нему. На рисунке изображены положения планеты относительно линии осеннего равноденствия во время разных сезонов в северном полушарии. Показаны противостояния с 1973 по 1999 гг. и взаимные положения Земли и Марса в одном из них (1973 г.)

Марс сближается с Землей на расстояние от 55 до 102 млн км. Эти сближения называются противостояниями. Если минимальное расстояние при сближении не превышает 60 млн км, противостояние называется великим. Эти периоды, казалось бы, должны быть наиболее благоприятными для изучения Марса, диаметр диска которого достигает в это время 25 угловых секунд. Но, как мы увидим дальше, с великими противостояниями часто совпадают глобальные пылевые бури, резко ухудшающие видимость деталей на диске, а то и вовсе закрывающие облачной пеленой всю поверхность планеты. Разумеется, не сближения с Землей служат причиной пылевой бури. Дело в том, что орбита Марса очень вытянута, и

марсианского года изменяется в 1,45 раза. Укажем для сравнения, что подобные же изменения для Земли не достигают и 7%, а расстояние от Солнца изменяется всего на $\pm 2,5$ млн км.

Подобно другим планетам Марс обращается вокруг Солнца против хода часовой стрелки, если смотреть с северного полюса эклиптики. Марсианский год продолжается 687 юлианских или 669 марсианских солнечных суток (табл. 1). Подобно Земле, плоскость экватора Марса заметно наклонена к плоскости орбиты (25° , у Земли $23,5^\circ$). В сочетании с вытянутостью орбиты это приводит к неодинаковой длительности времен года в северном и южном полушариях планеты. Причину таких различий

нетрудно понять, если вспомнить II закон Кеплера: радиус-вектор планеты в равные промежутки времени описывает равные площади. Поэтому в афелии планета движется заметно медленнее, чем в перигелии. Полярная ось Марса направлена в созвездие Лебедя. На небе Марса нет яркой полярной звезды. Точка полюса мира для него находится примерно в 10° от звезды Денеб. Млечный Путь служит своеобразной часовой стрелкой на его небе, показывающей звездное время.

Т а б л и ц а 1. Продолжительность времен года на Марсе в марсианских сидерических (звездных) сутках

Северное полушарие	Лето	Осень	Зима	Весна
Южное полушарие	Зима	Весна	Лето	Осень
Продолжительность	177	142	156	194

В сочетании с уже упоминавшимся изменением получаемой от Солнца энергии смена времен года на Марсе характеризуется значительными различиями в значениях средней температуры. Например, более короткое лето в южном полушарии в среднем на 20° теплее, чем более продолжительное лето северного полушария.

Из-за удаленности от Солнца на единицу поверхности Марса приходится в среднем только 43% той энергии, что получает Земля. И хотя отражательные свойства его поверхности ниже, чем у Земли, скудность получаемой энергии приводит к суровым условиям на планете. Так, средняя температура верхнего слоя грунта в 12 ч во время летнего солнцестояния на северном тропике обычно не превышает 250–270 К (от 0 до -20°C), а максимальная в 14 ч достигает 268 К (около -5°C). Это знойный летний полдень по марсианским меркам. Среднегодовая температура на широте тропика близка к 230 К (-43°C), а минимальная составляет 180 К (-90°C) и ниже. На широте 55° зимняя температура может падать до 150 К. Большие перепады температуры в течение суток связаны с разреженностью атмосферы Марса. На рис. 4.5 показан суточный ход температуры в точке посадки «Викинга-1», измеренный непосредственно. Вместе с тем, измерения со спутника позволяют проследить глобальное распределение теплых и холодных районов на планете (фото 12). Здесь Марс виден так, как его никогда нельзя наблюдать с Земли: на правой стороне — день, на левой — ночь. Цветные тона показывают распределение собственного теплового излучения планеты. Наиболее холод-

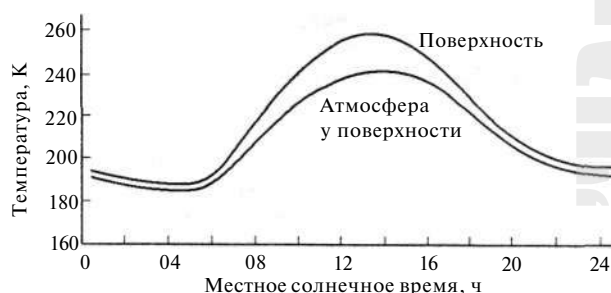


Рис. 4.5. Изменения температуры в течение суток летом на тропике Марса (в точке посадки «Викинга-1»)

ной оказывается ночная сторона зимнего полушария (левая нижняя часть, густой синий тон), а самой теплой — дневная летняя сторона (вверху справа). О природе холодных (голубых) пятен в северном полушарии мы расскажем дальше. Как видно из фото 12, температуры в пределах летнего полушария не очень сильно зависят от широты. По измерениям «Марса-5» (1974 г.) в южном полушарии на широте 50° в 13 ч было 255 К, в 14 ч 30 мин 248 К, в 15 ч 245 К, в 18 ч 230 К. В 20 ч температура опускалась до 210 К (-63°C). Во время измерений «Марса-5» там стояла середина осени.

Интересно, что в тропиках уже на небольшой глубине грунта, около 25 см, температура близка к 215 К (-60°C), постоянна в течение суток и мало меняется с временами года. Средняя температура на планете также близка к этому значению. Температура атмосферы вблизи поверхности согласно теории даже в летний полдень на северном тропике не поднимается выше 20°C , но экспериментально такие температуры ни разу зарегистрированы не были. Самая низкая температура, около 135 К, была зарегистрирована над зимней полярной шапкой планеты. Это вызвало недоумение среди специалистов, так как минимальные температуры на Марсе не могут быть ниже 148 К: при этой температуре конденсируется углекислый газ атмосферы, что предотвращает дальнейшее понижение температуры. Если пренебречь этими минимальными значениями, то можно говорить о сходстве температуры на Марсе с зимней Антарктидой. Таким образом, температура до $+15^\circ$ и даже $+30^\circ$, которая еще недавно приводилась в литературе как максимальная летняя температура на Марсе, оказалась завышенной градусов на 30, даже с учетом более высокой летней температуры в южном полушарии.

Лишь в районах с самой темной поверхностью в экваториальной части планеты тонкий

верхний слой грунта может после полудня иметь температуру около 0 °С или на несколько градусов выше. Но температура атмосферы останется низкой.

Когда космический аппарат приближается к Марсу, двигаясь примерно в плоскости орбиты планеты, то с расстояния в несколько десятков тысяч километров планета выглядит так, как показано на фото 15. Здесь мы видим Марс в фазе 93°. Такая фаза недоступна наземным наблюдениям. Максимальная фаза, которую можно увидеть с Земли, составляет 47°, когда в тени находится только 0,16 диаметра планеты. Телевизионная фотография 15 получена летом 1976 г., когда в северном полушарии было летнее солнцестояние, а в южном — в разгаре зима. Утренний терминатор, который мы видим в левой части снимка, внизу пересекает большое кратерное Море Аргир диаметром около 900 км (светлое пятно несколько ниже центра на терминаторе). Светлый район внизу на краю диска у терминатора — это туманный «полярный воротник», окружающий район южного полюса. На снимке сам полюс находится за терминатором, в области полярной ночи. Ниже Аргира расположены крупные метеоритные кратеры с белым от осадков дном.

Выше и правее Аргира на снимке расположена большая темная область, которая на старых картах называлась Эритрейским (Красным) морем. В его северной части изображение астрономов прошлого помешало густую сеть «каналов». Где же эти каналы? Впрочем, один из них мы видим: это извилистый контур правее темной области, почти на лимбе. А на месте канала Копрат, указанного на старых картах, находится система огромных каньонов, которые видны у терминатора (выше центра) как ряды параллельных долин. Каньоны ныне носят название долины Маринера, в память об аппарате «Маринер-9», одной из главных научных задач которого была телевизионная съемка поверхности Марса. Об этих каньонах у нас речь впереди. Других каналов здесь не видно.

Как всегда во время солнцестояния, наклон плоскости терминатора к экватору близок к наклону полярной оси к плоскости орбиты. Поэтому на фото 15 мы видим только часть «воротника» южной полярной шапки. Сам южный полюс, где царит полярная ночь, находится за терминатором. Вверху на фото 15, на самом лимбе, находится северный полюс, закрытый облаками.

Еще один снимок утреннего терминатора Марса представлен на фото 13. Планету в

такой фазе можно видеть только с космического аппарата. Аргир виден далеко на юге, а долина Маринера — в центре. Севернее, с хвостом из белых облаков, на дневной стороне появилась одна из высочайших вулканических вершин — гора Аскрийская. Здесь находится район Фарсида, где расположены гигантские вулканические горы. Светлая область левее и выше — равнина Амазония.

Дальнейшее усовершенствование методов обработки позволило получать куда более детальные снимки. На фото 14 представлен Марс в двух положениях, с долготой центра около 75° (слева) и 180° (справа). В нижней части левого снимка виден каньон долины Маринера (в центре) и три гигантские вулканические вершины в светлой области Фарсида. Небольшая темная область со сложным рельефом вверху — Лунное плато, а справа от него — оранжевая равнина Хриса. На их границе в 1976 г. совершил посадку «Викинг-1». От Лунного плато к югу тянется извилистая линия одного из «каналов» — это борозды Сакра, которые оканчиваются каньоном Гебы. Между южной границей равнины Хриса и каньоном — пятнистая земля Ксанфа. Южная часть планеты в тени, там зима.

Внизу на правом снимке фото 14 многочисленные кратеры покрывают Киммерийскую землю. Светлая оранжевая область внизу — равнина Элизий, справа вверху — равнина Амазония. В центре снимка вытянутый с севера на юг оранжевый лепесток — патера Орк. Далее к северу — светлая россыпь кратеров. Это горы Тартар. Темная область выше — западная часть равнины Аркадия, а совсем у северного лимба — темная Великая Северная равнина. Слева на ее границе, у лимба, большой кратер с темной точкой на дне. Это кратер Ми, слева от которого опустился «Викинг-2». Большое темное пятно слева — восточная часть равнины Элизий. Далеко на юге, у среза снимка, видны голубые отложения на поверхности, вблизи южной полярной шапки.

Оттенки от розового до кирпично-красного характерны для всей видимой на этих снимках поверхности Марса. Краски несколько сглажены благодаря тому, что поверхность видна сквозь легкую атмосферную дымку, хотя в целом они немного подчеркнуты. По той же причине лимб на снимках не совсем четкий, как и должно быть у планеты, имеющей атмосферу. Так же, как у Венеры, атмосфера Марса на 95% состоит из углекислого газа, но чрезвычайно разрежена. Среднее давление у поверхности составляет 6,1 мбар. Это в 15 000 раз меньше, чем на Венере, в 160 раз меньше, чем у

поверхности Земли на уровне моря, и в 20 раз ниже, чем предполагалось на Марсе по наземным наблюдениям. Принятое ныне значение 6,1 мбар соответствует некоторой условной поверхности, так как для Марса такой удобной точки отсчета, как «уровень моря», не существует. В наиболее глубоких низинах давление достигает 10—12 мбар, а на некоторых горных вершинах менее 1 мбар. Уровень 6,1 мбар соответствует тройной точке фазового состояния воды (лед—жидкость—пар). (Только следует помнить, что 6,1 мбар — это давление углекислого газа атмосферы, а парциальное давление водяного пара составляет ничтожную величину.) С высотой температура в атмосфере быстро падает. На высоте около 50 км, а зимой и ниже, она бывает настолько низкой, что начинает замерзать сам углекислый газ атмосферы. Голубые облака, наблюдаемые иногда в районе полюса и терминатора, состоят из кристаллов замерзшей углекислоты. Странно это звучит: замерзает атмосфера. Очень холодно на Марсе!

Облака земного типа (из водяных капель) на Марсе бывают весьма редко. Атмосфера очень сухая. В самых безводных районах Земли в атмосфере в сотни раз больше водяного пара. В среднем его концентрация в атмосфере Марса близка к 0,05% (по объему), но меняется в десятки раз, во всяком случае, в меньшую сторону. В атмосфере содержится 2,5% азота, 1,6% аргона, 0,1—0,4% кислорода, угарный газ (0,06%) и малые количества благородных газов — неон, криптон, ксенон. Но главная составляющая, 95%, как уже говорилось, — углекислый газ (рис. 4.6).

Вернемся, однако, к поверхности. Чтобы различить образования, которые намного меньше Аргира, необходимо использовать космические снимки. На них видно множество кратеров, покрывающих поверхность планеты. Боль-

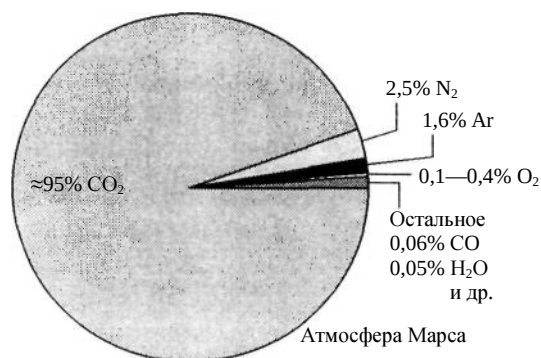


Рис. 4.6. Состав атмосферы Марса. Главное место (95%) занимает углекислый газ

шинство кратеров образовалось в эпоху интенсивной метеоритной бомбардировки планеты, примерно 3,5—4 млрд лет назад. Значительная их часть сохранилась очень хорошо. Такова цепочка из кратеров, изображенных на цветном снимке «Марса-5» (фото 18). Размер участка по вертикали 700 км, диаметр нижнего кратера 140 км. Дно двух больших нижних кратеров имеет светло-оранжевый оттенок, в то время как три меньших кратера в правой части снимка имеют темное дно.

Дальше мы увидим, что темные пятна на дне кратеров чаще всего связаны с образованием песчаных дюн, которые наматываются сильными ветрами, дующими над планетой. Следует обратить внимание на детали в верхней части снимка. Это широкий каньон, который получил название долины Узбой, и извилистая долина слева, напоминающая русла земных рек. На этом снимке хорошо передан естественный цвет марсианской поверхности.

Рельеф планеты

Детальное знакомство с поверхностью планеты состоялось в 1972 г. после окончания пылевой бури на Марсе, когда «Маринер-9» приступил к электронному фотографированию. За 10 месяцев работы аппарата была заснята практически вся поверхность, но снимки ряда районов, изображение которых было получено еще сквозь остатки пылевых облаков, требовали уточнения. Съемку нескольких районов с высоким разрешением выполнили в 1974 г. «Марс-4 и -5». А в 1976 г. на орбиту спутников Марса вышли «Викинг-1 и -2», имевшие в качестве одной из основных задач поиск простейших форм жизни на планете. Они проводили весьма детальную съемку поверхности как для выбора района посадки спускаемых аппаратов, так и для продолжения других исследований.

Карты рельефа и отражательных свойств поверхности Марса приведены на рис. 4.7. Они были составлены исследователями США по данным «Маринера-9». В нашей экскурсии по Марсу удобно воспользоваться основной картой рельефа (рис. 4.7, внизу и рис. 4.8) и картами полярных районов — южного и северного (рис. 4.7, сверху). Положение светлых и темных областей иллюстрирует правая часть рис. 4.7 и рис. 4.8.

Примерно от 40° з.д. и далеко к востоку тянется область, наиболее густо покрытая метеоритными кратерами всевозможных размеров. Она простирается от 50° с.ш. и почти до самого южного полюса, причем к востоку граница ее постепенно спускается от 50° с.ш.

до экватора (у 220° з.д.). Как мы увидим ниже, это граница между лавовыми полями, которыми покрыта значительная часть северного полушария планеты, и материковыми районами южного. От 220° з.д. и далее к востоку граница проходит примерно на уровне 10° ю.ш. почти до $130\text{--}140^\circ$ з.д. Здесь плотность кратеров несколько снижается. Отметим несколько крупных кратеров в этом районе. Кратер Лоуэлл с двойным валом находится в точке 52° ю.ш., 81° з.д. Еще два похожих кратера — Лио, диаметром 220 км, и Скиапарелли, диаметром 470 км, находятся у 50° с.ш., 331° з.д. и 3° ю.ш., 343° з.д. соответственно. Кратер Лио — последний северный форпост сильно кратерированной местности. Среди кратеров расположены несколько обширных равнин и низменностей. Одна из них — это уже известная по фото 15 равнина Аргир, диаметром около 900 км, с центром у 50° ю.ш., 42° з.д. Это типичное кратерное море, каких много на Луне. Другая равнина — Эллада, протяженностью от 1600 до 2000 км (центр 45° ю.ш., 290° з.д.). Дно ее совсем не такое ровное, как показано на этой карте. На долготе Эллады, на широтах 10° и 15° с.ш., находятся две равнины: Большой Сирт и равнина Исиды, которые к востоку переходят в равнину Элизий, а к северу — в равнину Утопия. Здесь в 1976 г. совершил посадку «Викинг-2». Еще одна равнина, Ацидальной, находится на долготе Аргира, на $30\text{--}50^\circ$ с.ш. К югу она переходит в равнину Хриса, где проходили исследования «Викинга-1». Южнее, у 23° ю.ш. и $19,5^\circ$ з.д., в 1974 г. опустился аппарат «Марс-6», а примерно на широте Аргира, но в 4,5 тыс. км к востоку (45° ю.ш., 160° з.д.), находится точка посадки на Марс первого посланца Земли — аппарата «Марс-3» (1971 г.).

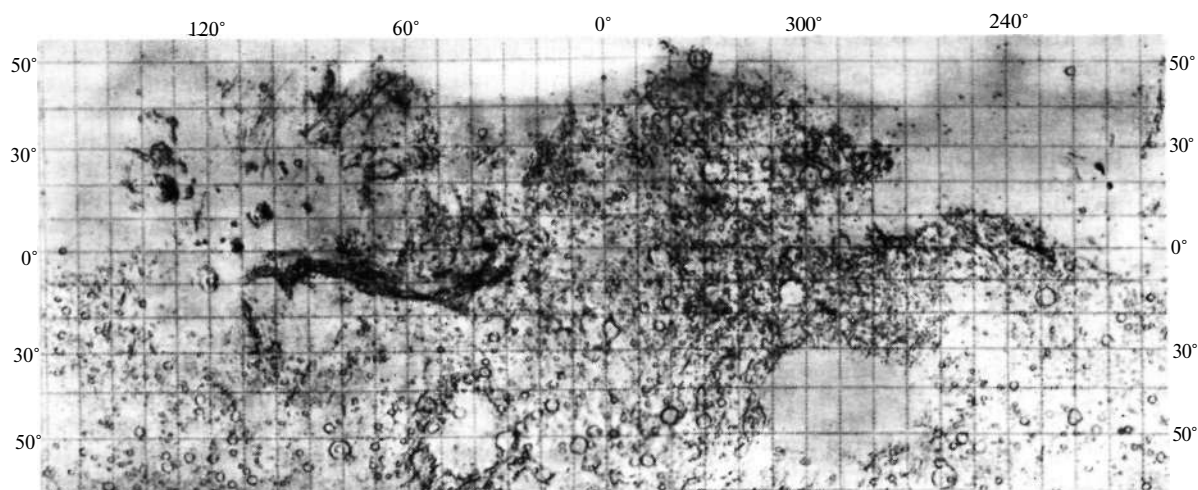
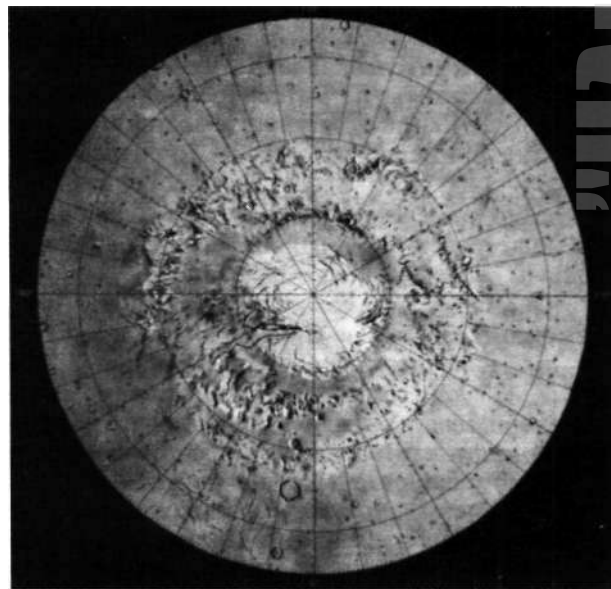
К югу местность с высокой плотностью кратеров спускается до $75\text{--}80^\circ$ ю.ш., но сам район полюса в пределах этих параллелей представляет собой равнину. Удивительно, что примерно так же устроен район северного полюса Марса. Но, в отличие от рельефа южного полушария, он окружен огромной Великой Северной равниной (рис. 4.7, в центре). На равнине есть много мелких кратеров, но большой — лишь один — Ломоносов (65° с.ш., 8° з.д.). Только между 70-й и 80-й параллелями снова можно встретить кратерированный рельеф. На «пятачке» в центре Северного полярного района расположена полярная шапка диаметром до 1000 км. На юге центр южной полярной шапки смещен к 86° ю.ш., 45° з.д.

Двигаясь к северо-западу от Аргира, мы встречаемся с удивительным образованием — долиной Маринера. Это гигантский каньон, размеры которого поражают воображение. На Земле нет ничего, даже отдаленно на него похожего по своим масштабам. Голова каньона расположена в лабиринте Ночи (центр 8° ю.ш., 97° з.д.). Дальше каньон проходит к востоку между 4-м и 18-м градусами ю.ш. до, примерно, 35° з.д., где отклоняется к северу. Общая длина каньона достигает 4,5 тыс. км. Знаменитый Большой каньон в Аризоне (Северная Америка) целиком уместился бы в одном из второстепенных оврагов, которые прорезают стенки марсианского каньона. Ширина его превышает 100 км, глубина в среднем 2—3 км, а в некоторых частях заметно больше.

Еще дальше в северо-западном направлении мы попадаем в другой интереснейший район Марса — страну гигантских вулканов Фарсида (центр: 0° , 110° з.д.). Три вулканических конуса, гора Аскрийская, гора Павлина и гора Арсия, превышающие по высоте 20 км, и находящаяся к северо-западу от них гора Олимп — самые высокие вершины на планетарных группах Земли (если, конечно, обратная сторона Меркурия не приготовила нам какой-либо маловероятный сюрприз). С запада и с северо-запада страна Фарсида окаймлена двумя равнинами — Амазония и Аркадия. Вулканические сооружения меньших размеров встречаются и немного западнее, в области Элизия.

За исключением самых крупных деталей (Эллада, Аргир), все эти подробности, конечно, нельзя различить с Земли. Зато хорошо различаются большие темные пятна. В нижней части рис. 4.7, справа, показано, как выглядит полушарие Марса с центром на долготе нулевого меридиана. Кстати, положение последнего привязано к маленькому кратеру Эри, названному в честь астронома, определившего положение начального меридиана Земли. Самая темная область севернее Эллады — это Большой Сирт. Если светлые области отражают до 30% падающего света, то Большой Сирт — только 8—10%.

Что же представляют собой эти темные районы, которые давно привлекают внимание астрономов? Уже делались попытки связать темные (или светлые) районы с их высотой. Но, как можно видеть из рис. 4.7, загадочные темные области приходятся на самые различные участки фотокарты. Еще лучше это видно на фотокарте, составленной по данным «Марса-4 и -5» (рис. 4.8), где рельеф показан вместе с отражательными свойствами поверхности. Это небольшая часть южного полушария, протяжен-

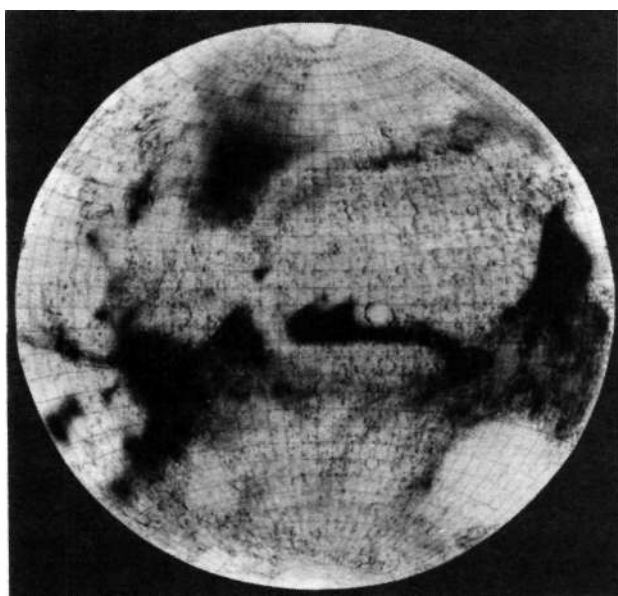
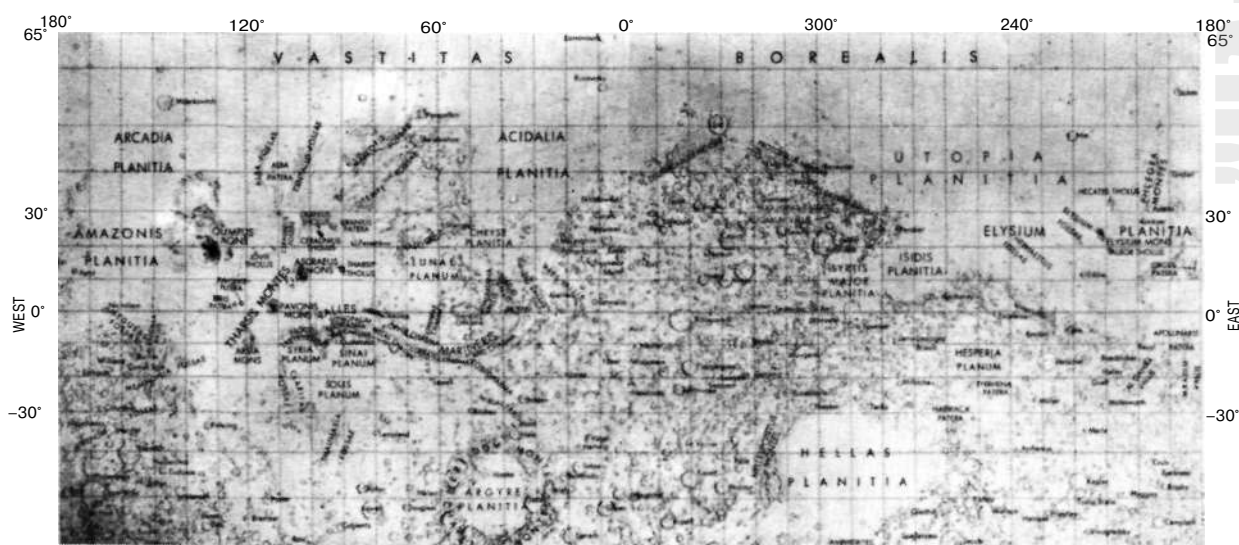


ность участка в долготном направлении составляет 3070 км (на широте 30°) и от 750 до 1500 км в направлении север — юг.

На широте 40—45° и долготе 35—40°, в нижней части рис. 4.8, виден северный вал Арги́ра с характерным венцом светлых и темных полос, расположенных радиально относительно центра бассейна. Венец, по-видимому, отражает изрезанность вала, а полосы — следы переноса материала под действием регулярных ветров. На Марсе, согласно теории, должны существовать редкие на Земле горно-долинные ветры. «Эоловы венцы», как мы увидим ниже, окружают многие детали марсианского рельефа, особенно после пылевой бури. Севернее Арги́ра, вдоль меридиана 35° расположены уже знако-

мые по фото 18 кратеры Холден — Хейл и долина Нергал. Темные пятна иногда совпадают с дном кратера, но однозначно с рельефом не связаны. Так, например, вал Арги́ра с северной стороны — темный, с южной — светлый. Как будет видно из дальнейшего, иногда это связано с направлением господствующих ветров.

В большинстве случаев рельеф не связан с окраской района. Установлено, что они могут быть и возвышенностями и низменностями. Но сопоставление крупномасштабных районов (в сотни километров) часто дает несколько большую высоту для более темного района. Такие результаты были получены и с искусственных спутников Марса, и средствами наземной радиолокации. В последнем случае удалось также измерить глубину некоторых кратеров.



Например, глубина кратера Гюйгенс (14° ю.ш., 304° з.д.) близка к 2 км.

Немного подробностей о кратерах и «каналах»

Познакомимся теперь подробнее с некоторыми особенностями марсианского рельефа. Под действием ветра и перепадов температур он постепенно сглаживается (конечно, за очень длительное время). Многие кратеры сильно разрушены. Иногда от них остаются только следы в виде темного или светлого круга. На рис. 4.9 показан район, примыкающий с севера к валу кратерного Моря Аргир. Участок имеет

Рис. 4.7. Вверху: слева — южная, в центре — северная полярная области, справа — расположение новых наименований. Внизу слева — карта рельефа, справа — положение светлых и темных областей (самая темная область — Большой Сирт находится справа по лимбе, над светлой Элладой). В центре всех карт — нулевой меридиан. По материалам NASA

размеры примерно 600 × 820 км. Два древних кратера диаметром около 80 км, от которых осталось только более темное дно, расположены у среза снимка, выше центра. Ниже можно видеть район, обильно усеянный большими кратерами. Поляриметрические измерения, выполненные в этой области «Марсом-5», показали, что поверхность здесь покрыта камнями и грубыми обломками скал.

Структура у многих марсианских кратеров такая же, как у лунных. У них есть кольцевой вал, иногда центральная горка. Однако из-за большего ускорения свободного падения диаметр кратеров примерно вдвое меньше лунных. Плотность кратеров, т.е. их количество на единицу площади (включая разрушенные образования), больше, чем на Луне. Это находит естественное объяснение в близости пояса астероидов (малых планет), которые поддерживали интенсивную метеоритную бомбардировку поверхности не только на ранней стадии формирования планет, но и в более позднее время. Нет сомнений, что иногда метеоритные кратеры на Марсе образуются и в наши дни. Косвенное доказательство этого таково. Как ни мала ветровая эрозия деталей рельефа Марса, все-таки валы кратеров постепенно разрушаются. В то же время местами мы видим свежие образования, возраст которых вряд ли превышает несколько миллионов лет. А миллионы лет для планеты — это

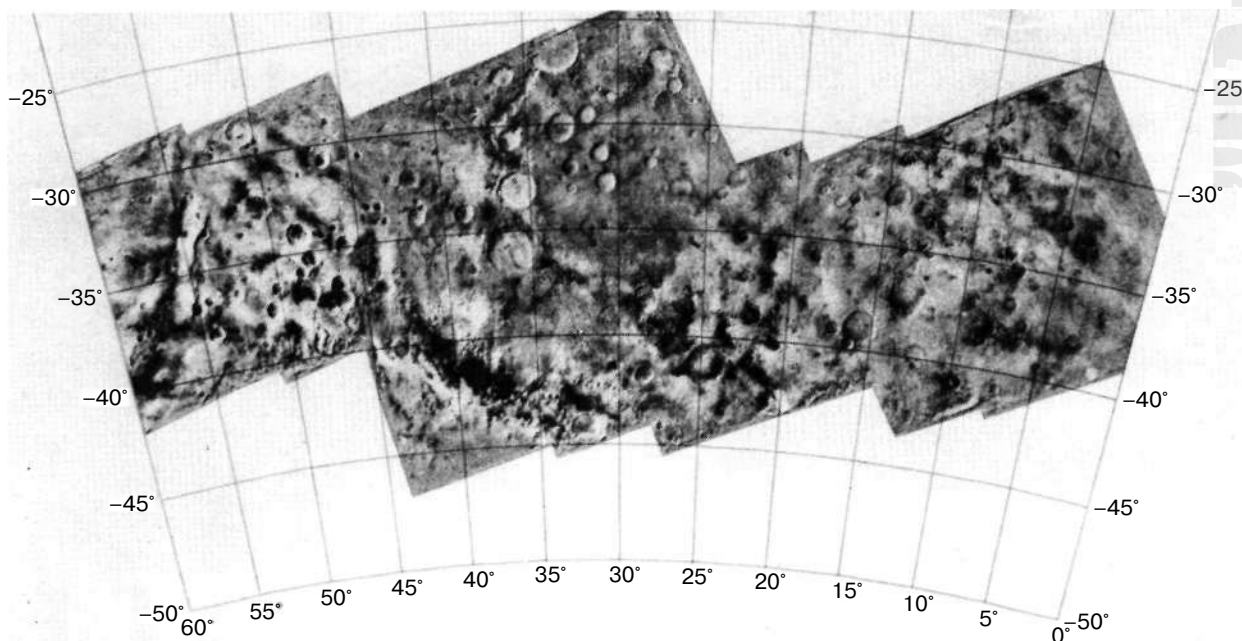


Рис. 4.8. Фотокарта района, охваченного фотосъемкой «Марса-4» и «Марса-5». На долготе 54° находится уступ Огига; на 45—35° и широте около 42° расположен северный вал Аргира. На долготе 35° находится цепочка кратеров Холден—Хейл (Институт проблем передачи информации АН СССР)

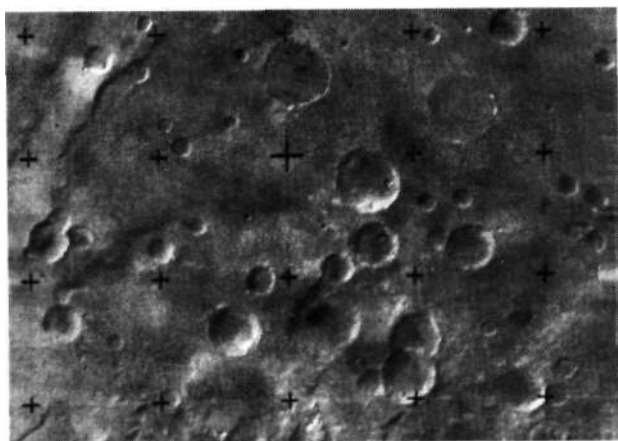


Рис. 4.9. Район к северу от вала кратерного Моря Аргир. Размеры участка 600 × 820 км. Снимок «Марса-5»



Рис. 4.10. Хорошо сохранившийся метеоритный кратер диаметром 25 км (33° ю.ш., 19° з.д.). Узкоугольная камера «Марса-5»

практически наши дни. Пример такого кратера мы видим на снимке «Марса-5», выполненном с помощью телеобъектива (рис. 4.10). Диаметр этого кратера около 25 км. В нижнюю часть его вала угодило менее крупное метеоритное тело. Выброс грунта в этом случае был значительно меньшим. Как мы увидим из дальнейшего, грунт Марса очень сыпучий. На

рис. 4.10 можно заметить оползни на внутренней стороне вала.

Крупномасштабная фотография района горной области у 36° ю.ш. и 79° з.д. приведена на рис. 4.11. Цепочка из трех кратеров состоит из сильно разрушенного старого кратера диаметром 50 км и двух менее разрушенных, диаметром 20 и 8 км. В отличие от кратера



Рис. 4.11. Район плоскогорья северо-западнее Аргира (36° ю.ш., 79° з.д.). Диаметр большого сильно разрушенного кратера около 50 км. Снимок сделан узкоугольной камерой «Марса-5»

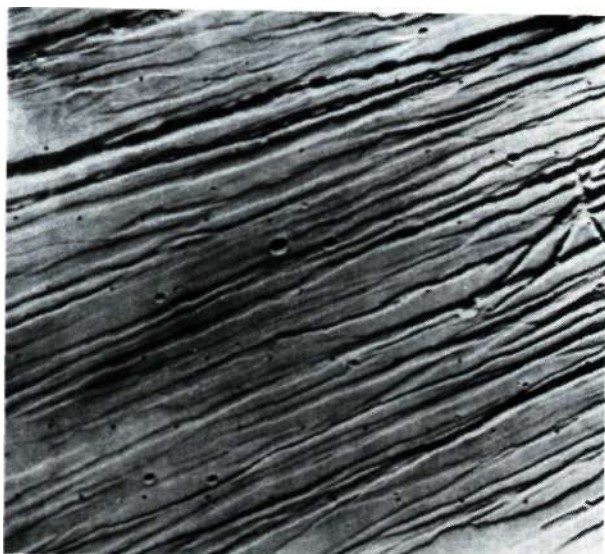


Рис. 4.12. Узкие Керавнские борозды в северной части Фарсиды. Вертикальный размер снимка около 100 км. Снимок NASA

на рис. 4.10, это более старые образования. Шкала возрастов, конечно, очень условна, но большой разрушенный кратер на рис. 4.11 может иметь возраст более 2 млрд лет.

Если открытие на Марсе в 1965 г. первых кратеров, подобных лунным, было сенсацией, то позже выяснилось, что в экваториальных районах, которые раньше считались пустынями, трудно найти место, где бы не было метеоритных кратеров. Однако севернее 40–50° с.ш. и почти до северного полюса их мало. Две обширные равнины Амазония и Утопия почти лишены кратеров. Об одной интересной гипотезе, объясняющей особенности поверхности Мар-

са, мы расскажем позже. Низкая плотность кратеров на этих двух равнинах, а также на всей области от 50° с.ш. почти до северного полюса связана со значительными различиями рельефа северного и южного полушарий в целом. Их асимметрия проявляется также в том, что при среднем диаметре планеты 6775 км и разнице между экваториальным и полярным диаметрами 20 км северный полярный район примерно на 4 км ниже южного. Поиск со спутников неоднородностей в распределении масс показал, что гравитационные аномалии на Марсе превосходят такие же аномалии на Земле в 17 раз. Это говорит о гораздо большей однородности недр Земли. К тому же если Землю можно представить слегка сплюснутым сфероидом, то у Марса и экваториальные оси различаются на 2 км, причем большая экваториальная ось проходит через область Фарсида, где находятся гигантские древние вулканы. Однако природа гравитационных неоднородностей Марса не похожа на лунные масконы — застывшие протяженные и глубокие лавовые поля. По характеру они ближе к прочным и массивным плитам, соответствующим отдельным геологическим провинциям.

В формировании рельефа Марса геологи различают множество периодов, которые значительно перекрывались, а некоторые образования, по-видимому, появлялись периодически. Наиболее характерные виды рельефа Марса — это обширные кратерированные области, пустынные равнины, вулканические зоны и, наконец, районы особого рельефа, которые не укладываются в одну группу.

В этой классификации нет каналов, хотя некоторые естественные образования тянутся на большие расстояния, 2000 км и более. Таковы рилли — длинные узкие субпараллельно расположенные долины в море Сирен. Иногда такие долины располагаются грядами, как на рис. 4.12, где представлены Керавнские борозды (в северной части Фарсиды) длиной до 200–300 км. Разумеется, увидеть с Земли их невозможно.

Сейчас ясно, что истоки великого спора о каналах лежат в природе человеческого глаза. Он обладает выработанной миллионами лет способностью «схватывать» и даже угадывать то, что видно плохо, что различается с трудом. Возможно, когда-то, когда человека повсюду подстерегали опасности, это было очень полезно. Дело в том, что если глаз и можно уподобить фотокамере, то только «думающей» фотокамере. Информация, которая поступает от глаза в мозг, уже обработана и сжата в 160 раз. Таково соотношение между числом чувствительных элементов в сетчатке глаза и

нервных волокон, соединяющих глаз с мозгом. Эта система обработки особенно чувствительна к линейным структурам. Если ряд плохо различимых точек находится примерно на одной (прямой или кривой) линии, мы воспринимаем их как линию. Так, космонавты легко различают из космоса железные и шоссейные дороги, след за кормой корабля, линии электропередач. Легко подсчитать, что для этого острота зрения должна в 10—20 раз превосходить «положенные» человеку 30 угл. с. Читатель легко может убедиться в собственных «необычных» способностях: натянутый вдали провод он сможет различить под углом всего 1—2 угл. с. Не у всех людей эта способность видеть линии вместо плохо различимых точек одинакова. Поэтому Лоуэлл совершенно честно утверждал, что видит каналы, а скажем Холл, который сумел открыть очень маленькие луны Марса, столь же искренне каналы не видел. Именно такими цепочками пятен и оказались «каналы».

Спящие вулканы и лавовые поля равнин

Когда в 1971 г. первые искусственные спутники вышли на орбиты, ученые с нетерпением ожидали результатов. Спутников было сразу три: «Маринер-9», «Марс-2 и -3». Еще на мелкомасштабных электронных фотографиях, выполненных при сближении аппаратов с Марсом, смутно различались какие-то непонятные пятна. Но ученых ждало разочарование: всю планету окутали оранжевые облака пылевой бури. Лишь четыре темных пятна постоянно присутствовали над хаосом пылевых облаков. Этими пятнами оказались четыре гигантские вулканические вершины — гора Олимп и три вулканических конуса в области Фарсида. Они образуют почти правильный треугольник с вершинами в точках 9° ю.ш., 120° з.д.; 18° с.ш., 134° з.д. и 11° с.ш., 114° з.д. Эти недействующие (или давно спящие) вулканы представляют собой самые высокие горы, известные пока человечеству. Может быть, где-либо в Солнечной системе мы еще встретимся с чем-либо подобным, но на Земле нет ничего похожего. В том, что это вулканические конусы, нет никаких сомнений: на всех вершинах расположены вулканические кальдеры немислимых размеров. Некоторые из них были детально изучены уже в первые месяцы работы «Маринера-9». На крупноплановом снимке (рис. 4.13) перед учеными предстала огромная кальдера весьма почтенного возраста; что-нибудь около нескольких сотен миллионов лет (более точную оценку дать

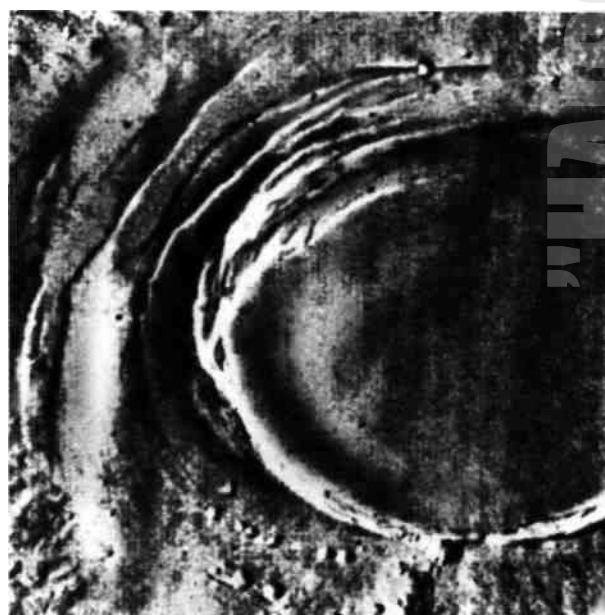


Рис. 4.13. Огромная вулканическая кальдера диаметром 130 км венчает вершину горы Арсия — древнего и давно не действующего вулкана. Снимок NASA

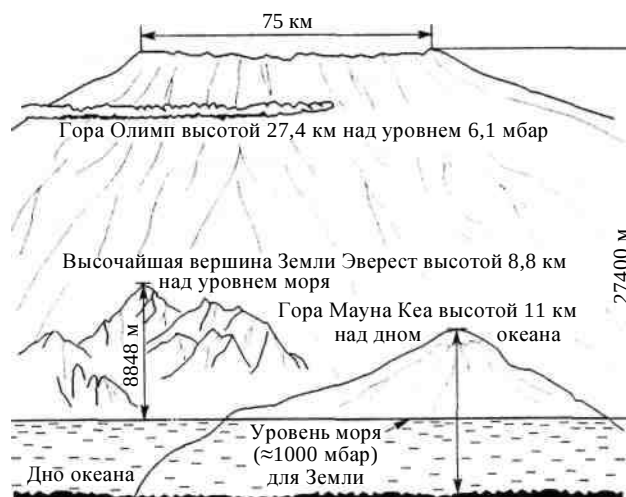


Рис. 4.14. Сравнительная схема высот горы Олимп и Эвереста

трудно). Это вершина горы Арсия, самой южной из гор. Диаметр кальдеры 130 км.

Но самый высокий из четырех вулканов — гора Олимп. На рис. 4.14 в сравнимом вертикальном масштабе показаны высочайшая вершина земного шара: Джомолунгма (Эверест), 8848 м, и гора Олимп на Марсе, 27 400 м от подножья. Гора Олимп — вулкан, который специалисты относят к типу щитовых. Лава таких вулканов отличается жидкой консистенцией и при извержениях растекается на большие расстояния. В отличие от схемы (см.

рис. 4.14), склоны такого вулкана очень пологие. Именно такую гору мы и видим (фото 16): диаметр ее основания достигает 600 км. При большом увеличении на склонах горы Олимп видны бесчисленные застывшие потоки, оставшиеся после извержений.

Масса горы Олимп огромна. Даже при малом (372 см/с^2) ускорении свободного падения вес ее намного больше, чем у величайших гор Земли. (Высота земных гор менее 9 км, а диаметр основания крупнейшего вулкана 250 км.) Три других гиганта в области Фарсида немного уступают Олимпу по высоте, но это компенсируется их расположением на возвышенности 3–5 км. Эта группа вулканов начала извергаться, вероятно, около 1,5 млрд лет назад. Извержение должно было представлять потрясающее зрелище: диаметр жерла вулканов группы Фарсида подстать их размерам. Во время извержения лава Олимпа изливалась через находящуюся на ее вершине гигантскую вулканическую кальдеру поперечником около 70 км (фото 17). Хорошо видно, что кальдер было несколько. Интересно отметить, что район горы Олимп был известен астрономам прошлого под названием «Снега Олимпа». Согласно мифологии, Олимп — высочайшая вершина, где обитали боги. Это название было дано неясному светлому образованию круглой формы. Образованием оказалось 1000-километровое кольцо облаков, часто опоясывающее высочайший вулканический конус. Таким образом, название оказалось пророческим.

Атмосферное давление на уровне вершины из-за большой высоты составляет всего 0,5 мбар. С высотой падает также температура. Это и было причиной того, что на тепловом изображении (см. фото 12) вулканические вершины района Фарсида выделяются холодными пятнами.

Вулканы существуют и в других районах Марса. Но пока среди них не найдено ни одного действующего. Похоже, что марсианский вулканизм ныне дремлет.

Трудности в оценке возраста вулканов объясняются вот чем. Возраст легче всего определить по количеству метеоритных кратеров на склонах. К сожалению, нынешняя интенсивность метеоритной бомбардировки неизвестна. Поэтому, даже зная среднее количество кратеров на единице площади, возраст найти не удастся: в дроби есть числитель, но нет знаменателя. Еще больше осложняют дело довольно убедительные доказательства того, что многие районы поверхности Марса, похоже, побывали вблизи его полюсов, где особая форма

отложений на поверхности искажает метеоритную датировку.

Многие ученые считают, что обширные равнины Марса, лишенные кратеров, покрыты, подобно лунным морям, толстым слоем застывшей лавы. Потоки лавы выделялись сквозь трещины в коре и заполняли низины. Вероятно, такова природа Великой Северной равнины. Наряду с этим лава в изобилии текла с вершин вулканов. На рис. 4.15 показан район, «затопленный» во время извержения вулкана Арсия.

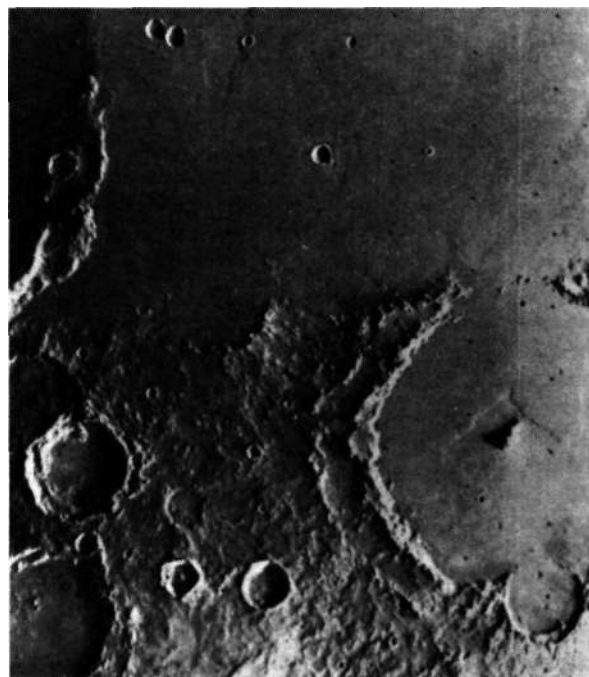


Рис. 4.15. Обильные излияния вулканических лав привели к затоплению обширных районов на расстояниях до 1500 км от вулкана. Участок поверхности выше и левее кратера Пикеринг (справа, диаметр 120 км) и само дно кратера подверглось затоплению при извержениях вулкана Арсия. Снимок NASA

Вулканы выбрасывали также тучи пепла, которые ветер разносил по планете. И хотя из-за малой плотности атмосферы ветры не в состоянии сильно воздействовать на поверхность, следы ветровой эрозии заметны во многих районах Марса.

Выше говорилось о темных пятнах на дне кратеров или вблизи кратеров на поверхности планеты. Оказалось, что эти пятна имеют явную связь с ветрами: после бури появляются новые пятна, а прежние становятся менее заметными. Как ни странно, оказалось также, что одно и то же пятно может быть как темным, так и светлым, в зависимости от направления освещения. Такими свойствами

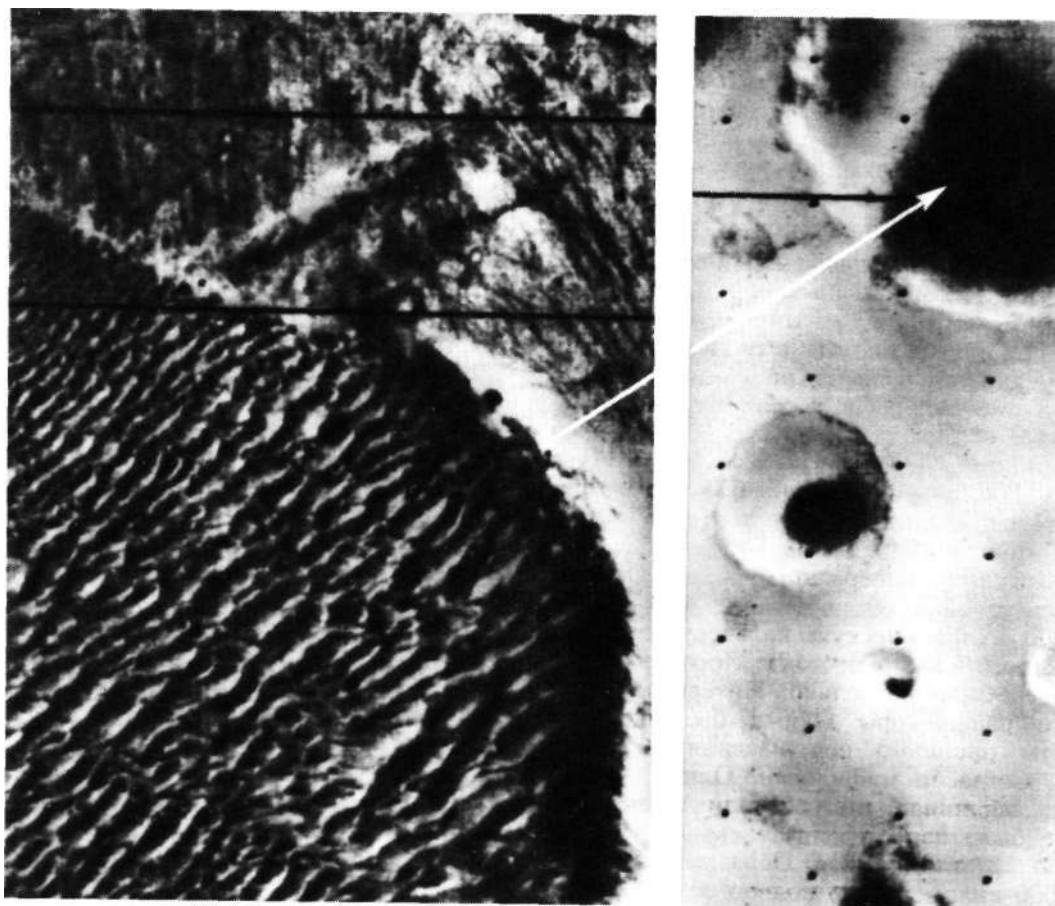


Рис. 4.16. На дне некоторых кратеров имеются черные пятна. При большом увеличении видно, что это дюны, которые образуются из сыпучего материала под действием ветра. Участок вытянут более чем на 100 км. Снимок NASA

обладают гряды песчаных дюн, которые наметает ветер (рис. 4.16). Часто они образуются на дне неглубоких кратеров, где нарушается однородность потока ветра, а грунт особенно сыпучий. В миниатюре такие образования можно видеть на земных пляжах, а в более крупном масштабе — это барханы в пустыне (фото 20). Но на Марсе они еще грандиозней. Как видно из снимка, такое поле, образованное грядами дюн, будет светлым или темным в зависимости от того, видим ли мы их освещенный или затененный склон. Таково же происхождение шлейфов или венцов вокруг кратеров, возникающих после пылевой бури (рис. 4.17).

Масса 1 м^3 газа у поверхности Марса составляет всего 16 г — это в 80 раз меньше, чем у поверхности Земли. Поэтому может показаться странным, что марсианские ветры в состоянии сдвигать горы песка. На самом деле все определяется скоростью ветра. Ураганы на Земле при скорости ветра 40–50 м/с

срывают крыши домов и останавливают движущиеся поезда. И хотя плотность газа у поверхности Марса намного меньше, но скорости его значительно выше. Напомним, что скоростной напор определяется квадратом этой скорости. Дюны, показанные на рис. 4.16 и 4.17, наблюдались «Маринером-9» в 1971–1972 гг. Видимо, они сохраняются недолго; по данным «Марса-5», через 2 года они были куда менее заметными.

Более устойчивы крупномасштабные полосы и характерные эоловые венцы, создаваемые регулярными местными ветрами. На рис. 4.18 показано плоскогорье с центром у 35° ю.ш., 60° з.д. Изображение охватывает участок около 1000 км по горизонтали. Темные и светлые полосы проходят вдоль плоскогорья и тянутся на расстояние до 500 км в направлении господствующих ветров. По-видимому, ветер создает здесь поля барханов, вытянутые вдоль плоскогорья, либо переносит вдоль полос какие-то темные частицы. Влево плоскогорье посте-



Рис. 4.17. Венец из темных полос окружает сравнительно небольшой кратер в разгар пылевой бури на Марсе. Снимок NASA



Рис. 4.18. Крупномасштабные полосы на плоскогорье простираются на несколько сотен километров. Их природа, по-видимому, связана с местными ветрами. Снимок «Марса-4» (красный фильтр)

пенно повышается. Справа оно ограничено эскарпом уступ Огига — сравнительно крутым обрывом, показанным на фото 19 и в правой части рис. 4.18, у меридиана 55° з.д. Перепад высот, измеренный альтиметром «Марса-5», в точке, расположенной немного ниже светлой вершины эскарпа (с кратером), составил 1,2 км. Крутизна склона здесь оценена в $16\text{--}30^\circ$. Вершины мало выделяются на снимках, главным образом из-за малой величины наклонов поверхности и отсутствия четких теней.

Левее (западнее) района, который был представлен на рис. 4.18, плоскогорье заканчивается горным хребтом Тавмасия, достигающим высоты 9 км. Единственное, что выдавало высшую точку хребта в районе Тавмасия в момент съемки с аппарата «Марс-5», — лег-

кая гряда голубых конденсационных облаков (фото 21). Вероятнее всего, природа этих облаков — конденсация ледяных кристалликов в атмосфере. Одна часть кратеров в этом районе имеет светлое дно, другая — темное. Не исключено, что темное дно опять-таки связано с песчаными дюнами. Данные поляриметрии указывают, что грунт в районе горного хребта Тавмасия очень мелкозернистый.

Естественная окраска поверхности Марса определяется присутствием гидратов окислов железа, образующих слой красной пудры на зернах силикатного песка — основной составляющей поверхности. Примесь гидратов железа составляет до 10%. Не исключено, что в районах более темной поверхности и эоловых полос имеются примеси других пород, возможно ферросиликатов.

Подавляющая часть поверхности Марса представляет мелкий красный песок, из которого торчат бесчисленные камни. Но даже на высоких камнях можно заметить шапки из того же красного песка.

Средний размер песчинок очень мал, всего $1\text{--}50$ мкм. Ветры в начале пылевой бури легко поднимают такие песчинки в атмосферу. Когда буря затихает, осевшие песчинки, по-видимому, слипаются в комочки размером до 1 мм. В слипании частиц определенную роль могут играть электростатические силы, возникающие при трении сухих пылинок, или намерзание на них водяного или уголекислотного инея. О том, что частицы гранулированы в комочки, говорят данные тепловой радиометрии. Коэффициент тепловой инерции для марсианского грунта оказался близким к значению $2 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1/2} \cdot \text{К}^{-1}$, что требует размера частиц $0,1\text{--}1,0$ мм. В некоторых районах аппараты «Марс» обнаружили повышенные значения тепловой инерции, присущие скальным породам. Такова область под названием Уступы Цербера (12° ю.ш., 207° з.д.) — южная граница Равнины Элизий. Здесь, вероятно, можно встретить крупные скалы. В других районах (например, в Тавмасии) поляриметр «Марс-5» обнаружил очень низкие значения поляризации, которые говорят о мелкораздробленном верхнем слое грунта. А наиболее крупные обломки обнаружены в районе к северу от вала Аргира. Здесь можно встретить массивные камни и скальные глыбы. С аппаратов «Марс» проводились радиофизические измерения, которые позволяют определить диэлектрическую проницаемость, а через нее — плотность грунта. Последняя оказалась в среднем около $1,85 \text{ г/см}^3$. Таким образом, поверхность Марса слагают пыль, песок, камни и в некоторых

местах скалы. Все это в 1976 г. подтвердили панорамы с «Викингов», на которых видны и пыль, и камни, и даже скалы. Пылевой компонент представляет собой мелкий легкий песок главным образом силикатного состава со средней плотностью $0,85\text{--}2\text{ г/см}^3$. Благодаря сухости марсианского климата под действием ветра песок легко «течет» со сколько-нибудь крутых склонов, таких как валы кратеров.

Каньоны и древние реки Марса

Наиболее крутые склоны на Марсе — это откосы каньонов. Самый большой каньон — долины Маринера, протяженностью до 4500 км и глубиной до 5—7 км. На его дне атмосферное давление достигает 12 мбар. Ширина отдельных долин также очень велика и доходит до 150 км и более. Центральную часть каньона можно видеть на рис. 4.19, где представлена одна из наиболее широких долин. По сторонам каньона имеется развитая система «притоков» — оврагов. Его западная оконечность переходит в лабиринт Ночи — разветвленную систему трещин в поверхности. Каждая из них достигает 30 км в ширину, а их система охватывает обширный район планеты. Трещины образуют подобие сравнительно правильной ромбической структуры (фото 22), напоминающую, если забыть о размерах, пересохшую лужу-солончак. От солончака лабиринт Ночи отличается масштабами: протяженность района достигает 100 км. Геологический процесс, благодаря которому образовался лабиринт Ночи, как-то связан с подпочвенными явлениями, возможно, с таянием вечной мерзлоты.

Часто по утрам, а иногда и к вечеру, каньоны долины Маринера и лабиринта Ночи заполняет довольно густой туман (фото 22). В 1974 г., в период съемки с «Марса-5» туман был настолько плотным, что дна каньона совсем не было видно. Голова каньона — лабиринт Ночи — представляет собой, по-видимому, продолжающееся разрушение поверхности. Долины Маринера обладают сложной структурой. Это комплекс из многих отдельных каньонов и провалов. Вытянутая форма каньона резко отличается от, например, извилистой долины в верхнем углу фото 18. Исследование снимков, на которых каньон снят крупным планом (фото 23), позволило установить несколько эпох в образовании поверхности планеты. Здесь природа «позаботилась» о том, чтобы мы смогли увидеть настоящий разрез поверхности. По заключению геологов, в склоне каньона видны слои пыли, лавы и вулканического пепла, причем общая толщина слоя достигает 2 км. Каньон разрезает окружающую равнину и дает

таким образом сведения о строении грунта на большой глубине. На некоторых снимках можно видеть такие же оползни, которые проходят через метеоритные кратеры, пересекают друг друга и растекаются по дну. На фото 23 на склонах, на языках оползня видны несколько метеоритных кратеров диаметром в несколько сотен метров. Окружающая равнина содержит мало таких образований, поэтому кратеры косвенно позволяют утверждать, что оползни имеют довольно большой возраст (но указать его трудно). Полосы на языках оползней отражают направление движения грунта, в то время как полосы на дне каньона (справа в центре) соответствуют направлению ветра.

Выполненный природой разрез грунта на большую глубину показывает, что слой реголита (грунта, переработанного в древности многократными метеоритными ударами) имеет толщину 1—2 км. Дно каньона покрыто какими-то темными отложениями сыпучего (или текучего?) состава. Это могут быть древние вулканические пеплы или даже сухое дно древнего водохранилища.

Предполагается, что после 2010 г. на Марс высадится научная экспедиция, а перед этим будет проведена серия подготовительных полетов. Космонавты опустятся на дно каньона и увидят ландшафт, очень похожий на тот, что изображен на рис. 4.20.

Если читатель внимательно рассматривал рис. 4.19 и фото 22, 23, он мог заметить, что, несмотря на большую глубину каньона и его значительную протяженность, нигде нет следов выброшенного грунта. Куда же он делся? Не исключено, что никуда.

В последние десятилетия широкое распространение получила теория дрейфа континентов (или глобальная тектоника плит), которая доказывает, что нынешние материки Земли являются осколками некогда единого материка Пангеи. Перемещение произошло благодаря скольжению материковых плит по верхнему слою мантии. Разрывы в Пангее заполнили океаны. Очень соблазнительно предположить, что долины Маринера имеют такое же происхождение. Более того, и сам огромный каньон, и невероятные размеры находящихся не очень далеко от него марсианских вулканов говорят о том, что тектоника Марса существовала, по крайней мере когда-то. Только тектоника эта была особой: вся кора планеты двигалась как единая плита. Ниже мы еще вернемся к этому интересному явлению.

Специалисты сейчас считают, что период формирования каньона начался около 3 млрд лет назад и что каньон примерно на миллиард лет (или более) старше вулканов Фарсиды.

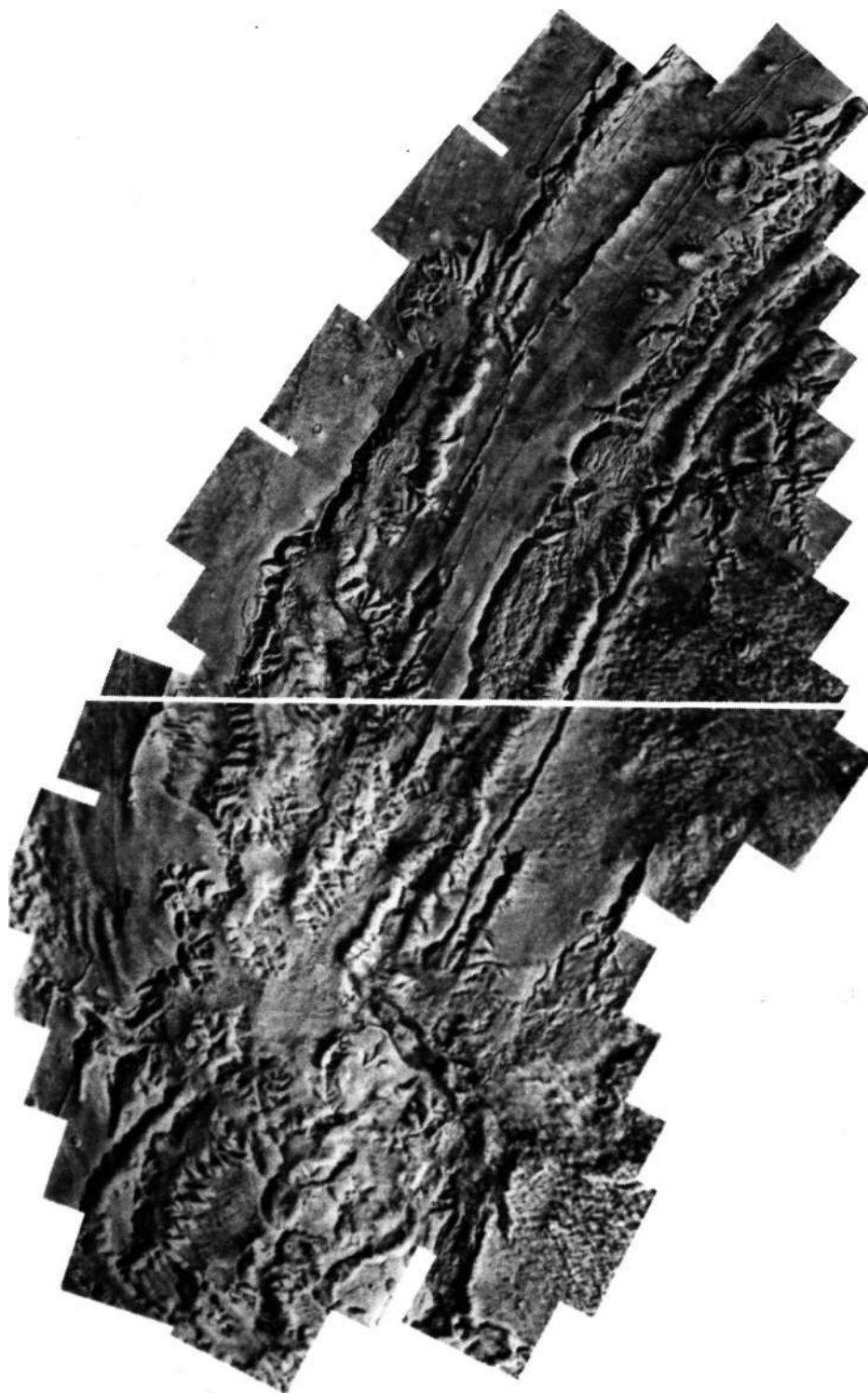


Рис. 4.19. Гигантский каньон долины Маринера. Снимок NASA

Конечно, можно задать множество вопросов; например, чем район каньона и вулканов отличается от других, почему в основном здесь была сосредоточена марсианская активность? И хотя мы сейчас не знаем ответа, но, опираясь на общность процессов в недрах Марса и Земли, можно сделать интересные выводы, которые мы тоже рассмотрим немного позже.

В отличие от Земли с ее океанами долины Маринера на Марсе, по-видимому, никогда не были полностью заполнены водой: на планете воды слишком мало. Более того, на поверхности Марса вода вообще не может существовать в жидком виде: при давлении 6,1 мбар она кипит при температуре 2 °С. Парциальное же давление водяного пара намного ниже. Поэтому вода в открытом сосуде там отчасти выкипит, отчасти замерзнет. Но и водяного пара в атмосфере Марса очень мало. Белые конденсационные облака, которые иногда наблюдаются, очень разреженные. Такие облака мы видели на снимке «Марса-5» (см. фото 21), охватывающем весь район горного кряжа, о котором у нас уже шла речь. Однако эти облака уже в буквальном смысле не делают погоды. По измерениям «Марса-3», в 1971–1972 гг. толщина условно осажденного слоя воды из атмосферы составляла всего 0,01–0,02 мм, или 10–20 мкм. (Сравните: в безоблачный день в земной атмосфере над единицей поверхности содержится в тысячу раз больше, 10–20 мм, условно осажденной воды.) Через два года измерения «Марса-5» дали впятеро большую величину: до 70 мкм. Это был сезонный эффект. Такое же количество условно осажденной воды дали измерения «Викинга-2» в 1976 г. вблизи тающей полярной шапки в разгар лета. Вместе с тем выяснилось, что по мере удаления от тающей полярной шапки количество пара в атмосфере уменьшается до единиц микрометров. Такие количества водяного пара совершенно не объясняют наблюдаемые особенности рельефа.

А особенности эти таковы. Долины Маринера имеют разветвленную сеть «притоков» — оврагов длиной до 300 км. На Земле овраги образованы текущей водой. Можно, конечно, представить себе, что в некоторых районах Марса грунт настолько сыпучий, что течет, как вода. Однако многие ученые в 1972 г. склонялись к мысли, что по крайней мере некоторые детали марсианского рельефа обязаны своим происхождением потокам воды. Это мнение получило практически безоговорочную поддержку, когда были получены снимки явно водно-эрозионных образований.

В верхней части рис. 4.21 можно видеть извилистое русло древней марсианской реки Нергал с притоками. Центр снимка — 28° ю.ш., 39° з.д. Этот район показан также на рис. 4.8, вверху. В долине реки Нергал давно нет никакой воды. Длина этой извилистой долины достигает 400 км. По-видимому, Нергал впадал в огромное водохранилище, образованное широкой депрессией в районе каньона Узбой и цепи кратеров Холден—Хейл. Извилистая форма Нергала напоминает русла земных рек.

Мы стараемся не перегружать читателя подробностями научной кухни. Но иногда один график может сказать больше, чем много страниц текста. Пусть долина Нергал действительно очень похожа на русло реки, впадающей в долину Узбой, а между кратерами Холден—Хейл действительно есть что-то вроде протоков. Но хорошо бы иметь какое-нибудь независимое подтверждение этой идее. Таким подтверждением стали результаты альтиметрии (измерения высот рельефа), которая дистанционно выполнялась с борта «Марса-5». На рис. 4.22 показано несколько таких высотных профилей вдоль трасс, расположенных на фрагменте карты внизу. Карта мелкая, но, если сопоставить ее с рис. 4.8, можно убедиться, что все шесть кривых в верхней части рисунка указывают на глубокую низину, расположенную там, где находится район Нергал—Холден—Хейл. Так результаты альтиметрии независимо свидетельствуют, что интересующий нас район как нельзя лучше приспособлен для водосбора.

Следом были обнаружены и другие долины такой же природы. Детальное их изучение показало, что обмеление происходило постепенно. Широкие потоки с течением времени превращались в небольшие речки, а затем в узкие ручьи. Такова, например, долина Маадим, где на всей ее протяженности, достигающей 700 км, прослеживается постепенное обмеление (нижняя часть рис. 4.21). Как только предположение о существовании в прошлом воды на Марсе завоевало право гражданства, многое стало понятным, в частности загадочная структура многочисленных исеченных районов (например, равнина Хриса, где опустился «Викинг-1») и широкие, до 80 км, долины. Вместе с тем нынешние физические условия у поверхности Марса, как уже говорилось, не допускают существования жидкой воды. Поэтому следовало допустить, что раньше условия были более благоприятными либо что в этих долинах текла не вода, а некая неизвестная субстанция. Скажем, текучая лава. Только трудно представить, чтобы лава текла 700 км в холодных берегах, не застывая. Высказывались

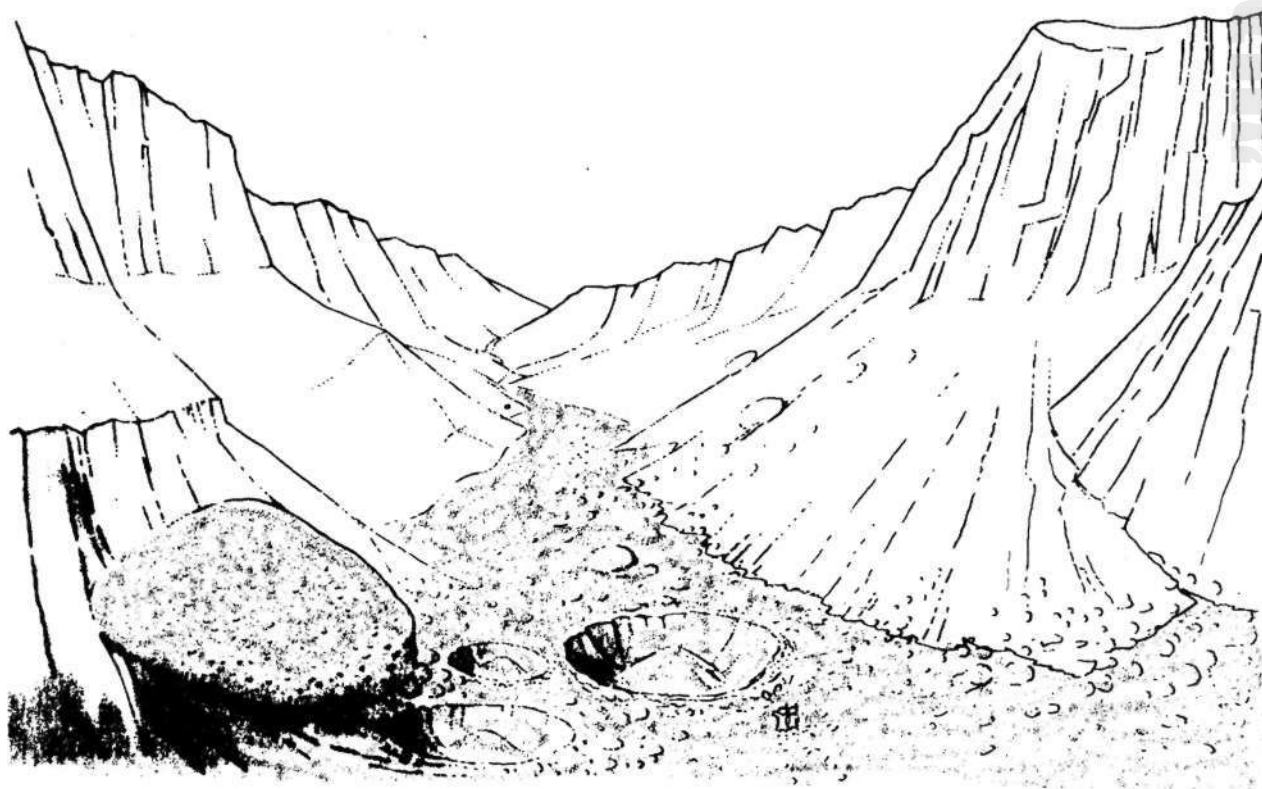


Рис. 4.20. Такой вид когда-нибудь откроется космонавтам, опустившимся на дно каньона

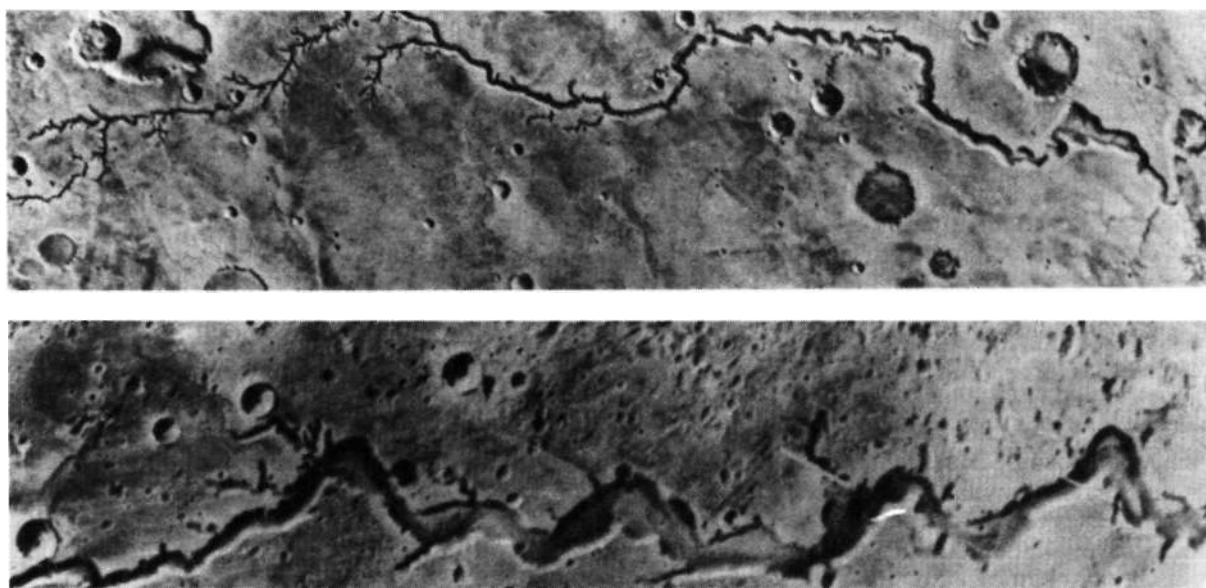


Рис. 4.21. Вверху: сухое русло древней марсианской реки Нергал с притоками (долина глубоко прорезает лавовую равнину). Полная ее длина около 400 км. Внизу: долина Маадим длиной около 700 км. В средней ее части видна тонкая, более поздняя долина. Маадим находится в южном полушарии и вытянута вдоль меридиана 187° от 29 до 14° ю.ш., где соединяется с большим кратером. Снимок NASA

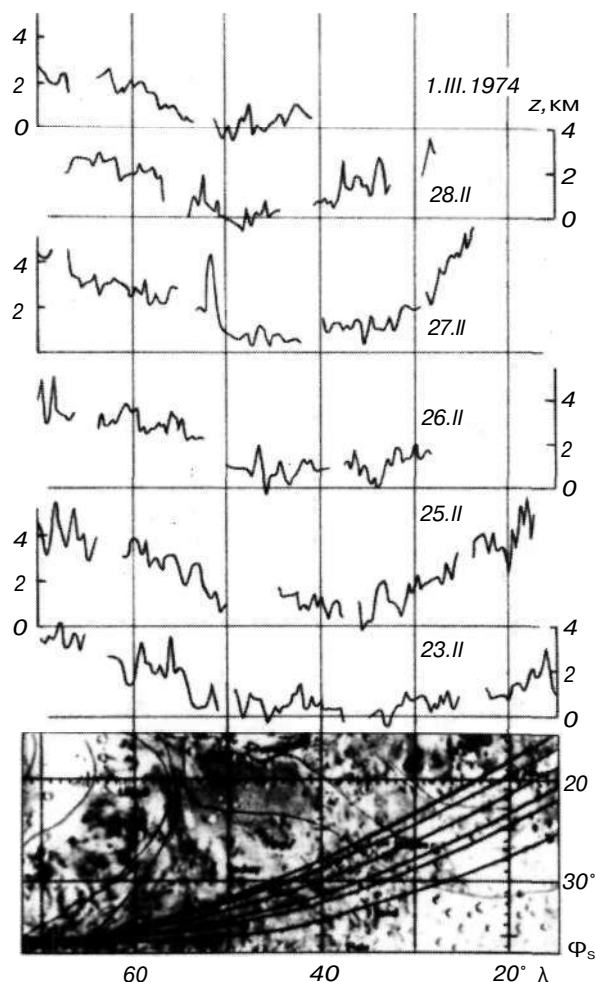


Рис. 4.22. Измерения рельефа вблизи долины Узбой, выполненные с «Марса-5», указывают на плавное понижение на несколько километров в сторону долины. Внизу показаны 6 трасс «Марса-5», пересекавшие район Нергал—Холден—Хейл

предположения и об органических жидкостях, и о грандиозных ледниках, скользивших по планете. И все-таки, вероятнее всего, это была вода, которая откуда-то появлялась. Следовательно, было более высокое давление атмосферы, более высокая температура (особенно, если учесть, что водно-эрозионные образования встречаются в очень высоких широтах, чуть ли не у полюсов). Наконец, нужны источник воды и ответ — куда же она делась.

Здесь следует в нескольких словах напомнить, как менялись представления о полярных шапках Марса. До начала космических исследований планеты большинство специалистов, опираясь на наземные спектроскопические измерения в инфракрасном диапазоне, придерживалось мнения, что шапки Марса состоят из

замерзшей воды. Однако наземные определения содержания водяного пара в атмосфере Марса трудны и неточны. Только с появлением космических аппаратов удалось установить его обилие, приводившееся выше. Более того, измерениями первых «Маринеров» и «Марсов» было показано, что температура зимней полярной шапки практически совпадает с температурой конденсации углекислого газа при марсианских давлениях: 148 К. Вместе с указаниями на основную составляющую атмосферы Марса этот аргумент заставил многих ученых склониться к альтернативной гипотезе: полярные шапки Марса — замерзший углекислый газ. С наступлением зимних холодов атмосфера в районе полярных шапок конденсируется и выпадает в виде снега из углекислого газа. «Шапка» охватывает огромные площади, достигая широт 55° и ниже. Однако толщина покрова на поверхности невелика и составляет, вероятно, сантиметров десять. Поэтому с наступлением весны она быстро тает и катастрофически сокращается в размерах. Уменьшившись до размера центрального ядра (см. фото 24), шапка перестает сокращаться. Для северной полярной шапки размеры этого ядра составляют 500—700 км. Но температура в летний период там хотя и низка по земным понятиям, но все же слишком высока, чтобы лед из чистого CO_2 мог сохраниться. Из чего же

состоит ядро?

Уже в 1972—1973 гг. было высказано предположение, что здесь мы видим многочисленные слои обычного льда вперемешку с напластованиями пыли и льда из CO_2 . Полная толщина этого огромного естественного хранилища водяного льда по некоторым оценкам может достигать километра. Исследователи обратили внимание на различие в скорости таяния северной и южной полярных шапок. Постепенно выяснилось, что природа их неодинакова. Вероятно, такое возможно только на Марсе: северная полярная шапка (она больше размером) состоит главным образом из водяного льда, а южная в основном из замерзшего углекислого газа. Причина этого объясняется, как читатель уже знает, различием средней сезонной температуры и продолжительности сезонов в северном и южном полушариях.

Тепловой портрет Марса

Многие физические свойства грунта (реолита) Марса, о которых говорилось выше, ученые умеют определять дистанционно, не касаясь поверхности, с помощью приборов,

установленных на искусственном спутнике планеты. Удобный и очень плодотворный метод — это измерение теплового излучения поверхности, по которому удастся найти тепловую инерцию реголита. Сопоставляя тепловые и некоторые другие данные, можно найти теплопроводность и теплоемкость грунта, можно картировать поверхность планеты, указывая, где расположены каменистые, а где песчаные равнины. Более того, знание спектра теплового излучения даже позволяет, в принципе, определить состав пород поверхности.

Тепловое излучение присутствует у всех тел, независимо от того, освещена ли Солнцем наблюдаемая поверхность или нет. Поэтому без особого труда тепловыми радиометрами можно, например, определять температуру деталей на ночной стороне планеты. Излучение очень сильно зависит от температуры поверхности и еще от одного ее параметра — коэффициента излучения (который, собственно, и позволяет отождествить состав пород по спектру излучения). Обычно используют понятие «яркостная температура», которое обобщает и температуру, и коэффициент излучения.

Наверное, интересно упомянуть, что сравнительно мощный источник инфракрасного теплового излучения — это тело человека, причем благодаря его температуре (310 К), максимум излучения приходится на длину волны 9,35 мкм. Но поверхность Марса из-за его низкой температуры излучает намного меньше тепла даже на дневной стороне (разумеется, с единицы площади).

Приборы для измерения теплового излучения планет входят в обязательный состав научного оснащения космических аппаратов. Но лишь недавно были созданы приборы-радиометры особенно высокой чувствительности. Они позволили перейти от отдельных, «точечных» измерений к созданию целого теплового изображения, наподобие телевизионного. Прежний метод позволял построить лишь очень грубые картинки, как, например, фото 12. Но за 10—12 лет, которые прошли после «Викингов», техника не стояла на месте.

Впервые такой сканирующий тепловой радиометр был установлен на советском аппарате «Фобос», судьба которого была не слишком счастливой. В 1989 г. аппарат был потерян за несколько дней до намеченного тесного сближения со спутником Марса Фобосом. Тем не менее какую-то часть программы аппарат выполнил. Удалось получить много новых телевизионных снимков Фобоса, а сканирующий радиометр передал 4 подробные тепловые панорамы поверхности Марса с разрешением до 1 км. На рис. 4.23 и 4.24 показаны два

фрагмента таких панорам — за 1 и 26 марта 1989 г. Оба фрагмента демонстрируют необычайную четкость поверхности, недостижимую для обычной или телевизионной фотографии. Объясняется это высокой прозрачностью атмосферы Марса в тепловом диапазоне: частицы пыли или конденсационных облаков слишком малы по сравнению с длиной волны 10 мкм, на которой работал прибор.

Фрагмент с лимбом планеты, приведенный на рис. 4.23, профессионалу гораздо больше напоминает Меркурий, чем Марс, настолько резко очерчен лимб в правой части рисунка. В видимом диапазоне, от 0,4 до 0,7 мкм, такие снимки удастся получить только для безатмосферных небесных тел, как, например, Луна или Меркурий. Но находящийся в центре снимка каньон долины Маринера сразу выдает Марс. Оба фрагмента представляют экваториальную часть планеты.

Здесь показана восточная часть каньона, находящаяся на долготе центра равнины Аргир (примерно 43° з.д.). Фрагменты ограничены широтами примерно от 4° с.ш. до 8° ю.ш. на рис. 4.23 и от 13° ю.ш. до 24° ю.ш. на рис. 4.24. Сильно разрушенное дно каньона несет на себе, похоже, следы мощного и широченного, около 50 км, потока. В левой верхней части рис. 4.23 хорошо видна извилистая долина, прорезающая покрытую кратерами равнину.

Как и у многочисленных кратеров вблизи лимба, все оттенки поверхности — это различия в температуре отдельных районов и в меньшей степени в их излучательных свойствах. Самые теплые (светлые) районы имеют температуру до 275 К, самые холодные (темные) — около 200 К. Различия температур темных и светлых (в видимых лучах) участков объяснить нетрудно. Но менее понятно на первый взгляд весьма неоднородное распределение яркостных температур даже в пределах относительно небольших и однородных, казалось бы, районов. Объяснить этот эффект можно аналогией теплового изображения с фотографией с очень большой экспозицией, где потемнение определяется суммарным действием накопленного за все время света. Склоны, долго находившиеся в тени, накопили меньше тепла, чем освещенные Солнцем участки. Солнце давно уже поднялось высоко, а тепловое излучение все еще выдает разные экспозиции, полученные утром. Районы, близкие к лимбу, где Солнце стоит низко над горизонтом, наоборот, показывают, как поверхность охлаждается вечером, где те же эффекты следуют в обратном порядке.



Рис. 4.23. Применение тепловой инфракрасной съемки позволяет как бы снять атмосферу Марса и получить необычайно отчетливые изображения планеты даже вблизи лимба (в принципе, для получения таких снимков солнечный свет вообще не нужен)



Рис. 4.24. Как и на рис. 4.23, оттенки здесь отражают в основном неоднородности в температуре поверхности Марса

Наряду с этими особенностями тепловые изображения иногда позволяют обнаружить необычные детали, связанные скорее всего с геологической историей Марса. Так, на южном склоне Горы Арсия проступают очертания гигантской кальдеры, покрытой и засыпанной, по-видимому, более поздними продуктами извержений. В некоторых случаях поверхность

оказывается и темной, и холодной или, наоборот, теплой, но с высоким альбедо, что свидетельствует о значительных неоднородностях в физических свойствах реголита в разных районах.

Читатель, видимо, согласится, что в нашей книге мы стараемся также избегать излишних подробностей, касающихся техники исследо-

ваний. Наряду со сканирующим радиометром, сделаем еще одно исключение для нового типа передающей телевизионной камеры, которая также применялась для новых исследований у Фобоса и Марса. Начиная с советского аппарата «ВЕГА» (это 1985 г.), место телевизионных трубок в космосе заняли так называемые ПЗС (приборы с зарядовой связью). Это полупроводниковый совершенно плоский прибор, «телевизионная камера в нагрудном кармане». ПЗС-приборы могут быть не только телевизионными: они обладают свойством накапливать и хранить информацию. С помощью ПЗС были получены снимки, приведенные на рис. 1.1 и 4.38. В разделе же, посвященном Фобосу, приводится новая фотография этого спутника (см. рис. 4.41), сделанная ПЗС-камерой.

Несколько гипотез о тех временах, когда по Марсу текли реки

После уточнения «Викингами» состава атмосферы Марса, по данным об изотопном составе азота и некоторым другим сведениям было найдено вероятное значение максимального давления, которое могло когда-либо существовать у поверхности планеты. По одним оценкам оно не превосходило 100 мбар, по другим — могло достигать 1000 и даже 3000 мбар. При таком давлении становится тепло и тает не только лед из углекислого газа, но и часть ледяной полярной шапки, что еще больше повышает давление. Парниковый эффект, который может создать атмосфера из углекислого газа такой плотности, да еще с примесью водяного пара, повышает температуру у поверхности градусов на 100 (т.е. до 30–50 °C). Это явление хорошо известно на Венере. Само существование атмосферы Марса в таком виде было связано с относительно высокой концентрацией водяного пара. Одним его источником была вода, выделявшаяся вулканами и заполнявшая водоемы на поверхности, другим — таяние подпочвенной мерзлоты из-за разогрева коры планеты. Тогда-то и текли реки на Марсе.

Особенностью марсианских рек была их тесная связь с явлениями, похожими на карст. Иногда реки брали начало в небольших кратерах, причем многие из них в какой-то точке уходили «под землю». Только карст — это результат растворения подземных месторождений солей или карбонатов, а на Марсе, видимо, таяла вечная мерзлота. Но все же очень значительная часть воды находилась (и, возможно, находится сейчас) в подпочвенном состоянии вечной мерзлоты. По-видимому, в

ту пору распространенными водоемами могли быть котлованы — большие кратеры, заполненные водой (см. фото 18). Вероятно, были и маленькие озера. Возможно, такой котлован, в который впадала маленькая река, мы видим на рис. 4.18. Интересно отметить, что эта река тоже берет начало из небольшого темного объекта размером около 2 км.

Как только на поверхности появилась вода, давление углекислого газа стало быстро падать, так как он легко растворяется в воде. Уходящие в подгрунтовые резервуары реки уносили его с собой, где он, скорее всего, выпадал в составе карбонатов в осадки.

Но что же произошло дальше с водой?

Собственно, дальше продолжалось то же, что происходило и раньше: катастрофическая потеря водорода марсианской атмосферой. Молекулы водяного пара диссоциировали под действием ультрафиолетового излучения Солнца, а водород ускользал в космическое пространство. Напомним, что даже наша Земля с ее мощным тяготением ежедневно теряет около 100 т водорода. На Марсе при том же диапазоне температуры этот процесс шел быстрее из-за малого ускорения свободного падения. Для Земли с ее океанами 100 т водорода — ничто. Другое дело — Марс. Относительно небольшие запасы воды на его поверхности были исчерпаны, парниковый эффект уменьшился, температура понизилась, значительная часть подпочвенной воды перешла в состояние вечной мерзлоты, а какое-то количество ее оказалось химически связанным в глинах.

Вместе с вечной мерзлотой снова появились полярные шапки, которые стали ловушками для остатков паров воды, содержащихся в атмосфере. Если предположить, что потери водорода шли с той же скоростью, что и теперь, потерянная вода могла бы составить слой в несколько метров, равномерно распределенный на планете. Полная глубина такого слоя могла достигать 100 м, а по некоторым оценкам и больше.

Крупноплановые снимки «Викинга», выполненные в период «макушки лета» в северном полушарии Марса, показали, что в керне полярной шапки в это время образуются протяженные промоины (см. фото 24), обнажающие многочисленные слои льда, перемежающиеся тонкими слоями более темного материала (фото 25). Температура шапки (200 К, или –73 °C) при этом все еще остается слишком низкой для того, чтобы появилась жидкая вода и могли образоваться ручьи. Происходит сублимация (испарение) льда, который переходит в пар. С этим и связана повышенная концентрация водяного пара в

атмосфере вблизи летней полярной шапки. Процесс испарения медленный, так как лед покрыт слоем пыли с теплоизолирующими свойствами.

Ученые давно уже понимают, как велика роль массы планеты в ее эволюции. По-видимому, недалеко время, когда будет создана теория эволюции планет в зависимости от массы. Некоторые механизмы, через которые влияет масса, ясны уже сейчас. Это плотность ядра планеты, связанная с нею температура плавления вещества, скорость процессов гравитационной и геохимической дифференциаций, темпы потери некоторых составляющих атмосферы и другие данные. Взаимное влияние многих факторов еще далеко не ясно.

Вероятно, из-за недостаточно большой массы Марс застрял где-то на промежуточной стадии той эволюции, которую прошла Земля. Во всяком случае, похоже, что признаки высокой активности планеты приходятся на очень-очень далекие времена. Это главным образом первая половина истории Марса. К этому времени относятся грандиозные пирокластические извержения, засыпавшие пеплом едва ли не половину планеты, плотная теплая атмосфера, реки, куда крупнее земных, образование огромных каньонов, наконец, феерия вулканов в стране Фарсида.

Примерно 3 млрд лет назад разогрев коры планеты под действием эндогенных источников тепла (радиоактивный распад и расслоение ее недр) стал достаточно заметным. Именно в эту пору, по-видимому, кое-где стал таять подпочвенный лед. Таяние сопровождалось последующим разламыванием и опусканием участков поверхности, чему сопутствовало появление рек на поверхности планеты. С мерзлотой, вероятно, связана и странная форма рельефа, впервые обнаруженная «Маринером-9» в 1971—1972 гг. Фрагменты равнины, сохранившие прежнюю высоту, окружены заметно опустившейся поверхностью (рис. 4.25).

Косвенным подтверждением существования больших запасов воды в виде подпочвенной мерзлоты может быть снимок относительно молодого кратера Юти диаметром 18 км. Снимок сделан «Викингом» (рис. 4.26). В стороны от вала кратера «выплеснулись» какие-то жидкие массы. Вероятно, разогрев грунта в результате удара крупного метеоритного тела послужил причиной излияния мощных селевых потоков. Рельеф представляет собой как бы моментальную фотографию этого процесса. На снимке хорошо видно, что потоки прошли путь 15—30 км. После их затвердевания частицы грунта остаются связанными льдом и освобождаются только после его испарения, что при

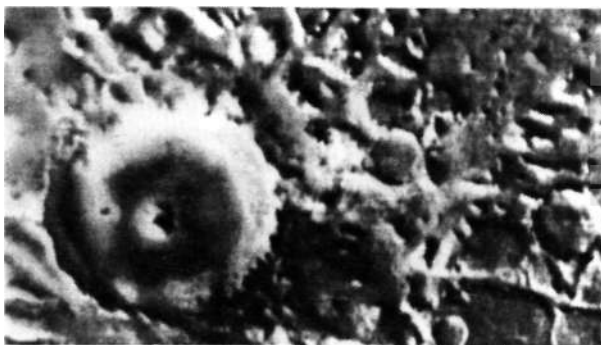


Рис. 4.25. Участки равнины вблизи кратера окружены заметно опустившейся поверхностью. Не исключено, что природа этого рельефа связана с подпочвенной мерзлотой. Снимок NASA



Рис. 4.26. Рельеф вокруг метеоритного кратера диаметром 18 км. Рельеф, показанный на снимке, похож на застывшие селевые потоки, образовавшиеся при мгновенном плавлении вечной мерзлоты в момент образования кратера. Снимок NASA

марсианских температурах происходит медленно.

Ряд образований, которые не похожи ни на долины, ни на сухие русла, носит следы какого-то движения. Некоторые специалисты считают, что в далеком прошлом Марс пережил эпоху селевых излияний, оставивших эти следы.

После исследований «Викинга» появилось несколько новых гипотез о происхождении особых видов рельефа Марса. В одной из них главная роль отводится ледникам, которые, как предполагается, образовали широкие протоки,

огибающие препятствия на поверхности планеты. Предполагается также, что и многие необычные формы марсианского рельефа соз-



Рис. 4.27. Широкая Долина Касэй, как русло пересохшей реки, огибает полуостров с кратером (25° с.ш., 72° з.д.). Такой след могли оставить как многоводная река, так и мощный ледник. Снимок NASA

даны ледниками. Таковы странные острова обтекаемой формы на равнине Хриса. Однако сторонники гипотезы катастрофических наводнений и обильных рек указывают, что такие острова могли образоваться и без помощи ледников.

На рис. 4.27 показана широкая Долина Касэй, расположенная в северной части Лунного плато (30° к северу от центральной части долин Маринер). Диаметр большого кратера на полуострове 25 км, а ширина долины, огибающей его слева, около 10 км. Если это была река, она была подобна Волге в разливе. Но и равнина слева тоже несет хорошо заметные следы движения какого-то потока, обтекавшего удлинённые острова (внизу слева), а края возвышенностей изрядно сглажены потоком. Следы движения проходят по диагонали через весь район и превосходят 100 км в ширину. Большинство специалистов видит в них следы древних рек и, может быть, обильных селей. Мелкие поперечные трещины относятся к более поздней эпохе.

Интересно отметить, что в пору наводнений на Марсе, похоже, не было сильных дождей. Исследование форм кратеров, находящихся поблизости от протоков и промоин, показывает, что если они и разрушались, то только текущей по поверхности водой, а не ливнями.

Итак, свидетельств существования на планете ручьев, рек, целых наводнений и даже ледников — сколько угодно. Практически все специалисты сходятся в том, что запасы воды сконцентрированы в вечной мерзлоте и, может быть, подземных резервуарах воды. В период тектонической активности Марса в его коре возникали глубочайшие, в несколько километров трещины, куда вода и уходила. В зависимости от температуры вода либо снова выделялась на поверхность, либо переходила в состояние вечной мерзлоты, и в этом виде существуют ее основные запасы. Немало воды сосредоточено и в полярных шапках. Марс относительно богат водой.

Отметим, что «таяние» полярной шапки, о котором мы часто упоминали, носит сложный характер. Сначала весной тает сухой лед (из углекислого газа), переходя непосредственно в газ (сублимация). Летом таким же образом тает обычный лед, переходя в водяной пар. Никаких потоков жидкости при этом нет — в обоих случаях мы имеем дело только с сублимацией.

Недавно было показано, что положение полярной оси Марса не остается постоянным и испытывает колебания с периодом 120 тыс. лет. Это может быть причиной периодического изменения климата Марса. Значит ли это, что на смену нынешнему оледенению планеты через сотню тысяч лет придет потепление, давление в атмосфере возрастет, сухие русла наполнятся водой? Но прежде чем перейти к этой интересной проблеме, кратко рассмотрим историю Марса, как она сейчас представляется ученым.

Новые гипотезы об истории поверхности Марса, циклах Миланковича, блуждающих полярных районах и кратерах необычной формы

Через 100—200 млн лет после завершения наиболее яростного периода выпадения метеоритных тел на поверхность Марса, 3,8 млрд лет назад, на планете наступила пора повсеместных лавовых излияний, которые охватили почти полностью одно полушарие, а в другом сосредоточились в основном в крупных ударных бассейнах («морях»). Наряду с этим водяной пар и вода, выделявшиеся в извержениях,

конденсировались в виде льда в «холодных ловушках» полюсов.

Около 3 млрд лет назад характер вулканических извержений стал постепенно изменяться. Наряду с продолжающимся формированием протяженных лавовых равнин стали появляться первые крупные вулканы, а около 2,5 млрд лет назад на крупнейшей лавовой равнине появились очень крупные трещины (грабены), которые предшествовали возникновению в этом месте в дальнейшем Долины Маринера. Тектонической причиной появления грабенов считается нарушение целостности коры, участки которой проходили над экваториальным вздутием мантии Марса. Одновременно кора как единая плита смещалась относительно полярной оси планеты, из-за чего полярные запасы льда передвинулись к умеренным широтам, где началось их таяние. Возникли первые реки.

Вулканы-гиганты в области Фарсида начали формироваться около 2 млрд лет назад, причем этот процесс растянулся более чем на миллиард лет. Одновременно из-за низкой температуры атмосферы продолжалось накопление льда. Примерно 1 млрд лет назад гора Олимп и три конуса в области Фарсида уже существовали. Но вулканическая деятельность продолжалась, хотя и шла на убыль. Около 300 млн лет назад закончились в основном извержения гигантов Фарсиды. Гора Олимп сохранила свою активность дольше, ее кальдера, которую мы видели на фото 17, действовала еще 60 млн лет назад.

Также около 1 млрд лет назад смещение коры планеты относительно ее полярной оси снова привело к перераспределению ледяных отложений на поверхности Марса.

Существует несколько причин перемещения полярных районов.

В течение всей истории нашей планеты положение ее полярной оси в пространстве не оставалось постоянным. Благодаря процессии, вызываемой гравитационным воздействием Солнца и планет, полярная ось за 25,8 тыс. лет описывает в пространстве конус. Сам угол, определяющий положение полярной оси ($23,5^\circ$ между осью и нормалью к плоскости орбиты) также периодически изменяется (на 4° за 41 тыс. лет). Кроме того, изменяется эксцентриситет орбиты, от 0 до 0,06 за 100 тыс. лет. Периодические изменения орбиты Земли, вызываемые этими факторами, называются циклами Миланковича. Для Марса амплитуда циклов Миланковича намного больше. При среднем значении угла между нормалью к плоскости орбиты и полярной осью $25,2^\circ$ изменения достигают $\pm 13^\circ$ за 120 тыс. лет,

причем на этот цикл накладывается еще один, с периодом 1300 тыс. лет. По последним данным, до образования экваториального выступа, расположенного ныне в области Фарсида, угол был еще большим, 32° , и изменялся от 25° до 45° . Эксцентриситет орбиты также изменялся (в 2,5 раза больше, чем у Земли, от 0 до 0,14). Напомним, что из-за большого эксцентриситета летняя (и зимняя) температура для северного и южного полушария неодинакова. В наше время Марс проходит перигелий, когда в южном полушарии лето. Климатические изменения благодаря циклам Миланковича на Марсе могут даже привести, согласно одной из гипотез, к полному таянию полярной шапки (как минимум — одной), когда угол приблизится к $40\text{--}45^\circ$. Давление в атмосфере при этом повысится, атмосфера обогатится влагой, возникнет усиленное перетекание газа к зимнему полюсу. Но на пути этого переноса лежат экваториальные и умеренные широты, где, согласно гипотезе, в ночное холодное время возможны обильные снегопады и отложения инея, снега и льда на поверхности. Подтаивание их в дневные часы могло бы вызвать, по мысли авторов гипотезы, появление на Марсе рек.

Заметим, что к последней части гипотезы многие отнеслись с недоверием. Полярные льды лежат слоями, вперемешку с пылью, изолирующей лед от солнечных лучей. Длительности годового цикла совершенно недостаточно для прогрева этого «слоеного пирога» толщиной в сотни метров, если не в километры, а тем более для его испарения. На это указывают, например, типичные полярные отложения, найденные, как это ни странно, в экваториальном районе Марса.

Образование полярных слоистых отложений связано с очень низкой зимней температурой в полярных районах, ниже температуры конденсации и водяного пара, и углекислого газа. Роль центров конденсации играют мельчайшие пылинки, взвешенные в атмосфере (которые ответственны за розовый цвет неба Марса). На них нарастает слой инея, пылинки утяжеляются и выпадают на поверхность. Такой необычный путь нашла природа для конденсации ничтожных количеств влаги, присутствующей в атмосфере. Естественно, этот способ годится только для полярных районов и в полярную ночь. За один сезон выпадает целый слой частиц, однако он вряд ли отличим от предыдущего и последующего. Слои, которые видны на фото 25, отмечают более крупные климатические изменения, например циклы Миланковича. Слоистые отложения уходят на большую глуби-

ну под полярными шапками, по имеющимся оценкам — на 1–2 км вблизи южной и на 4–6 км у северной полярной шапки. Мелкозернистая структура их поверхности подтверждается радиометрическими измерениями.

В экваториальном поясе известно несколько районов точно такой же природы, но несколько меньшей толщины. Протяженность каждого из них около 1000 км. Таковы, например, экваториальные слоистые отложения в районе 4° ю.ш., 156° з.д. Есть основания считать, что они действительно возникли в полярном районе и что процесс их таяния растянулся на несколько сотен миллионов или даже миллиард лет. По мере таяния льда и уноса ветром пылевой части отложений из-под них появляется неповрежденный древний кратерный рельеф. Вместе с тем такие же отложения, наполовину скрывающие рельеф «дна», находятся у 73° ю.ш., 215° з.д., в районе северной полярной шапки.

Каким же образом полярные отложения могли оказаться вблизи экватора? Сначала это вызвало недоумение. Однако определение возраста слоистых образований вблизи полюса, выполненное методом подсчета ударных кратеров, указало на их молодость (в геологическом смысле, конечно): около 1 млн лет. Оценка по количеству слоев дала число в 10 раз большее, что неудивительно, поскольку в таком «пушистом» образовании кратеры, по-видимому, заплывают. Тем более неожиданным оказался возраст слоистых «полярных» отложений вблизи экватора, расположенных между 145 и 215° з.д.

Наиболее сильно переработанный из них (и старый) — это район западных отложений, а относительно молодой — восточный. Для него получен возраст 2–3 млрд лет, в десятки и сотни раз старше, чем у отложений, находящихся ныне у полюса. Кстати, возраст находился по числу особых ударных образований, «кратеров на пьедестале». Эти странные образования представляют собой типичные ударные кратеры, но помещенные в центре плоской «лепешки», поднятой над окружающим уровнем примерно на сотню метров. Край такой «лепешки», как правило, изрезаны, а диаметр всего сооружения в 7–10 раз больше диаметра кратера. Предполагается, что их образование опять-таки связано с ледяными слоями в полярных районах: достаточно крупное метеоритное тело создавало при ударе настолько глубокую воронку, что выбросы обломочного материала происходили уже с уровня основного, подстилающего материала. Эти выбросы настолько надежно укрывали слои льда с пылью, что таяние последних растягивалось на многие сотни и даже миллиарды лет (что

косвенно указывает на неизменно холодный климат Марса. Здесь нет противоречия: предположения о теплой, плотной атмосфере и обильных марсианских реках относятся к более далеким временам, более 3,5 млрд лет назад). Кратеры на пьедестале распространены как в полярных зонах (где они дают возраст до 100 млн лет), так и в особых районах слоистых отложений в экваториальном поясе Марса.

Первая догадка о том, как они туда попали, возникла, когда ученые заметили, что району слоистых отложений в экваториальной зоне соответствует очень похожий участок на диаметрально противоположной стороне планеты. Миграция полюсов — такая гипотеза хорошо объясняла наблюдаемые факты, но требовала настолько большого смещения полюсов (в общей сложности больше диаметра планеты), что объяснить его циклами Миланковича уже было невозможно.

Наиболее вероятная причина перемещения полюсов Марса лежит в перераспределении масс в мантии планеты (или даже на ее поверхности). Если наиболее плотные части мантии находятся достаточно далеко от экватора, нарушается устойчивость вращения, а в результате вся кора Марса, которая представляет собой как бы единую плиту, стремится сместиться таким образом, чтобы маскон переместился к экватору. Положение оси вращения планеты при этом не изменяется. Разумеется, несбалансированная масса не обязательно должна быть масконом у поверхности, это может быть и какая-то масса в глубоких слоях недр планеты, и заполняемые лавой огромные кратерные моря.

Выявлению движений коры, происходивших в течение истории Марса, способствуют хорошо сохранившиеся древние районы с возрастом чуть ли не в 4 млрд лет. Гипотеза, о которой мы рассказываем, указывает на крайнюю неравномерность движений, которые разделялись очень длительными «спокойными» интервалами. Путь полярных районов за длительное время описал грандиозную подкову. Северный полюс побывал вблизи северо-западной окраины массива Олимп, в точке 45° с.ш., 160° з.д. (нынешних, конечно), затем подолгу оставался в трех районах сегодняшнего экватора и оставил там массу полярных слоистых отложений. Одно из смещений, последнее по времени, совпадает с периодом мощных вулканических извержений в районах горы Олимп и Фарсиды. Предполагается, что одной из причин смещения как раз и была вулканическая активность и связанный с ней перенос масс.

После съемки поверхности Марса аппаратами «Викинг» и подробного анализа получен-

ных снимков были выделены некоторые кратеры несколько удлиненной формы с боковыми выбросами, напоминающими крылья бабочки (рис. 4.28). Их происхождение должно быть очень необычным: в течение многих лет экспериментаторы доказывали, что любое направление удара неизменно приводит к появлению кратеров округлой формы, какой бы угол ни составлял вектор скорости с поверхностью. Впрочем, было одно исключение: если тело падало по касательной под углом меньше 5° к поверхности, получался удлиненный кратер. Вероятность такой траектории для небесных тел типа обычных метеоритов считается очень малой. Поскольку кратеры довольно крупные, породившее их тело должно быть достаточно массивным. Что же могло двигаться по касательной к поверхности? Кометы? С определенными допущениями можно рассчитать вероятное количество касательных падений. Но кратеров оказалось намного больше, чем давали расчеты.

Подобные кратеры были найдены и на Луне. Там их число согласуется с расчетом примерно для 0,5% от общего количества. Почему же их много на Марсе?

Далее была обнаружена любопытная подробность: удлиненные кратеры примерно одной возрастной группы ориентированы большей осью в одном и том же направлении, причем для каждой возрастной группы есть свое преимущественное направление. Для объяснения и этой особенности, и самого происхождения удлиненных кратеров была предложена еще более захватывающая гипотеза: кратеры образованы обломками некогда существовавших, но погибших многочисленных спутников Марса. Каждая группа обломков (один разрушенный спутник) заставляла поверхность Марса в новом относительно полярной оси положении. (Кстати, спутник Фобос тоже «протянет» только 30 млн лет или около того.) Согласитесь, гипотеза смелая и неожиданная. Но другого объяснения нет.

По направлению осей удлиненных кратеров ученым удалось восстановить примерное положение полярной оси в разные эпохи, причем это положение совпало с теми результатами, о которых мы рассказывали выше.

Таким образом, целый комплекс марсианских загадок, похоже, объясняется этими гипотезами. Сеть долин, оставшаяся от древних марсианских рек, которая сейчас находится вблизи полюса, передвинулась туда в «готовом» состоянии из экваториального района. Полярные отложения возникли в полярном районе, а у экватора оказались много позднее. Холмы слоистых отложений на днищах некоторых



Рис. 4.28. Кратеры удлиненной формы и с боковыми выбросами материала могли образоваться только при касательной траектории тела. Предполагается, что многие из этих кратеров образовались при падении на поверхность древних лун Марса. Из работы П.Шульца

кратеров вблизи экватора — также остатки древних полярных отложений, из-под которых вновь появился древний рельеф. Ну, а относительная молодость полярных районов находит вполне естественное объяснение.

Интересно отметить, что в земных условиях путь полюсов определить гораздо проще. Породы, которые образуются в зонах срединно-океанических рифтов (и вообще в извержениях), несут «застывшее» направление магнитного поля, которое ученые находят методами палеомагнитного анализа. Поле у Марса очень слабое, поэтому палеомагнитные исследования там не планируются.

Пылевые бури и ураганы. Необычные свойства атмосферы Марса

Читатель уже знает, что явление большой (а иногда и глобальной) пылевой бури на Марсе характерно для периода великого противостояния. Кроме разогрева атмосферы из-за увеличения притока солнечной энергии в перигелии важную роль здесь играет предшествующая перигелию весна в южном полушарии. Более того, по-видимому, именно весна в каждом из полушарий служит своеобразным сигналом к началу пылевой бури. Это связано с быстрым таянием углекислотной части полярной шапки.

Примерная последовательность событий, которые происходят в это время на Марсе, такова. К концу зимы «сухим льдом» (из углекислого газа) оказываются покрыты огромные пространства, достигающие 50° широты. С наступлением весны эти отложения начинают быстро таять и переходят в виде углекислого газа в атмос-

феру планеты. Из-за таяния приповерхностная атмосфера охлаждается. Температура тающей шапки из чистого углекислого газа составляет 148 К. Весной эти зоны — кладовая холода. С таянием шапки давление над нею повышается. Образуются сильнейшие ветры, которые несут большие массы газа в осеннее полушарие. Теперь там идет конденсация. Гигантские масштабы этого явления вызывают изменения давлений противоположных знаков в северном и южном полушариях, что позволяет планете «перекачать» атмосферу из одного полушария в другое. На рис. 4.29 показано, как в течение марсианского года изменялось давление в районах работы «Викинга-1 и -2». Предполагалось, что изменения будут лежать в пределах 0,5—1 мбар. Действительные изменения намного больше и достигают 25% от абсолютного значения давления. Это говорит о том, что процесс конденсации в зимнем полушарии носит почти катастрофический характер. Не удивительно, что при этом возникают такие сильные бури. Конденсация атмосферного углекислого газа вблизи растущей полярной шапки, по-видимому, обогащает окружающую атмосферу аргоном, азотом и другими газами, которые не конденсируются при марсианских температурах. Это еще одно поразительное свойство атмосферы Марса: концентрация малых составляющих атмосферы зависит от места и времени! Интересно, что при последовательном наступлении одних и тех же сезонов в разных полушариях абсолютные значения атмосферного давления неодинаковы (см. рис. 4.29). В этом сказывается эксцентриситет орбиты Марса. Бури всегда начинаются южнее экватора, потому что перигелию соответствует лето в южном полушарии.

Огромные массы перетекающего газа оказывают значительное влияние на общую циркуляцию атмосферы. Обычно скорость ветра у поверхности не превышает 10 м/с. Но все эти процессы приводят к развитию более сильных ветров, достигающих 70, а иногда и более 100 м/с. Вероятно, ветрам сопутствуют мощные вихри. Такие ветры и смерчи поднимают с поверхности рыхлого грунта мелкие частички. Если ветры усиливаются, количество пыли, поднимающейся в атмосферу, может стать очень большим. Этому способствует своеобразный механизм, предсказанный советскими учеными и подтвержденный при работе спутников Марса: пылевые облака начинают перехватывать значительную часть солнечных лучей, температура поверхности падает. Создаются большие местные перепады температуры, из-за которых ветры еще больше усиливаются.



Рис. 4.29. Годичное изменение давления в атмосфере Марса, связанное с таянием и образованием полярных шапок (по данным «Викинга»). Чтобы избежать наложения, верхняя кривая условно смещена вверх на 1 мбар

Так было и в конце 1971 г., когда астрономы ожидали результатов исследований первых искусственных спутников Марса. Именно в это время на Марсе разворачивались драматические события: надвигалась глобальная пылевая буря. Сначала на краю диска, скрывая под собой тысячекилометровые просторы планеты, появилась мгла. Потом пылевые облака закрыли весь экваториальный пояс и распространились к полярным областям. Пылевая буря поднимала в атмосферу сотни миллионов тонн пыли.

С поверхности планеты развитие бури представляло, вероятно, феерическое зрелище. Ярко освещенные Солнцем буро-красные равнины, покрытые змеящимися струйками легкого песка, холмы и долины постепенно скрывались в красной мгле. Глубокие тени появились в оврагах и кратерах. А в красном от пыли небе неслись бурные облака и протяженные облачные фронты. Из космоса планета предстала мутным красноватым диском. Облака пыли, которые окутали всю планету от полюса до полюса, были настолько плотными, что исчезли из виду даже наиболее заметные детали, например, полярные шапки. На снимках «Маринера-9» и «Марса-3» не было почти никаких деталей, относящихся к поверхности, — сплошные тучи пыли. Над облачным покровом выступали лишь высочайшие вершины Марса в виде четырех темных пятен, окруженных безбрежным кипением облаков. Вершины поднимались над облачным слоем, который сам достигал высоты 15 км. Хотя пылевые бури и носят сезонный характер, но столь высокий и плотный облачный слой — довольно редкое явление на Марсе. Расчеты показывают, что основная масса пыли пере-

носятся в слое толщиной всего метр или немного больше.

Заметим, что все эти подробности стали понятными позже. Но в 1971 г. все было новым и загадочным. Вид планеты совершенно не походил на карты, составленные по наземным наблюдениям. Нужно было догадаться, что именно мы видим. Взять хотя бы вершины вулканических конусов в районе Фарсида. Тогда никто не предполагал, что на планете существуют такие высокие горы.

Не каждое великое противостояние наблюдаются одинаково мощные бури (очень сильные бури были в 1892, 1924, 1956 и 1971 гг.), но за многие сотни миллионов лет под их действием детали рельефа разрушаются (в последние миллиарды лет — очень умеренно). Определенную роль играют также большие суточные и сезонные перепады температуры.

Во время бури 1971 г. первые же измерения указали на резкое изменение теплового режима планеты. Мощные пылевые облака практически перекрыли приток солнечной энергии к поверхности, и ее температура стала быстро падать. Максимальные температуры упали на 30° и более. Вместе с тем начался разогрев атмосферы за счет перехвата солнечных лучей пылью в атмосфере. Схематически это показано на рис. 4.30, где стрелками изображено примерное распределение получаемой энергии между поверхностью и атмосферой. Измерения показали, что нормальный температурный профиль атмосферы резко нарушен и приближается к изотермическому, т.е. температура оставалась примерно постоянной по всей высоте тропосферы.

Уже в конце января 1972 г. следы бури исчезли. Так, случай представил исключительную возможность детально исследовать пылевую бурю, о которой, кстати, и сейчас известно далеко не все. Прежде всего была сделана попытка оценить размер частиц, составлявших пылевое облако. Для этого были привлечены измерения, сделанные приборами «Марса-3». И вот оказалось, что на длине волны $0,7\text{ мкм}$ оптическая плотность облаков превышает 6, на волне $1,4\text{ мкм}$ — около 3, а в области $8\text{—}40\text{ мкм}$ пылевые облака практически прозрачны. Даже если бы длины волн подбирались специально для исследования пылевой бури, результат не мог бы стать лучше. Принимая некоторые допущения, из этого можно рассчитать размеры частиц. Независимую оценку дает время «жизни» пылевой бури: $50\text{—}100$ сут. За это время пылевые частицы должны выпасть на поверхность. Была измерена также высота верхней границы пылеоблачного слоя. Она находилась на уровне $7\text{—}15\text{ км}$ над поверхностью планеты, что также позволяло найти размеры частиц. Все результаты практически совпали. Средние размеры частиц составляли $1\text{—}10\text{ мкм}$ в начале бури и около 1 мкм в ее конце. Было подсчитано, что разреженная атмосфера Марса в бурю поднимает и удерживает огромное количество пыли, превышающее 1 млрд т . Несмотря на внушительность этой величины, она составляет всего лишь тысячные доли процента от общей массы марсианской атмосферы.

Не исключено, что экранирующее действие облаков устраняет дальнейший выброс пыли в атмосферу. Тогда последующие фазы бури должны носить более спокойный характер.

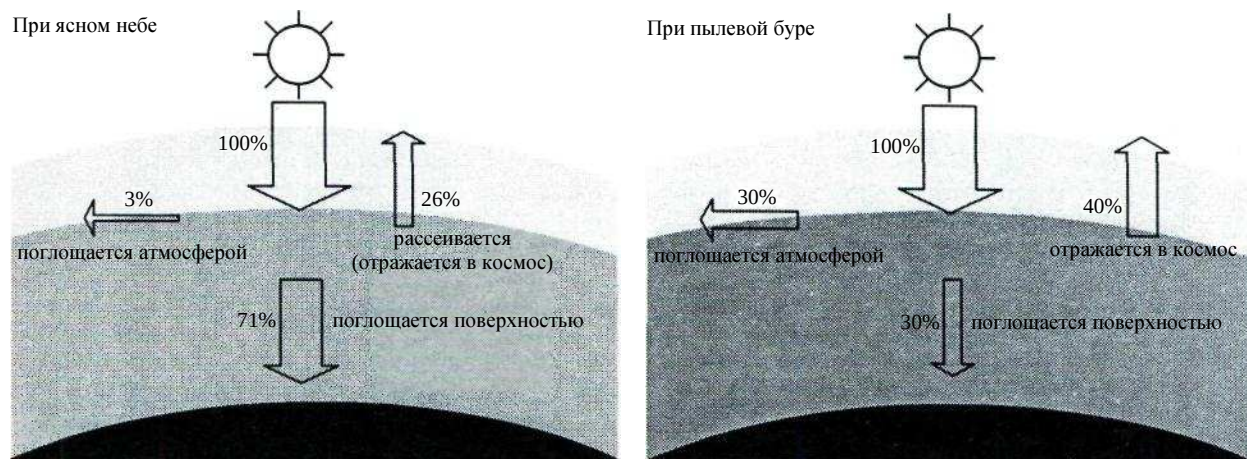


Рис. 4.30. Баланс энергии, получаемой Марсом от Солнца при ясном небе (слева) и во время пылевой бури (справа)

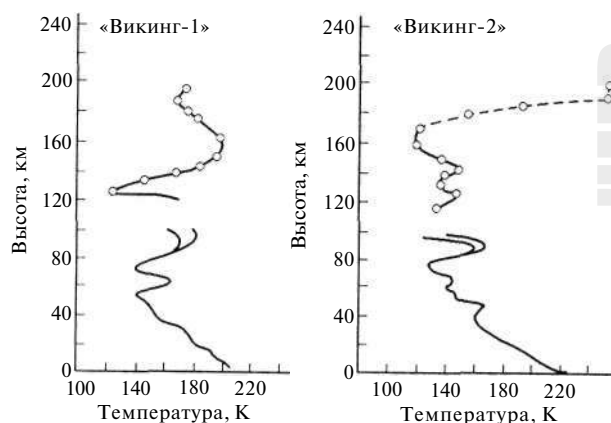
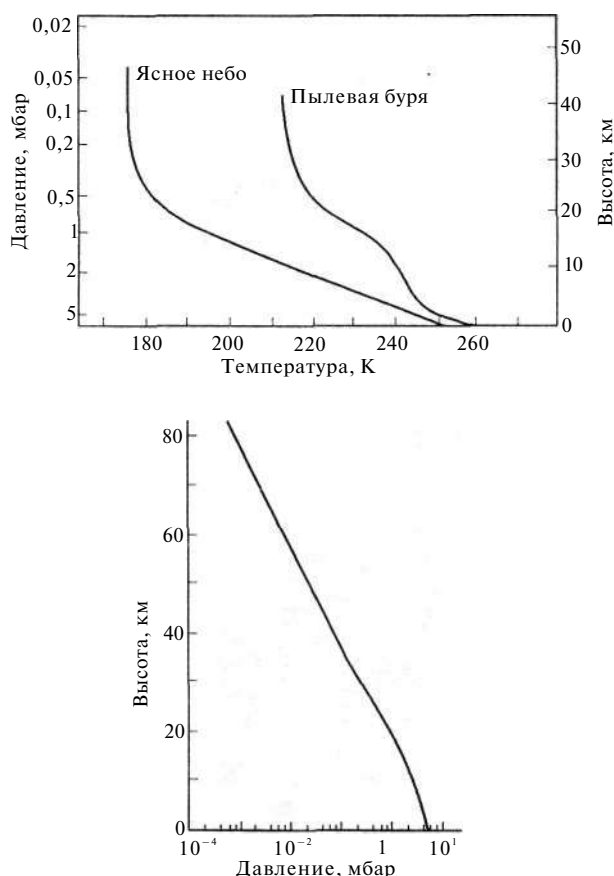


Рис. 4.31. Высотная зависимость температуры и давления в атмосфере Марса. Слева — расчетный ход температуры и измерения во время пылевой бури, справа — фактические значения. Внизу — давление

Наблюдения показали, что активная фаза бури развивалась несколько раз.

Одно из интересных явлений, связанных с бурей, это «антипарниковый» эффект. Напомним: «парниковым» называется эффект удержания полученного от Солнца тепла за счет различия в поглощении в атмосфере в видимой и дальней инфракрасной областях спектра. Таковы атмосферы Венеры и Земли. Марсианские пылевые облака, наоборот, непрозрачны для приходящего и прозрачны для уходящего излучений, что вызывает выстуживание поверхности планеты. Поэтому во время глобальной пылевой бури температура поверхности падает, а атмосфера быстро разогревается. В обычных условиях, при ясном небе, этот эффект не возникает, а температура с высотой быстро падает (как в тропосфере Земли) и на высоте 40–50 км оказывается на 70–80° ниже, чем у поверхности Марса (рис. 4.31).

На рис. 4.31 можно также видеть, что давление в атмосфере быстро падает с увеличением высоты. Но и в нижних слоях атмосферы плотность газа невелика. Такая атмосфера не может задержать ультрафиолетовую солнечную

радиацию. Атмосфера Марса прозрачна для ультрафиолетовых лучей с длиной волны более 180 нм. Поглощение более коротковолнового излучения разогревает верхние слои атмосферы (термосферу). На высоте 200 км и выше, где плотность составляет менее одной десятиллионной от плотности у поверхности планеты, дневная температура в среднем равна 350 К и заметно зависит от солнечной активности. С этим же ультрафиолетовым излучением связано существование ионосферы Марса. Днем концентрация заряженных частиц достигает в ней $1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ на высоте 140 км, а ночью снижается примерно в 25 раз. Минимум температуры находится на высоте примерно 60 км (130–140 К). От высоты 30–40 км с приближением к поверхности температура растет почти линейно.

Интересно отметить, что состав атмосферы, постоянный примерно до 100 км, выше этого уровня изменяется: ультрафиолетовое излучение Солнца разрушает часть молекул углекислого газа и появляется атомарный кислород. Благодаря диффузионному разделению, выше 150–200 км содержание углекислого газа быстро уменьшается, возрастает относительное содержание кислорода и гелия. Еще выше, начиная с 500 км, основные составляющие атмосферы — очень разреженные гелий и водород. Такое разделение должно было бы произойти на меньших высотах, но ему препятствуют, по-видимому, ветры в верхних слоях атмосферы Марса.

Пылевые облака над равниной Эллада

В атмосфере, несмотря на ее разреженность, постоянно присутствует заметное количество мелкой пыли, придающей небу Марса розовый

цвет. Этот неожиданный результат был получен «Викингами» в 1976 г. Небо над планетой было очень прозрачным, что позволило получить отчетливое изображение дна бассейна Аргир (фото 26). При ясном небе оно выглядит совсем не таким пустынным, как можно было предположить на основании снимков «Марса-5» и «Маринера-9». На фото 26 можно видеть южный полярный район на расстоянии 15—19 тыс. км от аппарата. Там в разгаре зима и морозная мгла висит над поверхностью. Два тонких слоя облаков находятся на большой высоте, 25—40 км. Зимой еще более низкая температура на этих высотах, чем показанная на рис. 4.31, вполне годится для конденсации углекислого газа, поэтому голубые облака

то снимки Эллады, выполненные с «Викинга» в условиях редкой прозрачности атмосферы, дали совершенно неожиданный результат.

Эллада представляет собой большое, диаметром около 2000 км, светлое образование в форме более или менее правильного круга. Эллада хорошо различима с Земли. После первых спутников Марса считалось, что это плоская низменность, расположенная на 4—6 км ниже окружающего уровня. Специальные съемки, выполненные с высоким разрешением с пролетных аппаратов и первых спутников Марса, показали практически полное отсутствие каких-либо деталей на поверхности Эллады. Поэтому настоящей сенсацией стал снимок, приведенный на рис. 4.32. Оказалось,

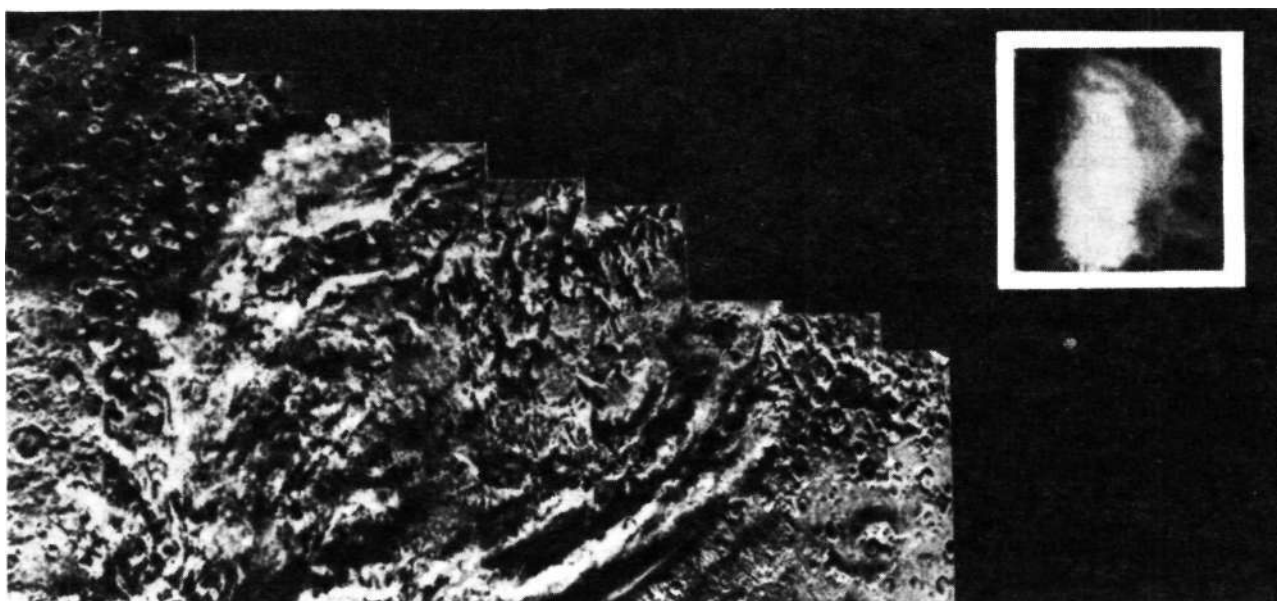


Рис. 4.32. «Равнина» Эллада во время редких прояснений атмосферы над ней предстает гигантской чашей, на дне которой имеется цепь ветвящихся горных хребтов. Есть предположения, что именно в чаше Эллады зарождаются пылевые бури. На фрагменте справа вверху — вид Эллады на более ранних фотографиях. Снимок NASA

состоят, вероятнее всего, из кристалликов замерзшей углекислоты. Как мы уже видели на фото 15, дно бассейна Аргир зимой покрыто слоем конденсатов (вероятно, сухого льда) — об этом говорит светлый оттенок поверхности, на которой, кстати, ясно видны отдельные кратеры. То, что их не замечали раньше, указывает на повышенную обычно концентрацию пыли в небе над Аргиром. В научной литературе можно было и раньше встретить указания на вероятную замутненность атмосферы как над Аргиром, так и над вторым большим кольцевым бассейном — Элладой. И если дно Аргира все же оказалось равниной,

что все дно Эллады покрыто развитой системой горных хребтов, совершенно не похожих на окружающий рельеф. Гигантская чаша правильной формы — Эллада действительно служит местом хранения пылевых бурь на Марсе (такое предположение высказывалось), своеобразным «сундуком Пандоры». Именно светлые облака этой пыли, наблюдавшиеся раньше, создавали иллюзию плоского дна. Даже в условиях спокойной атмосферы небо над Элладой не вполне свободно от облаков. Пылевые и, вероятно, конденсационные облака грядами располагаются вдоль краев чаши, которая

обещает стать одним из самых интересных объектов исследования на Марсе.

Какие геологические процессы привели к образованию огромного геологического естественного заповедника, упрятав горные хребты на пятикилометровой глубине чаши? Как получилось, что эта горная страна, казалось бы, абсолютно не схожа с окружающей кратерированной местностью? Это интересная проблема молодой астрогеологической науки. Можно ожидать, что в недалеком будущем изучению Эллады будет посвящено много работ.

Яркость спокойного розового неба Марса намного меньше, чем в пылевую бурю, но почти в 100 раз выше, чем можно было ожидать на основе расчетов для незапыленной атмосферы. Конечно, никаких звезд днем на этом небе нельзя увидеть: для этого оно слишком светлое. Но планеты, Венеру и Землю, увидеть нетрудно, если знать, где они находятся. Присутствие мелких пылевых частиц в атмосфере — следствие периодически возникающих пылевых бурь. Наиболее мелкие частицы пыли, которые выносятся в атмосферу, способны оставаться в ней в течение нескольких марсианских лет. Для этого их диаметр должен составлять единицы или доли микрометра. Например, силикатная частица радиусом 1 мкм при условии движения в совершенно спокойной атмосфере будет падать с высоты 10 км (высота однородной атмосферы для Марса) в течение нескольких сотен марсианских суток. Таким образом, цвет неба на Марсе — это цвет красного песка Марса, цвет внешних слоев его грунта. В свою очередь, красный цвет песка планеты — это следствие высокого содержания гидроокисей железа в грунте. Еще недавно предполагалось, что частицы грунта состоят из этих гидроокисей — гетитов и лимонита. Однако в эксперименте по инфракрасной спектроскопии было показано, что пылевым облакам Марса присущ инфракрасный спектр, характерный для силикатных частиц. Во всяком случае, количество силикатных частиц достигает 50—60%. Постепенно выяснилось, что зерна частиц действительно силикатные, а наружный покров, как уже говорилось, состоит из гетитов, чем и объясняется их характерный цвет. Измерения, в том числе непосредственные, показывают, что железа в грунте Марса очень много, 12—14%. Много также кремния (до 20%). Отмечено множество других элементов, из которых упомянем кальций (около 4%), алюминий (2—4%), магний (около 5%), титан. Необычным является высокое содержание в грунте серы, 3%.

Внутреннее строение. Есть ли у Марса магнитное поле?

Высокое содержание железа в грунте — это, пожалуй, наиболее серьезное свидетельство того, что опускание тяжелых элементов и пород к ядру планеты — гравитационная дифференциация Марса — затянулось и выражено куда слабее, чем у Земли. С этим процессом связана большая или меньшая концентрация массы планеты к центру, что характеризуется безразмерным моментом инерции. Как уже говорилось, если шар имеет постоянную по глубине плотность, момент инерции составляет 0,4 произведения массы на квадрат радиуса тела. В действительности, конечно, плотность увеличивается с глубиной. Напомним, что у Земли средняя плотность на глубине 2900 км достигает 10 г/см³. С этой глубины начинается металлическое ядро планеты. Наличие ядра снижает безразмерный момент инерции. У Земли он равен 0,3309, что соответствует радиусу ядра 0,57 радиуса планеты. Для Марса отличие от 0,4 значительно меньше: 0,377. Это указывает, что ядро Марса совсем маленькое. По некоторым данным, в нем сосредоточено не более 5—9% массы планеты. Схема внутреннего строения планеты приведена на рис. 4.33. Обращает на себя внимание не только малое по сравнению с земным ядро, но и очень толстая литосфера.

Согласно теории планетарного «магнитного динамо» магнитное поле планеты связано с ее ядром. Небольшое магнитное поле Марса, по-видимому, было обнаружено в исследованиях на аппаратах «Марс». Оно совсем слабое и как будто составляет на экваторе около 65 Тл, а у полюсов примерно вдвое больше.

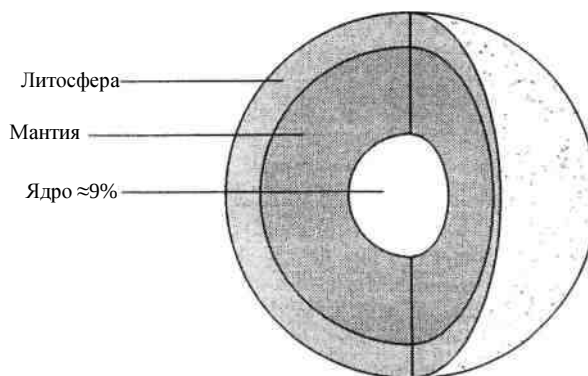


Рис. 4.33. Схема внутреннего строения Марса

Это всего лишь 0,002 от того, что имеется на поверхности Земли.

Отметим, только, что у специалистов есть серьезные возражения против этих оценок. Более того, многие даже сомневаются в их реальности. Дело в том, что измерения поля выполнялись с борта спутников Марса, т.е. в его магнитосфере и вне ее. А магнитосфера образована как дипольным собственным полем (если оно есть), так и наведенным. Определить вклад каждого из них довольно трудно. Измеренную напряженность магнитного поля на орбите искусственного спутника Марса можно одинаково успешно объяснить как его собственным полем, так и межпланетным. Поэтому экспериментаторы пользовались одной интересной особенностью межпланетного поля — его своеобразной секторной структурой с противоположным направлением поля в смежных секторах (так называемая структура «пачки (юбки) балерины»). Такая структура определяется Солнцем. Вылавливание собственного поля планеты как раз и основывалось на поисках асимметрии поля вблизи планеты. Словом, это трудный эксперимент.

Рассказывая в предыдущей главе о магнитосфере Венеры, мы приводили ее сравнение с магнитосферой Земли (см. рис. 3.54). Магнитосфера Марса хотя, кажется, и имеет некоторые черты земной, но по устройству ближе к венерианской. Это естественно, если учесть, что поле Марса очень слабое. Его недостаточно для образования сколько-нибудь заметных радиационных поясов, подобных земным. Магнитосфера Марса, наблюдаемая из космоса, резко асимметрична. С дневной стороны планеты она как бы прижата солнечным ветром, в то время как на ночной уходит от планеты почти на 10 000 км. Потоки солнечного ветра, взаимодействуя с верхними слоями атмосферы Марса, образуют ударную волну над дневной стороной на высотах около 3000 км над поверхностью.

Известно, что поле Земли только за последний миллион лет изменяло свое направление много раз — об этом свидетельствуют данные палеомагнетизма. Поэтому трудно пока сказать со всей определенностью, застали ли космические аппараты эпоху минимума марсианского магнитного поля или это обычное для Марса значение. Последнее более вероятно.

Прикосновение к поверхности Марса

Марс — очень своеобразная, ни на что не похожая планета. Чтобы ее понять, предстоит потратить немало сил. Ученые знали, что не

все исследования можно выполнить с орбиты спутника.

В конце 1971 г. от орбитальной станции «Марс-3» отделился и ушел вниз спускаемый аппарат. В самый разгар пылевой бури он совершил посадку в районе 45° ю.ш., 160° з.д. Сразу же после посадки был включен сканирующий телефотометр, предшественник телекамер аппаратов «Венера». Двадцать секунд передавалось изображение из хаотически расположенных темных и светлых точек, затем сигнал пропал. О том, что случилось с аппаратом, можно только гадать. Что же касается изображения, то предполагалось даже, что это и была картина пылевой бури.

В марте 1974 г. еще один спускаемый аппарат, «Марс-6», проведя измерения на трассе снижения, прекратил работу вблизи поверхности планеты. Аппарат опустился в точке с координатами 23° ю.ш. и $19,5^\circ$ з.д. Удивительно не везет нам с марсианскими аппаратами.

Большинство специалистов считало, что отказы как-то были связаны с моментами посадки. Поэтому американские ученые с большой тщательностью отработывали посадочное устройство аппарата «Викинг». Автоматическая лаборатория «Викинг» была первым американским аппаратом для посадки на другую планету. Главной его задачей было проведение химико-биологических исследований, призванных провести тщательный поиск жизни на Марсе.

20 июля 1976 г. «Викинг-1» совершил успешную посадку в северо-западной части Равнины Хриса ($22,4^\circ$ с.ш. и $47,5^\circ$ з.д.). Посадочные опоры аппарата углубились в рыхлый грунт, а одна из них погрузилась в него полностью. Таким образом, прежние представления о том, что аппарат может утонуть в песке, были не такими уж безосновательными. Но более серьезной опасностью оказались большие острые камни, на один из которых чудом не попал аппарат. Не исключено, что и «Марсу-3», и «Марсу-6» в этом отношении не повезло. Сразу же после посадки аппарат передал изображение грунта под опорами и вблизи них (рис. 4.34). Это была предосторожность: если бы аппарат начал понемногу тонуть в зыбучих песках, об этом узнали бы на Земле и срочно изменили бы программу, чтобы хоть что-то успеть сделать. Но все обошлось благополучно. В тот же день «Викинг-1» передал панорамное изображение окружающей местности. Высокое разрешение камеры позволило рассмотреть на последующих снимках мелкие частицы грунта (рис. 4.35). Поверхность Марса оказалась примерно такой,

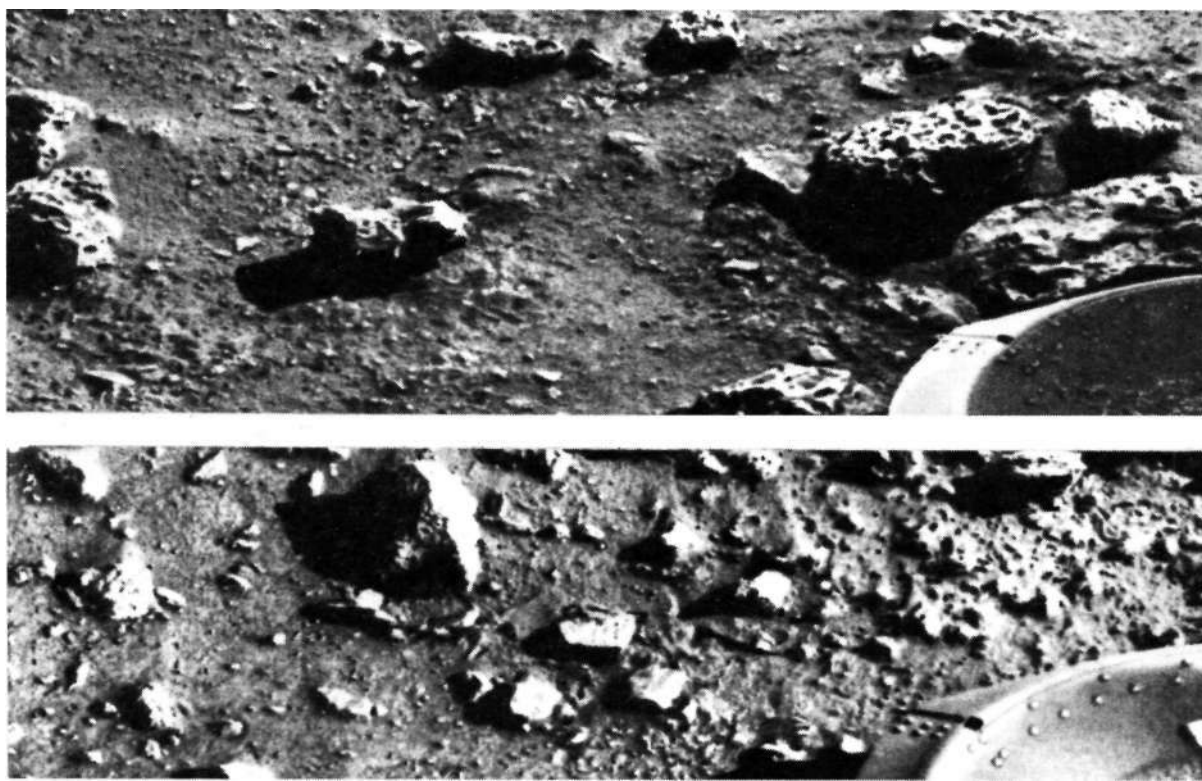


Рис. 4.34. В первые десятки секунд после посадки «Викингов» на Марс телевизионные камеры передавали изображение опор аппаратов. Это были первые снимки с поверхности Марса. Если бы аппарат утонул в песках Марса, это были бы единственные переданные с поверхности Марса картинки. К счастью грунт оказался прочным. Снимок NASA

как ожидалось: пыльная пустынная местность, обильно усеянная камнями. Пожалуй, только камней оказалось больше ожидаемого. Внимание исследователей сразу же привлекла линия горизонта: нагромождения камней, песчаные дюны и невысокие холмы вдали.

Угол, который охватывает панорама по горизонтали, составляет 120° . Именно таков угол зрения человека. Поэтому панорама не только позволяет представить себе, что мы увидим на Марсе, но дает также «эффект присутствия». Панорама получена через 2 ч после восхода Солнца. Ландшафт напоминает некоторые районы пустынь на Земле. Песчаные дюны и барханы, которые можно видеть на панораме, вытянуты примерно по диагонали из левого верхнего угла и указывают направление сильных ветров. Они очень напоминают барханы в пустынях Земли. Правая сторона панорамы — юго-восток. В центре находится штанга метеостанции «Викинга».

Большой валун в левой, северо-западной части панорамы имеет длину 2 м и высоту над песком 1 м. Подробные изображения показали, что сверху валун покрыт песчаной шапкой, нанесенной ветром (фото 27). Валунками обыч-

но называют большие камни, принесенные ледниками. Сторонники ледниковой гипотезы происхождения марсианского рельефа обратили внимание на более или менее правильное кольцо, которым мелкие обломки окружают этот валун. Оказывается, вокруг валунов ледники Земли также оставляют круги из мелких камней.

Линия горизонта на панораме рис. 4.35 довольно неровная. Ее неправильность, а также некоторые особенности рельефа, например широкое углубление на первом плане в правой части панорамы, позволили ученым предположить, что «Викинг-1» угодил в небольшой кратер. То, что мы видим на горизонте — вал кратера. Размер наибольшей каменной глыбы на горизонте составляет 140 м.

Через полтора месяца после «Викинга-1», 6 сентября 1976 г., на равнину Утопия в точке $47,9^\circ$ с.ш. и $225,9^\circ$ з.д. опустился «Викинг-2». Расстояние между обеими точками посадки по дуге большого круга составило 6500 км. Аппараты опустились в диаметрально противоположных часовых поясах. По-видимому, «Викинг-2» все же угодил на какой-то камень. Во всяком случае, удар при посадке был настолько

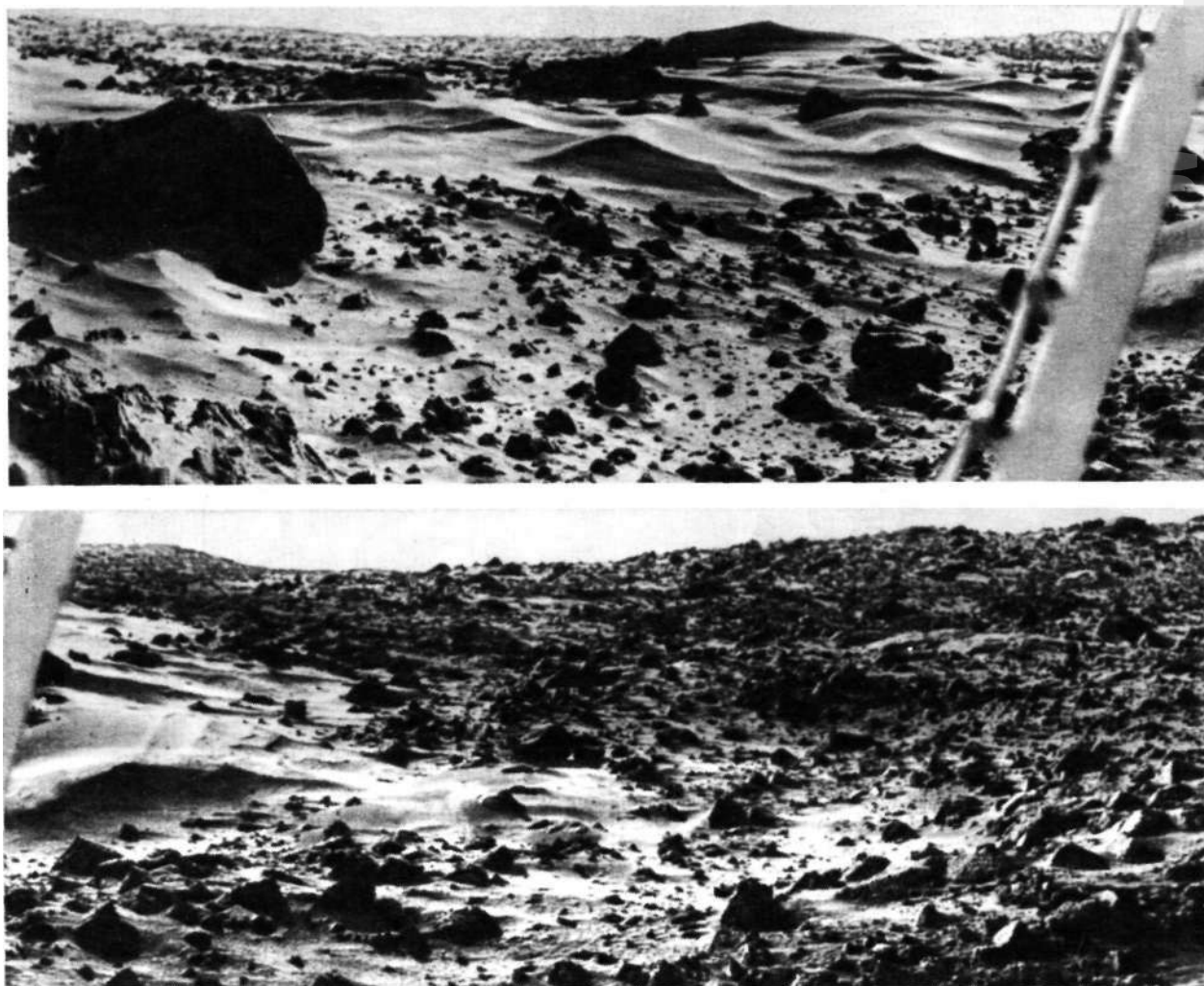


Рис. 4.35. Панорама, переданная «Викингом-1» 3 августа 1976 г. Марсианское время 7 ч 30 мин; утреннее освещение — Солнце взошло 2 ч назад. Панорама позволяет мысленно перенестись на Марс, так как охватывает 120° — именно таков угол зрения человека. В центре — штанга метеостанции «Викинга». Песчаные дюны вытянуты с северо-востока (слева) к юго-западу. В правой (юго-западной) части панорамы видна грубая поверхность крупных камней. Снимок NASA

сильным, что в одной из частей аппарата образовалась неопасная трещина.

Пейзажи в обоих случаях сходны: пустынная местность, засыпанная ржаво-красным песком и обильно усеянная камнями. В точке посадки «Викинга-2» камней так много (фото 28), что эту местность называли «лес камней». Камни имеют крупные поры, характерные для вулканических изверженных пород. Основания их глубоко погружены в красный песок. Размер камней вблизи аппарата 5—20 см, вдали достигает нескольких метров. Каменистая равнина в месте посадки «Викинга-2» уходит до самого горизонта, образующего, в отличие от «Викинга-1», ровную линию на панораме

(искривление вызвано наклоном аппарата). Согласно одному из предположений, камни выброшены из расположенного примерно в 100 км большого метеоритного кратера. Возможно, «лес камней» и есть луч кратера.

Немного левее центра панорамы фото 28 видна большая глыба, отличающаяся гладкой поверхностью. Влево от нее до самого края снимка проходит неглубокая канава, в которой нет камней. По всему полю снимка расположены ноздреватые камни.

Перед посадкой обоих аппаратов орбитальным отсеком была произведена съемка районов предполагаемой посадки. Снимки выполнялись с высоким разрешением — до 50 м. Избранные

районы посадки казались наиболее безопасными. Тем не менее, в обеих точках мы видим такие похожие нагромождения камней. Не исключено, что каменистой окажется почти вся поверхность Марса.

После посадки «Викинга-1» предстояло выяснить, насколько велика реальная опасность песчаных заносов. Ряд повторных изображений, переданных в последующие дни, показал, что перемещение песка под действием ветра незаметно. Это не удивительно; скорость ветра не превышала 7 м/с. Примерно одинаковые скорости ветра в обоих местах указывали на спокойное состояние атмосферы. Направление ветра в районе посадки «Викингов» имело суточную зависимость. В Утопии утром ветер был юго-восточного направления, в полдень — северо-западного, в полночь — северо-восточного. На рис. 4.36 показано, как менялись скорость и направление ветра над «Викингом-2».

Первые же измерения на обоих «Викингах» показали, что ночью температура атмосферы в месте посадки падает до -86°C . А максимальные дневные температуры оказались несколько ниже того, что ожидалось для летнего состояния и не превышали -20°C . И это в самом разгаре лета! Наибольшая температура грунта оказалась градусов на 20 выше. Атмосферное давление в месте посадки «Викинга-1» было 7,5–7,7 мбар. По-видимому, он опустился в несколько пониженном районе.

Метеорологическая обстановка оставалась спокойной довольно долго. Вместе с тем большие песчаные барханы показывали, что ветер играет большую роль в образовании рельефа планеты.

Одновременно с работой «Викингов» на поверхности, спутники Марса продолжали исследования планеты, в частности изучение полярных шапок. Неожиданно оказалось, что иногда их температура падает на 10° ниже температуры конденсации углекислого газа при марсианских давлениях, т.е. до 138 К. Такая низкая температура на поверхности может наблюдаться на возвышенностях, где давление близко к 1,4 мбар, либо в двух особых случаях. Первый был найден в измерениях «Марса-3», которые позволили сделать поразительный вывод: периферийная часть осенней полярной шапки, «полярный воротник», висит «в воздухе». Это мелкие частицы затвердевшего углекислого газа, которые еще не осели на поверхность. Если они находятся на высоте нескольких километров, их температура действительно будет ниже чем 148 К. Второй случай: из полярных объемов атмосферы может быть

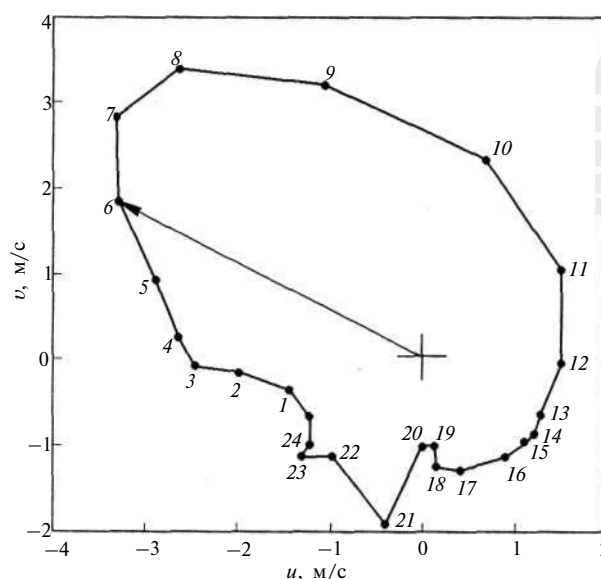


Рис. 4.36. В течение суток ветер меняет свое направление. Стрелкой показаны величина и направление ветра в 6 ч утра в точке работы «Викинга-2» (v — северный ветер, u — восточный)

выморожена значительная часть углекислого газа и относительные количества азота и аргона возрастут. Приток новых порций углекислого газа из других частей атмосферы будет ограничиваться диффузией, что также приведет к понижению температуры конденсации. Расчет показывает, что для достижения таких температур необходимо, чтобы в процессе вымораживания было осаждено примерно 75% углекислого газа.

К сожалению, вряд ли можно считать, что проблема природы снегоподобных осадков на Марсе решена полностью. Как всегда, некий факт не укладывается в общую картину. Этот факт получен при анализе изображений местности вокруг аппарата «Викинг-2», переданных осенью 1977 г., т.е. спустя полгода по марсианскому календарю после посадки аппарата. В это время на равнине Утопия начиналась зима, а на переданных аппаратом изображениях в тени камней видны небольшие горки снега (рис. 4.37). Но автоматическая метеостанция сообщала о температурах хотя и низких, но все же явно недостаточно низких для существования снега из углекислого газа. Вместе с тем ничтожное количество водяного пара вблизи осенней полярной шапки заставляет сомневаться в том, что это обычный иней или снег. Наконец, несколькими днями раньше этот «снег» покрывал намного большую площадь, но отчасти стаял, хотя температура была намного ниже 0°C . Высказан ряд предположений о



Рис. 4.37. Зима подступает к «Викингу-2»: на равнине Утопия появились белые осадки. Осадки могут иметь другую природу, чем снег Земли. Снимок NASA

природе этого снега: возможно, это клатраты двуокиси углерода, или полимеры типа C_3O_2 , или что-то другое. Окончательного ответа нет до сих пор.

Снова на Марсе через 21 год

4 июля 1997 г., в северо-восточной части земли Ксанфа, в районе долины Ареса, в точке $19,33^\circ$ с.ш., $33,55^\circ$ з.д. опустился аппарат «Пас-файндер» («Следопыт»). Аппарат состоит из посадочного модуля и небольшого автономного шестиколесного марсохода с массой всего 11 кг. Посадку смягчила большая надувная подушка, на которой аппарат долго прыгал после посадки. Связь с Землей происходит через посадочный модуль. Изображение окрестностей района посадки (рис. 4.38), снятое стереокамерой посадочного модуля, очень похоже на панорамы «Викингов». Справа на этом снимке виден сам марсоход. В цветном варианте это все тот же ржаво-красный песок с многочисленными камнями, розовое небо, неровная линия горизонта. Аппарат, по-видимому, находится в самой долине, которая когда-то, возможно, была обширным водным резервуаром. На расстоянии 1–2 км от аппарата видны два холма. Возможно, что светлые пятна на их верхушках оставили когда-то потоки воды.

Марсоход также оснащен телевизионной камерой, но главный его инструмент — это комбинированный альфа-протонно-рентгеновский спектрометр, который можно направлять на камни и другие образования на поверхности, чтобы определить их химический и, косвенно, минеральный состав. Состав первого же иссле-

дованного камня показал, что по своей геологической истории он гораздо ближе к породам Земли, чем Луны. По-видимому, почти на 1/3 он состоит из кварца (которого на Луне нет); история его, возможно, включает многократные расплавления при излияниях лавы и затвердевания. По составу он отнесен к андезитам, второй по распространенности на Земле вулканической породе. Марсоход может исследовать объекты на удалении до 10 м от посадочного модуля.

В месте посадки, которое находится недалеко от равнины Хриса, где 21 год назад опустился «Викинг-1», лето было в разгаре. Метеостанция на посадочном модуле сообщала следующее о погоде. Максимальная дневная температура в течение трех дней была от -13 до -18°C , минимальная в ранние утренние часы падала до -75 и -76°C . Давление 6,75 мбар, ветер 3 м/с и меняется по направлению в течение суток. На «Викинге-1» температура немного отличалась, но это скорее связано с топографической высотой места. Небо чистое; количество взвешенной в атмосфере пыли не больше, чем над земными городами, но поднимается она высоко, до 40 км.

Где ты, жизнь на Марсе?

Одной из основных научных задач в исследовании Марса считается поиск возможных форм жизни. Такой поиск был главной задачей «Викингов».

В недалеком прошлом ученые указывали, что некоторые из наблюдаемых на Марсе



Рис. 4.38. Фрагмент панорамы, переданной посадочным модулем аппарата «Пасфайндер» из района Долины Ареса. Поверхность мало отличается от той, которую можно видеть на панорамах «Викингов». На среднем плане справа — марсоход

явлений можно было бы объяснить существованием каких-то видов растительности на планете. Одно из таких явлений, которое активно изучалось сторонниками «органической» гипотезы, — так называемая волна потемнения.

Многие астрономы сообщали, что каждые полгода по марсианскому календарю с началом весны в одном из полушарий Марса вокруг тающей полярной шапки появляется темная окантовка. Постепенно она распространяется к экватору, обычно со средней скоростью около 30 км в сутки. Достигнув экватора, волна переходит через него. Через полгода такая же «волна» движется от другого полюса. Это явление, в общем, наблюдается более или менее регулярно. После прохождения волны области высоких широт снова светлеют.

Наряду с этим известно, что пыль, выпадающая на поверхность после пылевых бурь,

почему-то не уменьшает контрасты между темными и светлыми областями. Сопоставляя эти данные, ученые — сторонники «органической» гипотезы — указывали, что такими свойствами обладает растительность: ее окраска не меняется после бури. Вместе с тем в условиях очень сухой марсианской атмосферы вегетационный период в развитии растительности должен быть приурочен к весне, когда при таянии шапки в атмосфере появляется немного влаги. Постепенное распространение этой влаги к экватору, как считали сторонники «органической» гипотезы, и вызывает странную волну потемнения.

Чтобы проверить ее, в 1956—1957 гг. были проведены наземные инфракрасные спектроскопические измерения. Дело в том, что органические молекулы CH дают характерные полосы вблизи длины волны 3,5 мкм. Полосы были обнаружены. В течение пяти лет счита-

лось, что гипотеза растительности имеет сильное подтверждение, пока в 1963 г. сами авторы не высказали сомнений в своих результатах. Проверка последних не дала вполне четкого отрицательного ответа, но все же он скорее отрицательный, чем положительный.

Была предложена и другая, «неорганическая» гипотеза о природе волны потемнения. Она связывает природу темных областей с эоловыми процессами — переносом больших количеств пыли регулярными ветрами. Предполагалось, что темную пыль выбрасывают вулканы, а местные ветры разносят ее, образуя характерные полосы, направленные от вулкана. В отношении переноса пыли гипотеза блестяще подтвердилась, но пока на Марсе не найдено ни одного действующего вулкана. Есть у гипотезы и другие противоречия.

Еще одна неорганическая гипотеза объясняет волны потемнения увлажнением каких-то гигроскопических веществ на поверхности. Однако попытки подобрать такие вещества, которые изменяли бы оттенки под действием ничтожных количеств влаги, убедительного результата не дали. Впрочем, грунт Марса, как выяснилось, обладает очень необычными физико-химическими свойствами.

Несмотря на появление неорганических гипотез многие энтузиасты доказывали, что микроорганизмы, похожие на земные, вполне могли бы жить на Марсе, и искали проявления их жизнедеятельности.

Поиск микроорганизмов был основной задачей аппаратов «Викинг». И здесь мы подходим к самым удивительным результатам, полученным этими аппаратами. Портативные автоматизированные химические лаборатории обоих аппаратов произвели анализ с тем, чтобы узнать, есть ли в грунте Марса микроорганизмы. Для этого было подготовлено несколько специальных экспериментов.

В герметически закрытой камере атмосфера над пробой грунта содержала, как и марсианская, углекислый газ, но часть атомов углерода-12 в нем была замещена на радиоактивный изотоп углерод-14. Грунт освещался светом, подобным солнечному. Земные микроорганизмы и растения в этих условиях энергично поглощают углекислый газ. Затем проба грунта нагревалась, органические вещества разлагались, а приборы должны были обнаружить усвоенный радиоактивный углерод, что доказывало бы использование микроорганизмами фотосинтеза. Во всяком случае, на Земле этот эксперимент действовал безотказно. На Марсе же ответ был неопределенным; радиоактивный углерод то регистрировался, то нет.

Во втором приборе тот же принцип использовался, так сказать, «наоборот»: обитателей грунта подкармливали радиоактивной пищей; в результате метаболизма (обмена веществ с окружающей средой) они должны были выделить меченный углекислый газ. Результаты этого эксперимента можно было при желании считать положительными, хотя и очень непохожими на то, что ожидалось.

Еще меньше были похожи на земные результаты третьего эксперимента, где грунт помещался в камеру с точно известной контрольной атмосферой. Подкормка грунта питательной смесью в результате жизнедеятельности микроорганизмов изменяла состав газовой среды. Время, которое требовалось для нормального проведения эксперимента, на Земле занимало две недели. Но на Марсе из грунта сразу же выделились углекислый газ и кислород, а все реакции завершились за двое суток. Может быть, марсианские микроорганизмы гораздо активнее земных? Но результаты с таким же или даже большим успехом можно было объяснить необычными химическими свойствами грунта планеты — присутствием в нем некоторых перекисей. При смачивании водой такой состав дает сильное газовыделение. Как сказал один из экспериментаторов, грунт Марса было бы опасно положить на язык, настолько он едкий. Большую роль в этом играет, по-видимому, ультрафиолетовая радиация, которой облучается грунт.

Ультрафиолетовое излучение Солнца проникает до самой поверхности планеты и было бы в состоянии уничтожить большинство земных микроорганизмов, если их поместить на поверхность Марса. Поэтому поиск марсианских микроорганизмов, как предполагалось, следовало бы вести в верхнем слое грунта, но не на самой поверхности. Кстати, с этой целью «Викинги» изрядно вскопали грунт вокруг аппарата (фото 29). Более того, с помощью манипулятора удалось даже убрать камень и взять из-под него пробу. Но все реакции неизменно протекали столь же необычно, как и раньше. Можно ожидать, что интенсивное ультрафиолетовое излучение может быть причиной многих необычных для Земли фотохимических реакций. Возможно, с этим связан интересный факт, обнаруженный после посадки «Викингов». Вблизи поверхности у аппарата включились тормозные ракетные двигатели, чтобы смягчить удар при посадке. Струи газа двигателей ударили в поверхность и подняли облако пыли. Сразу же после посадки было передано изображение места посадки. В тех местах, где пыль была сметена, вместо красного песка были видны зеленовато-серые пятна.

Такой же цвет имеет грунт возле отдельных камней и боковые поверхности некоторых камней. Когда грунтозаборник аппарата углубился в грунт, под слоем красного песка снова был обнаружен тот же серый оттенок. Отсюда можно сделать предварительный вывод, что интенсивный красный цвет имеют только внешние слои грунта Марса. Более того, сами песчинки, как уже говорилось, только снаружи покрыты слоем тончайшей красной пудры.

Но закончим рассказ о поисках жизни.

Наиболее тяжелый удар по надеждам встретить микрофлору на Марсе нанес другой прибор — газовый хроматограф, соединенный с масс-спектрометром. В нем образец грунта нагревался, а выходящие из него газовые продукты разложения органических веществ анализировались. Был исследован ряд образцов марсианского грунта, взятого с глубины от 4 до 6 см. Зарегистрировано выделение сравнительно больших количеств кислорода, водяного пара и углекислого газа. Никаких органических соединений не отмечено, хотя чувствительность прибора к примесям достигает одной десяти-миллиардной доли. Укажем для сравнения, что в образце антарктического грунта массой всего 0,1 г в таких же условиях прибор обнаруживает более двадцати органических соединений!

Любая известная нам форма жизни при разложении выделяет органические летучие вещества. Поэтому можно сделать вывод, что либо количество микроорганизмов в местах посадки «Викингов» было ничтожно мало, либо их вообще нет на планете. К этой мысли склоняется все больше ученых. В таком случае, почему нет жизни на Марсе? Ведь многие земные микроорганизмы смогли бы приспособиться к обитанию в верхнем слое марсианского грунта. Не химическая ли активность грунта мешает возникнуть жизни? Но, может быть, жизнь там совсем не похожа на земную, а эксперименты «Викингов» не годились для ее поиска? Возможно, здесь ученые уже столкнулись с тем, что даже очень совершенные автоматы все-таки обладают ограниченными возможностями. Но это был хороший эксперимент. Природа такова, как она есть, и не меняется от наших мифов. А что жизнь на планете не найдена... Спустя 20 лет, в 1996 г., появились сообщения, что следы окаменелых микроорганизмов, возможно, были обнаружены в метеорите ALH 84001, некогда прилетевшем с Марса. Подробнее об этом рассказывается в гл. 10.

Естественные спутники Марса

Оставим теперь поверхность и атмосферу Марса и обратимся к его спутникам. Две луны Марса (может быть, следовало бы сказать, две современные луны Марса), Фобос и Деймос, были открыты А.Холлом немного больше 100 лет назад, в том же 1877 г., что и «каналы». Хотя никаких указаний на существование этих спутников не было, почему-то многие астрономы считали, что у Марса должно быть именно два спутника. По-видимому, для этих утверждений использовалась простая интерполяция: у Венеры спутников нет, у Земли — 1, у Юпитера — 4 (в действительности не менее 16). Стало быть, у Марса — 2. Чтобы не нарушать традицию, напомним, что за 157 лет до открытия Фобоса и Деймоса, в «Путешествиях Гулливера» Д.Свифт писал, что астрономы Лапуты, где происходят приключения Гулливера, «открыли ... две меньшие звезды, или спутники, которые обращаются вокруг Марса, причем внутренняя отстоит от центра планеты точно на три ее диаметра, а внешняя на пять». Заметим, что Д.Свифт писал свою книгу уже после того, как Галилей в 1610 г. открыл четыре больших спутника Юпитера.

Луны Марса очень малы. Их масса примерно в 10 тыс. раз меньше, чем можно было бы ожидать из сравнения с ассортиментом, имеющимся в поясе астероидов, откуда, очевидно, Марс и позаимствовал Фобос и Деймос. Свифт угадал расстояние, на котором находится Деймос: 20 130 км от поверхности планеты. Но это не внутренняя, а внешняя луна. Фобос удален от поверхности планеты всего на 6000 км (рис. 4.39). Это в 64 раза ближе, чем наша Луна. Удивительно, что оба спутника находятся на почти круговых орбитах. Удивительно, потому что неправильная форма Фобоса и Деймоса позволяет видеть в них типичные астероиды, в древнейшие времена захваченные Марсом. Период обращения Фобоса 7 ч 39 мин, Деймоса 30 ч 18 мин.

Среди множества особенностей Фобоса: он восходит на западе и заходит на востоке, и все это по три раза в сутки. Если наблюдать Фобос с поверхности Марса, его наибольший угловой диаметр составляет 12 угловых минут (1/3 диска Луны), причем у горизонта этот угол меньше в 1,4 раза. Фобос представляет собой небесное тело неправильной формы (рис. 4.40), обколотое со всех сторон метеоритными ударами, или обломок более крупного родительского тела. Если бы нашу Луну можно было бы разместить на территории бывшего СССР, она заняла бы пространство от Северного Ле-

довитого океана до южной границы — 3480 км. Фобос вписался бы в кольцо Московской автодороги. Его две оси, большая и малая, составляют 27 и 20 км. Деймос еще меньше: 16 и 10 км. Своими большими осями Фобос и Деймос всегда направлены к центру Марса (синхронное вращение). Иными словами, подобно нашей Луне, они всегда обращены к планете одной стороной.

Форму Фобоса удалось уточнить в 1989 г., когда с аппарата «Фобос» были получены его снимки (рис. 4.41).

Средняя плотность Фобоса близка к $1,95 \text{ г/см}^3$, а его масса около $1,08 \cdot 10^{19} \text{ г}$. Это примерно в 7 млн раз меньше массы Луны. Можно подумать, что притяжение такого тела должно быть ничтожным. Но это не так. Ускорение свободного падения на среднем уровне его поверхности составляет $0,7 \text{ см/с}^2$, или в 1400 раз меньше, чем у поверхности Земли. Космонавт в гермокостюме весил бы на

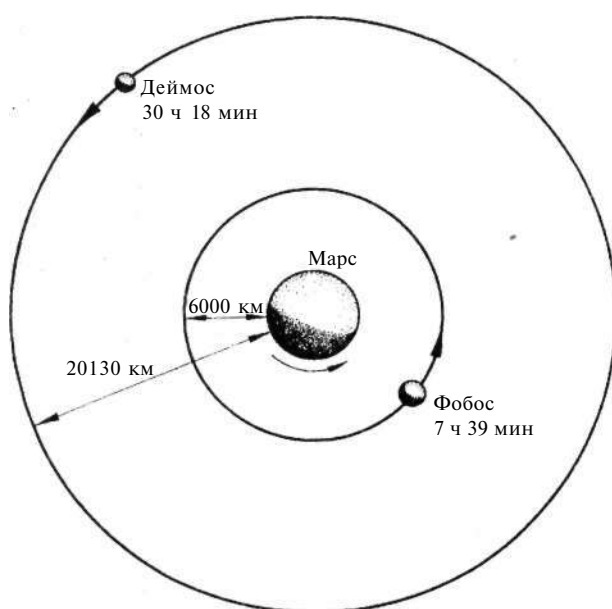


Рис. 4.39. Орбиты Фобоса и Деймоса

Фобосе только 65 г. И все-таки передвигаться там было бы безопасно. Улететь с него от толчка ногами мог бы только человек, который на Земле сможет прыгнуть на высоту 2,6 м: первая космическая скорость для Фобоса близка к 8 м/с. У Деймоса ускорение свободного падения вдвое ниже.

На поверхности Фобоса и Деймоса в виде кратеров сохранились следы многочисленных метеоритных ударов. Наибольший кратер на

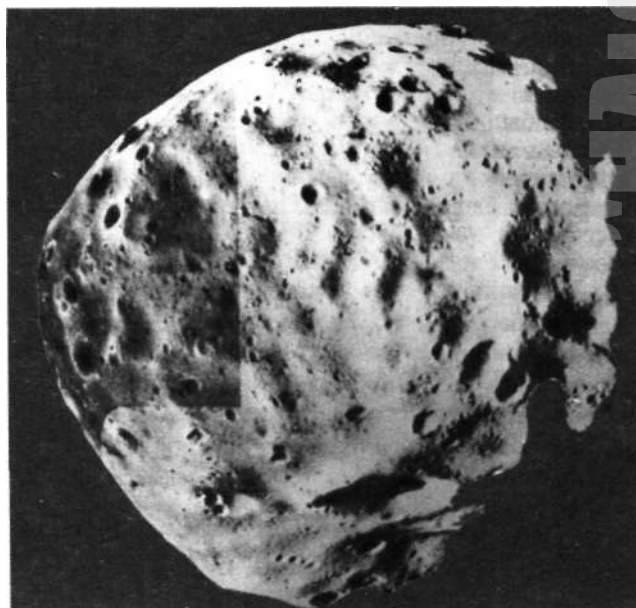


Рис. 4.40. Снимок большей из двух лун Марса — Фобоса. Его размеры около 20 км. На поверхности Фобоса видны кратеры, наибольшие из которых достигают нескольких километров. Фобос слишком мал, чтобы в нем могли развиваться вулканические процессы, поэтому все кратеры имеют метеоритное происхождение. Снимок NASA

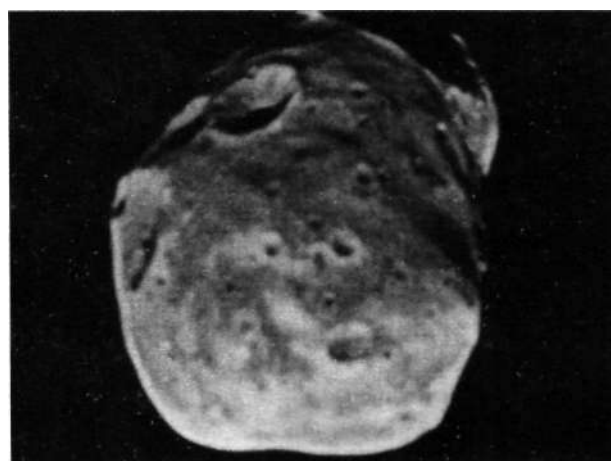


Рис. 4.41. Другая сторона Фобоса. Снимок с аппарата «Фобос», 1989 г.

Фобосе имеет диаметр 8 км. Трудно понять, как он уцелел после такого удара. Когда с помощью «Викингов» удалось сделать подробные снимки Фобоса, были обнаружены странные ряды борозд, идущие вдоль поверхности спутника на большие расстояния. Можно предположить, что эти трещины образовались либо мгновенно, при сильном метеоритном ударе, когда возник кратер Стикни диаметром 8 км, либо в результате длительных приливных

воздействий Марса: напряжения долго накапливались, пока, наконец, не возникли трещины. Есть и другие предположения, но связь борозд с кратером Стикни очевидна. Одну из таких борозд шириной 100—300 м можно видеть на рис. 4.42, где показан трехкилометровый участок поверхности Фобоса. Самые мелкие детали на этом снимке составляют 10—15 м. Сравнительно большие кратеры на первом плане имеют диаметр около 800 м, и, конечно, все они метеоритного происхождения: Фобос слишком мал, чтобы в нем могли развиваться вулканические явления. Вся поверхность обоих спутников очень древняя; она покрыта толстым слоем пыли, которая черна, как сажа. Считалось, что низкая отражательная способность и спектры отражения присущи наиболее примитивным типам метеоритов — углистым, хондритам. Толщина слоя реголита на Фобосе оценивается в несколько сотен метров; на его поверхности имеются крупные изолированные глыбы породы, но на Деймосе их намного больше. При большом увеличении на поверхности Фобоса видно огромное число совсем мелких кратеров, окруженных кольцами со сложной внешней структурой.

На поверхности Деймоса (рис. 4.43) кратеров меньше; это может объясняться тем, что выбросы из одних кратеров засыпали другие. На рис. 4.43 показаны также увеличенные фрагменты изображения, где наименьшие детали составляют 2—3 м. Интересно, что в отличие от Фобоса кратеры на Деймосе имеют



Рис. 4.42. Фрагмент поверхности Фобоса крупным планом. Наименьшие детали имеют размеры около 15 м. Снимок охватывает примерно $3 \times 3,5$ км поверхности этого небесного тела. Ширина засыпанной пылью трещины от 100 до 300 м. Снимок NASA

светлую окантовку, а само небесное тело обладает более правильными очертаниями. На его поверхности видны глыбы размерами до 10 м.

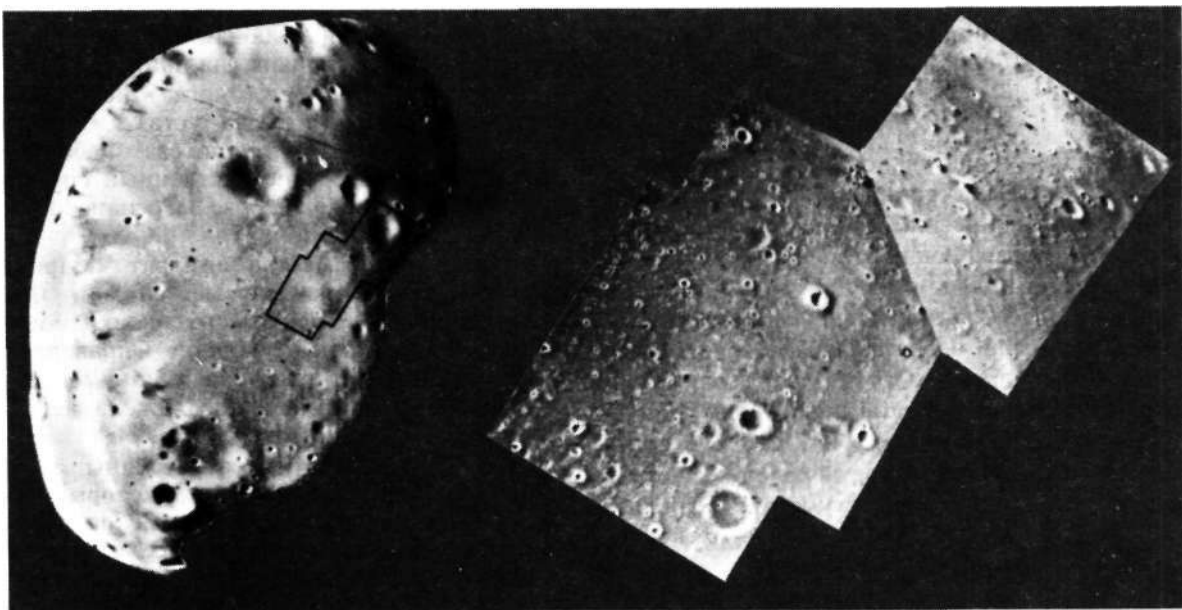


Рис. 4.43. Поверхность Деймоса. Размеры наименьших деталей на фрагменте составляют 2—3 м. Снимок NASA

Имеются расчеты, которые показывают, что с определенной вероятностью Фобос, Деймос и древние погибшие спутники (если они действительно существовали) могут относиться к обломкам единого протопланетного тела.

Фобос и Деймос так малы, что их открытие средствами наземной астрономии, казалось бы, противоречит тому, что сказано выше о предельном разрешении на Марсе (около 500 км). Но это не так: одно дело — различить малоконтрастные детали, другое — сфотографировать спутник на темном фоне неба.

Изучение Фобоса и Деймоса очень важно: не исключено, что они сохранились с тех времен, когда планеты еще не существовали. Сведения о природе и особенностях происхождения этих спутников представляют большую ценность для космогонической науки. Поэтому Фобос был выбран основной целью крупного советского проекта «Фобос» с широким участием иностранных ученых. Аппарат с тем же названием летом 1988 г. стартовал с советского космодрома и весной 1989 г. должен был сблизиться с Фобосом до расстояния всего 50 м. На борту аппарата было много научных приборов для физических исследований, определения состава поверхности и даже для картирования его внутренней структуры на глубину до 200 м. О судьбе аппарата уже говорилось. Но исследования Фобоса все же удалось провести, хотя и со значительно большего расстояния, около 200 км. Фобос оказался телом далеко не однородным, включающим, скорее всего, крупные глыбы различного состава. Исследования показали, что его история совсем не так проста, как думали многие ученые.

Конец Фобоса?

Наше время небывалого роста знаний о Солнечной системе странным образом совпадает с периодом, критическим для некоторых небесных тел. В последующих главах немало внимания уделено кольцам планет-гигантов. Кстати, когда в 1978 г. вышла первая книга автора о планетах, была известна одна-единственная планета с кольцами — Сатурн. А на этих страницах читатель найдет описание колец Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, что как будто указывает на универсальность колец. С другой стороны, есть серьезные аргументы в пользу того, что кольца не вечны и что в космогонических масштабах они «живут» не очень долго. Тогда придется признать, что нам удивительно повезло: мы застали кольца у всех гигантов!

Похоже также, что мы присутствуем едва ли не при последнем акте одной или двух спутниковых драм. В гл. 8 рассказывается о необычном спутнике Тритоне и ожидающей его судьбе. А пока — несколько слов о предстоящей судьбе Фобоса.

В 1945 г. анализ положений Фобоса на его орбите привел ученых к заключению, что движение спутника медленно, но неуклонно ускоряется (так называемое вековое ускорение). Это может происходить только за счет его постепенного снижения. Расчеты показывали, что из-за приливных потерь орбитальной энергии Фобос в конце концов снизится настолько, что неминуемо разрушится в верхних слоях атмосферы Марса. Интересно, что у второго спутника — Деймоса — вековое ускорение практически отсутствует.

Однако после опубликования расчетов некоторые ученые высказали сомнения в их достоверности. А затем И.С.Шкловский, один из крупнейших советских астрофизиков, предложил в 1959 г. совсем другое объяснение эволюции орбиты Фобоса. Если массу спутника оценили неверно, если она намного меньше, потеря высоты может возникнуть и от ничтожного аэродинамического торможения в весьма разреженной экзосфере Марса. Но чтобы такие потери энергии стали ощутимыми, спутник должен быть настолько легким, что ему впору быть ... пустотелым. Высказана эта мысль была в 1959 г., на второй год после запуска первого искусственного спутника, когда представления о физике Марса были довольно расплывчатыми, а среди астрономических дисциплин была даже «астроботаника», изучавшая вегетацию гипотетической растительности на Марсе.

Так вот, в пору, когда искусственные спутники были у всех на устах, и появилась эта захватывающая дух гипотеза! Фобос потому пустотелый, что это искусственный спутник — монумент почившей в бозе марсианской цивилизации!

Через 12 лет, когда аппарат «Маринер-9» передал на Землю первые снимки Фобоса, автор гипотезы получил их с ехидной надписью: «А заклепок не видно!» Справедливости ради заметим, что гипотеза о монументе, хоть и наделала шума, была предложена не вполне серьезно.

В 1989 г. были переобработаны все имеющиеся наблюдения Фобоса (которых набралось 6954). Выяснились забавные подробности, например, в старые данные вкралась ошибка из-за небольшой разницы в стандартном тихоокеанском и местном астрономическом времени. Но в целом ускорения подтвердились. Фобос по очень пологой спирали спускается к Марсу.

Высота орбиты уменьшается на 9 м за каждые 100 лет. Через 40 млн лет (один миг в истории Солнечной системы) период его обращения уменьшится с 7,5 до 1,7 ч, а спутник неминуемо разрушится. Его обломки упадут в экваториальном поясе Марса и оставят новые ударные кратеры со свежими валами, которые станут единственным памятником Фобосу. Заметим, что уже теперь он находится внутри предела Роша — той границы, ниже которой приливные силы стараются разорвать небесное тело. Поэтому Фобос существует, строго говоря, только за счет своей прочности.

Прощание с Марсом и «Викингами»

Каждое марсианское утро лучи восходящего Солнца освещают каменистую Равнину Утопия. Марсианским летом в северном полушарии через 15 мин после восхода Солнца равнина наполняется обманчиво теплыми тенями камней на обжигающе холодном грунте (фото 30). Тени касаются опор неподвижно стоящего аппарата, недалеко от которого в песке грунтозаборником были вырыты канавки. С каждым годом песок заметает и канавки, и опоры аппарата. Понемногу и на его плоских поверхностях растут шапки песка, который оставляют проносящиеся над ним пылевые бури. Однажды аппарат включил свои электронные

глаза во время бури и осмотрелся. Сквозь мглу насыщенной пылью атмосферы едва различались уже знакомые близкие камни, которые будут его единственными соседями еще много тысяч лет. Один из них так странно напоминает каменный обломок на далекой Венере, где стоят другие земные аппараты.

Солнце поднимается все выше, и под светлым розовым небом все та же ровная линия горизонта очерчивает пустынный ландшафт Утопии. А в нескольких тысячах километров к западу, с противоположной стороны того же северного полушария, вблизи северного тропика Марса, по соседству с камнем, похожим на большого медведя, стоит еще один такой же аппарат. Пока ему позволяли постепенно слабеющие электрические силы, аппарат выполнял дежурную метеорологическую программу. Когда Солнце клонится к западу, за 15 мин до его захода в летнее время равнина Хриса тоже наполняется длинными тенями (фото 32). Заходит Солнце и над равниной Хриса спускается ночь (фото 31). Над Марсом восходят те же созвездия, что и над Землей, только непохоже направление их движения. Звезды на Марсе очень яркие (если, конечно, нет пылевой бури). Они не мерцают. Небо планеты, кроме Деймоса и быстролетающего Фобоса, украшают Венера, Юпитер, Сатурн и Земля.

Г Л А В А 5

ВЛАСТЕЛИН НЕБЕС ЮПИТЕР

Гигантский полосатый шар Юпитера остался позади аппарата (фото 34). «Вояджер-2» вошел в тень планеты. Через несколько часов только освещенный лимб обозначал контуры темного диска, который даже теперь, с расстояния 1,5 млн км, все еще составлял более 5°. В экваториальной плоскости по обе стороны планеты выступало золотистое кольцо Юпитера, почти вдвое превышающее его диаметр. Отсюда, из-за планеты, кольцо казалось довольно ярким. Раньше, до полета «Вояджеров», не было никаких указаний на его существование. Но поиск кольца Юпитера был включен в программу исследований, и Юпитер не подвел.

Вся история исследований планет-гигантов пока основана на полетах аппаратов «Пионер», «Вояджер» и «Галилей». В 1972 и 1973 гг. к Юпитеру были направлены первые аппараты США, «Пионер-10 и -11». Второй из них впоследствии был переименован в «Пионер—Сатурн». В 1973 г. «Пионер-10», а в 1974 г. «Пионер—Сатурн» сблизились с Юпитером. Благодаря гравитационному маневру в поле Юпитера «Пионер—Сатурн» поднялся над северным полушарием планеты (и над эклиптической) и направился к шестой планете — Сатурну. «Пионер-10» после сближения с Юпитером уходит из Солнечной системы, а «Пионер—Сатурн» в 1979 г. сблизился с Сатурном, после чего также перешел на трассу ухода. В конце 1995 г. впервые на орбиту спутника Юпитера был выведен аппарат «Галилей», а его зонд спустился в атмосферу планеты и провел научные измерения.

Основные результаты, приводимые ниже, получены с помощью весьма совершенных космических аппаратов, «Вояджер-1 и -2». Аппараты были запущены в США осенью 1977 г. и достигли первой цели миссии — планеты Юпитер — в 1979 г. После выполнения исследовательской программы у Юпитера и подробных исследований его спутников аппараты

совершили гравитационный маневр (с использованием поля тяготения Юпитера), что позволило направить их по несколько различающимся траекториям к Сатурну, которого они достигли в 1980 и 1981 гг. соответственно. Здесь также изучались спутники и сама планета, но программа «Вояджера-2» в последний момент была несколько сокращена из-за неполадок на борту. Далее «Вояджер-1» лег на трассу ухода из Солнечной системы, а «Вояджер-2» проделал еще один гравитационный маневр и, несмотря на некоторые возникшие технические проблемы, был направлен к седьмой планете, Урану. В ходе полета неисправности удалось если не устранить, то обойти. Встреча с Ураном состоялась в начале 1986 г. После исследования Урана и его спутников «Вояджер-2» сохранил работоспособность, чему значительно способствовало перепрограммирование его управляющих систем. Перепрограммирование было результатом большой работы специалистов уже после запуска аппарата, а также общего прогресса в прикладной математике и было выполнено с помощью радиокоманд. После сближения с Ураном снова был выполнен гравитационный маневр и «Вояджер-2» лег на трассу полета к Нептуну.

Встречей с Нептуном в 1989 г. аппарат завершил планетную часть своей миссии. Такой последовательный облет за сравнительно короткое время стал возможным лишь благодаря расположению планет-гигантов в этот период в относительно узком секторе неба. Повторение примерно такого же «парада планет» произойдет лишь через 175 лет.

Наряду с исследованием планет-гигантов не менее приоритетной задачей было изучение многочисленных спутников каждой из планет. Последняя четверть XX в. с бурным развитием космических исследований внесла много поправок и уточнений в классификацию этих небесных тел. В самостоятельную группу выделились очень многочисленные «ледяные»

спутники планет-гигантов и близкие к ним по природе планета Плутон и его спутник Харон. Название «ледяные спутники» не вполне правильно относить ко всем этим телам. Например, на спутнике Юпитера Ио водяной лед практически отсутствует, а в составе многих других спутников имеются заметные количества силикатов. Тем не менее образное название «ледяные тела» постепенно привилось и хорошо характеризует внешние слои и даже всю кору этих спутников.

В Солнечной системе ныне известно 60 естественных спутников. Четыре крупнейших спутника Юпитера относятся к самым большим. Их называют галилеевыми, потому что их открыл в XVII в. Галилей в только что изобретенную им зрительную трубу. Семь спутников, включая нашу Луну, имеют диаметр больше 3000 км. Еще три — диаметр больше 1500 км. Самый крупный спутник Ганимед относится к семейству Юпитера. Его диаметр даже превышает диаметр планеты Меркурий, но благодаря ледяной природе масса Ганимеда в 2,2 раза меньше. Галилеевым спутникам в книге уделено много внимания.

Юпитер возглавляет семейство планет-гигантов, включающее половину планет всей Солнечной системы: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. О девятой планете, Плутоне, иногда говорят, что его справедливее отнести к планетам группы Земли. Но, как уже говорилось, по своей природе Плутон ближе всего к крупным спутникам гигантов. Поэтому, рассматривая планеты-гиганты вместе со спутниками, можно утверждать, что к гигантам можно отнести все внешние планеты, начиная с Юпитера.

Юпитер устроен совсем иначе, чем планеты земной группы. Вообще вся группа характеризуется низкой средней плотностью, от $0,70 \text{ г/см}^3$ у Сатурна до $1,64 \text{ г/см}^3$ у Нептуна. Это значительно меньше средней плотности Земли ($5,52 \text{ г/см}^3$) и других планет земной группы. Тем не менее размеры гигантов так велики, что на их долю приходится 99,5% всей массы планетной системы, или 446 масс Земли. Наиболее велика масса Юпитера: 318 масс Земли или $1/1047$ массы Солнца. Практически вся кинетическая энергия вращения планет и весь вращательный момент Солнечной системы приходится на планеты-гиганты.

Низкая средняя плотность гигантов указывает на малую молекулярную массу основных составляющих, которыми могут быть только легкие газы, прежде всего водород и гелий. Именно таковы основные составляющие атмосферы Юпитера и Сатурна. Недра Урана и Неп-

туна наряду с водородом и гелием значительно обогащены более тяжелыми элементами.

Планеты-гиганты находятся в десятки раз дальше от Солнца, чем Земля, и на единицу площади получают ничтожное количество солнечной энергии (табл. 2). Например, Сатурн на весь свой огромный диск получает в 2,7 раз меньше энергии, чем маленькая Земля (с учетом отражательных свойств обеих планет). А плотность солнечного света на расстоянии орбиты Юпитера в 27 раз меньше, чем на Земле.

Т а б л и ц а 2 Потоки энергии от Солнца, получаемой планетами-гигантами

Планета	Мощность солнечной радиации, поглощаемой планетой, МВт	Среднее расстояние от Солнца, а.е.
Земля	$1090 \cdot 10^8$	1
Юпитер	$2400 \cdot 10^8$	5,2
Сатурн	$430 \cdot 10^8$	9,54
Уран	$8 \cdot 10^8$	19,2
Нептун	$5,4 \cdot 10^8$	30,1
Плутон*	$0,04 \cdot 10^8$	39,4

*Приняты альбедо 0,2 и радиус планеты 1400 км

Из этих чисел следует, что энергия, получаемая Ураном и Нептуном, составляет всего 0,5—0,8% по сравнению с Землей. Только Юпитер поглощает больше солнечной энергии, чем Земля. Это выделяет его по сравнению с другими планетами-гигантами. Но такие характеристики Юпитера как состав, строение, низкая средняя плотность и быстрое вращение типичны и для других гигантов. Благодаря быстрому вращению Юпитер и Сатурн сильно сплюснены центробежными силами. Еще одна особенность Юпитера — очень малое наклонение экватора к орбите, всего 3° . Таким малым наклонением, кроме Юпитера, обладают только Венера и Меркурий. У всех остальных планет наклонения лежат в пределах $23\text{—}29^\circ$, а у Урана оно составляет 98° .

Большой объем новой информации о Юпитере, Сатурне, Уране и Нептуне дополняется в последние годы интересными результатами, полученными с помощью новой наземной астрономической техники.

Полосатый гигант

Юпитер — удобный объект астрономических наблюдений несмотря на большую удаленность от Солнца, 778 млн км. Это в 5,2 раза дальше, чем от Солнца удалена Земля.

На далеком Солнце мы можем различать детали, в 4 раза более мелкие, чем на Юпитере. 43 мин уходит на то, чтобы свет Солнца достиг планеты. Эксцентриситет орбиты составляет 0,048, что втрое больше, чем у Земли, но вдвое меньше, чем у Марса. Движение Юпитера по орбите довольно медленное, 13 км/с. Один оборот вокруг Солнца Юпитер завершает за 11,86 земного года. Противостояния повторяются каждые 399 сут. Наклон орбиты Юпитера к плоскости эклиптики мал, около 1°. Малый наклон плоскости экватора планеты к плоскости орбиты приводит практически к полному отсутствию смены времен года.

Размеры Юпитера очень велики: он в 11,2 раза больше Земли по диаметру, в 1320 раз — по объему и в 318 раз — по массе. Средняя плотность 1,33 г/см³ лишь немногим больше плотности воды и в 4 раза меньше средней плотности Земли. Сила тяжести на экваторе планеты в 2,36 раза больше, чем у Земли. У полюсов она больше на 16%. Привычные для нас значения первой и второй космических скоростей (7,35 и 10,40 км/с для спутника Земли на высоте 1 тыс. км) на Юпитере благодаря огромной его массе возрастают до 41,9 и 52,2 км/с соответственно. Период обращения такого спутника на круговой орбите составит всего 3 ч несмотря на очень большую удаленность от центра планеты (72 400 км). Для Земли этот период составил бы 54 ч.

Эти особенности, вытекающие из огромной массы планеты, делают чрезвычайно сложной технической задачей создание спускаемого аппарата для Юпитера (из-за чудовищных динамических перегрузок). Тем не менее такой аппарат, названный «Галилей», стартовал с Земли в 1989 г. в США и достиг Юпитера в 1995 г.

Юпитер заметно сплюснут: его полярный диаметр на 7% меньше экваториального. Это вызвано центробежными силами: при огромном экваториальном радиусе (71 400 км) Юпитер совершает один оборот вокруг своей оси всего за 9 ч 55,5 мин. Каждая точка экватора движется со скоростью 45 тыс. км/ч. Еще в XVII в. стало известно, что вращение Юпитера отличается от вращения твердого тела: если на 23° с.ш. сутки составляют 9 ч 49 мин, то всего на 5° южнее, на 18° с.ш., их длительность достигает 9 ч 56 мин. Это крайние значения; в так называемой системе II, применяемой почти для всех деталей вне пояса $\pm 10^\circ$ широты, принято значение 9 ч 55 мин 29,7 с. Это период вращения глубоких плотных слоев планеты.

Вся видимая поверхность Юпитера и детали, по которым определены периоды вращения, — это довольно плотные облака. Они образуют многочисленные полосы желто-коричневых, белых, красных и голубоватых оттенков. Полосы, охватывающие планету, как параллели, образуют системы темных поясов и светлых зон, сравнительно симметрично расположенных к северу и к югу от экватора. Вид Юпитера из космоса, с расстояния 28 млн км, приведен на фото 33. Там же в сравнимом масштабе показана Земля.

Хотя темные пояса и светлые зоны — постоянные образования на Юпитере, вид их довольно изменчив. Изменяется также общий оттенок Юпитера. Полосатая структура облачного покрова охватывает экваториальную часть планеты и доходит до широт $\pm 40^\circ$. Севернее и южнее облака образуют поле с коричневыми и голубоватыми пятнами диаметром до 1 тыс. км.

На фото 33 слева внизу можно видеть и самую известную деталь Юпитера — Большое Красное Пятно (БКП). Это овальное образование изменяющихся размеров, расположенное в южной тропической зоне. Его размеры сейчас около 25 тыс. км в долготном направлении. В 1878 г. оно было почти в 2 раза больше. БКП привлекает внимание яркой окраской. Впрочем, не всегда. Впервые БКП как яркая деталь описано в 1878 г. Но оказалось, что наблюдатели рисовали его в своих журналах еще 300 лет назад. Периоды, когда пятно становилось особенно заметным, отмечались в 1878—1882, 1893—1894, 1903—1907, 1911, 1914, 1919—1920 и в другие годы. Поиски какой-то периодичности не принесли результатов. Между периодами видимости БКП бледнеет и становится малозаметным. В красных лучах БКП вообще мало отличается от фона.

Изучению пятна посвятили свои работы многие астрономы. Особый интерес вызывает движение БКП. Почему-то период его вращения несколько больше периода светлой Южной тропической зоны, на которой оно находится, поэтому в своем движении пятно несколько отстает от нее, запаздывая на один полный оборот примерно в 30 лет. Иногда там появляются другие детали, которые постепенно догоняют БКП. Такое событие происходило в 1902 г. Астрономы с нетерпением ждали, когда темная масса, названная Южным тропическим возмущением, достигнет БКП. Но ничего не случилось: вид пятна не изменился, хотя в движении его как будто произошли небольшие отклонения. Через несколько недель передняя часть возмущения появилась с другой стороны

пятна. Похожее явление наблюдалось и с «Вояджером».

Было высказано множество догадок о том, что такое БКП. Предположения были самые различные. В наши дни допустимые пределы возможного и невозможного на Юпитере значительно сузились. Стало ясно, что главные составляющие атмосферы планеты — это водород и гелий. Измерения показали, что температура внешних слоев атмосферы (облачного слоя) очень низка. Поэтому в одной из гипотез предполагалось, что БКП — гигантский остров из гелиевого льда, который плавает в плотной холодной атмосфере, то погружаясь в нее (когда БКП видно плохо), то снова всплывая. Однако, по расчетам, такая льдина не смогла бы сохранить свое положение на постоянной широте. Да и температура там намного выше тех значений, при которых можно было бы сказать, что это «гелиевый лед», которого, кажется, нет в природе.

Другие гипотезы связывали БКП с поверхностью планеты. Например, это постоянно извергающийся вулкан. Было показано также, что если на поверхности имеется какой-то большой кратер (скажем, метеоритный), ветры должны создавать над ним в атмосфере так называемую конвективную колонну, которая извне представляется пятном. Но и в этой гипотезе много изъянов. Как мы увидим дальше, у Юпитера вообще нет поверхности в земном смысле. Кроме того, чтобы такая конвективная колонна прошла всю атмосферу, толща последней должна быть не очень большой. А по нынешним воззрениям, она составляет никак не менее 1000 км. К тому же БКП постоянно дрейфует на несколько градусов то в одну, то в другую сторону. Не удается подобрать такую равномерно вращающуюся систему координат, в которой пятно было бы неподвижным. Эти шатания пятна вообще указывают, что с поверхностью оно никак не связано.

Плодотворной оказалась идея о том, что БКП — это долгоживущий свободный вихрь в атмосфере Юпитера. Приложение принципов теории подобия к планетным атмосферам дает удивительные результаты. Скорость изменения погоды — так можно назвать один из параметров этой теории. Расчеты показывают, что на Марсе, например, погода может измениться за несколько часов, на Земле — за несколько суток, а на Юпитере ее изменения требуют сотен и тысяч лет. Тогда такой вихрь в атмосфере с верхушкой в виде Красного Пятна может прожить еще немало времени. Согласно наблюдениям, движение масс по пятну действительно носит характер вихря.

В последнее время появилось большое число гипотез в развитие идеи вихря. Образования, подобные БКП, связывают с существованием устойчивой одиночной волны в атмосфере. Такая волна называется солитоном. Ряд авторов считает, что БКП может даже быть постоянной деталью на облачной поверхности Юпитера.

Отвлечемся немного от Большого Красного Пятна и расскажем, как выполнялись исследования, которые так продвинули наши знания о Юпитере и Сатурне.

Два первых разведывательных аппарата, «Пионер-10» и «Пионер—Сатурн», должны были сообщить основные данные о радиационной обстановке у Юпитера и выполнить исследовательскую программу, в том числе передать первые изображения, полученные с близких расстояний. Несмотря на довольно примитивную технику получения изображений, некоторые из них оказались сравнимыми со снимками гораздо более совершенных «Вояджеров».

В процессе сближения аппарат «Пионер—Сатурн», как уже говорилось, выполнил гравитационный маневр, что позволило направить его к шестой планете Солнечной системы — Сатурну. Полет продолжался, и через 5 лет, в 1979 г., аппарат достиг Сатурна.

Суть гравитационного маневра, о котором мы уже несколько раз упоминали, заключается в использовании поля тяготения планеты для значительного, до 180°, изменения направления движения аппарата без потери его скорости. Это позволяет направить аппарат по таким траекториям, которые без гравитационного маневра вообще недостижимы. Недостижимо, например, близкое Солнце. Чтобы аппарат долетел до него, достаточно было бы погасить скорость, которую он несет как часть Земли, т.е. 29,8 км/с. Тогда остановившийся аппарат просто станет падать прямо на Солнце. Но пока ракеты могут сообщить аппарату относительную скорость не более 18 км/с. Поэтому одним из самых популярных способов достижения Солнца остается полет к нему через Юпитер, гравитационное поле которого позволяет, если как следует выбрать траекторию, повернуть аппарат так, чтобы он устремился к Солнцу. Такой же прием использовался при полете аппаратов «ВЕГА» к комете Галлея через окрестности Венеры.

Критическим в гравитационном маневре оказывается расстояние до планеты, в сфере действия которой выполняется маневр, причем соответствующим выбором трассы сближения можно не только изменить направление, но и совершенно «бесплатно» значительно увеличить скорость аппарата. В некоторых случаях в



Рис. 5.1. Схема полета аппарата «Галилей» с множеством гравитационных маневров

перицентре облетной гиперболы аппарату, с помощью его двигательной установки, сообщают небольшой реактивный импульс. Выигрыш от маневра по сравнению с «прямым» полетом к планетам-гигантам получается настолько большим, что полезную нагрузку аппарата можно увеличить вдвое!

Время достижения цели при гравитационном маневре у массивной планеты (Юпитера) сокращается очень значительно. Разработка принципов маневра показала, что можно использовать и менее массивные тела (Землю, Венеру). Только масса в каком-то смысле разменивается на время полета, что заставляет исследователей ждать 2—3 лишних года. Однако стремление сократить расходы на дорогостоящие космические программы заставляет ученых смириться с такой потерей, времени. Впрочем, если как следует выбрать трассу полета, то подобный проект может стать многоцелевым.

В самом конце 1995 г. Юпитера достиг новый аппарат, «Галилей», трасса полета которого была выбрана как цепь гравитационных маневров в полях тяготения Земли и Венеры. Это позволило аппарату за 6 лет дважды посетить пояс астероидов и сблизиться с довольно крупными Гаспрой и Идой, да еще дважды вернуться к Земле.

Схема полета «Галилея» показана на рис. 5.1. После запуска осенью 1989 г. аппарат был направлен к Венере, с которой сблизился в феврале 1990 г., а затем в декабре 1990 г. вернулся к Земле. Снова был выполнен гравитационный маневр, и аппарат ушел к внутренней части пояса астероидов, где в октябре 1991 г. провел съемку малой планеты Гаспра. Чтобы достичь Юпитера, в декабре 1992 г. «Галилей» снова вернулся к Земле и, наконец, лег на курс полета к Юпитеру. Во внешней части пояса астероидов в августе 1993 г. аппарат исследовал малую планету Ида (которая преподнесла сюрприз и о которой читатель прочтет в гл. 9). Полет «Галилея» — пока самая сложная цепь гравитационных маневров. Юпитера, как уже говорилось, он достиг в декабре 1995 г. (выполнение планетной программы миссии «Галилей» было осложнено техническими проблемами на борту аппарата, из-за чего передача информации была возможна лишь в очень медленном режиме).

Есть еще более смелые проекты: многократное использование гравитационных маневров позволяет так разогнать космический аппарат, что можно подумать и о полете к звездам, причем проект не потребует немислимых затрат. Что же касается многих лет, необходимых на такой разгон, то по сравнению с длитель-

ностью самого полета это пренебрежимо малая величина.

Но вернемся к исключительно успешной миссии аппаратов «Вояджер». С помощью гравитационных маневров «Вояджер-1 и -2» провели исследования планет-гигантов и их спутников: в 1979 г. Юпитера, в 1980—1981 г. Сатурна, в 1986 г. Урана и в 1989 г. Нептуна. Подавляющее большинство фотографий, приводимых в последующих главах, получены с помощью аппаратов «Вояджер».

Состав, строение и динамика атмосферы

Юпитер состоит почти целиком из водорода и гелия: 89 и 11% по объему соответственно. Таков же газовый состав его атмосферы. Отношение 89:11 по объему для водородно-гелиевой смеси — это то же, что 80:20 по массе, так как масса молекулы водорода 2, а атома гелия 4. (По измерениям с зонда «Галилей» гелия оказалось немного больше, 24%.)

Водородно-гелиевая атмосфера Юпитера обладает огромной протяженностью. Облачный покров расположен на высоте не менее 1000 км над условной «поверхностью», которая представляет собой постепенный переход от газообразного к жидкому состоянию. Облачный слой и, по крайней мере, верхняя часть атмосферы охвачены интенсивными движениями, устойчивость которых и приводит к характерной картине темных поясов и светлых зон Юпитера.

В атмосфере Юпитера практически нет меридиональных течений. Зоны и пояса — это области восходящих и нисходящих потоков в атмосфере, которые в долготном направлении имеют глобальную протяженность. Эти атмосферные течения, параллельные экватору, имеют некоторое сходство с пассатами Земли. Движущие силы в этой «машине» — потоки тепла из глубины планеты, отчасти энергия, получаемая от Солнца, а также быстрое вращение планеты. Видимые поверхности зон и поясов в таком случае должны находиться на разных высотах. Это было убедительно подтверждено радиометрическими (тепловыми) измерениями на аппаратах «Пионер»: зоны оказались несколько холоднее поясов. Разница в температурах показывает, что видимая поверхность зон расположена примерно на 20 км выше и на несколько градусов холоднее поясов. И, наоборот, голубые пятна оказались источниками тепловой радиации, восходящей из глубоких слоев атмосферы. Интересно, что не обнаружено существенной разности температур

между полярными и экваториальными областями планеты. Косвенно это позволяет сделать такой вывод: внутреннее тепло планеты играет более важную роль в динамике ее атмосферы, чем энергия, получаемая от Солнца. Средняя температура на уровне видимых облаков близка к 130 К.

Строение поясов и зон поясняет рис. 5.2. Поднимающиеся из глубин атмосферы нагретые массы газов в зонах под действием значительных на Юпитере кориолисовых сил вытягиваются в долготном направлении, причем противоположные края зон движутся навстречу друг другу, вдоль параллелей. На границах поясов (районы нисходящих потоков) и зон видна сильная турбулентность; скорости движения здесь достигают наибольших значений, до 100 м/с, а в экваториальном районе даже 150 м/с. Севернее экватора потоки в зонах, направленные к северу, отклоняются кориолисовыми силами к востоку, а направленные к югу — к западу. В южном полушарии направление отклонений обратное. Именно такую структуру движений на Земле образуют пассаты. Как показано на рис. 5.2, «крыша» облаков в поясах и зонах находится на разных высотах. Различия в их окраске определяются температурой и давлением фазовых переходов малых газообразных составляющих. Светлые зоны — это восходящие колонны газа с повышенным содержанием аммиака, пояса — обедненные аммиаком нисходящие потоки. Яркая окраска поясов связана, вероятно, с аммонийными полисульфидами и некоторыми другими

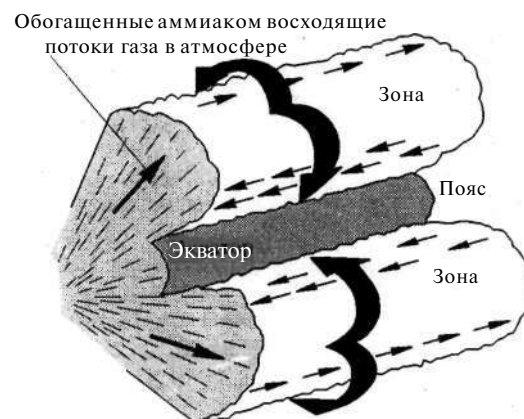


Рис. 5.2. Структура поясов и зон Юпитера и, возможно, Сатурна. Зоны представляют собой облачную «крышу» восходящих более теплых потоков, пояса — холодные районы нисходящих потоков. Благодаря действию кориолисовых сил потоки вытягиваются в долготном направлении

окрашивающими компонентами, например фосфином. Примером такой окраски может служить снимок южного полушария планеты, сделанный «Вояджером-1» в 1979 г. (фото 35). На фоне Большого Красного Пятна виден спутник Ио, правее — спутник Европа. На поясах и зонах, расположенных южнее (ниже) БКП, видно несколько голубых пятен.

Глобальная структура поясов и зон в атмосфере Юпитера давно была классифицирована в наземных наблюдениях. Полосы называются экваториальными, северными и южными тропическими, умеренными и полярными поясами и зонами. Например, БКП относится к Южной тропической зоне. Эту зону, а также Южный экваториальный пояс, Экваториальную зону и Северный экваториальный пояс можно видеть на фрагменте подробной цилиндрической проекции видимой поверхности облачного слоя Юпитера (фото 36), составленной по данным «Вояджера-1».

Экспериментальные данные свидетельствуют, что динамика облачного слоя Юпитера — лишь внешнее проявление могучих сил, действующих в подоблачной атмосфере планеты, своего рода «верхушка айсберга». Иногда удавалось наблюдать, как в облаках возникает мощное вихревое образование, местный ураган, диаметром в 1000 км и более. Такие образования живут довольно долго, по несколько лет, а наиболее крупные из них — даже несколько сотен лет. Подобные вихри образуются, например, в результате движения больших масс поднимающегося нагретого газа в атмосфере.

На рис. 5.3 приведен мозаичный снимок Юпитера, сделанный «Вояджером-1» в фиолетовых лучах. Такие снимки показывают наибольшее количество контрастных деталей. Наряду с Большим Красным Пятном (в нижней половине снимка) на рисунке видно большое число вихревых образований меньших размеров как в северном, так и в южном полушариях. Во всех случаях пятна имеют темную окантовку. Самые маленькие пятна живут меньше 24 ч. Образующийся вихрь выносит на поверхность облаков нагретые массы газа с парами малых компонентов, чем замыкается цепь их кругооборота в атмосфере Юпитера. Образующиеся кристаллы аммиачного снега, растворов и соединений аммиака в виде снега и капель, обычного водяного снега и льда постепенно опускаются в атмосфере и достигают такого уровня температуры, где испаряются. В газовой фазе вещество снова возвращается в облачный слой. (Ни о каких осадках на «поверхности» Юпитера, конечно, не может быть и речи: и атмосфера очень глубока, и поверхности не существует.) Концентрация и состав малых

компонентов на уплощенной шляпке вихря будут несколько отличаться от регулярного облачного слоя и выделяться цветом, а благодаря особенностям циркуляции атмосферы подерживается его вращение.

Многочисленные голубые пятна, наблюдавшиеся с «Вояджера-1», имели антициклоническое движение (против хода часовой стрелки). Как правило, в центре такого урагана давление оказывалось более высоким, чем в окружающем районе, а сами ураганы были с запада окантованы возмущениями с низким давлением. В земных ураганах такого типа часто наблюдаются молнии. Телевизионные снимки «Вояджеров» показали, что на ночной стороне Юпитера наблюдаются световые вспышки колоссальной протяженности — до тысячи километров и более. После некоторых сомнений ученые пришли к выводу, что это действительно молнии, энергия в которых намного больше, чем в земных. Выяснилось, однако, что юпитерианские молнии малочисленнее земных. Интересно, что молнии были обнаружены через 3 месяца после открытия гроз на Венере. Это совпадение означает, что и исследователи, и их техника были готовы к открытиям такого рода.

Вихревые образования вроде пятен голубого и коричневого оттенков наблюдались не только в устойчивых поясах и зонах, но и в полярных районах Юпитера. Здесь характерный вид облачного слоя представляет светло-коричневое поле с темными и светлыми коричневыми и голубоватыми пятнами (фото 37). На этом фрагменте изображения северного полушария видны образования в виде «кружевных воротников» и «плюмажей» в области тех широт, где зональная циркуляция становится неустойчивой. Районы вблизи полюса Юпитера, показанные на этом снимке, увидеть с Земли невозможно. К тому же снимки с космических аппаратов позволяют увидеть подробности, различимые только с близких расстояний, как, например, детали на рис. 5.3.

Кажущийся хаос пятен все же подчиняется общей закономерности циркуляции, причем определяющую роль играют движения в глубине атмосферы. Для объяснения наблюдаемой циркуляции привлекаются сложные представления теории.

Несомненная упорядоченность движений атмосфер планет-гигантов задала трудные задачи теоретикам. Они попытались, используя известные законы движений жидкости и газа, создать такие теоретические модели, в которых объяснялись бы зонно-поясная структура атмосферы, природа пятен и время их жизни. Принимая ряд допущений, ученые все-таки

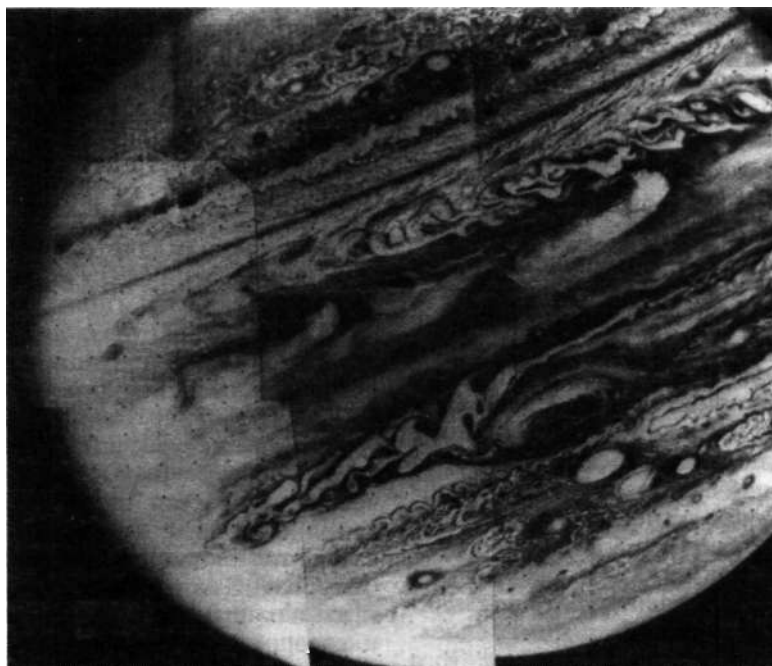


Рис. 5.3. Мозаичная картина Юпитера, наблюдаемая в фиолетовых лучах. Снимок NASA

сумели в некоторых моделях получить явления, напоминающие то, что видно на Юпитере (и Сатурне). В одной из наиболее разработанных моделей структура планеты представляет собой систему из вложенных друг в друга цилиндров огромных размеров, осью которых является полярная ось. Цилиндры проходят сквозь всю планету и выходят на поверхность, скажем, у 40° с.ш. и у 40° ю.ш. То, что мы видим, — срезы этих цилиндров, вращающихся со слегка различными скоростями. Если считать от экватора, то такие цилиндры проникают вглубь на половину радиуса планеты. Пятна или овалы также представляют собой сквозные колонны, подобные иглам в игольчатом подшипнике, разделяющим вращающиеся слои. Кстати, некоторые авторы считают, что симметрично БКП на той же широте в северном полушарии иногда видно такое же по размерам, но слабее выраженное образование.

Теперь, когда читатель уже знаком с основными «действующими лицами» поверхности облачного слоя Юпитера, вернемся к Большому Красному Пятну. Наблюдения с космических аппаратов подтвердили, что БКП — это гигантский долгоживущий вихрь в атмосфере планеты. Определен период вращения этого образования: немного более 6 сут. Сложив многочисленные снимки Юпитера, сделанные «Вояджерами» за много дней, специалисты смонтировали их в кадры кинофильма,

где все движения ускорены в полмиллиона раз. Перед зрителями возникла шевелящаяся, ползущая масса поясов, зон и плюмажей, подобных тем, что можно видеть на фото 38. «Кружева» и плюмажи, окантовки БКП и других пятен обтекают эти вихри, срываются с них и уходят к западу. Светлые, расширяющиеся к западу полосы вдоль экваториального пояса напоминают хвосты дыма, относимые ветром от источника. Изображение в фильме было построено так, что положение БКП на диске сохранялось в том же месте, что и на рис. 5.3. И вот отчетливо видно, как темный экваториальный пояс в своем относительном движении к западу обгоняет южный умеренный пояс, а зажатое между ними Большое Красное Пятно вращается против хода часовой стрелки, как камень между мельничными жерновами. Сам сплюснутый вихрь БКП, его изорванные края и слоистая структура центральной части напоминают спущенное автомобильное колесо. Зрелище настолько впечатляет, что зрителю определенно не хватает шума, какого-нибудь рева, грохота, шипения...

Хотя БКП астрономы наблюдают с Земли уже 300 лет, детали его, хорошо видимые на фото 38, с Земли, конечно, неразличимы. Уже говорилось, что время жизни БКП может достигать многих тысячелетий. Если на периферии БКП движение облаков имеет хаотический, турбулентный характер, то в центре движение

спокойное. С периферией БКП связаны характерные голубые пятна; некоторые из них возникли сравнительно недавно, в 1939—1940 гг. Есть предположение, что это дочерние вихри, отделившиеся от Большого Пятна. Сейчас БКП имеет долготную протяженность $25 \cdot 10^3$ км, или в 2 раза больше Земли. БКП особенно хорошо видно в синих и фиолетовых лучах, хотя и в этих лучах видимость его подтверждена сильным изменением.

По данным «Вояджеров», дочерние голубые пятна, возможно, наблюдаются сквозь разрывы облачного слоя. Однако часто разрывы бывают не связаны с какими-либо пятнами. Сквозь них видны более низкие облачные слои. Пример такого образования показан на фото 39. Серия подобных разрывов наблюдалась вдоль границы северного экваториального пояса Юпитера. О том, что это именно разрывы, свидетельствует повышенный поток тепла от таких образований. Разрывы существуют довольно долго, по нескольку лет. Темный оттенок нижних слоев, видимых сквозь разрывы, по видимому, того же происхождения, что и окраска поясов Юпитера. Наблюдение таких объектов — единственный способ увидеть нижние слои. Но для получения информации о более глубоких слоях атмосферы приходится использовать их тепловое радиоизлучение. С глубиной температура быстро возрастает. Уже на уровне 2 бар она составляет примерно 210 К. А радиоизлучение, приходящее с больших глубин, свидетельствует о еще более высокой температуре. По расчетам, на глубине 300 км атмосфера Юпитера так же горяча, как и атмосфера Венеры у ее поверхности (около 730 К).

Измерение тепловых потоков, исходящих от Юпитера, показало, что практически нет различий между потоками, излучаемыми полярными и экваториальными районами, его дневной и ночной сторонами. Значительную роль в этом играет подвод тепла благодаря адвекции — переносу тепла в горизонтальных движениях атмосферы. На фоне упорядоченной структуры поясов и зон, вихрей и плюмажей наблюдаются быстрые течения газа — ветры, скорость которых достигает 120 м/с. Такое течение в виде яркой оранжевой полосы можно видеть на фото 40 в Северной умеренной зоне. Течение направлено к востоку. Если учесть большую теплоемкость водорода, постоянство температуры в разных районах планеты станет неудивительным.

Кроме мощной циркуляции, которая доставляет тепло к облачному слою, в этом несомненно проявляется важная роль теплового потока, исходящего из недр планеты. Изме-

рения показали, что собственные источники энергии Юпитера дают не меньший поток тепла, чем планета получает от Солнца. Каково же происхождение этой энергии?

Во многих научных работах можно прочесть, что энергия освобождается в результате очень медленного сжатия планет-гигантов, причем расчеты показывают, что для этого достаточно сжатия планеты на миллиметры в год. Однако сведения о строении Юпитера не подтверждают эту гипотезу.

Анализ характера движения космических аппаратов в гравитационном поле планеты позволяет судить о строении недр планеты, о ее фигуре и состоянии вещества. Наконец, теоретические расчеты позволяют построить модель структуры ядер и оболочек, но это весьма непростая задача. Самые ценные сведения получены именно из анализа движения аппаратов в гравитационных полях Юпитера и Сатурна. Так удалось установить, что это газообразные планеты (состоящие из смеси гелия и водорода) и что твердой поверхности они не имеют. Фигура Юпитера математически идеальна, какой может быть только жидкая планета. Значительная часть его ядра находится в жидком состоянии. А жидкое ядро практически несжимаемо. Источником теплового потока может быть выделившееся еще при формировании планеты (4,5 млрд лет назад) тепло, запасенное в ядре и оболочках Юпитера. Важным источником тепла в настоящее время может быть медленное погружение к центру планеты более тяжелого, чем водород, гелия. Безразмерный момент инерции, найденный расчетным путем, имеет очень низкое значение: 0,200. Это говорит о самой высокой в Солнечной системе концентрации массы в центре планеты. Впрочем, прежде чем перейти к недрам Юпитера, приведем данные о его яркостной температуре. В конечном счете именно она подтверждает (или отвергает) гипотезы о механизмах тепловыделения.

Немного подробностей об облачном слое и природе цветного наряда планеты

Измерение яркостной температуры Юпитера — очень непростое дело. Результаты зависят от длин волн, в которых производятся измерения. В одних спектральных интервалах атмосфера более прозрачна, и в этих «окнах» удастся наблюдать излучение относительно глубоких (и более теплых) слоев тропосферы. В других — поглощение очень велико и тепловое излучение приходит от более высоких (и холодных) слоев стратосферы. В среднем на том уровне, где расположена видимая поверх-

ность облаков, температура составляет 150 К, а давление немного ниже, чем у поверхности Земли, — 500 мбар (рис. 5.4). По данным аппаратов «Пионер» на уровне 100 мбар, где расположена тропопауза (это на 50 км выше), температура падает до 100–120 К — это минимальная температура на Юпитере. Выше температура снова растет и на высоте около 90 км над облаками достигает 140–160 К. Значения яркостной температуры около 130 К были неоднократно получены в наземных радиометрических измерениях на длинах волн 8–13 мкм. Выше стратопаузы, до уровня давлений 10^{-6} мбар, температура остается почти постоянной, около 180 К. Наконец, еще выше — в термосфере и экзосфере — снова наблюдается возрастание температуры за счет перехвата коротковолнового излучения Солнца. Благодаря этому средняя протонная и электронная температура на высотах 600–3000 км составляет 850–1000 К. Здесь находится обширная ионосфера планеты, которая в высоту простирается на 3 тыс. км. Наибольшая концентрация электронов, примерно 10^5 в 1 см^3 , находится на высоте 1 тыс. км.

Изменяется ли яркостная температура Юпитера в течение суток? По-видимому, нет. Но с Земли мы видим только дневную сторону планеты: наибольший угол фазы составляет 12° (угол Солнце—Юпитер—Земля). Поэтому о ночной температуре мы можем судить лишь по измерениям с космических аппаратов. Впрочем, есть один очень странный результат, полученный с Земли. Произошло это в 1962 г., когда ученые США с помощью пятиметрового телескопа измеряли распределение яркостной температуры по диску Юпитера. В это время по нему проходила тень самого большого из его спутников — Ганимеда. Ученым удалось измерить температуру в тени. Она оказалась выше на 50 градусов, что означает, что тепловое излучение этого района во время солнечного затмения повышается в несколько раз. Измерения велись тщательно, и авторы не сомневались в реальности результата. Единственное сколько-нибудь подходящее объяснение этому явлению заключается в том, что в тени почему-то уменьшается плотность облаков, и мы видим тепловое излучение глубоких слоев. Но вот что странно: подобные же измерения, проведенные в другое время, не показали такого повышения температуры. Все это может быть связано с большой изменчивостью процессов, наблюдаемых на Юпитере (как, впрочем, и с возможными погрешностями измерений).

Состав облаков Юпитера, в отличие от облаков Земли, состоящих только из воды, включает различные соединения по меньшей мере шести элементов (водорода, углерода, азота, кислорода, серы и фосфора) и определяется давлением, температурой, притоком света и движениями атмосферы. Анализируя спектрограммы, астрономы в 30-х годах нашего столетия установили, что в атмосфере Юпитера присутствуют аммиак и метан. Молекулы обоих газов содержат много водорода — NH_3 , CH_4 .

Присутствие водородосодержащих газов казалось, в общем, естественным в то время, когда был известен только состав земной атмосферы с большим количеством азота. (Если бы тогда был известен состав атмосферы Венеры, это вряд ли показалось бы таким естественным.) Пока ученые трудились над количественной оценкой содержания метана и аммиака, что заняло много лет, популяризаторы поторопились ошеломить читающую публику сообщениями о «метано-аммиачной атмосфере Юпитера». Как это ни удивительно, такое утверждение проникло даже в некоторые учебники. На самом деле аммиак, метан, водяной пар, гидросульфид аммония ($\text{NH}_3\text{H}_2\text{S}$) — малые составляющие доступной изучению части атмосферы Юпитера. Их содержание на уровне облаков: водяной пар $1,5 \cdot 10^{-3}$, метан $8,3 \cdot 10^{-3}$, гидросульфид аммония в газовой фазе $2,8 \cdot 10^{-5}$, аммиак $1,7 \cdot 10^{-4}$, причем содержание аммиака переменное и зависит от высоты. Он образует видимый облачный покров; температура его конденсации зависит от давления и составляет 130–200 К, что в среднем совпадает с тем, что наблюдается на уровне облаков. При температуре 165 К давление аммиака над кристалликами аммиачного льда составляет 1,9 мбар, и возрастает вдвое при 170 К. Для конденсации метана при тех же давлениях нужна значительно более низкая температура, 79 К. Поэтому метан в атмосфере Юпитера в твердую фазу, по-видимому, не конденсируется. В облаках наряду с кристаллами должны присутствовать капли жидкого аммиака. Цвет облаков с такой смесью — белый с легким желтоватым оттенком, характерным для зон. Однако для объяснения красно-коричневых оттенков поясов необходим какой-то другой окрашивающий агент.

Интересные результаты дал спектральный анализ применительно к другим планетам-гигантам. Оказалось, что очень сильные полосы паров аммиака, присущие Юпитеру, у Сатурна едва заметны, а Уран и Нептун не имеют их вовсе. Зато полосы метана у этих планет

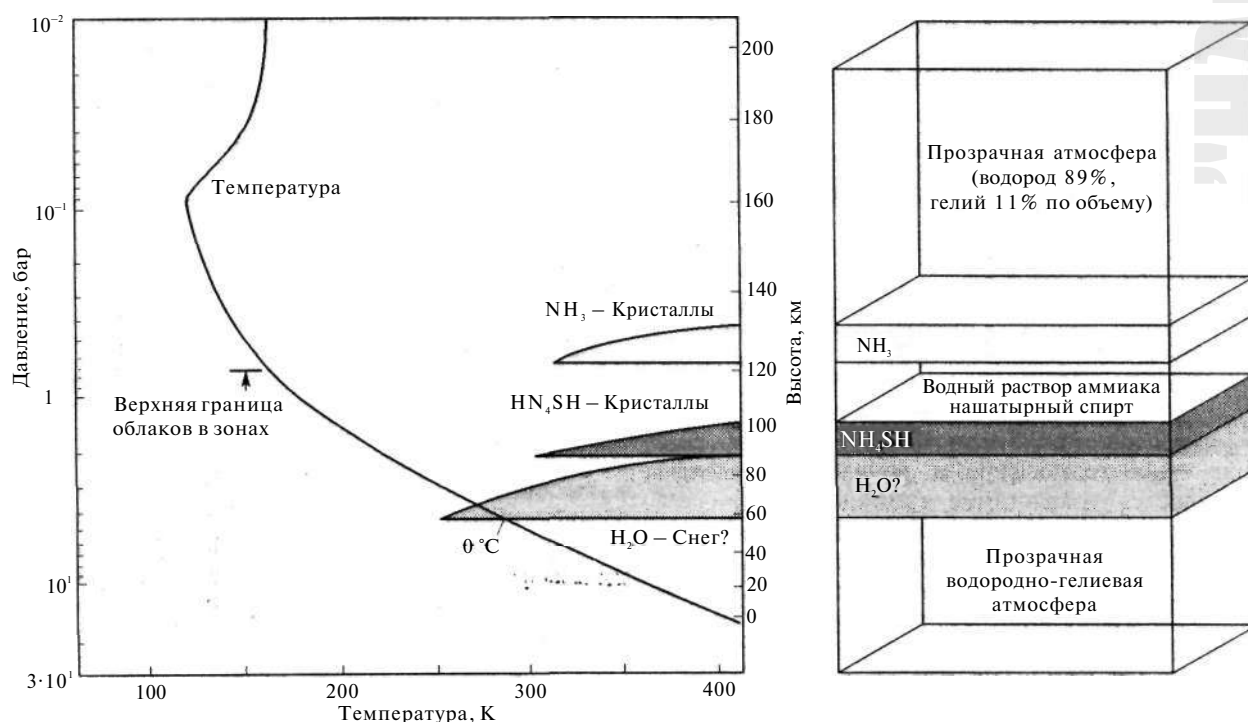


Рис. 5.4. Высотная зависимость температуры и схема строения облачного покрова Юпитера, состоящего из слоев облаков разной природы. Вероятно, такую структуру имеют и нижние слои облаков Сатурна, но, в отличие от Юпитера, над ними расположен протяженный слой дымки. Из книги Р.Фиммела и др. «Pioneer»

становятся весьма широкими и занимают значительную часть спектра в красно-голубой области. Это, несомненно, связано с низкими температурами на этих планетах (и придает им сине-зеленую окраску).

В годы, предшествовавшие полетам «Вояджер» (и «Пионеров»), с помощью летающей (на самолете) астрономической обсерватории уточнялось содержание в атмосфере Юпитера других газов. Часть из них давно предполагали найти на этой планете, другие оказались полной неожиданностью. К первым относится фосфин (PH_3 — газообразное соединение фосфора с водородом. По-видимому, именно это соединение, по крайней мере отчасти, ответственно за цветной «наряд» Юпитера: при температуре 290—600 К оно распадается с выделением красного фосфора. А температура 290 К — это совсем неглубоко (по юпитерианским масштабам) под облачным слоем: на какие-нибудь 60 км ниже его видимой поверхности. И наоборот, при низкой температуре фосфор снова соединяется с водородом. Фосфина около $6 \cdot 10^{-7}$.

Предполагается, что окраска облаков может быть связана также с водородными и аммонийными полисульфидами и серой. В списке газов, присутствующих в атмосфере Юпите-

ра, теперь значится этан (C_2H_6), ацетилен (C_2H_2), незначительное количество паров воды и два сильнейших яда: цианистый водород, или синильная кислота (HCN), и газообразное соединение германия с водородом (GeH_4). Напомним, что циан (C_2N_2), несмотря на токсичность, — обязательный ингредиент многих органических соединений. (Кстати, присутствие некоторых соединений на Юпитере еще требует подтверждений.)

Среди «сюрпризов» оказались окись углерода и углекислый газ. Присутствие этих соединений, обычных для атмосфер планет земной группы, в атмосфере Юпитера объяснить трудно, так как двуокись углерода разрушается в водородной атмосфере. Похоже, что Юпитер еще раз дает понять, что процессы, происходящие в глубине его атмосферы, крайне сложны. Все, что мы пока видим, — только поверхностные их проявления. Лучи Солнца проникают не очень глубоко под видимую поверхность облаков (по разным расчетам — от 50 до 300 км), а то, что видно, лежит в весьма тонком слое.

Содержание основных составляющих атмосферы Юпитера — водорода и гелия — долго оставалось неизвестным. Крайняя оценка по

каждому из этих газов колебалась в очень широких пределах. Делу несколько помогли наблюдения затмений звезд планетой — так называемые покрытия звезд. Благодаря приятной случайности Юпитер в своем движении покрыл в 1952 г. яркую звезду в созвездии Орла. Исходя из постепенного ослабления света звезды, была рассчитана средняя молекулярная масса атмосферы Юпитера. По ней можно было оценить соотношение между водородом и гелием. Однако по ряду причин этот способ не мог дать достаточно точных результатов. А в них нуждались не только специалисты по Юпитеру.

По современным представлениям, планеты и Солнце образовались из общего газопылевого облака. Среди планет Юпитер занимает особое положение: многие ученые считают его «несостоявшейся звездой». Его масса, как мы видели, очень велика. На нее приходится $2/3$ всего, что обращается вокруг Солнца. Но все же ее недостаточно для того минимума, который приводит к началу самоподдерживающейся термоядерной реакции, являющейся источником энергии Солнца. В процессе такой реакции водорода на Солнце становится все меньше, а гелия все больше. Атмосфера Юпитера, наоборот, должна иметь реликтовый (исходный) состав: его масса настолько велика, что убежание каких-либо газов, включая водород, невозможно. Поэтому соотношение между количествами водорода и гелия должно сохраниться таким же, как было на Солнце в пору его младенчества (конечно, при условии, что Солнце и планеты возникли из одного облака и получили водород и гелий в одинаковых соотношениях). На Солнце значительная часть водорода уже «выгорела» в термоядерных реакциях. С точки зрения космологии очень важно знать, каким было соотношение вначале. Это дает ответ на многие вопросы и, в частности, на вопрос о том, к какому поколению звезд относится Солнце.

Известно, что в течение своей жизни звезда теряет большое количество вещества с плазмой, выбрасываемой в пространство. Но это вещество не теряется бесследно: со временем из него снова сформируются газопылевые туманности, а из них снова появятся звезды. Но они будут уже несколько другими: в них будет меньше водорода и больше гелия — своеобразного шлама некогда сиявших звезд. По соотношению водород — гелий можно, таким образом, судить, сколько в среднем поколений звезд уже «переживали» эту смесь, прежде чем она досталась нашему Солнцу. Нетрудно видеть, что важно и то, насколько обогатилось гелием Солнце за время его существования, иными словами, сколько у него еще «горючего». Для

этого опять-таки нужно знать начальное соотношение водорода и гелия.

Основная причина трудностей в измерении этого соотношения была простой, но непреодолимой: непрозрачность земной атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне. Одна из основных спектральных линий атома водорода ($L\alpha$) с длиной волны 121,6 нм поглощается даже небольшой толщей газа. А уж о земной атмосфере и говорить нечего. С гелием дело обстоит еще хуже: главная линия его атома соответствует всего 58,4 нм — это в 10 раз короче длины волны желтого света.

Водорода в атмосфере Юпитера намного больше, чем гелия, — в 4 раза по массе. На основании этого измерения можно с известной осторожностью считать, что Солнце, вероятно, — звезда третьего поколения.

Среди множества малопонятных явлений в атмосфере — загадка поляризации света в полярных областях Планеты. Степень поляризации здесь несколько выше, чем в экваториальных районах. Но вот странно: поляриметры наземных обсерваторий часто показывают, что когда поляризация света вблизи северного полюса Юпитера максимальна, она снижается почти до нуля вблизи южного полюса, и наоборот. Несмотря на многолетние исследования, убедительных объяснений этому факту пока нет.

Полярные районы Юпитера очень неудобны для наблюдений с Земли из-за малых наклонов его экватора к плоскости орбиты и орбиты к плоскости эклиптики. По-видимому, полярные области планеты в будущем станут объектом особенно пристальных исследований. Именно здесь мы обнаруживаем мощные потоки тепла из глубин Юпитера: по сравнению с экватором яркостная температура полюсов ниже не более чем на 2° , хотя здесь должна царить вечная зима.

Около 30 лет назад было установлено, что из недр Юпитера идет поток тепла, в 2,5 раза превышающий приток энергии от Солнца. В дальнейшем это значение немного исправили — в 1,9 раза. Что же представляет собой источник этой гигантской энергии?

Уже говорилось, что масса Юпитера недостаточно велика для начала термоядерных реакций на планете. Но есть и другие источники энергии, хотя и не такие мощные. Один из них — планетохимическая дифференциация. Это, в частности, погружение к центру планеты тяжелых веществ и всплывание легких. Выделяющаяся при этом энергия также могла бы объяснить наблюдаемые факты. Очень похоже, что в жизни Юпитера были бурные

периоды, когда энергия из него выделялась очень интенсивно. Об этом кое-что говорят спутники Юпитера, о которых речь впереди.

На расстоянии орбиты Юпитера поток солнечной радиации в 27 раз слабее, чем на Земле. Это, кстати, заставляет ставить на космические аппараты ядерные источники энергии: солнечные батареи имели бы слишком большие размеры.

В 1973—1974 гг. с помощью «Пионеров» был обнаружен еще один, довольно экзотический источник энергии планеты. В отличие от тех, что описаны выше, он воздействует на верхние этажи атмосферы и вызывает их разогрев. Этот необычный источник энергии — потоки метеоритного вещества вблизи Юпитера. Они гораздо плотнее, чем у Земли. Энергия, которую они несут, в 170 раз превышает то, что получает на единицу площади от метеоритов наша Земля. Естественно, что сбор этой энергии планетой с поверхностью в 118 раз большей, чем Земля, очень велик. Кстати, не связаны ли эти метеоритные потоки с гипотетическим вторым поясом астероидов?

Быстрое развитие космических исследований заставляет периодически обновлять свод наиболее достоверных данных и разумных предположений, касающихся той или иной планеты, и создавать новые модели ее. Отталкиваясь от модели планеты, можно проектировать новые космические аппараты с требуемой чувствительностью бортовой аппаратуры. Воспользуемся одной из современных моделей и заглянем под верхний слой облачного покрова Юпитера (см. рис. 5.4).

Под облаками из кристаллического аммиака находятся другие слои облаков: из сернисто-кислого аммония, водного раствора аммиака, затем облака из кристаллов водяного льда, а еще ниже — из капель воды. В пользу такой модели говорит вся совокупность измерений яркостной температуры планеты на различных длинах волн. Модель соответствует также и некоторым теоретическим расчетам. Изменение характера движений в атмосфере в районе широт $\pm 40^\circ$ определяется изменением баланса между горизонтальными градиентами давления и кориолисовыми силами (силами, возникающими при движении масс по поверхности вращающегося тела).

Не исключено, что в полярных областях Юпитера атмосфера имеет большую оптическую толщину, чем в экваториальных широтах. Впрочем, и в низких широтах солнечный свет вряд ли проникает глубоко в облака. На глубине 200—300 км, вероятно, царит вечная ночь. А еще ниже атмосфера становится

безоблачной, очень плотной и горячей. На больших глубинах можно было бы отметить, что становится светло, но теперь свет идет уже снизу.

Внутреннее строение и магнитное поле

Протяженность атмосферы Юпитера по разным оценкам составляет от 1 до 6 тыс. км. Возьмем первое из этих значений — 1 тыс. км. В этом случае давление на «дне» водородно-гелиевой атмосферы будет достигать 150 тыс. бар. Здесь должна начинаться зона плавного перехода в «поверхность» Юпитера, раскаленную, по некоторым расчетам, до 2000 К.

Странная это должна быть поверхность — без резкого перехода между газообразной, жидкой и твердой фазами, что-то вроде крупнопористого океана из газа и жидкого водорода в смеси с гелием.

Что это поверхность жидкая, показывает анализ движения космических аппаратов в гравитационном поле Юпитера. Толстый слой «жидкого водорода» (схема на рис. 5.5) действительно ведет себя как жидкость, хотя правильнее это состояние назвать газожидким. Дело в том, что из-за высоких температур водород Юпитера и других гигантов находится в сверхкритическом состоянии. Водород может быть жидкостью при температурах не более 33 К. Критическая точка для него 33 К и 13 бар. Если же температура выше 33 К, водород останется газом при любых давлениях. Но здесь необходимо сделать одну оговорку.

Увеличение давления выше некоторого предельного значения (очень высокого, возможно, даже недостижимого в лабораторных условиях) приводит к разрушению электронных оболочек атомов. Вещество резко изменяет свои свойства. Так, при чудовищно высоких давлениях образуется жидкий молекулярный водород. Это происходит при давлениях около 1 млн бар (в условиях Юпитера — на глубине от 12 до 20 тыс. км, по разным оценкам). Такая необычная фаза водорода долго оставалась гипотетической, но в 1975 г. она впервые была получена экспериментально в одном из институтов АН СССР. Этот слой, вероятно, легированный гелием, образует внешнее ядро планеты. Далее происходит переход водорода в металлическое состояние с выделением теплоты фазового перехода. Это может быть одним из источников энергии в недрах планеты. Можно представить себе более сложные случаи, когда высокое давление действует на двухкомпонентную или многокомпонентную смесь (в нашем случае — смесь водорода и гелия). При

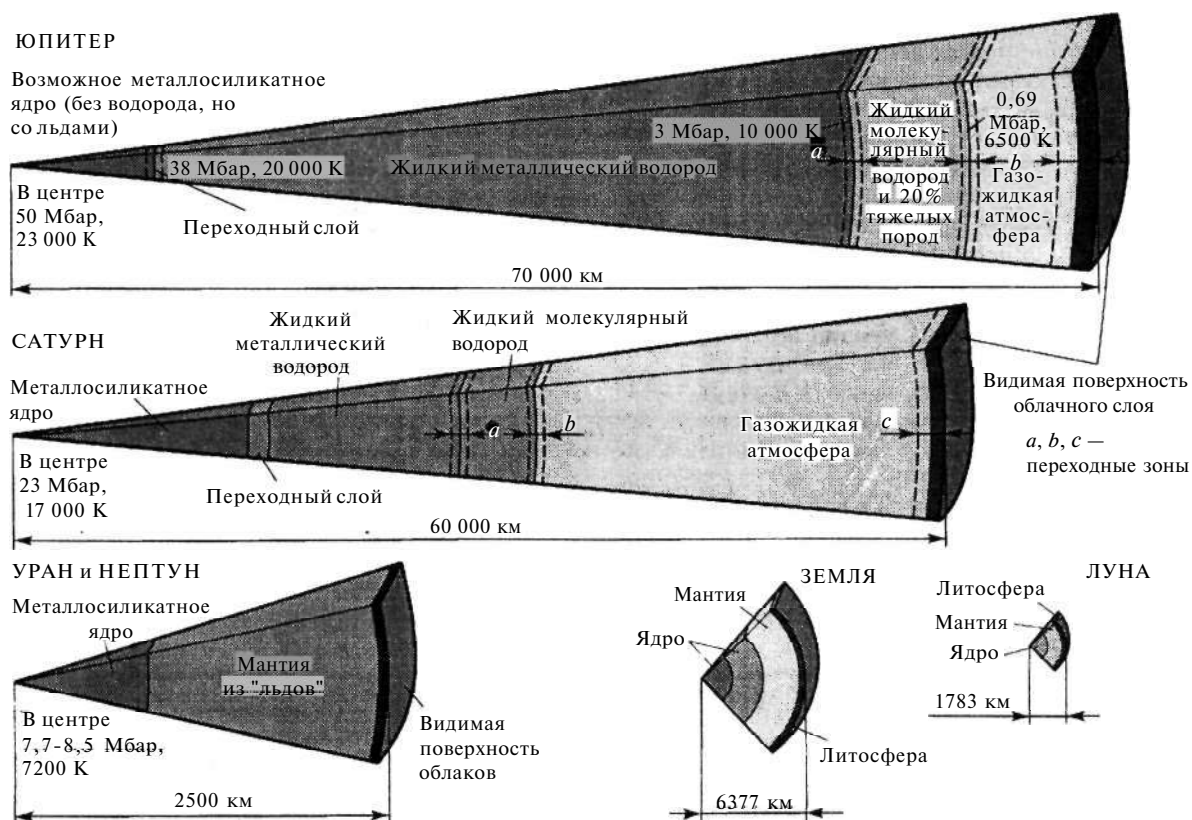


Рис. 5.5. схема внутреннего строения планет-гигантов.

металлизации одного из них могут возникнуть своеобразные растворы, например раствор гелия в металлическом водороде. Наконец, сам металлический водород тоже может быть твердым или жидким. Учет всех этих подробностей делает расчеты внутреннего строения планет-гигантов делом крайне сложным и тонким.

Схемы внутреннего строения планет-гигантов представлены на рис. 5.5 в виде объемных секторов. Структура имеет вид оболочек все возрастающей плотности по направлению к центру планеты. У Юпитера на дне уплотняющейся в глубину атмосферы, толщина которой принята 1500 км, находится слой газожидкого водорода толщиной около 7000 км. На уровне 0,88 радиуса водород переходит в жидкомолекулярное состояние с увеличением плотности с 0,56 до 0,66 г/см³. Здесь давление и температура составляют 0,69 Мбар и 6500 К. Ниже, на уровне 0,77 радиуса (3 Мбар, 10 000 К), водород переходит в жидкое металлическое состояние. Границы отделены переходными зонами *a*, *b* и *c*. Наряду с водородом и гелием в состав слоев входят небольшие количества тяжелых элементов.

На внутреннее ядро приходится примерно 5 масс Земли. Водорода в нем нет. По составу ядро металлосиликатное и, возможно, включает воду, аммиак и метан. Предполагается, что внутреннее ядро может быть окружено слоем гелия (или слоем растворов гелия). Диаметр внутреннего ядра примерно вдвое больше Земли. Температура и давление в центре планеты близка к $23 \cdot 10^3$ К, а давление около 50 Мбар. Похожее строение имеет и Сатурн, однако уровень внешней границы металлического водорода у него находится, например, у 0,49 радиуса, а граница внутреннего ядра — у 0,15 радиуса. Температура и давление в центре Сатурна, согласно расчетам, $17 \cdot 10^3$ К и 23 Мбар. Значительно ниже температура и давление в центре Урана и Нептуна: 7200 К, 7,7—8,5 Мбар. Над большим металлосиликатным ядром у них расположены мантии из смеси водяного и аммиачно-метанового льдов. (Не следует понимать слово «льды» в привычном смысле: это может быть такое же состояние льдов, как у Юпитера.) Водорода в составе Урана и Нептуна намного меньше. На схеме для сравнения показано также схематическое строение Земли и Луны.

На уровне 0,91 радиуса Юпитера, ниже «океанической» поверхности, давление и температура достигают значений, достаточных для освобождения из вещества проводящих электронов. По-видимому, начиная с этого уровня формируется магнитное поле.

Быстрое вращение Юпитера и движения проводящей среды в его недрах приводят к образованию сильного магнитного поля. На первый взгляд оно несколько напоминает земное, хотя намного сильнее его. Дипольная составляющая создает на уровне облачного слоя напряженность 4—5 Гс (на Земле 0,35 Гс), а в районах магнитных полюсов Юпитера — 11 и 14 Гс. Ось диполя на 11° наклонена к оси вращения планеты (как у Земли). Направление полюсов обратно земному. Но на расстояниях менее 3 радиусов от центра планеты значительную напряженность поля создают компоненты более сложного характера с числом полюсов 4 и 8 — квадрупольная и октупольная. Они сильно усложняют структуру магнитного поля. Их происхождение, как предполагается, связано с относительно небольшой глубиной слоя, где происходит освобождение проводящих электронов.

Структура недр Юпитера очень отличается от глубинного строения Земли. Зоны, где работает механизм магнитного динамо, у Земли спрятаны глубоко под ее мантией и находятся в ядре, на расстоянии 0,25—0,30 радиуса от центра планеты. У Юпитера же зона проводящих электронов находится даже выше металлической поверхности (0,77 радиуса). В мощном магнитном поле наиболее сильна дипольная составляющая, а разница в напряженности поля у северного и южного магнитного полюсов объясняется именно недипольными компонентами, магнитный момент которых составляет 22 и 18% от дипольного. Все это создает сложную картину магнитного поля планеты: множество магнитных полюсов, из которых два (северный и южный) примерно в 5 раз сильнее остальных.

Как видим, сложность устройства Юпитера проявляется во всем. Как тут не позавидовать астрономам недавнего прошлого, которые видели в нем простой газовый шар.

Подведем итоги: металлическое жидкое ядро внутри толстой скорлупы из металлического водорода. На ней — странный океан глубиной в несколько тысяч километров. Примерно такая же глубина атмосферы. Во внешних ее частях плавают облака из водяного инея, сернистокислого аммония и аммиака. И все это распределено строго равномерно по своим уровням: никаких «материков» в океане, никаких масконов под поверхностью. Анализ движе-

ния аппаратов вблизи Юпитера показал, что гравитационное поле планеты соответствует математически точному и однородному на каждом уровне телу планеты без каких-либо отклонений, в том числе и в районе Большого Красного Пятна. Иными словами, анализ гармоник гравитационного поля дал результат, который соответствует жидкой поверхности планеты.

Общее количество водорода на Юпитере соответствует 225, гелия — 70 массам Земли. Еще 20 масс Земли приходится на тяжелые элементы в центре планеты и отчасти в оболочках.

Почти одновременно с открытием радиационных поясов Земли было обнаружено дециметровое радиоизлучение Юпитера. Вскоре было установлено, что оно имеет в значительной мере нетепловой характер (т.е. не связано с тепловым излучением Юпитера). Возникло подозрение, что и у Юпитера имеются радиационные пояса и что источник дециметрового радиоизлучения находится в них.

Движение электронов в магнитных полях наблюдается у многих объектов астрофизики. Оно сопровождается двумя видами излучения: циклотронным, если энергия электронов значительно меньше 0,5 МэВ, или синхротронным, если она намного больше 0,5 МэВ (такие электроны с очень высокими энергиями называют релятивистскими). Вскоре уже не оставалось сомнений, что один из этих механизмов возбуждает дециметровое радиоизлучение, хотя еще долго оставалось неясно — который. В 1964 г. было показано, что радиоизлучение исходит из пространства, намного превышающего диаметр Юпитера, причем наиболее интенсивно излучают две области: справа и слева от планеты. Многое еще оставалось непонятным, и прежде всего — откуда берутся эти электроны, которые должны были довольно быстро растерять свою энергию? Кто мог тогда предположить, что вокруг Юпитера расположен гигантский природный ускоритель частиц, в действии которого принимают участие спутники планеты!

Дальнейшими исследованиями было установлено существование у Юпитера весьма протяженной магнитосферы и радиационных поясов, похожих на земные, но превышающих их во много раз по напряженности поля и размерам.

Магнитные поля и окружающая планету плазма образуют магнитосферу Юпитера, по объему в тысячи раз превышающую земную (рис. 5.7). В отличие от земной, ее граница, обращенная к Солнцу (магнитопауза и ударная волна), значительно больше изменяет свое по-

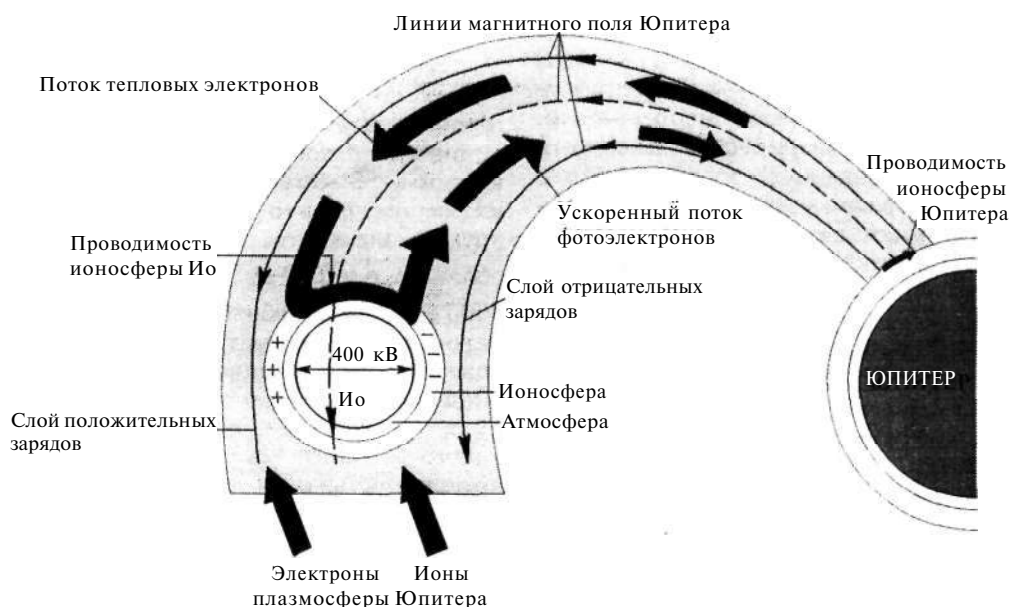


Рис. 5.6. Ио с магнитосферой Юпитера образует своеобразный естественный электрический генератор огромной мощности. Токи проходят вдоль магнитных силовых линий и замыкаются через Ио и ионосферу Юпитера. Из книги Р.Фиммела и др. «Pioneer»

ложение в зависимости от солнечной активности, от газодинамического давления «солнечного ветра». Зарегистрированное положение ударной волны менялось от 47 до 99 радиусов планеты (т.е. до 7 млн км от ее центра). С противоположной стороны «магнитохвост» Юпитера тянется на несколько астрономических единиц, а плотная часть «хвоста» наблюдалась на расстоянии до 160 радиусов Юпитера.

Наиболее близкая к планете часть магнитосферы, в пределах 20 радиусов планеты, вращается вместе с дипольной составляющей магнитного поля (период вращения 9 ч 55 мин 29,7 с). Эта зона напоминает 100-кратно увеличенные радиационные пояса Земли. Плазма здесь сосредоточена в объеме, имеющем примерно вид диска, который жестко связан с вращающимся полем планеты.

Наряду с протонами и электронами в радиационных поясах Юпитера найдены ионы серы, кислорода и других элементов. Поскольку магнитосфера вращается быстро, часть заряженных частиц выбрасывается из нее центробежными силами и движется в межпланетной среде в виде компонента космических лучей, пульсирующего с периодом вращения Юпитера. Собственно, по периодичности этого компонента и магнитного поля, которые регистрировались космическим аппаратом, и был найден точный период вращения магнитосферы Юпитера. Во второй зоне, до 60 радиусов, поле сильно

деформировано центробежными силами (конечно, через плазму) и образует «магнитодиск» вместо магнитосферы. Эта зона имеет практически тот же период вращения. Внешняя — до 90 радиусов планеты — зона сильно деформирована взаимодействием с солнечным ветром. Вдоль внешней границы магнитосферы проходит ударная волна, вызванная торможением плазмы солнечного ветра. С ночной стороны магнитный шлейф Юпитера тянется на многие сотни миллионов километров и достигает орбиты Сатурна, находящейся вдвое дальше от Солнца. Последними исследованиями установлено, что в противоположность Земле, магнитосфера которой «подпитывается» солнечным ветром, энергия, необходимая для поддержания магнитосферы Юпитера, черпается из вращения планеты.

Магнитосфера и радиационные пояса Юпитера — это гигантский природный ускоритель заряженных частиц. Детальный анализ космических лучей, регистрируемых у Земли, показал, что значительная часть электронов с низкой энергией имеет характерную 10-часовую периодичность, связанную с вращением Юпитера. Это указывает на их происхождение. Иными словами, не все «космические лучи» — космические, часть их приходит из области Юпитера, «ускоритель» которого представляет собой тороидальный пояс, наклоненный к экваториальной плоскости планеты в соответствии с наклоном оси магнитного диполя. Пояс

охватывает пространство от 1,5 до 6 радиусов планеты. Энергия электронов, захваченных в радиационных поясах и ускоренных в них, лежит в пределах от 3 до 30 МэВ. Дециметровое радиоизлучение, имеющее непрерывный, спокойный характер, генерируется именно в этих поясах электронами с энергией около 17 МэВ. Таким образом, дециметровое излучение Юпитера имеет синхронную природу.

До полетов космических аппаратов оставались неизвестными как концентрация частиц в поясах, так и их энергетический спектр. Защита аппаратуры «Пионера-10» от облучения в радиационных поясах была выбрана по предварительным оценкам. История его сближения с Юпитером в декабре 1973 г. была полна драматизма. Положение усугублялось тем, что информация о состоянии аппарата достигала Земли только через 1 ч.

По мере приближения аппарата скорость счета высокоэнергичных заряженных частиц возрастала. Они пронизывали всю аппаратуру и вызывали некоторые нарушения в ее работе. Поначалу нарушения были безобидными. Но каждое последующее измерение уровня радиации давало все более тревожные результаты. Точки располагались все выше на кривой, которая неумолимо ползла к аварийному пределу. Сквозь транзисторы и диоды, фотоумножители и радиоаппаратуру неслись лавины заряженных частиц. Доза радиации внутри аппарата составляла $5 \cdot 10^8$ рад, что значительно превышает смертельный уровень практически для всех высших форм жизни, включая растения и семена. Приборы начали лихорадить, они стали сами переключаться в незапланированные режимы, выдавать ложные отсчеты. И в тот момент, когда стало ясно, что «Пионеру-10» не выдержать дальнейшего роста радиации, ее уровень, наконец, остановился, а затем пошел на убыль. Максимальные потоки электронов с энергиями больше 3 МэВ и протонов с энергиями больше 30 МэВ составили соответственно $5 \cdot 10^8$ и $4 \cdot 10^8$ см⁻²·с⁻¹.

Радиационные пояса Юпитера имеют сложную структуру. Частицы образуют как бы изолированные полости вокруг планеты. Измерения показали, что на процессы во внутренней части пояса активно влияет один из крупнейших спутников Юпитера Ио (и отчасти следующий — Европа). Ио обращается в самом радиационном поясе на расстоянии 442 тыс. км от центра планеты по орбите с ничтожным эксцентриситетом. Хотя Ио (имя женского рода) несколько более удалена от Юпитера, чем наша Луна от Земли, но из-за огромной

массы Юпитера на один оборот она затрачивает всего 42,5 ч.

На расстоянии примерно 0,5 млн км от центра планеты, на орбите Ио, обнаружен тор горячей плазмы с температурой до 10^5 К, источник разогрева которой остается неизвестным. Вместе с Ио вращается огромное вытянутое облако из водорода, паров серы и других элементов. Концентрация водорода в облаке около 500 см⁻³, а всего частиц — около 3000 см⁻³. На орбите находится также облако паров щелочного металла натрия, также очень большой протяженности, почти в диаметр Юпитера. Разумеется, облако и тор рассеялись бы в пространстве, если бы не пополнялись из какого-то источника на Ио. Этот источник, который оставался загадкой до 1979 г., поставляет в тор и облако до 2—3 тыс. тонн вещества в секунду.

Ио активно взаимодействует с магнитосферой и самим тором, перемешивая частицы средних и низких энергий и поглощая высокоэнергичные частицы, и «работает» как одна из частей ускорителя. Измерения показали, что из тора исходит интенсивное ультрафиолетовое излучение сильно ионизованных паров серы на длинах волн 672 и 953 нм и что температура плазмы в торе достигает, как уже говорилось, $(50-100) \cdot 10^3$ К. Это означает, что в тор накачивается огромная энергия, порядка $500 \cdot 10$ МВт, причем механизм ее поступления в газовое кольцо остается неизвестным. Взаимодействие Ио с тором осуществляется, по видимому, при помощи относительно плотной, до 10^4 см⁻³, ионосферы Ио и наведенного магнитного поля.

Электрические и магнитные явления вообще очень интенсивны в ближней магнитосфере Юпитера. Среди чудес природы — мощный естественный электрический генератор, составная часть которого — спутник Ио. Только, пожалуй, «мощный» — не то слово. Между Юпитером и Ио течет ток в $(3-5) \cdot 10^6$ А. Мощность этой «энергосистемы» во много раз превышает суммарную мощность всех земных электростанций. Механизм, с помощью которого вырабатывается эта фантастическая мощность, очевидно, связан с весьма своеобразной структурой токовых оболочек в плазмосфере Юпитера (рис. 5.6). Интересно отметить, что именно такая структура токов давно была предсказана для явлений, происходящих в протопланетной туманности.

Явление было обнаружено «Вояджером-1». Для более подробных исследований шедший за

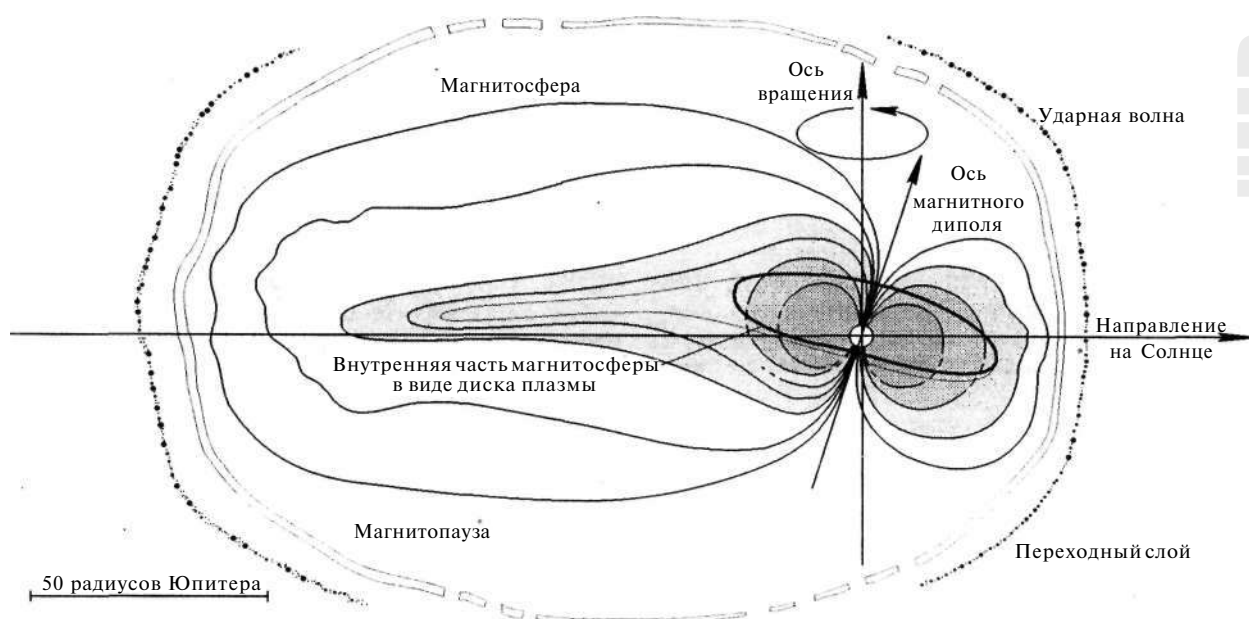


Рис. 5.7. Схема магнитосферы Юпитера. По своему устройству она напоминает магнитосферу Земли, но в тысячи раз превышает ее по объему.

ним «Вояджер-2» был специально направлен в токовую трубку, показанную на рис. 5.6, но ... почти ничего не обнаружил: линии тока искривились и за 4 месяца между посещениями «Вояджер-1 и -2» сместились в сторону.

Космическими аппаратами было принято радиоизлучение в диапазоне волн от 0,3 до 30 км. Предполагается, что оно также генерируется в плазменном торе на орбите Ио. Это радиоизлучение, похоже, возвращает нас к началу истории радиоастрономии.

Радиопомехи естественного и промышленного происхождения часто мешают радиоастрономам, использующим очень чувствительные и широкополосные радиоприемники. В некоторых особенно неприятных случаях приходится искать какой-то достаточно близкий источник помех, чтобы устранить их. На эти поиски иногда уходит немало времени.

Так было и в 1954—1955 гг., когда в США вводили в действие новый радиотелескоп. На выходе тщательно проверенной радиоаппаратуры время от времени появлялись сильнейшие периодические помехи. Всплески повторялись с более или менее правильными интервалами на длине волны 13,5 м. Ученые потратили много сил, прежде чем установили, что искать этот источник на Земле бесполезно. Мощные помехи шли от Юпитера. Это немало удивило ученых; было известно, что в небесных окрестностях Земли только Солнце создает достаточно сильное радиоизлучение, но от планет никто этого

не ожидал. Тепловое радиоизлучение от такой далекой и холодной планеты, как Юпитер, очень невелико и никаких помех, конечно, создать не могло. И все-таки эти радиосигналы шли с Юпитера. (Сейчас известно, что кроме Юпитера и Сатурна еще одна планета создает сходные естественные шумы высокой интенсивности в радиодиапазоне: это наша Земля.)

Вскоре экспериментаторы даже стали утверждать, что излучение части мощных источников радиоизлучения Юпитера можно принимать, как это ни странно, на вполне определенных длинах волн: 29,7; 20; 18,2; 16,7; 15,5; 11,4 м. Они оставляли наблюдения, уходили в отпуск, но и через несколько месяцев таинственные радиосигналы принимались на тех же частотах. (Так, по крайней мере, утверждалось в относительно недавних работах по радиоастрономии.) Подобно нашим радиопередатчикам, эти источники занимают очень узкую полосу, 5—50 кГц. Когда была применена радиоаппаратура с высоким временным разрешением, удалось установить, что в ряде случаев сигналы имеют сложную внутреннюю структуру: импульсы длительностью в тысячные доли секунды разделены паузами в сотые доли, причем амплитуда меняется от импульса к импульсу, но остается постоянной в пределах одного импульса. Очень похожую структуру имеют сигналы некоторых специальных радиостанций Земли, использующих особую кодово-импульсную модуляцию.

Наряду с этой фантазмагорией с Юпитера идут и другие, менее экзотические всплески радиоизлучения, которые получили название «радиобурь». Поначалу думали, что они исходят от грозовых разрядов. Но простой расчет показал, что такие «молнии» по мощности должны в миллиарды раз превосходить земные. Это слишком много (хотя «сверхмолнии» на Юпитере действительно существуют).

Пока ученые искали (добавим: и продолжают искать) объяснение этому странному явлению, кое-кто уже сообщил читателям об обитателях Юпитера (без марсиан стало как-то грустно).

В 1964 г. удалось заметить, что странное дециметровое радиоизлучение Юпитера тоже определенно зависит от положения Ио.

Первый зонд в атмосфере Юпитера

В июле 1995 г. зонд аппарата «Галилей» отделился от орбитального отсека и начал самостоятельный неуправляемый полет. В атмосферу Юпитера он должен был войти под чрезвычайно критичным углом $8,5^\circ$. Ошибка в полтора градуса была бы достаточной, чтобы аппарат погиб. Но все обошлось. 7 декабря 1995 г. зонд вошел в атмосферу. Его скорость, которая вначале в 50 раз превышала скорость винтовочной пули, за 3 мин упала до 500 м/с. Масса аппарата составляла 339 кг, а его замедление достигало 228g. Энергия рассеивалась на лобовом коническом щите с абляционным покрытием, температура которого поднялась до 14 000 градусов. За неполных 3 мин торможения испарилось 2/3 покрытия щита. Затем щит отделился, и дальнейший спуск проходил на парашюте.

С задержкой в 53 с относительно расчетного времени, начиная с уровня с давлением 0,35 бар, аппарат стал передавать результаты научных измерений на орбитальный аппарат. Сеанс продолжался 58 мин, причем за это время аппарат углубился в атмосферу на 150 км. Предполагалось, что при этом он пройдет все облачные слои, о которых говорилось выше. Радиосигналы с аппарата перестали поступать, когда давление достигло 24 бар, а температура 420 К. По некоторым данным, водородно-гелиевая атмосфера Юпитера каким-то образом проникла в аппарат, иначе измерения продолжались бы и дальше. Проблемы (кроме нераскрывшейся антенны) имелись также на орбитальном отсеке. Из-за сбоев в системе регистрации данных, в дальнейшем было решено не передавать изображение района входа. Но его положение ($6,5^\circ$ с.ш., $4,5^\circ$ з.д.) удалось достаточно точно установить с по-

мощью наземных радиосредств и космического телескопа Хаббла.

Результаты измерений, проведенных на зонде, впервые позволили сопоставить имевшиеся ранее дистанционные измерения с непосредственными измерениями в атмосфере планеты. Их сравнение показало, что физика Юпитера еще сложнее, чем предполагалось.

За 3 ч до входа зонда в атмосферу был включен прибор для регистрации частиц высоких энергий, что позволило обнаружить еще один мощный радиационный пояс планеты. Он простирается от внутренней границы кольца до самых верхних слоев атмосферы. Пояс заполнен ионами гелия высокой энергии. Их происхождение пока неизвестно.

Район входа находился на границе экваториальной зоны и северного экваториального пояса, где на некоторых участках наблюдается повышенная яркость в инфракрасном (5 мкм) диапазоне. Поэтому неожиданный характер полученных данных вначале даже предполагалось отнести за счет локальных особенностей района. Прежде всего, по постепенному ослаблению солнечного света зонд обнаружил над верхним ярусом облаков диффузный слой, состоящий из ледяных частиц аммиака. С помощью нефелометра зарегистрирован фактически только один слой облаков, состоящий, по-видимому, из ледяных частиц гидросульфида, причем метеорологическая «дальность видности» в нем превышает 1,5 км. Как хорошо известно из физики земной атмосферы, в ясный день яркость неба очень велика в направлении на Солнце, а в облачный день более или менее одинакова во всех направлениях. Прибор для таких измерений также имелся на зонде. По результатам измерений яркости неба был сделан вывод, что вдали все-таки были какие-то облака. Но никакого слоя водяного пара или снега, вопреки ожиданиям, не обнаружено. Более того, атмосфера Юпитера оказалась очень сухой. (Фактически измерялось количество кислорода, которое в отношении к водороду меньше солнечного.)

Измерение массового соотношения водород/гелий в атмосфере было одной из главных задач эксперимента. Оно оказалось бóльшим, чем по результатам «Вояджеров»: 0,75/0,24. (На Солнце, в период его формирования, гелия было до 28%.) На долю остальных элементов приходится всего 1%, причем углерода и серы в 2—3 раза больше по сравнению с Солнцем. Количество органических молекул ничтожно мало, что, как пишут авторы, «выводит Юпитер из числа объектов, перспективных для поиска жизни».

24%-ное содержание гелия указывает на принципиальные различия в строении Юпитера и Сатурна, у которого в атмосфере гелия в 4 раза меньше. В гл. 6 рассказывается о том, как гелий «тонет» на Сатурне. Что же касается Юпитера, здесь этот процесс идет намного медленнее. Результаты зонда «Галилея» косвенно указывают на очень высокую температуру ядра, вплоть до 20 000 К.

С помощью метода доплеровского измерения горизонтальной составляющей скорости аппарата удалось установить, что зональные (восток-запад) скорости ветра на всем протяжении спуска были очень велики и достигали 640 км/ч, или 180 м/с. Хотя измерения с «Вояджеров» тоже указывали на высокие скорости ветра, но трудно было предположить, что такие же скорости сохраняются глубоко под облачным слоем. Если на Земле динамика атмосферы и океана определяется притоком энергии от Солнца, то на Юпитере роль Солнца в его метеорологии невелика. Ветры Юпитера, превосходящие в несколько раз самые ураганные ветры Земли, определяется мощными источниками в горячих глубинах планеты. Как читатель сможет увидеть в последующих главах, в значительной мере это относится ко всем планетам-гигантам.

Выше рассказывалось о «сверхмолниях» на Юпитере. На зонде был установлен прибор для регистрации молний как оптическим, так и радиометодом. Вспышки зарегистрированы не были, но радиоизлучение удаленных молний принималось постоянно. Вспышки молний примерно в 10 раз превосходят по мощности земные, но на единицу площади их меньше тоже в 10 раз. Таким образом, грозовые явления теперь известны на Венере, Земле и Юпитере. Возможно, они существуют и на других планетах-гигантах.

Физика планет-гигантов обогащается новыми экспериментальными данными. В начале XXI в. у следующего гиганта, Сатурна, тоже появится искусственный спутник («Кассини») и спускаемый зонд «Гюйгенс» для исследований естественного спутника планеты — Титана.

Спутники Юпитера

Из 16 спутников Юпитера, перечисленных в табл. 3, по своей природе выделяются 4 галилеевых. Это Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. Они отличаются большими размерами (от размера Луны до размеров Меркурия) и близостью к планете. Известны еще более близкие к Юпитеру спутники: это 3 совсем маленьких тела, открытых за последние годы, и Амальтея, имеющая неправильную форму

(размеры примерно $135 \times 85 \times 75$ км). Вместе с ними галилеевы спутники образуют так называемую правильную систему, которая отличается компланарностью (расположением орбит спутников в плоскости экватора планеты) и почти круговой формой орбит. Если сравнить их с положением нашей Луны, то Ио находится на 10% дальше, а Каллисто в 4,9 раз дальше Луны. Но из-за огромной массы Юпитера на один оборот вокруг планеты они затрачивают всего 1,8 и 16,7 земных суток соответственно.

Знакомство с системой Юпитера начнем с галилеевых спутников Ио и Европы. Со времен их открытия они оставались одними из самых популярных объектов астрономических наблюдений. Но если бы астрономы тогда знали, какие чудеса таятся на этих небесных телах! Впрочем, начнем с небольшого отступления, касающегося галилеевых спутников.

В истории науки встречаются великолепные идеи, поражающие своей простотой и изяществом. Одна из них относится к концу XVII в., когда определение скорости света становилось все более актуальной задачей. Идея принадлежала Оле Рёмеру. Рёмер сообразил, что движение галилеевых спутников Юпитера (других тогда не знали) можно использовать для определения скорости света. Параметры их движения уже тогда были хорошо известны. Взаимное положение спутников и их положение относительно Юпитера, которые легко рассчитать заранее, можно условно рассматривать как положение четырех стрелок каких-то часов. Ход этих часов очень точен; в свое время отсутствие хороших хронометров даже подтолкнуло мореплавателей пользоваться этими небесными часами для нужд навигации. Но идея, о которой мы рассказываем, красивее. Пусть взаимное положение «стрелок» — спутников найдено, скажем, на момент одного из противостояний Юпитера (которые повторяются каждые 399 сут) и далее рассчитано на некоторое время вперед. Вскоре наблюдения покажут, что небесные часы... врут. Их отставание будет расти с каждым днем и на 200-й день достигнет

16,7 мин. Затем отставание станет уменьшаться и постепенно исчезнет совсем. Нетрудно догадаться, в чем дело: «часы»-то идут точно, но когда наблюдатель вместе с Землей перемещается на противоположную от Юпитера сторону орбиты, он видит положение «стрелок», которое соответствует моменту времени на 16,7 мин раньше, чем по его часам. Если он знает радиус земной орбиты (т.е. астрономическую единицу — 149,6 млн км), скорость света в его руках: 16,7 мин — время распро-

Т а б л и ц а 3. Спутники Юпитера

Название или обозначение	Радиус орбиты, тыс.км	Орбитальный период, сут	Эксцентриситет орбиты	Наклонение орбиты к экватору планеты, градусы	Радиус спутника, км	Год открытия
XVI Метис	127,96	0,295	(0)	(0)	20	1979
XV Адрастея	128,98	0,298	(0)	(0)	12×10×8	1979
Амальтея	181,3	0,498	0,003	0,45	135×85×75	1892
Теба	221,4	0,675	0,013	(0,9)	55×45	1979
Ио	421,6	1,769	0,004	0,04	1815	1610
Европа	670,9	3,551	0,009	0,47	1569	1610
Ганимед	1 070	7,155	0,002	0,21	2631	1610
Каллисто	1 880	16,689	0,007	0,51	2400	1610
Леда	11 094	238,7	0,148	26,1	(5)	1974
Гималия	11 480	250,6	0,158	27,6	(90)	1904
Лиситея	11 720	259,2	0,107	29	(10)	1938
Элара	11 737	259,7	0,207	24,8	(40)	1904
Ананке	21 200	631	0,17	147	(10)	1951
Карме	22 600	692	0,21	164	(15)	1938
Пасифае	23 500	735	0,38	145	(20)	1908
Синопе	23 700	758	0,28	153	(15)	1914

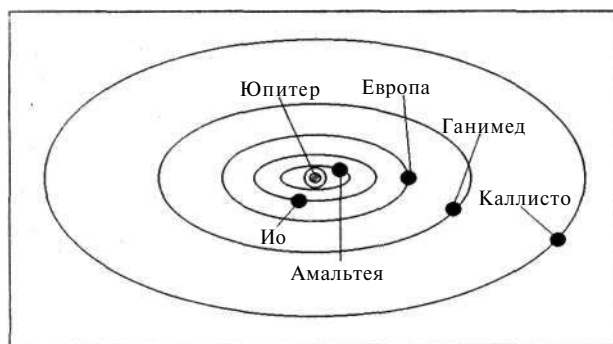


Рис. 5.8. Схема орбит ближайших к Юпитеру спутников

странения света на 2 а.е. К сожалению, астрономическая единица Рёмеру была известна неточно и прямая цель достигнута не была. Но идея, несомненно, была очень красивой.

В наше время наблюдение галилеевых спутников принесло новые проблемы, связанные, прежде всего с Ио. Еще средствами наземной астрономии в пространстве вблизи Ио было обнаружено излучение натрия и некоторых других элементов, что не находило объяснения до начала космических исследований Ио.

На рис. 5.8 приведена схема орбит галилеевых спутников и Амальтеи. «Вояджеры» двигались примерно в плоскости их орбит, чтобы исследовать спутники. При сближении аппарата с Ио было сделано важное открытие, к которому мы теперь и перейдем.

Ио

Краткая летопись исследований космоса полна забавных, а иногда и невеселых происшествий, недоразумений и неожиданных открытий. Постепенно возник некий фольклор, которым специалисты обмениваются при встречах. Часто он связан с неожиданностями в поведении космических аппаратов. Недаром в кругах исследователей космоса родилась полупуштливая, полусерьезная формулировка закона Мерфи — Чизхолма, о которой уже говорилось в гл. 2. Одна из сугубо научных статей в журнале «Сайенс» так и начиналась: «В соответствии с законом Мерфи ...». Случай, о котором мы расскажем, скорее относится к удивительному везению. Трудно сказать, сколько здесь правды, но научная канва этой истории вполне достоверна.

Точному знанию положения аппарата у далекой от Земли планеты способствуют не только средства радионавигации, но и передаваемые аппаратом телевизионные изображения, на которых видны спутники на фоне звезд. Получаемые относительные положения небесных тел вводятся в вычислительную машину, которая уточняет координаты аппарата. Одна из легенд рассказывает, что когда «Вояджер-1» приближался к Юпитеру, ЭВМ стала возвращать руководительнице эксперимента вводимую в ЭВМ магнитную ленту с видеозаписью изображения спутника Ио. Причина была непонятной, но в конце концов ученой удалось выяснить, что форма лимба Ио не соответствовала заложенным в ЭВМ представлениям о

круглом небесном теле. Сбоку у Ио (фото 41) что-то выступало. Это «что-то» оказалось огромным газовым султаном, который поднимался на высоту 250—300 км над действующим вулканом.

Следует сказать, что Ио давно удивляет астрономов. Мы уже говорили, что несколько лет назад вдоль орбиты Ио было обнаружено излучение кислорода, паров натрия и серы. Как сохраняется такой тор в пространстве? Вначале ученым показалось, что все объяснили телевизионные снимки Ио. Семь-восемь действующих вулканов на ее поверхности выбрасывают фонтаны газообразных веществ, поднимающихся на сотни километров. На фото 42 они видны в виде туманных колец вокруг черных кальдер. Оранжевый цвет поверхности Ио объясняется, вероятно, отложениями серы и сконденсированного сернистого газа. Если предположить, что часть продуктов извержений рассеивается в космосе, происхождение газового тора вдоль орбиты Ио находит объяснение. Но дело в том, что спутник Ио — довольно массивное небес-

ное тело: его масса $8,92 \cdot 10^{25}$ г (это на 20% больше массы Луны), а его средняя плотность составляет $3,55 \text{ г/см}^3$. Диаметр Ио 3630 км (диаметр Луны 3476 км). Расчеты показывают, что ускорение свободного падения на его поверхности достаточно велико, 181 см/с^2 . Поэтому в извержениях уходить в космос могут только легкие элементы. Тяжелый сернистый газ (сернистый ангидрид), а также пары серы, выброшенные из вулканической кальдеры, из-за низкой температуры быстро конденсируются и в таком виде, как иней и снег, выпадают на поверхность Ио. Этот процесс опережает фотодиссоциацию. В то же время ускорение свободного падения недостаточно, чтобы удерживать такую атмосферу, как у Марса, хотя какие-то следы атмосферы Ио имеет. В целом, реальные количества вещества, которые поступают в газовые облака на орбите Ио от извержений, зависят от таких конкретных условий, как атомная (или молекулярная) масса, скорость истечения газа и его температура. Расчеты показывают, что атомы тяжелых элементов и тяжелые молекулы выносятся в газовые облака каким-то другим механизмом.

Выброс газа на высоту сотен километров требует скоростей истечения газа из жерла примерно 1 км/с . Этому способствует ничтожная плотность атмосферы Ио: в $10\text{--}100$ млн раз меньше, чем у поверхности Земли. По земным понятиям это глубочайший вакуум. Но концентрация молекул не так уж мала, около 10^{11} см^{-3} . У всех остальных спутников Юпите-

ра, Сатурна и Урана, как и у планеты Меркурий, плотность атмосферы еще в миллиарды раз ниже. Попросту говоря, атмосферы у них нет. Исключение — спутник Сатурна Титан и спутник Нептуна Тритон, о которых речь будет дальше. Отложим немного разгадку, как сера попадает в газоплазменный тор из нейтральных и ионизованных атомов, и обратимся к удивительному механизму извержений на Ио.

Ио недостаточно велика, чтобы радиоактивный распад элементов в ее недрах вызвал сильный разогрев коры. Энергия для разогрева черпается совсем из другого источника: из приливных воздействий второго галилеева спутника — Европы, самого Юпитера и, в небольшой степени, третьего спутника — Ганимеда. Подобно тому как в атомах запрещены определенные сочетания состояний электронных оболочек, в системе Юпитера запрещены (хотя и по другим причинам) некоторые конфигурации (взаимные расположения) спутников. Как только Ио приближается к определенной точке относительно Европы и Ганимеда, влияние последних начинает искажать ее орбиту. За каждый оборот Ио дважды изменяет орбиту, смещаясь радиально на 10 км «вверх» и «вниз». Орбита становится не совсем круговой, хотя эксцентриситет всего 0,004. Ио имеет значительный приливный выступ (отличие от сферичности) и при движении вдоль орбиты испытывает сильную либрацию, хотя подобно другим галилеевым спутникам находится в синхронном вращении, т.е. всегда обращена одной стороной к Юпитеру.

Приливные силы изгибают литосферу Ио и разогревают ее, подобно тому как нагревается изгибаемая проволока. Благодаря приливным воздействиям в недрах Ио выделяется огромная энергия, 60—80 триллионов ватт. По-видимому, она распределяется неравномерно, больше выделяется в приповерхностных слоях небесного тела. В результате рассеяния этой энергии движение всех трех тел постепенно замедляется, но происходит это чрезвычайно медленно.

Нечасто бывает, чтобы предсказание теории нашло подтверждение всего через 2 месяца, но Ио оказалась как раз таким случаем. Ее извержения были предсказаны на основе анализа взаимных возмущений галилеевых спутников. Предсказание было опубликовано незадолго до сближения с Ио «Вояджера-1».

Мощность, рассеиваемая в приливных возмущениях Ио, достигает 2 Вт/м^2 — это в 30 раз больше тепла, чем выделяется через поверхность Земли. Дистанционные измерения температуры поверхности, которая при равновесии с получаемой от Солнца энергией должна

составлять примерно 140 К в районе экватора Ио, привели к совсем удивительным результатам. Равнины, покрытые слоем светло-оранжевых отложений, имеют даже более низкую температуру, 130 К. Это понятно: высокое альbedo поверхности уменьшает количество поглощаемой энергии. Вместе с тем около 2% поверхности занимают активно горячие пятна. Их насчитывается более 10.

Температура в пятнах 310, 400 и даже 600 К, причем размеры пятен колеблются в пределах от 75 до 250 км. «Вояджер-1» застал 8 активных гигантских извержений, места которых были отождествлены с горячими пятнами. Сблизившийся с Ио через 4 месяца «Вояджер-2» обнаружил, что семь из них все еще продолжают извергаться. «Выключился» только один из наиболее крупных вулканов, получивший в честь гавайского бога вулканов имя Пеле. В 1979 г. в точке, которая оказалась вулканической кальдерой Пеле, была зарегистрирована наивысшая температура, 600 К.

На фото 43 представлено изображение значительной части поверхности Ио с вулканическим комплексом Пеле в центре. (Кстати, качество снимка отражает прогресс в технике обработки изображений, достигнутый за последние годы.) Поверхность видна сквозь газовый султан выбросов, по-видимому, более плотный, чем тот, что виден над лимбом. Эллипс вулканических отложений на поверхности имеет размеры примерно 950×1400 км. В центре извержения расположены несколько обширных плоскогорий с обрывистыми краями и разделяющей их широкой долиной. Вся поверхность имеет темные оттенки оранжевого и коричневого цветов. Лишь плоскогорье выделяется светло-голубой окраской.

Еще одно извержение можно видеть на фото 44. Это патера Ра (с немного подчеркнутыми оттенками). Кальдера здесь темная. Предполагается, что это открытая поверхность лавы, а в стороны, на расстояния до 200 км, распространяются оранжевые потоки — продукты извержений. Вероятно, они накапливаются в глубинных резервуарах расплавленных веществ. Есть признаки того, что продолжительность существования вулканической кальдеры тем больше, чем из более глубоких резервуаров происходит извержение.

Вулканы Ио делятся на несколько типов. Первые имеют температуру 350–400 К и скорость выброса газовых продуктов около 500 м/с. Высота газового султана достигает 100 км и более, а выпадающие осадки имеют белый цвет. Таких большинство. Вторые отличаются очень высокой температурой кальдеры, имеют скорость выбросов около 1 км/с и

высоту султана до 300 км. Главная их особенность — темная кольцевая окантовка на расстояниях нескольких сотен километров от кальдер. К ним относится Пеле и найденные позднее Сурт и Атен. Кольцо газоконденсатной природы вокруг Пеле имеет форму подковы, что указывает на неравномерность выбросов.

Среди интересных гипотез имеется предположение о гейзерном характере извержений второго типа, когда происходит внезапный фазовый переход летучих (жидкость — газ). Такой фазовый переход в глубинном резервуаре известен для земных вулканов, например острова Св. Елены. Для сернистого газа переход должен происходить при температуре 400 К, а для серы примерно при 700 К. Если принять эту гипотезу, малые султаны соответствуют выбросам с небольших глубин, большие — из глубоких резервуаров.

Состав продуктов извержений — сера, сернистый газ и некоторые сульфиды. Они присутствуют и в вулканических извержениях на Земле, но к основным составляющим извержений не относятся.

Чтобы судить о реальной мощности вулканизма на Ио, важно знать, много ли вещества выбрасывается в извержениях, для чего можно воспользоваться сведениями о возрасте поверхности. В свою очередь, для оценки возраста поверхности небесных тел широко используется метод подсчета количества метеоритных кратеров, приходящихся на единицу поверхности. Метод дает оценку возраста, если, конечно, известна средняя плотность метеоритной бомбардировки (о некоторых трудностях такой оценки для спутников Юпитера мы расскажем в разделе, посвященном Каллисто). По отсутствию метеоритных кратеров на поверхности Ио было установлено, что поверхность эта очень молодая, около 1 млн лет. Ее составляют продукты извержений.

Отложения конденсатов как серы, так и сернистого ангидрида из-за низкой температуры испаряются крайне медленно и сохраняются долго. Толщина слоя отложений оценивается от 3 до 30 км. В извержениях выбрасываются также силикатные магмы. Возможно, таково происхождение некоторых темных пятен на поверхности Ио. Общее количество вулканических кальдер на поверхности Ио (в том числе горячих) — несколько десятков, но действующих, как уже говорилось, гораздо меньше. Общая площадь вулканических кальдер составляет примерно 2% территории спутника. Все они довольно мелкие (по глубине). Вулканический объект патера Ра, представленный на фото 44 (с темным дном и змеевидными потоками), окружен обширным районом отло-

жений от оранжевого и коричневого до белого тонов.

Природа вулканических потоков остается непонятной. Еще более загадочные объекты — лавовые озера, к которым мы теперь перейдем. На их примере можно также кое-что узнать о времени жизни крупных извержений.

Самый сильный сигнал был зарегистрирован тепловыми радиометрами «Вояджеров» от не вполне понятного объекта, который получил название патеры Локи (фото 45). На телевизионных снимках с высоким разрешением он предстает как слегка срезанное круглое (кольцевое) образование темного оттенка; в центре его имеется угловатой формы светло-желтый объект размерами примерно в половину всего образования, которое само составляет 250 км. Предполагается, что темный объект представляет собой озеро расплавленной серы, в центре которого плавает 100-километровый «айсберг» из твердой серы. Вокруг него на темном фоне видны более мелкие обломки того же светлого материала. Примерно в 300 км севернее центра патеры Локи проходит слегка наклонный разлом (трещина) длиной около 200 км с таким же темным дном, имеющий в центре примерно такой же «айсберг». С обеих сторон трещины бьют в небо Ио на высоту 250 км два мощных белых газовых султана, выделяющихся на фоне светло-серой поверхности. (Измерения показывают, что жидкий темный материал кальдеры Локи не такой уж темный, светлее поверхности Луны.)

Район патеры Локи давал основной тепловой поток при наблюдениях и «Вояджера-1», и «Вояджера-2» в 1979 г. Но этим дело не ограничилось. Наземные телескопические наблюдения вскоре также позволили зарегистрировать мощный тепловой поток, который появлялся после того, как Ио входила в тень Юпитера. Потом вспомнили, что такое же явление наблюдалось лет за 15 до того и осталось загадкой. Обстоятельства иногда обманывают, что отмечается в поговорке: «после того — не значит вследствие того!» Если бы триллионы ватт рассеянной в коре Ио энергии излучались всей ее поверхностью, ее температура возросла бы всего на пару градусов. Здесь же излучал определенно горячий район относительно небольших размеров. Сопоставление показало также, что источники излучения распределены по поверхности очень неравномерно, появляются и исчезают при вращении спутника, а появление горячих пятен при затмении Юпитером объясняется попросту тем, что именно в это время мы видим постоянно обращенную к Юпитеру сторону спутника, где расположен... кратер Локи. Дальнейшие мно-

голетние наземные исследования показали, что тепловое излучение Ио неизменно резко возрастает, как только становится виден меридиан 300—306° з.д., т.е. район Локи. Его вклад в излучение Ио составляет половину.

В самое последнее время появился новый метод исследований — тепловая поляриметрия. Эти исследования показали, что излучение исходит от гладкой поверхности, расположенной на 13° с.ш. и 303° з.д. С учетом ошибки $\pm 5^\circ$, указанной авторами, это снова координата патеры Локи (16—19° с.ш., 300—306° з.д.). Ученых чрезвычайно интересует, сколько же лет может непрерывно происходить это извержение?

Разные цветовые оттенки поверхности Ио указывают, что кроме серы и конденсированного сернистого газа там имеются и другие составляющие. Цвет отложений серы также зависит от температуры и может быть белым, желтым, красным, коричневым и даже черным. Кроме серы широкий выбор цветов могут дать и полисульфиды.

Чего определенно нет ни на поверхности Ио, ни в ее вулканических выбросах — это воды, водяного снега или инея. А именно вода составляет основную массу вулканических выбросов на Земле. Но не на Ио. Но всегда ли спутник был сухим, или его запасы воды растеряны в извержениях? Этот вопрос еще ждет своего решения, особенно если учесть, что Ганимед и Каллисто на 50—60% состоят из водяного льда и, возможно, жидкой водяной мантии.

Несколько слов о рельефе Ио. Он в основном равнинный. Кроме гор, в центре комплекса Пеле имеются еще несколько крупных массивов. Гора Хемус у южного полюса высотой до 10 км занимает площадь около 150 × 80 км. Интересный объект, обнаруженный на телевизионных снимках, представляет собой гору высотой до 2,5 км, с диаметром основания около 85 км, конической формы, которую специалисты относят к щитовым вулканам. Однако последние характеризуются совсем другим типом извержений.

Здесь было бы уместно перейти к внутреннему устройству Ио, но у специалистов оно вызывает так много споров, что мы ограничимся общей схемой галилеевых спутников, которую рассмотрим несколько ниже.

Орбита Ио расположена в той части магнитосферы Юпитера, где потоки заряженных частиц особенно плотны, — в центре радиационного пояса. Выше мы рассказали о трубках тока, соединяющих Ио с ионосферой Юпитера, и о сильном электрическом токе в этой

своеобразной кабельной сети. Учеными была высказана мысль, что сильные электрические токи у поверхности Ио могут благодаря самостягиванию разряда (пинч-эффекту) концентрироваться на малой площади. Не связаны ли начала извержений с таким прожигающим электрическим разрядом?

Как уже говорилось, электрические процессы в магнитосфере на уровне орбиты Ио связаны с радиоизлучением, приходящим с Юпитера в дециметровом диапазоне. Установлено, что вероятность его регистрации зависит от положения Ио: она наибольшая, когда Ио оказывается на максимальном угловом расстоянии от Юпитера, если смотреть с Земли. В меньшей степени такую же зависимость показывают Европа и Ганимед.

Плазменный тор на орбите Ио вращается со скоростью, почти равной скорости магнитосферы, поэтому частицы в нем движутся намного быстрее, чем сама Ио. Их скорость относительно Ио достигает 57 км/с, что вызывает интенсивную бомбардировку поверхности спутника и ежесекундно выбивает из нее 1–2 т сернистого газа, который поступает в тор уже в виде однажды и дважды ионизованных атомов серы и ионизованного кислорода. Такой оказалась разгадка, откуда берутся атомы и ионы серы в торе на орбите Ио.

А сравнительно низко над спутником обнаружены облака нейтральных натрия, калия, кислорода и серы. Структура тора и облаков до конца еще не исследована.

Европа

Приливная энергия, рассеиваемая в недрах следующего спутника — Европы, значительно меньше. Первые сообщения после сближения с Юпитером космических аппаратов не указывали на какие-либо признаки извержений. Но в дальнейшем были опубликованы сведения о наблюдавшемся над лимбом спутника слабым султаном газового состава, включавшего пары воды, аммиака и другие газы. Тем не менее газовые извержения, столь типичные для Ио, на Европе, по-видимому, очень редки.

То, что предстает на снимках Европы, — сплошная ледяная оболочка спутника. Вид ее необычен. Более 100 лет назад была высказана нашумевшая идея о каналах на Марсе. Эти линии оказались всего лишь обманом зрения в условиях плохо различимых деталей на другой планете. Но вот на поверхности оранжево-коричневой Европы обнаружена вполне реальная густая сеть искривленных пересекающихся линий. Вид поверхности Европы (фото 46) напоминает снимки льдов Северного Ледовитого

океана, сделанные со спутника. Ученые вначале осторожно отнеслись к напрашивающейся аналогии. Но спектральные измерения не оставляли места для сомнений: природа поверхности — водяной лед и снег.

Первый этап исследований Европы провели аппараты «Вояджер» (о чем говорилось выше), причем интерпретация этих результатов была неоднозначной. Прежде всего, это относится к выводам о природе и строении ледяной коры спутника, которые в сжатом виде выглядели примерно так.

Размеры и средняя плотность небесного тела позволяют сделать предварительные выводы о доле льда в общей массе спутника. При диаметре 3138 км и средней плотности 3,01 г/см³ Европа должна быть обогащена водой по сравнению с Ио и Луной. Поэтому первые выводы говорили о толщине ледяной оболочки в 100 км. Дальнейшие оценки, однако, привели к более скромным числам. В недрах Европы также выделяется энергия приливных взаимодействий, которая, как минимум, поддерживает в жидком виде толстую мантию, а попросту говоря, глубочайший подледный океан. Благодаря небольшой, но заметной эксцентricности орбиты и гравитационному взаимодействию с другими спутниками рассеиваемая энергия довольно велика, поэтому океан может быть теплым. Глубина океана составляет несколько десятков километров, а ледяной панцирь, по минимальным оценкам, должен иметь толщину всего в несколько километров. Эта оболочка хрупка и под действием перемещающегося приливного выступа иногда лопается, образуя доступ жидкой воды к безатмосферной поверхности спутника. Впрочем, говорили и о толщине льда от 60 до 200 км.

По-видимому, глобальная сеть линий (фото 48) — это трещины в толстой ледяной коре, вызываемые тектоническими процессами. Предполагалось, что эти разломы не сопровождаются какими-либо движениями коры, а сами трещины заполняются быстро твердеющим оранжевым раствором. Ширина разломов — от десятков до сотен километров, а их протяженность достигает 3000 км и более. При высоком разрешении сеть трещин выглядит сложнее (рис. 5.9). Некоторые ледяные поля, как можно заметить, успели повернуться до застывания материала в трещинах. Изливающаяся вода мгновенно закипает и одновременно замерзает, а испарившаяся часть выпадает на поверхность в виде снега и инея в радиусе нескольких сотен километров от источника. Само кипение уносит очень много тепла; в условиях Европы слой



Рис. 5.9. Поверхность спутника Юпитера Европа, снятая с высоким разрешением (500 м) с аппарата «Галилей» 27 июня 1996 г. Ширина поля снимка 770 км. Поверхность напоминает льды полярных морей Земли (как они видны с орбиты спутников), разорванные во время подвижек. Светлые ледяные поля растрескались и повернуты, а разрывы заполнены темным материалом, вероятно ледяной кашей или жидкой водой. После застывания разрывы образовали характерный рисунок на поверхности спутника

льда в полметра образуется за несколько минут. Такая схема подтверждается высокой яркостью поверхности (обнаженный свежий иней и лед) и, как уже говорилось, спектральными измерениями, указывающими на водяной лед почти без примесей.

Как и в случае Ио, решающим оказывается вопрос о возрасте поверхности. Космические снимки Европы с аппаратов «Вояджер» имели плохое разрешение, в основном около 20 км. На них практически отсутствовали метеоритные кратеры — эти «засечки» возраста. Добавим, что Европа считалась очень гладким спутником (иногда говорили даже «как бильярдный шар»). Наибольшие перепады высот оценивались в 50 м. Все это можно было понимать по-разному: либо как очень молодой рельеф, либо как существование какого-то механизма сглаживания рельефа. В пользу второго говорила высокая температура в глубине (жидкий океан воды) и способность льда в таких условиях к пластическим перемещениям (ледники). Чтобы получить более однозначный ответ, была сделана попытка определить, насколько загрязнена снежная поверхность Европы серой. Сера выбрасывается с Ио, встраивается в виде ионов в магнитосферу Юпитера и постоянно бомбардирует поверхность Европы. Плотность этого потока известна, поэтому содержание серы дает оценку возраста. Измерения, выполненные с борта искусственного спутника Земли, дали следующие результаты: серы намного меньше, чем ожидалось, а средняя скорость выпадения осадков на поверхность за счет извержений воды составляет не менее 10 см за 1 млн лет. Отсюда сразу же следует вывод, что через трещины, не считая

испарения льда с поверхности спутника, выбрасывается не менее 100 кг воды в секунду (конечно, для спутника в целом).

Дно подледного океана должно быть сложено из силикатных пород, составляющих основную часть массы спутника. Если в силикатной подводной коре Европы имеются места повышенного тепловыделения (подводные вулканы), в результате термохимического синтеза могут возникать сложные химические соединения. Правда, существование таких очагов сомнительно, так как масса Европы уступает массе спокойной в вулканическом отношении Луны. Но ведь и вулканизм Ио был сюрпризом.

Интерес к подледному океану Европы был стимулирован предположением о возможном существовании в нем жизни, пусть в самых простейших формах. По своему объему океан Европы должен быть близок к земному, если его глубина составляет 50–60 км. При ускорении свободного падения на поверхности 132 см/с^2 давление на его дне такое же, как на 4-километровой глубине земного океана. Известно, что жизнь на Земле появилась именно в океанах, но для океанов Европы имеется труднопреодолимое ограничение: отсутствие источников энергии, каким на Земле является солнечный свет. Жизнь и фотосинтез на Земле неразделимы. Правда, есть исключение: соединения серы, образующиеся при весьма высокой температуре подводных извержений, используются некоторыми микроорганизмами в хемосинтезе. Есть и другие столь же гипотетические идеи: поглощение света микроорганизмами в короткий период существования новых трещин в ледяном панцире

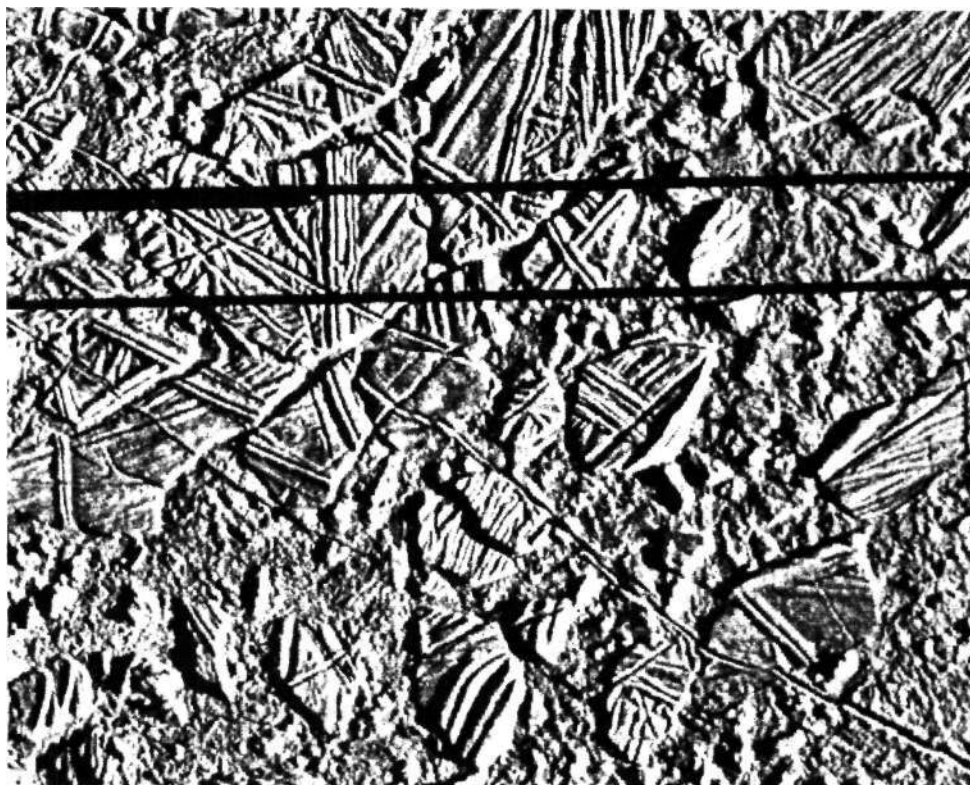


Рис. 5.10. Поверхность спутника Европа, снятая с аппарата «Галилей» 20 февраля 1997 г. Четко видна застывшая история ледяной поверхности спутника. Две черные полосы — сбои в приеме телеметрической информации

планеты. Читатель, вероятно, сможет предложить еще какую-нибудь идею.

Второй этап изучения Европы наступил через 20 лет. Европа стала одной из главных тем исследований первого искусственного спутника Юпитера, аппарата «Галилей», в 1996—1997 гг. Поток информации, поступивший с «Галилея», в том числе и количество телевизионных изображений, ограничивалось тем досадным обстоятельством, что у аппарата не раскрылась основная остронаправленная антенна, из-за чего телеметрия работала очень медленно. Получаемые научные результаты приходилось, как говорят, «цедить в час по чайной ложке». Тем не менее, снимки с «Галилея», сделанные с разрешением на поверхности Европы до 20 м, позволили увидеть поразительные подробности. На рис. 5.10 представлен небольшой участок поверхности спутника, 34×42 км, снятого с разрешением 54 м. Отдельные поля неправильной формы с характерной структурой поверхности имеют размеры от двух-трех до десяти км. По-видимому, они впаены в менее регулярную структуру со своими трещинами и разломами.

Вытянутые хребты и долины большой протяженности, охватывающие иногда полспутника, оказались основными деталями рельефа Европы. Вид участка размерами 140×130 км с центром у 12° с.ш. и 268° з.д. показан на рис. 5.11. По диагонали проходит неправильной формы разлом шириной 2 км. Слева внизу видна сложная линейная система параллельных хребтов и долин шириной 8 км. Похожие структуры находятся и в других частях снимка. Они напоминают снимки разрушенных шоссе с пересечениями и развязками. По их взаимным пересечениям, степени разрушения и отсутствию или незначительному числу ударных кратеров на поверхности можно судить о последовательности событий и о возрасте поверхности, который оказывается удивительно малым, всего сотни тысяч или миллионы лет. Обращают на себя внимание многочисленные темные пятна, положение которых в ряде случаев совпадает с кратерами ударного (или вулканического?) происхождения. Темные пятна имеют, по-видимому, другую природу, чем окружающая ледяная равнина.



Рис. 5.11. Поверхность Европы в районе 12° с.ш. и 268° з.д.. («Галилей», 20 февраля 1997 г.)

на. Несомненно, эти отложения были принесены из-под ледяной поверхности.

С увеличением разрешения вид поверхности не меняется: все те же пересекающиеся линейные хребты и долины, только меньших размеров (рис. 5.12). Здесь разрешение составляет 26 м, размеры участка 13×18 км. По теням и углублениям можно оценить высоту рельефа. Это, конечно, не 50 м, как предполагалось. Высота хребтов составляет никак не менее нескольких сотен метров. Структура двойного (по-видимому, молодого) хребта хорошо видна на рис. 5.13, где разрешение составляет 20 м. Согласно гипотезе, параллельные хребты образуются примерно так же, как срединно-океанические хребты на Земле: вязкая лава выдавливается сквозь разрывы и затвердевает, причем процесс повторяется с некоторой периодичностью. Но в отличие от Земли, здесь вязкая лава должна состоять из смеси льда, воды с примесями аммиака и других компонентов и, вероятно, силикатов.

В ряде случаев поступающая на поверхность лава полностью уничтожала (расплавляла) предшествующий рельеф. В левой части снимка

рис. 5.12 можно видеть выделяющийся гладкой поверхностью район разрушенного рельефа, затопленный излившейся лавой, с небольшим ударным кратером в центре. Симметрично этому району, справа от сложного хребта, находится участок размерами в 4—5 км сложного рельефа, также наложенного на более ранние образования. Все это указывает не только на активную тектонику, но и на большие энергетические ресурсы спутника, источник которых — скорее всего, как уже говорилось, приливное рассеяние энергии в недрах Европы. Но было бы преждевременно утверждать это категорически.

Вопрос об источниках энергии тесно связан с внутренним строением спутника. Сейчас никто не возьмется однозначно утверждать, что подледный океан на спутнике реально существует. Сомневаться в этом заставляет сравнительная устойчивость некоторых элементов рельефа, прежде всего кратеров, показанных на рис. 5.14 и 5.15. Структура поверхности первого из них может быть объяснена двояко. Первый вариант: массивное метеоритное или кометное тело пробilo ледяной панцирь, а

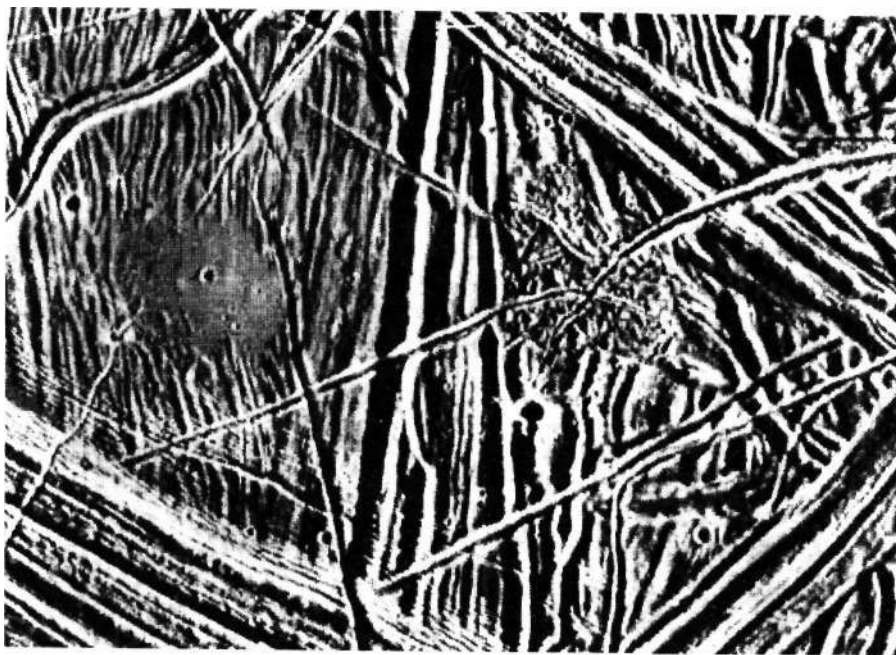


Рис. 5.12. Линейные хребты, долины и районы лавовых излияний («Галилей», 20 февраля 1997 г.)

поднявшаяся ледяная каша затвердела и образовала этот кратер с диаметром вала 100 км. В этом случае толщина ледяной оболочки должна быть не очень большой. Но тогда релаксация возникших напряжений за длительное время должна была бы сгладить все следы, а они сохранились. Во втором варианте объяснения предполагается, что все было наоборот: события развивались от недр к поверхности. Нагретый восходящий локальный поток проплавил кору насквозь и образовал поднятие, подобное «коронам» на Венере. Если это так, то океана, скорее всего, вообще нет, а этот кратер — явление локальное. Другой кратер (на рис. 5.15) меньше по размерам, около 25 км в диаметре. Происхождение его, по-видимому, ударное, так как следы выбросов из него прослеживаются на сотни километров. Валы вокруг кратера также хорошо видны на снимке.

Похоже, что неизвестные процессы переработки поверхности (благодаря восходящим нагретым потокам?) могут образовывать и более сложные структуры, чем та, что представлена на рис. 5.14. Предполагается, что на рис. 5.16 представлен именно такой случай. Снимок охватывает площадь 100×140 км. В правой верхней части рисунка видна сложная структура поверхности, где новый рельеф, по-видимому, поглощает прежний. Видны смещенные примерно десятикилометровые фрагменты двойного хребта на фоне рельефа, напоминающего тот, что показан на рис. 5.10. Как и



Рис. 5.13. Двойной хребет и долины в районе 15° с.ш. и 274° з.д. Разрешение на снимке 20 м («Галилей», 20 февраля 1997 г.)

на других снимках, малое число ударных кратеров позволяет утверждать, что поверхность молодая.

Выводы, к которым приводит анализ снимков 5.9—5.16, заключаются в том, что на ледяных спутниках планет-гигантов действуют неизвестные процессы, в которые вовлечены большие потоки энергии и большие массы вещества. Возникают ли они только в приливном рассеянии энергии или работают и какие-то другие источники (например, радиоизо-

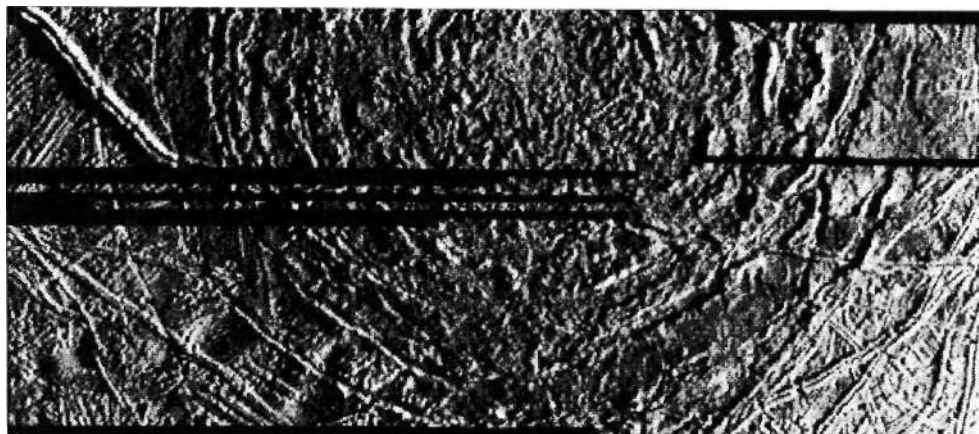


Рис. 5.14. Диаметр внешнего вала 100 км. Природа этого кратера вызывает споры («Галилей», 20 февраля 1997 г.)



Рис. 5.15. Кратер с координатами 26° с.ш. и 271° з.д. Диаметр вала 25 км («Галилей», 20 февраля 1997 г.)

топные источники эндогенного тепла в недрах небесного тела), остается неизвестным. Их проявления встречаются на всех более или менее крупных спутниках, от Европы и Ганимеда у Юпитера, до Миранды у Урана и Тритона у Нептуна.

Что же касается Европы, то среди главных нерешенных вопросов остаются следующие. Существует ли жидкая вода под ледяной оболочкой? Имеются ли теплые локальные восходящие потоки? Существует ли глобальный подледный океан? По-видимому, эти фундамен-



Рис. 5.16. В правой верхней части рисунка вновь образовавшийся рельеф поглощает и смещает более ранние хребты и долины («Галилей», 20 февраля 1997 г.)

тальные вопросы быстро не решить. Интересно, что уже высказано предложение привлечь к исследованиям океанологов и отправить к Европе в следующих космических миссиях океанографическую аппаратуру.

Ганимед и Каллисто

Средние плотности галилеевых спутников монотонно уменьшаются от Ио к Каллисто, что указывает на увеличение доли льда:

	Ио	Европа	Ганимед	Каллисто
Масса, в единицах 10^{25} г	8,92	4,87	14,90	10,75
Средняя плотность, г/см ³	3,55	3,01	1,93	1,83

Ганимед — самый большой спутник в системе Юпитера и вообще в Солнечной системе. По своему диаметру (5262 км) он даже превосходит Меркурий. Средняя плотность Ганимеда низка, всего 1,93 г/см³. Одно его полушарие — «морское», другое — «материковое», если эти характеристики годятся для ледяных тел. Внешне Ганимед напоминает Луну, но значительно больше ее. Темная древняя поверхность коричневого цвета на самом деле в 4—5 раз светлее темных районов Луны. На ней ярко выделяются светлые

молодые ударные кратеры, имеющие альбедо до 100%. Они, как правило, окружены столь же светлым ореолом лучей из выброшенного и обнаженного материала (фото 47).

Две наиболее крупные темные области на поверхности Ганимеда получили имена Галилей и Симон Мариус. (Последний независимо от Галилея открыл четыре крупнейших спутника Юпитера, практически одновременно с Галилеем.)

Возраст поверхности Ганимеда оказался очень большим. Выше мы рассказывали о методе оценки возраста по количеству метеоритных кратеров на единице поверхности небесного тела. Удобный объект для таких оценок — Луна, где имеются обширные равнины лавового характера с известным ныне временем образования. Кратеры на них дают сведения и о том, как изменялась плотность метеоритной бомбардировки во времени.

В настоящее время большие кратеры образуются очень редко. Применительно к галилеевым спутникам Ганимеду и Каллисто есть к тому же простой способ отличить молодой кратер от старого: недавно образовавшиеся имеют в основном светлые дно и лучи вокруг кратера, обнажающие чистую ледяную поверхность. Но для перехода к возрасту необходимо знать также, каковы характеристики мете-

оритных тел и их количество в данном районе Солнечной системы.

Основным источником метеоритных соударений являются астероиды и кометы (или их обломки). В результате очень редких столкновений астероидов образуется некоторое количество обломков разных размеров. Мелкие, естественно, встречаются чаще. Такие микрометеориты легко регистрируются на космических аппаратах. Предполагается, что по их количеству можно судить и о существовании более крупных обломков. Измерения, выполненные на «Пионер—Сатурне», дали странный результат: похоже, что количество микрометеоритов (их численная плотность) не убывает по мере удаления от Солнца, по крайней мере вблизи эклиптики. К этому мы еще вернемся в гл. 9. Здесь же существенно, что интенсивность метеоритной бомбардировки в разных частях Солнечной системы могла подчиняться различным закономерностям и что оценка возраста поверхности небесных тел по количеству ударных кратеров дает не совсем однозначные результаты. С другой стороны, насыщенный кратерный рельеф, как материки Луны или поверхность Каллисто, никак не мог образоваться в сравнительно недавние времена.

Если исходить из количества метеоритных кратеров, возраст наиболее старых участков поверхности Ганимеда оценивается в 3—4 млрд лет. Очень большие размеры и сравнительно невысокая средняя плотность, лишь вдвое больше плотности воды, указывают на значительную толщину ледяной коры этого небесного тела. Согласно расчетам, на водяной лед приходится около 50 % его массы.

На снимках Ганимеда, выполненных с высоким разрешением, хорошо видны странные изломанные, похожие на рельеф Европы ряды многочисленных субпараллельных долин и хребтов, образующих причудливую структуру на поверхности спутника (рис. 5.17). Они сформированы более светлым материалом и геологически моложе темных областей. Они концентрируются главным образом в светлых областях. Ширина их от единиц до десятков километров, а высота хребтов (или глубина долин) составляет всего несколько сотен метров; они простираются на многие тысячи километров, пересекаясь и изменяя иногда направление в точках пересечений и даже пересекая ударные кратеры. В районах этих полос меньше ударных кратеров, что также указывает на более молодой их возраст. Астрогеологи предполагают, что полосы возник-

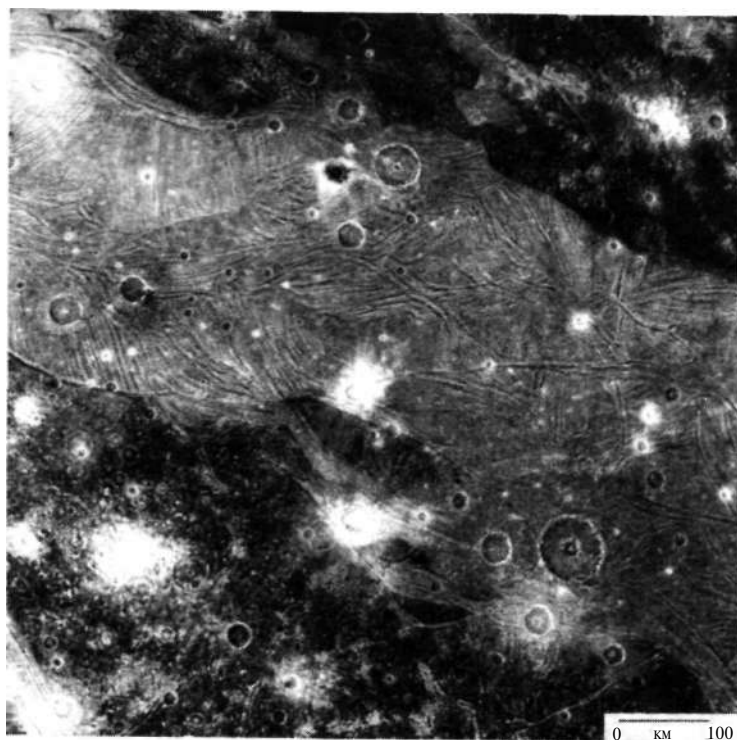


Рис. 5.17. Загадочные образования на поверхности Ганимеда в виде субпараллельных долин и хребтов возникли как предполагается, во время активного периода в истории Ганимеда. Из работы С.Мёрчи

ли под действием растяжений ледяной коры Ганимеда, что можно понять, как ее локальную тектонику и даже возможные наводнения. Широкая полоса «молодого» материала на рис. 5.17 не исключает такую возможность. Более того, подробный анализ указывает на древние явления, напоминающие глобальную тектонику плит на Земле, например вращение больших блоков поверхности. «Галилей» передал новые снимки поверхности Ганимеда со стократно повышенным разрешением. Структура ориентированных гряд и долин прослеживается и на этих новых изображениях (рис. 5.18).

Наряду со светлыми системами лучей у некоторых кратеров на Ганимеде имеются темные лучи. Возможно, они образовались из темного материала поверхности. В темных же районах в южном полушарии обнаружены необычные кратеры-фантомы, которые выделяются только оттенком, но не имеют выраженного рельефа. Наряду с ними имеется относительно «свежий» метеоритный кратер диаметром 175 км, окруженный сильно разрушенным рельефом. Последний образовался, похоже, уже при разрушении застывшей на большую глубину коры.

Чуть ли не половину поверхности Ганимеда занимает рельеф, который, вероятно, можно считать наиболее старым (рис. 5.19). Размер участка 19×26 км, координаты 19° с.ш. и 149° з.д., разрешение до 80 м. Темная поверхность несет следы многочисленных метеоритных ударов, а на валах наиболее старых кратеров прослеживается сегментация, ориентированная в двух направлениях (на снимке — рифты, ориентированные по вертикали и по диагонали). Этот процесс сопровождал выпадению темного метеоритного вещества на ледяную поверхность спутника.

Ударные кратеры на поверхности Ганимеда и следующего спутника, Каллисто, образовались под действием выпадавших на их поверхность ледяных и силикатных обломков в эпоху последних стадий образования планет и спутников. Природа же гигантских «морей» на поверхности Ганимеда может иметь и другое происхождение. Исследование поверхности этих тел позволяет сделать еще одно удивительное заключение: по-видимому, на ранних стадиях эволюции планеты-гиганты излучали в космос огромные потоки энергии. Спутники Юпитера, расположенные несравненно ближе к центральной планете, чем к Солнцу, на единицу площади получали больше энергии, чем Меркурий от Солнца. Следы этих событий и сейчас можно увидеть на поверхности Ганимеда.

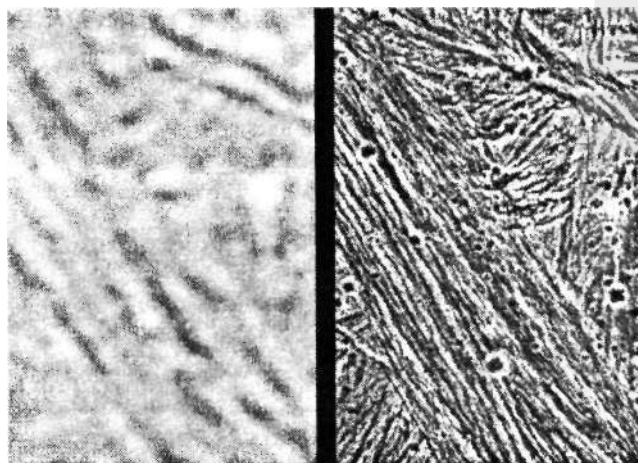


Рис. 5.18. Даже при очень высоком разрешении видна та же самая структура хребтов и долин. Район Урук Сулькус на Ганимеде (10° с.ш., 168° з.д.). Участок 55×35 км снят аппаратом «Галилей» в 1996 г. Наименьшие детали имеют размер всего 74 м. Вверху для сравнения показан фрагмент изображения по данным «Вояджера» (слева, разрешение 1,3 км), и «Галилей» (справа, разрешение около 70 м)

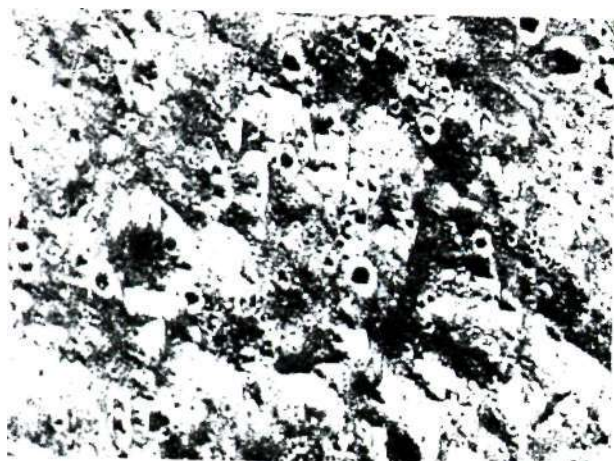


Рис. 5.19. Темная область Галилей на поверхности Ганимеда относится к наиболее древним его территориям («Галилей», 1997 г.)

Расчеты подтверждают такую возможность. До 1/10 полной солнечной радиации — такова мощность, которую Юпитер мог излучать в космос на ранней стадии своей эволюции. В лучах Юпитера плавилась льды на поверхности всех спутников, частично включая Ганимед. Вместе с тем излучавшиеся Юпитером потоки тепла были недостаточны, чтобы вызвать плавление поверхности Каллисто, удаленного от планеты почти на 2 млн км. Его поверхность представляет насыщенный метеоритными кратерами рельеф, сохранившийся со времени образования системы Юпитера, с возрастом около 3,5 млрд лет (фото 49). На ней запечатлелись следы колоссального столкновения с относительно большим телом: трещины вокруг одного из метеоритных кратеров образуют более десяти концентрических колец диаметром до 2600 км (фото 51). Образование получило название Валгалла. Его масштабы напоминают гигантский бассейн Равнина Жары на Меркурии. Два мира — мир глубокого холода Каллисто и раскаленный (в полдень) Меркурий — роднят одинаковые по происхождению и сходные по масштабам и очертаниям кольцевые структуры на Каллисто и валы Равнины Жары на Меркурии. Интересно, что центральный кратер Валгаллы невелик и выражен слабо.

По своим размерам Каллисто очень немного уступает Ганимеду: диаметр 4800 км, средняя плотность $1,83 \text{ г/см}^3$. Водяной лед составляет 60% массы спутника. Ледяная кора Каллисто имеет очень большую толщину.

Исследования, проведенные на аппарате «Галилей» в 1996—1997 гг. при двух облетах с Ганимедом позволили объявить о новой научной сенсации: спутник обладает собствен-

ным дипольным магнитным полем с напряженностью 750 нТл у поверхности. Это больше напряженности поля Меркурия. Выводы указывают на существование у спутника металлического ядра диаметром $0,2R$. Ранее предполагалось, что ядро металло-силикатное, около $0,6R$. Таким образом, Ганимед стал третьим обладателем магнитного поля в ряду плотных тел Солнечной системы с размерами Земли — Луны. У Каллисто магнитное поле не обнаружено. Спутник Европа — следующий кандидат на обладание магнитным полем, но пока установлено только, что его верхний предел не может быть выше 120 нТл. Самый сложный объект таких исследований — Ио, с ее плотной плазмосферой. Здесь в оценках напряженности специалисты пока затрудняются, хотя больше склоняются к присутствию дипольной составляющей.

На Каллисто полностью отсутствуют протяженные равнины, покрытые продуктами извержений (как морские области Ганимеда или Луны). Кратеры Каллисто отличаются от кратеров тел силикатной природы (как наша Луна) небольшой глубиной и слабо выраженными валами. Предполагается, что пластичность ледяной коры за очень большое время сглаживает рельеф ударных кратеров. Температура поверхности Каллисто (на экваторе в полдень) достигает 140—150 К и быстро падает после захода Солнца. Любопытный факт установлен в радиоастрономических наблюдениях галилеевых спутников: радиояркостьная температура составила 180 К для Каллисто и 165 К для Ганимеда. Причина расхождений с вполне надежными инфракрасными определениями, приведенными выше, остается неизвестной. Радиоволны проникают глубже, чем инфракрасные лучи, но все же недостаточно глубоко для таких температур.

На рис. 5.20 показана схема внутреннего строения галилеевых спутников. Под тонкой корой Ио находится разогретая и, вероятно, размягченная силикатная мантия. Не исключено, что спутник имеет очень маленькое ядро из более тяжелых каменных пород и льдов, не превышающее 3% его массы. Поверхность покрыта отложениями серы, сернистого газа (в виде инея) и другими составляющими. Толщина отложений может достигать 20 км.

Внешняя оболочка Европы водно-ледяная. Толщина покрова из льда — около 10 км, глубина океана — около 50 км. Силикатная мантия может быть нагретой, но далеко не до температур плавления. Если там и есть ядро из более тяжелых пород, его масса не может быть более 3% массы спутника.

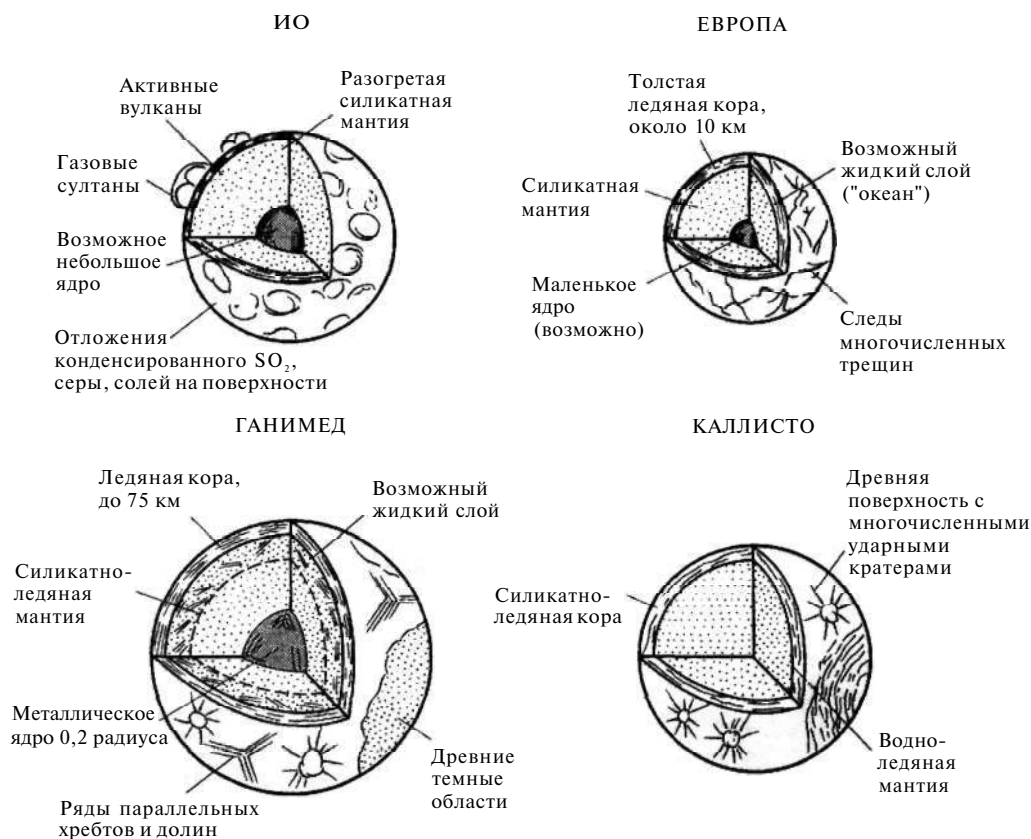


Рис. 5.20. Схема внутреннего строения спутников Юпитера

Слой ледяной коры у Ганимеда и Каллисто должен быть толщиной около 75 км, причем в случае Каллисто должна быть значительная примесь каменных пород. Мантия силикатно-ледяного состава доходит почти до центра спутников. Поверхность обоих тел покрыта бесчисленным количеством ударных кратеров, большинство из которых очень старые. Более молодые кратеры в некоторых точках обнажают незагрязненную ледяную поверхность.

Проблема спутников Юпитера, этой «мини-планетной системы» в планетной системе, на редкость увлекательна. Здесь можно проследить многие закономерности, присущие Солнечной системе в целом, хотя есть и существенные отличия. Эта отрасль астрономии ныне быстро развивается.

Ио, Европа, Ганимед и Каллисто легко различаются с Земли даже в бинокль. Но поверхность этих спутников на снимках космических аппаратов ученые увидели впервые. Можно также вообразить вид Юпитера с галилеевых спутников, который должен представлять необычайно величественное зрелище. Например, с Ио Юпитер виден диском, по диаметру в 36 раз больше привычной нам

Луны. Остается добавить, что эмоционально необычность оттенков и их сочетаний производит впечатление незнакомой и привлекательной красоты далеких миров. Впрочем, возможно, что широко публиковавшиеся цветные фотографии семейства Юпитера имеют преувеличенно яркие тона. Точно так же, как насыщенность цвета экрана телевизора регулируется по желанию телезрителя, переданные из космоса снимки допускают произвольное усиление цветных оттенков изображения. В одной из недавно опубликованных работ известный специалист-планетолог провел сравнение реальных телевизионных астрономических сюжетов и опубликованных в печати материалов. По его данным, истинный цвет Ио бледно-желтый и серый, а паторы Локи светло-соломенного оттенка. Равным образом он считает, что и другие объекты должны быть гораздо бледнее.

Амальтея и другие. Кольцо Юпитера

Небольшая Амальтея, спутник неправильной формы, имеет размеры 135 × 85 × 75 км, причем ее большая ось, как и у других спутников этой группы, постоянно направлена

на центр Юпитера. Окраска Амальтеи (фото 50) оранжевая, альbedo около 0,05. Подробных снимков Амальтеи пока нет. На ее поверхности видно какое-то белое образование. В одной из работ, посвященных происхождению галилеевых спутников, предполагается, что в отдаленном прошлом диаметр Ио, вероятно, был намного больше нынешнего, так как спутник постоянно теряет массу в извержениях. Более того, высказывается также предположение, что существовал еще один гигантский спутник, процесс разрушения и потери массы которого шел особенно быстро. Тот «огарок», который остался от него, — нынешняя Амальтея.

Еще один небольшой спутник, Теба, размером около 50 км, движется по орбите, лежащей между орбитами Ио и Амальтеи. Два ближайших к Юпитеру спутника, небольшие тела Метис и Адрастея, тоже имеют не правильную форму. Их орбиты проходят по внешнему краю удивительного образования — кольца Юпитера.

Кольцо было найдено при тщательных поисках его аппаратами «Вояджер» (рис. 5.21). Его внешняя граница проходит на расстоянии 128 тыс. км от центра планеты, а толщина не более нескольких километров. Кольцо состоит из частиц микронных размеров, об этом говорит сильное рассеяние света вперед. Микрочастицы, как предполагается, поставляют кольцу эти два небольших спутника, Метис и Адрастея, которые одновременно своим гравитационным воздействием формируют резкую внешнюю

границу кольца. Лучше всего кольцо видно на снимках, сделанных, когда аппарат находился за Юпитером, а кольцо наблюдалось в контр-аюре. Плотность его так мала, что оно в тысячи раз прозрачнее хорошего стекла. Ширина наиболее плотной части кольца около 5200 км, но оценка эта условна, так как пылевая материя присутствует глубоко внутри кольца и доходит, по-видимому, до верхних этажей атмосферы Юпитера.

Слабый свет, рассеиваемый кольцом в направлении к Солнцу (и к Земле), удаленность Юпитера и положение экватора, близкое к плоскости эклиптики, делают его наблюдение с Земли практически невозможным: наблюдатель фактически находится в плоскости кольца.

Вторая группа спутников находится значительно дальше от Юпитера, чем галилеевы спутники, на расстоянии около 12 млн км. Период их обращения близок к 250 сут. В эту группу входят пять спутников. Все они очень малы и, кроме особенностей движения и названий, о них мало что известно. Наконец, есть третья группа из четырех спутников, отличающихся обратным направлением движения. Их расстояние от Юпитера около 23 млн км, а период обращения около двух земных годов.

Спутники галилеева семейства относятся к крупнейшим телам Солнечной системы, включающей 60 членов. Диаметр семи спутников (из общего числа 56 у планет-гигантов) превышает 3000 км (рис. 5.22): по одному у Земли, Сатурна и Нептуна и четыре у Юпитера.

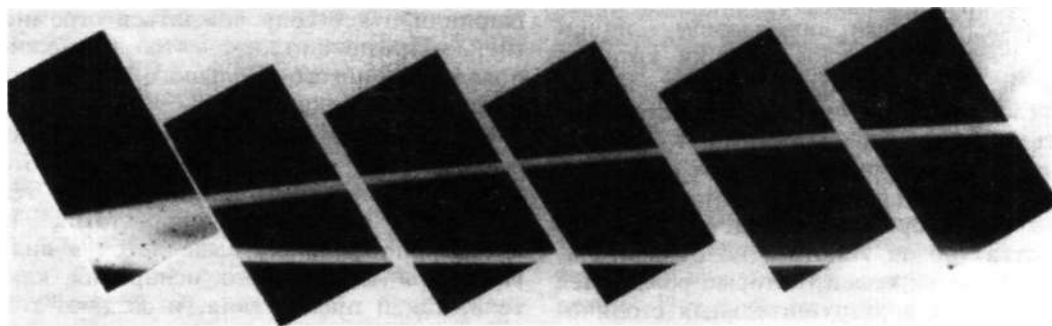


Рис. 5.21. Вверху — кольцо Юпитера, наблюдавшееся с ночной стороны планеты аппаратом «Вояджер-2», когда яркий свет, рассеянный Юпитером не мешает видеть кольцо (снимок NASA). Внизу — снимок с аппарата «Галилей» (1996 г.) позволяет рассмотреть детали кольца. Оно имеет структуру

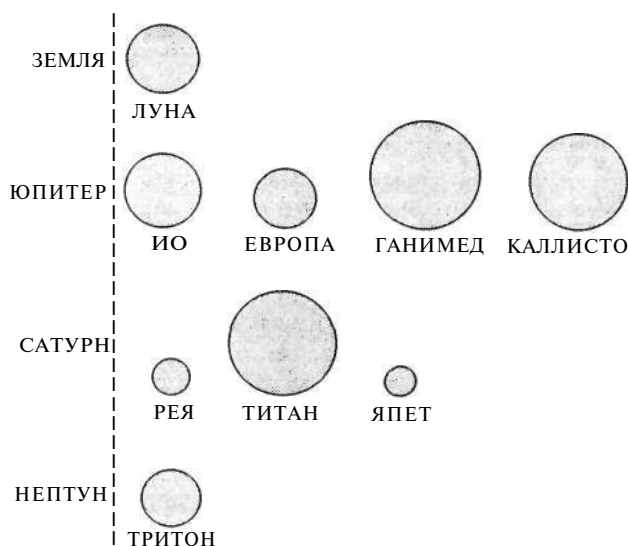


Рис. 5.22. Сравнительная схема размеров крупнейших спутников в Солнечной системе

Все остальные тела этого класса имеют диаметры около 1500 км или значительно меньше.

О событиях почти невероятных. В определенных условиях спутники могут взрываться

Науке свойственно стремиться к классификации явлений и событий. Но иногда оказывается, что четкость определений исчезает при ближайшем рассмотрении предмета. Это происходит с такими, казалось бы, устойчивыми понятиями, как спутники, астероиды, кометы и даже кольца планет. Границы, разделяющие их, становятся расплывчатыми; вспомним, например, Фобос, который, по-видимому, ничем не отличается от астероидов, снимки которых приведены в заключительных главах нашей книги. В свою очередь, некоторые астероиды могут быть «вымершими» кометами. К спутникам Юпитера фактически относятся «троянцы» — группа астероидов, орбиты которых связаны с Юпитером. Набирает силы (и доказательства) новая гипотеза об относительной недолговечности колец, которые рождаются (или обновляются) в разрушительных столкновениях спутников-астероидов. Заметим, что критики «объединительной» гипотезы неизменно приводят примерно такое возражение: почему же мы не видим самих соударений, столкновений и прочих катастроф? И вот мы их увидели.

В начале 1993 г. была открыта странная комета, получившая, по именам открывших ее астрономов, название «Комета Шумейкера—Леви 9». Комета, по их выражению, выглядела «раздавленной»: около 20 отдельных кометных

тел вытянулось тесной цепочкой, составившей, по образному выражению, «небесное ожерелье». Орбита кометы, как показал анализ, восходила к группе спутников-троянцев; это мог быть «сорванный с места» небольшой спутник, богатый конденсатами летучих веществ, или захваченная Юпитером комета. Распад ее на отдельные фрагменты определился происшедшим в июле 1992 г. (за год до ее открытия) слишком опасным ее сближением с Юпитером, когда она оказалась внутри так называемого предела Роша. Это расстояние, на котором приливные воздействия начинают разрывать приблизившееся тело; если оно не обладает какой-то прочностью, если его части слабо связаны между собой, тело разрушается. Вблизи Юпитера с его огромной массой такие эффекты очень сильны (как не удержаться от перефразировки: шутить не можете с богами!). Но даже относительно прочное тело могло разрушиться благодаря сопротивлению верхних слоев атмосферы Юпитера, в которую оно нырнуло.

Дальнейшая судьба кометы SL-9 была предсказана незамедлительно; вскоре астрономы станут свидетелями небесной катастрофы примерно таких же масштабов, как та, что произошла 65 миллионов лет назад на Земле, когда погибли около 80% всех видов животных. Вероятность такого события представлялась ученым настолько малой, что его обычно воспринимали как исторический факт, не более. Однако расчеты уверенно предсказали: в 1994 г., в 20-х числах июля, обломки кометы, размерами, по разным оценкам, от 1 до 10 км, врежутся в Юпитер со скоростью 60 км/с. Столкновение произойдет в южном его полушарии и будет сопровождаться огромной энергией. Предполагалось, что возможно даже появление нового Большого Красного Пятна или чего-то похожего.

Взрывы тел, которые нормально не содержат никакой «взрывчатки», объясняются просто. Огромная кинетическая энергия тела, движущегося с такими скоростями, при его внезапной остановке выделяется в виде тепла. Продукты мгновенного испарения как самого тела, так и препятствия, и создают гигантские давления, т.е. взрыв.

Были организованы специальные службы астрономических наблюдений всеми имеющимися средствами. Большие надежды возлагались на орбитальную обсерваторию — космический телескоп «Хаббл», который с земной орбиты может сделать снимки Юпитера, не хуже фото 33. Положение осложнялось тем, что столкновение должно было произойти на не видимой с Земли стороне планеты. Ночную сторону можно было наблюдать с приближаю-



Рис. 5.23. След взрыва от фрагмента G кометы Шумейкера—Леви 9 на облачной поверхности Юпитера, через 45 мин после соударения (в зеленых лучах). Снимок Группы телескопа «Хаббл» и NASA

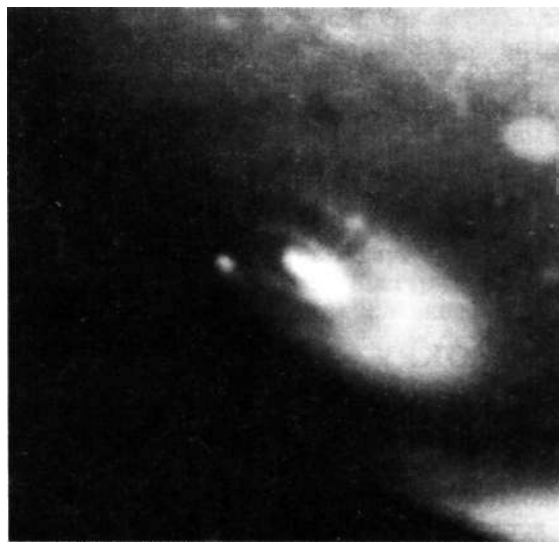


Рис. 5.24. Тот же объект, что и на рис. 5.23. Снимок сделан в полосе метана. Снимок Группы телескопа «Хаббл» и NASA

щегося к Юпитеру аппарата «Галилей», но он был еще слишком далеко от него: 238 млн км. С другой стороны, быстрое вращение Юпитера позволяло надеяться, что на появляющихся из-за лимба районах столкновения какие-то следы все же будут видны. И действительно, следы остались надолго, да еще какие!

Обломки кометы взрывались с 16 по 22 июля 1994 г. На снимках, полученных в инфракрасных лучах, вспышки полностью затмевали всю планету. Энергия, выделившаяся при ударе одного из крупнейших фрагментов, G, была оценена как эквивалент 6 млн водородных бомб по одной мегатонне каждая. На фото 52 и рис. 5.23, 5.24 можно видеть след этого взрыва через 45 мин, полученный телескопом «Хаббл» 18 июля. Следы взрыва более темные, чем окружающий фон облаков, но в полосе метана они светлее (рис. 5.24). Тонкое кольцо вокруг центра лишь на 1/5 меньше диаметра земного шара. Фрагмент G входил с юга, под углом 45°. Широкая темная дуга справа образована, по-видимому, продуктами выбросов, направленных в сторону удара. На снимках виден также след, оставленный фраг-

ментом D. Это точка слева от кольца, темная на фото 51 и рис. 5.23 и светлая на рис. 5.24. Фрагменты кометы оставили цепь подобных следов меньших размеров на облачной поверхности Юпитера. По оценкам, взрывы происходили достаточно глубоко в атмосфере; на это указывают радиальные лучи на рис. 5.23 и 5.24. Продукты взрыва поднялись над лимбом планеты в виде полусферы и примерно через 20 мин превратились в полосу над горизонтом.

Полученные результаты анализируются учеными. Спектроскопией установлено присутствие в продуктах взрыва большого количества серосодержащих соединений (например, дисульфида углерода, аллотропа S_2 и других), в то время как в обычных наблюдениях сера на Юпитере не обнаруживается. Уже высказано предположение о роли серы в окраске облаков Юпитера.

Научные статьи о столкновении кометы SL-9 с Юпитером останутся уникальным материалом надолго, возможно даже, на тысячелетия. Но есть еще одна сторона подобных событий: их вполне реальная опасность для Земли. К этой проблеме мы вернемся в гл. 9.

ГЛАВА 6

ОКРУЖЕННЫЙ БЕСЧИСЛЕННЫМИ КОЛЬЦАМИ САТУРН

Сближение «Вояджера-2» с Сатурном произошло в августе 1981 г. Он стал третьим аппаратом, достигшим этой планеты. К моменту встречи с Сатурном «Вояджер-2» прошел $2,23 \cdot 10^9$ км, двигаясь со средней скоростью $64 \cdot 10^3$ км/ч. Длительное путешествие аппарата, запущенного в 1977 г., сказалось на его технических системах. Но последние построены так, что позволяют выполнить намеченную программу даже при некоторых отказах оборудования. На аппарате не действовал основной служебный радиоприемник, а у дублирующего неустойчиво работала система удержания частоты сигнала. В бортовой вычислительной машине отказала одна из систем памяти. Однако самый серьезный отказ произошел в момент пересечения аппаратом плоскости колец планеты.

Поворотная платформа, на которой установлены телевизионные камеры и другие приборы, потеряла движение в азимутальном направлении. Аппарат в это время с Земли виден не был. Он находился довольно далеко от края колец А, F и G, поэтому специалисты считают маловероятным повреждение платформы частицами кольца. После выхода из-за планеты намечалась съемка южного полушария Сатурна, а также получение мозаичного изображения поверхности спутников Тефия и Энцелад. Эту часть программы пришлось сократить. Вместе с тем и объем других полученных материалов настолько значителен, что потеря относительно невелика. Специалисты долго пытались «оживить» платформу, и через несколько дней понемногу она начала реагировать на команды. На всякий случай ее заранее установили в положение, соответствующее работе вблизи Урана. В дальнейшем она действовала нормально.

Вероятно, из-за широко известных колец Сатурн — самая популярная планета. Что же касается ученых, понимание физических про-

цессов на планетах-гигантах требует от них большой работы. По сравнению с привычными земными понятиями гиганты как бы «расположены в другой главе физики».

Сатурн — планета-гигант, которая по размерам лишь немногим уступает Юпитеру и обладает большим сходством с ним. Объем Сатурна в 800 раз больше объема Земли. Период вращения в области широт около 40° составляет 10 ч 39,4 мин. Для экваториальной зоны период вращения меньше, 10 ч 12 мин, а для приполярных районов выше 57° — более 11 ч. Быстрое вращение приводит к сильному сжатию планеты: отношение полярного радиуса к экваториальному равно 0,912. Экваториальный диаметр составляет 120 540 км по верхней границе облачного слоя. Средняя плотность Сатурна рекордно низка: $0,70$ г/см³. Масса планеты $5,69 \cdot 10^{29}$ г.

Главное украшение Сатурна — его широко известные кольца, внешнее А, среднее В и внутреннее С. Как известно, кольца Сатурна впервые заметил Галилей в 1610 г. Но из-за несовершенства своего телескопа он не смог различить, что именно он видит, и составил латинскую анаграмму: «Высочайшую планету тройною наблюдал». Честь открытия колец Сатурна принадлежит Гюйгенсу. Это произошло лишь через 46 лет после наблюдений Галилея, в 1656 г.

Пояса, зоны, вихри и ветры

Хотя Сатурн и удален от Земли в среднем в 9,54 раз дальше, чем Солнце, даже при наземных наблюдениях он представляет собой один из самых красивых небесных объектов. Подобно Юпитеру, Сатурн также имеет развитую систему поясов и зон. Однако они никогда не бывают видны так ясно, как полосы на Юпитере. Если добавить к этому вдвое большую удаленность Сатурна, трудности визуаль-

ного (да и фотографического) исследования планеты становятся очевидными. И все же астрономам иногда удавалось проследить движение каких-то малоконтрастных пятен, что и позволило найти зональные периоды вращения этой красивой планеты. Но с борта космического аппарата Сатурн выглядит намного интереснее (фото 53). Два аппарата «Вояджер» прошли мимо Сатурна с интервалом в девять месяцев, что позволило проследить за изменчивостью деталей на диске планеты.

Поверхность облачного слоя, которая плохо различалась в 1980 г., в следующем году стала видна довольно ясно. Определяющую роль в этом могла сыграть смена сезонов на Сатурне, где началась весна в северном полушарии. Поскольку наклон экватора к плоскости орбиты Сатурна составляет 29° , смена времен года там должна приводить к большим изменениям инсоляции (приток солнечной радиации), чем на Земле. Уже на расстоянии шести недель пути на снимках «Вояджера-2» можно было различить циклонические образования в различных районах планеты. Одно из них, напоминающее цифру 6, можно видеть на фото 54. По последовательным телевизионным снимкам удалось подробно проследить их развитие и даже предсказать их положение на момент сближения аппарата с Сатурном.

По аналогии с Большим Красным Пятном Юпитера одно из вновь найденных гигантских овальных образований названо Большим Коричневым Пятном. Метеорология Сатурна и Юпитера сходна. Но есть и различия. В отличие от антициклонических деталей Юпитера, не поднимающихся выше широт 60° , пояса и зоны Сатурна доходят до очень высоких широт (фото 55). Большое Коричневое Пятно лежит всего в 16° от северного полюса. В отличие от Юпитера, потоки, движение которых заметно на фоне облачного слоя и чаще всего направлено к востоку, наблюдаются на очень высоких широтах, вплоть до 78° . Скорость такого потока, имеющего вид извилистой линии на фото 56, достигает 580 м/с. Ниже (южнее) можно видеть три «коричневых» пятна (на этом снимке в условных цветах они серые). Это ураганы, причем наибольший из них (в центре) по диаметру немного меньше половины земного шара. Скорость на периферии этого пятна 30 м/с. Из-за значительно большей, чем на Юпитере, скорости потоков, ураганы быстро затухают, вращаясь в потоки и обмениваясь с ними энергией.

Как и на Юпитере, образование вихрей определяется источниками энергии, упрятанными глубоко в атмосфере. Подробные снимки

районов умеренных широт показывают большое число местных ураганов с диаметром вихрей 1000 км и более. Скорость зональных ветров на Сатурне очень велика. В районе экватора она достигает $400\text{--}500$ м/с, что в 4 раза выше, чем на Юпитере. Однако на широтах 30° и выше скорости гораздо меньше, имеют периодический широтный характер и значение не более 100 м/с (рис. 6.1). По-видимому, время жизни крупных вихрей в атмосфере Сатурна невелико по сравнению с Юпитером, так как сильные ветры разрушают вихри. В отличие от Юпитера температуры и скорости ветров слабо коррелированы с положением поясов и зон Сатурна. Интересно отметить, что по данным «Вояджера» широтное распределение ветров в южном полушарии зеркально повторяет такое же распределение в северном полушарии.

Протяженный облачный слой и быстро нарастающая в глубину атмосферы ее плотность значительно ослабляют солнечный свет. На глубине 350 км под поверхностью облаков может быть темно. Реальная освещенность зависит от того, насколько консервативно рассеяние света в атмосфере Сатурна.

Когда космический аппарат будущего начнет спуск в атмосферу Сатурна, он зафиксирует быстрый рост температуры и давления с глубиной. На рис. 6.2 показаны зависимости этих параметров от глубины вблизи облачного

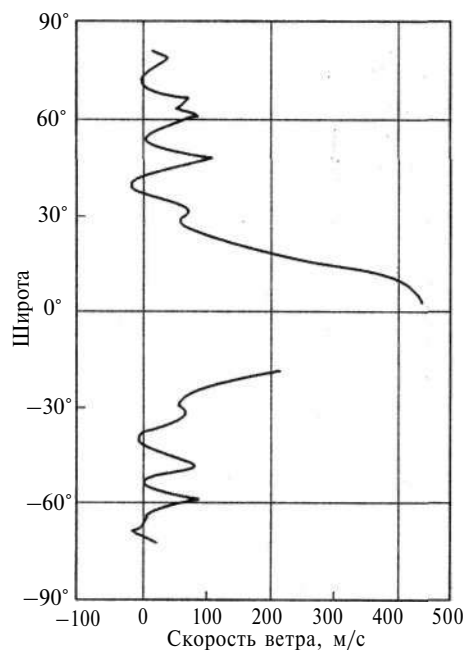


Рис. 6.1. Распределение скорости ветров в зависимости от широты. Наибольшие скорости зональных ветров вблизи экватора превосходят 400 м/с

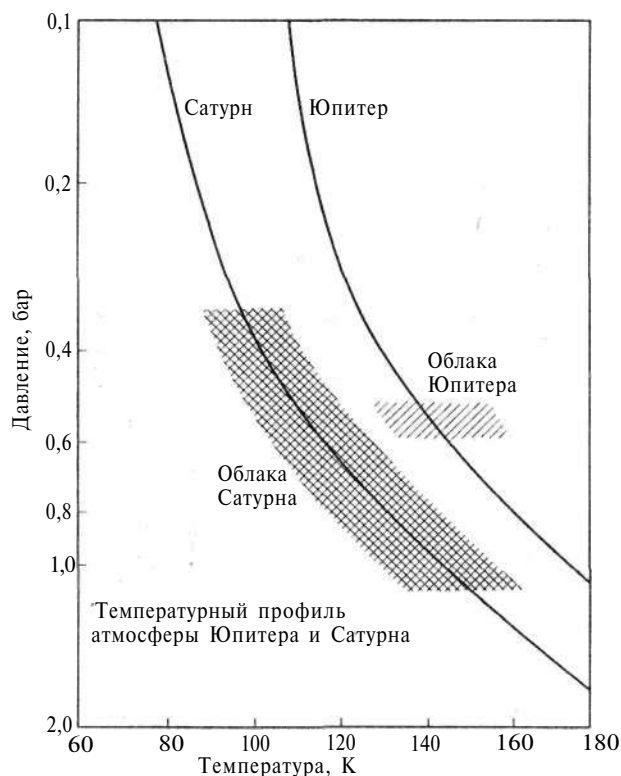


Рис. 6.2. Схема строения облачного слоя Сатурна и Юпитера. Надоблачная дымка ухудшает видимость поясов и зон

Солнце, как оно видно

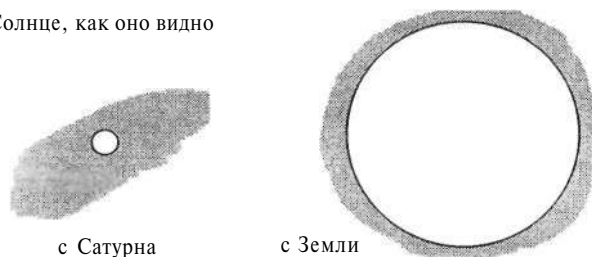


Рис. 6.3. Сравнительные угловые размеры Солнца, видимого с Сатурна (слева) и с Земли. Если рассматривать рисунок с расстояния 3,5 м, угловой диаметр изображения будет равен углу, под которым видно Солнце

слоя для Юпитера и Сатурна. Вертикальная шкала линейна в отношении высоты. Правая кривая относится к Юпитеру, левая — к Сатурну. Поскольку предполагается, что структура и состав облачного слоя обеих планет сходны, нижняя граница облаков находится в пределах одной и той же температуры — около 150 К. Но из-за вчетверо меньшего количества тепла, получаемого на единицу площади, верхняя граница облачного слоя Сатурна не совпадает с ее положением у Юпитера. Спектральные полосы аммиака у Сатурна выражены

слабо. Это связано с низкими температурами в надоблачной атмосфере, где пары аммиака вымораживаются. Образующийся здесь довольно плотный слой тумана скрывает структуру поясов и зон, которая так хорошо видна на Юпитере. Снимок фото 54 был специально обработан, чтобы стали видны подробности.

Измеренная яркостная температура внешнего слоя облаков на Сатурне составила всего 80—90 К, а эффективная температура планеты 95 К. Поток солнечной энергии, достигающий Сатурна, в 91 раз меньше, чем на Земле. Солнце на небе Сатурна выглядит совсем маленьким диском (рис. 6.3). С учетом альбедо, несмотря на огромные размеры, планета получает в 2,7 раз меньше энергии, чем наша маленькая Земля. Вместе с излучением надоблачной атмосферы тепловой поток от Сатурна по разным оценкам в 1,9—2,2 раза превышает поток энергии, получаемой от Солнца. Отчасти это реликтовое тепло, но его недостаточно. В качестве дополнительного источника энергии называют гравитационную дифференциацию. Согласно одной из гипотез, более тяжелый гелий медленно погружается к центру планеты, что вызывает выделение энергии, в конечном счете излучаемой в космос. Не исключено, что эта гипотеза находит подтверждение. В атмосфере Сатурна содержится 94% водорода (по объему), а гелий составляет почти все остальные 6%. Напомним, что в атмосфере Юпитера гелия около 11%. Так как состав обеих планет одинаков, такое различие может быть указанием на значительную долю «утонувшего» гелия на Сатурне. Пока мы не можем указать, как это скажется на схеме внутреннего строения Сатурна, которая приводилась в гл. 5 (см. рис. 5.5).

Радиоисточник у 80° с.ш. Магнитосфера Сатурна

Одна из загадочных находок «Вояджера-2», относящихся к самой планете, — таинственный источник радиоизлучения, наблюдавшийся еще в 1980 г. Все началось с того, что в одном из экспериментов было обнаружено изменяющееся радиоизлучение, исходящее откуда-то из области высоких широт. Сигнал принимался в широкой полосе частот, причем максимальная мощность приходилась на 175 кГц. Так как приемное устройство имело всенаправленную антенну, указать точное направление на источник не удалось. И все-таки была намечена длинная полоса, около $25 \cdot 30^3$ км, в пределах которой должен находиться источник. Вторую такую же полосу дали измерения «Вояджера-2». Пересечение полос указало на положение

источника: у 80-й северной параллели. Дальнейшие исследования еще больше усложнили дело. Оказалось, источник излучает сравнительно короткий весьма мощный импульс с периодом повторения, очень близким к 10 ч 39,4 мин, т.е. 1 раз в сатурнианские сутки. Но и этим дело не исчерпывается: излучение возникает именно в тот момент, когда источник проходит через полуденный меридиан. Служба времени, да и только! Проверьте ваши часы: 12 ч по сатурнианскому времени. Не следует, конечно, понимать это так наивно. Подобно радиоисточнику на орбите Ио излучение таинственного источника на Сатурне тоже регистрируется с достаточно высокой, но не 100%-ной вероятностью, хотя и более высокой, чем у Ио. По характеру излучения удалось найти, что источник достаточно мал по размерам.

Скажем сразу, что разгадки пока нет. Теория могла бы подсказать ответ, если бы магнитное поле Сатурна имело сложный характер. Но поле почти дипольное, гармоники высшего порядка (в отличие от Юпитера) невелики. Период вращения этого района также составляет 10 ч 39,4 мин. Поверхности в земном смысле у Сатурна нет. С чем же связан этот источник? Отмечается странное совпадение: именно в этой точке с помощью ультрафиолетового спектрометра «Вояджера-1» наблюдалось полярное сияние, имевшее вид кольца.

В эксперименте зарегистрированы и другие источники радиозумов внутри магнитосферы Сатурна, но они связаны не с самой планетой, а с плазменными торами на орбитах спутников. За лунами Сатурна тянутся хвосты из нейтральных и ионизованных молекул и атомов газа. «Хвосты» образуют гигантские торы. Вероятно, один из источников такого тора — верхняя атмосфера Титана. Этот тор занимает пространство между орбитами Титана и Реи, т.е. более полумиллиона километров. Он состоит в основном из нейтрального водорода. Плазменный тор охватывает спутники Энцелад, Тефия и Диона. Магнитосфера взаимодействует с заряженными частицами и заставляет тор вращаться вместе с нею. Центробежные силы стягивают нейтральный газ и плазму в диск, расположенный в плоскости колец, причем более тяжелые ионы уходят на периферию. И хотя в целом явление легко понять, количество тяжелых ионов, зарегистрированных в эксперименте, намного превысило ожидаемое.

Магнитосфера Сатурна (рис. 6.4) значительно отличается от магнитосферы Юпитера. Напряженность магнитного поля планеты на уровне видимых облаков на экваторе (радиус

60 тыс. км) составляет чуть больше 0,2 Гс (на поверхности Земли 0,35 Гс). Но магнитный момент Сатурна гораздо больше, чем у Земли, из-за объема планеты. Магнитное поле Сатурна имеет уникальный характер. Это как раз тот случай в практике научных исследований, когда из-за новых экспериментальных результатов почти законченная теоретическая постройка дает трещину.

Механизм возбуждения магнитного поля планет, «планетарное магнитное динамо», долго не поддавался теоретическим объяснениям. Наконец, удалось найти некоторые аналитические решения, которые доказали свою работоспособность на примерах Земли, Меркурия и Юпитера. Для возбуждения поля необходимым условием был угол (скажем, 10–12°) между осью вращения планеты и осью магнитного диполя. Именно таков угол между этими осями у перечисленных планет. А вот у Сатурна ось вращения до долей градуса совпадает с осью диполя. Сразу же возникло много проблем (которые слишком специальные, чтобы их здесь рассматривать) и необходимость пересмотра теоретических представлений.

Высказано предположение, что в случае Сатурна поле создается весьма глубокими его частями по сравнению с Юпитером. Направление поля у обеих планет одинаково и противоположно направлению поля Земли. Магнитосфера Сатурна имеет более правильный и симметричный вид, чем весьма протяженная и сложная по форме магнитосфера Юпитера (хотя «Вояджер-2», который 5 суток шел в радиационных поясах, показал, что не все так просто). Ударная волна, где газодинамическое давление солнечного ветра уравнивается упругостью магнитосферы, с дневной стороны находится примерно на расстоянии $35R$ (радиусов планеты). С ночной стороны магнитосфера простирается на огромные расстояния. Радиационные пояса имеют правильную форму и состоят из нескольких характерных зон, образующих типичную тороидальную конфигурацию с внешним радиусом $(20–22)R$. В радиационных поясах имеются пустые полости, где для заряженных частиц спутники Сатурна играют роль своеобразной «метлы». Наиболее эффективным «пылесосом» оказались кольца, так как энергичные частицы, которые путешествуют взад-вперед вдоль магнитных силовых линий (см. рис. 6.4), легко захватываются огромной площадью материала колец. Вблизи них концентрация частиц оказалась ничтожной. На сегодня здесь самое «пустое» место в отношении заряженных частиц в Солнечной системе, хотя кольца, вероятно, понемногу

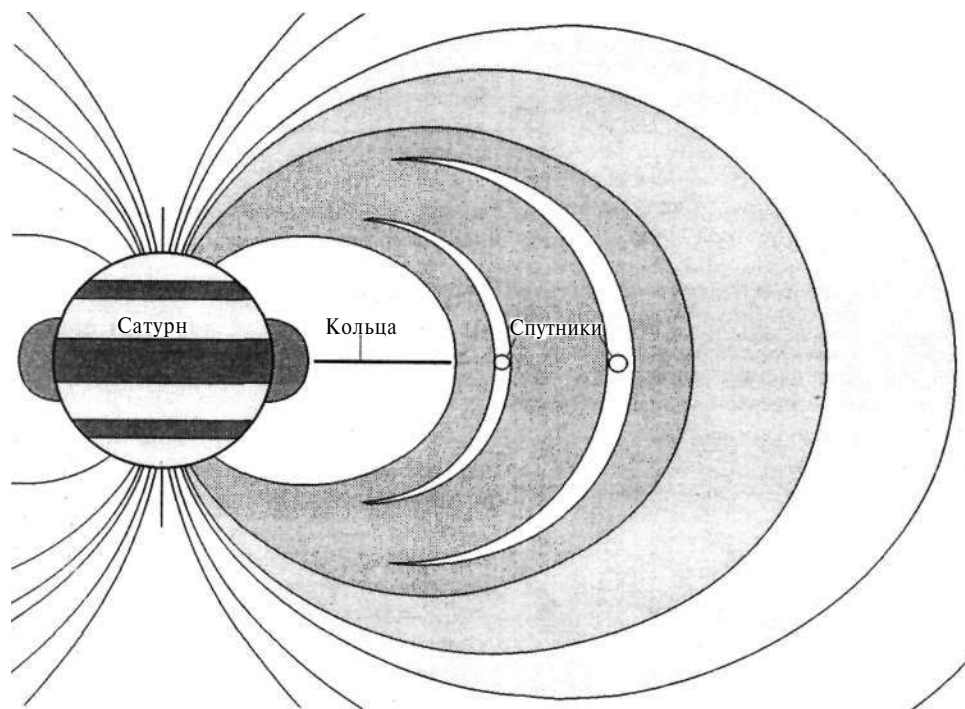


Рис. 6.4. Магнитосфера Сатурна. Заряженные частицы двигаются от полюса к полюсу вдоль силовых линий и перехватываются частицами колец и спутниками. Благодаря захвату в этих зонах наблюдается чрезвычайно низкая концентрация электронов и ионов

сами выделяют нейтральный водород. Приборы зарегистрировали его ультрафиолетовое свечение. Как видно из рис. 6.4, вся зона вокруг колец пуста.

В результате Сатурн создает в радиодиапазоне куда меньше шумов, чем можно было ожидать исходя из сходства с Юпитером. Взаимодействие плазменных торов с магнитосферой и со спутниками создает радиоизлучение, которое принималось на аппаратах. Такие всплески с максимумами на частоте в несколько килогерц принимались с орбит Дионы и Мимаса. Но особенно мощные импульсы возникают в неизвестном механизме, который связывали с кольцами.

Волнующееся море колец

Читатель, вероятно, помнит наш рассказ о резонансах и соизмеримостях в движении планет. Куда нагляднее резонансы выражаются в движении бесчисленных частиц, образующих кольца планет. Под действием резонансов от спутников планеты возникают сгущения, разрежения и щели («деления») в кольцах, формируются их внешние и внутренние границы и даже происходит сортировка материала, образующего то или иное кольцо.

Задолго до начала космической эры ученые поняли, что неперемнная деталь — деление Кассини в кольце Сатурна — образована гравитационным влиянием спутника Мимас. Кстати, деление носит имя астронома XVII в., который одним из первых отметил его существование. Орбитальный период частиц кольца на этом расстоянии от центра Сатурна составляет точно половину периода обращения спутника. Под влиянием Мимаса в движении частиц по круговым орбитам возникают возмущения, которые в конечном счете выражаются в образовании щели между кольцами А и В. Возмущения запрещают частицам перемещаться из одного кольца в другое, образуя так называемый резонансный барьер. Но не только деление Кассини определяется такими резонансами. И как мы увидим ниже, не только резонансы определяют движение частиц кольца.

Снимки колец, сделанные «Вояджером-1» в 1980 г. (фото 57), поставили столько вопросов, что было ясно: ответить на все «как» и «почему» «Вояджер-2» не успеет. Поэтому решено было сосредоточить усилия на «главных» загадках, связанных с кольцами С, В, А, F, с делением Кассини, динамикой кольца В и странными радиальными образованиями и пятнами на кольце В, получившими назва-

ние «споки» (споки по-английски значит «спицы»).

Кольца расположены в таком порядке от планеты: D, C, B, A, F, G, E. Три основных кольца видны на фото 58. В наблюдениях 1980 г. новые кольца D и G лишь однажды мелькнули в одном из ракурсов. Теперь их существование было подтверждено. Невидимое оптическими приборами самое внешнее кольцо E регистрировалось устройствами, реагирующими на поля и заряженные частицы. Кольцо D очень неплотное и доходит, по-видимому, до верхних слоев атмосферы, как у Юпитера.

Нельзя сказать точно, сколько колец у Сатурна. В 1980 г. их насчитали несколько сотен. А измерения «Вояджера-2» говорят о тысячах колец (фото 59). Тем не менее выяснилось, что в качестве постоянных деталей следует все-таки рассматривать более или менее крупные образования. Причин две. Во-первых, есть основания считать, что очертания многих колец, даже больших, непостоянны. Во-вторых, кольца состоят из достаточно больших глыб и обломков, что не всегда позволяет точно указать, где кончается одно кольцо и начинается другое. Радиусы наиболее выраженных колец указываются в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Радиусы колец Сатурна

Кольцо, или деление	Внешний радиус, км	Внутренний радиус, или ширина, км
F	140 180	50
A	136 780	122 170
B	117 520	≈92 000
C	≈92 000	74 510
D	74 510	66 970
Энке	133 570	330
Кассини	119 760	4 450

Деление Кассини, которое считали местом, свободным от материала колец, на самом деле заполнено веществом с другой степенью измельченности и меньшей концентрацией. Это установлено путем наблюдения колец с теневой стороны (фото 60, 61). Против света наиболее плотные части кольца благодаря многократным отражениям и заметному поглощению выглядят темными. На фото 60 и 61 это кольца A и B. Темными были бы и промежутки, если бы они были пустыми. На самом деле самые светлые образования — кольцо F и особенно деление Кассини. При ширине деления 4500 км в нем видно не менее пяти широких колец (см. фото 61), расположенных вплотную друг к другу. В свое время обсуждалась идея направить «Пионер—Сатурн» сквозь деление

Кассини, от которой в последний момент отказались. Осторожность руководителей полета оказалась очень уместной: аппарат бы неминуемо погиб, хотя эти кольца наименее плотные (а потому и светлые). Но не только представления о делении Кассини радикально изменились после сближения аппаратов с планетой.

Во время сближения «Вояджера-2» с Сатурном был проведен интересный эксперимент. Поляриметр с очень высоким разрешением (до 150 м на кольцах) был направлен на яркую звезду Дельта Скорпиона и в фотометрическом режиме благодаря движению аппарата пересекал кольца. В результате, получился фотометрический разрез части кольца A вблизи деления Энке (рис. 6.5). Легко отождествить сравнительно крупные части кольца; но при высоком разрешении уже становится трудно указать, где проходит граница отдельных узких «колечек». Вполне вероятно, что многие минимумы кривой определяются отдельными глыбами и обломками. Общая картина получается настолько сложной, что один из опубликованных обзоров был назван примерно так: «Безумный мир колец». В этом же эксперименте были определены наиболее типичные размеры элементов колец. Они составили 10 м для кольца A, 8 м — в делении Кассини, 2 м — в кольце C. Разумеется, в каждом из них есть элементы и других размеров, от пыли до крупных блоков, на что указывает рис. 6.5. Природа материала колец та же, что и у спутников Сатурна, — слегка загрязненный водяной лед, а в некоторых частях колец снег.

Очень резкими оказались внешние края колец A и B (фото 61). Здесь резонансы проявляются весьма остро. Удалось оценить толщину края кольца A: она не превышает 150 м. Даже если предположить, что в какой-то части толщина достигает 0,5 км, моделью колец будет диск толщиной в 0,5 мм и диаметром 270 м (круг из плотной бумаги диаметром в четверть километра!)

Стабильность колец и само их существование предполагает какой-то механизм, который удерживает их на месте. Если бы его не было, они давно рассеялись бы в пространстве или выпали на планету. На первый взгляд это кажется парадоксальным, так как каждый элемент кольца движется по своей орбите. Но парадокса нет: при достаточной плотности вещества в кольцах их элементы должны постоянно сталкиваться между собой, благодаря чему одни частицы приобретут скорость, достаточную для убегания, другие замедлятся и станут переходить на более низкие орбиты, что приведет к новым столкновениям и измель-

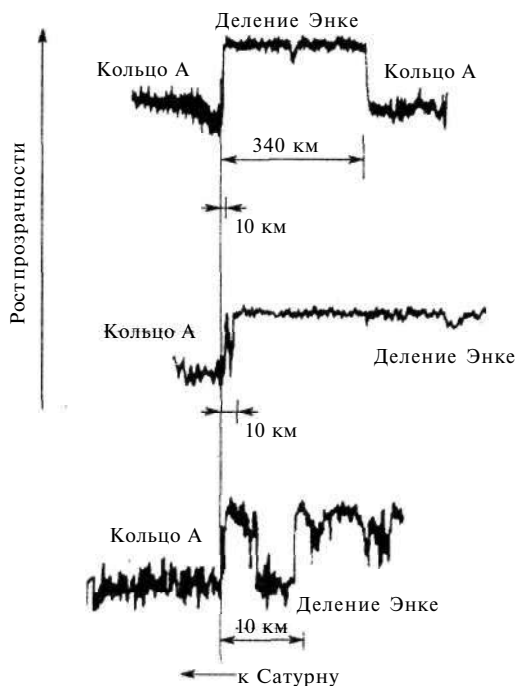


Рис. 6.5. Фотометрический разрез кольца А вблизи деления Энке

чению мягкого вещества элементов (льда). В результате жизнь колец должна быть очень короткой (в космогонических масштабах). Но против недавнего возникновения колец говорят многие факты, в том числе присутствие колец у других планет — Юпитера, Урана, Нептуна. Правильнее исходить из того, что кольца Сатурна благополучно существуют уже очень давно. Стало быть, что-то действительно удерживает их на своих местах.

Еще несколько лет назад казалось, что теория резонансов объясняет структуру колец полностью. Затем, когда кольца увидели вблизи, предполагалось, что если будет точно известно положение всех отдельных колец и делений (или щелей), задача будет решена в терминах резонансов. Но эта работа оказалась бесполезной и была прекращена. Резонансов явно не хватает на бесчисленные «колечки» и щели, которых, вероятно, десятки тысяч.

Кольцо F, споки и новые идеи

Очертания колец меняются. Вероятно, этого можно было ожидать. Но то, что преподнесло кольцо F, вызвало у специалистов некоторый шок. Кольцо F было замечено еще на первых изображениях «Пионер—Сатурна». Эта тонкая светлая полоска шириной от 50 до нескольких сотен километров находится на расстоянии 4000 км от края кольца А (или в 140–180 км

от центра планеты). В первых сообщениях указывалось, что по неизвестным причинам линия кольца выглядит прерывистой. Загадка прояснилась, когда были получены снимки «Вояджера-1»: кольцо оказалось свитым из двух тонких «шнуров» с шагом около 7000 км. Рядом с ними проходит узкая полоса, различить подробности которой в 1980 г. не удалось (см. фото 61 и рис. 6.6). Среди различных объяснений природы кольца F было и такое: структура его определяется гравитационным воздействием небольших спутников, орбиты которых проходят вдоль кольца.

Пока теоретики разрабатывали аналитическую базу этой гипотезы, к Сатурну подошел «Вояджер-2» и передал свои снимки. К всеобщему изумлению, теперь кольцо F было ровным, как инверсионный след за самолетом в хорошую погоду (рис. 6.7). Лишь один раз знакомые скрученные шнуры снова промелькнули на экране. На всех остальных снимках «Вояджера-2» никаких перевитых колец нет, вместо них — одно кольцо постоянной толщины. Когда и как изменялся вид кольца F, остается неизвестным. Считается существенным, что кольцо действительно находится между двумя спутниками, которые получили название «пастухи» (или, по аналогии с английским термином, «овчарки», «сторожевые собаки»). Это спутники Прометей и Пандора, которые движутся, обгоняя друг друга каждые 25 дней. Предполагалось, что скручивание кольца происходит у точки соединения обоих спутников. Но это не подтвердилось; по-видимому, взаимодействие их с кольцом F сложнее. Анализ его структуры методом фотометрического разреза указал на присутствие примерно десяти слабых компонентов там, где телевизионная камера показывала три компонента.

Еще одно удивительное образование — тонкое эксцентрическое кольцо в делении Энке. С одной стороны планеты кольцо почти касается внутренней границы деления, с другой — проходит по его середине (рис. 6.8). Это необычное образование получило неофициальное название «Энке Дудл». Многие «колечки» имеют такой несимметричный вид. На рис. 6.9 можно видеть пример такого образования в кольце C. (Здесь сложены диаметрально противоположные половинки снимка.)

Распространяется мнение, что изменение формы некоторых из колец происходит постоянно. Множество мелких деталей заставляет теоретиков искать объяснение полосам, делениям, волнам, изгибам и прочему кажущемуся хаосу. Предложено несколько новых гипотез о механизмах работы колец. Согласно одной из них, в кольца как бы вмонтированы

небольшие спутники, размерами около 30 км. Они создают возмущения и образуют щели, которые по ширине могут намного превосходить сами спутники. Однако самый тщательный анализ показал, что в 90% колечек таких спутников нет, а там, где есть, они слишком малы, чтобы вызвать ожидаемые явления.

Согласно другой гипотезе, в кольцах распространяются волны плотности, которые и

определяют многообразие их динамики. Есть интересное наблюдение, которое, возможно, имеет отношение к возникновению волн плотности. Если совместить два изображения колец, разделенные углом 180° , возникает странное несоответствие: при совпадении внутренней границы кольца В и внешней кольца А внутренняя граница деления Кассини для двух изображений расходится на 50 км. Это объясняется гравитационным резонансом с Мимасом. Внешний край кольца В прецессирует с периодом 22,6 ч (период обращения Мимаса), за счет чего в кольцо накапливается энергия, вызывающая возмущение. Большая ось эллипса, образованного кольцом В, направлена под углом 90° к Мимасу. Это было интересной находкой, так как противоположно хорошо известным приливным явлениям в системе Земля—Луна. Наконец, еще одна гипотеза рассматривает в качестве источников возмущений столкновения между элементами колец. Вероятно, столкновения также влияют на структуру колец.

О спокях заговорили после полета и снимков «Вояджера-1». Однако изучение исторического материала показало, что упоминания о них встречались еще в прошлом веке, когда наиболее зоркие астрономы изображали характерные зубцы на своих зарисовках. Типичные спокы показаны на рис. 6.10, где они видны как темные образования на фоне средней части кольца В. Их можно видеть также как светлые полосы на рис. 6.7, где благодаря перспективе спокы, да и все другие детали колец, сжаты в полосы. Спокы могут быть светлыми или темными, это зависит от направления освещения: они выглядят темными пятнами при обратном рассеянии света и светлыми — при прямом, что говорит об очень малых размерах рассеивающих частиц. Спокы наблюдались даже

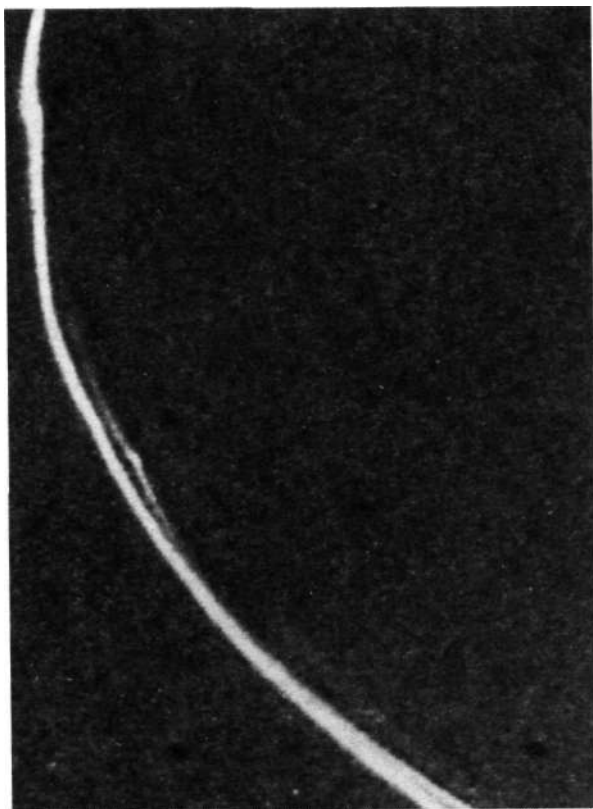


Рис. 6.6. Структура кольца F по снимкам «Вояджера-1». Снимок NASA

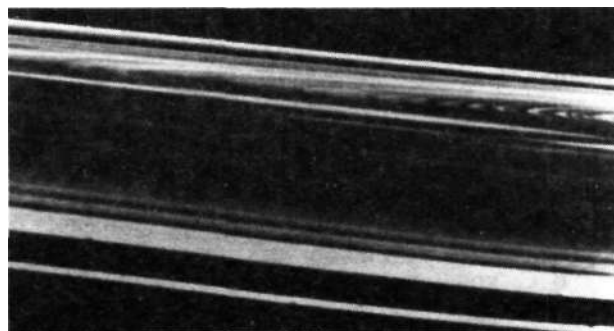
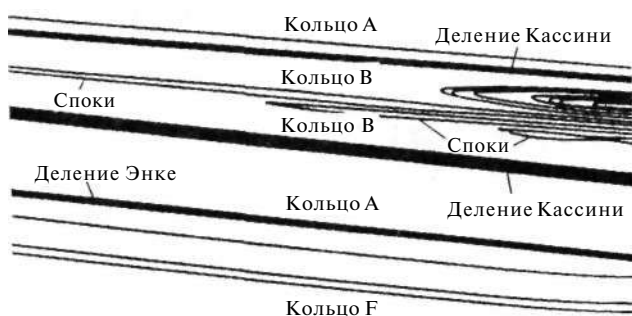


Рис 6 7 Вид колец за 88 с до пересечения аппаратом их плоскости. На первом плане — кольцо F постоянной ширины, за ним — кольцо А и деление Энке. Самое дальнее — удаленная часть кольца А. Светлые вытянутые детали — спокы. Слева — схема изображения. Снимок NASA

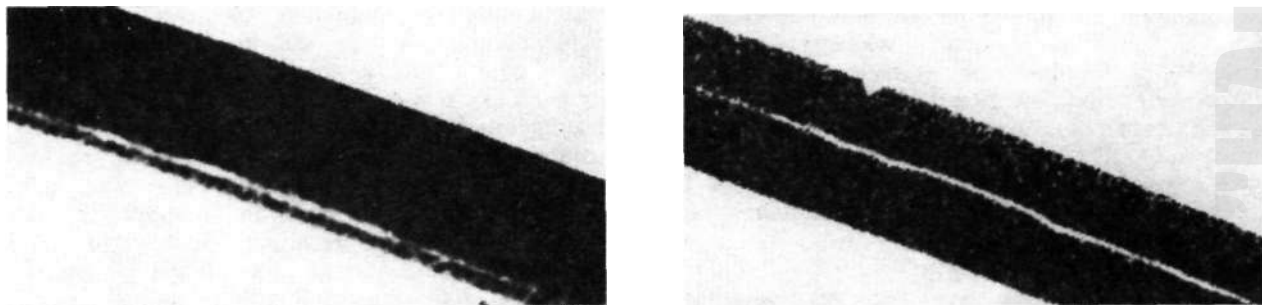


Рис. 6.8. Некоторые несимметричные (некруговые) образования в делении Энке. Снимок NASA

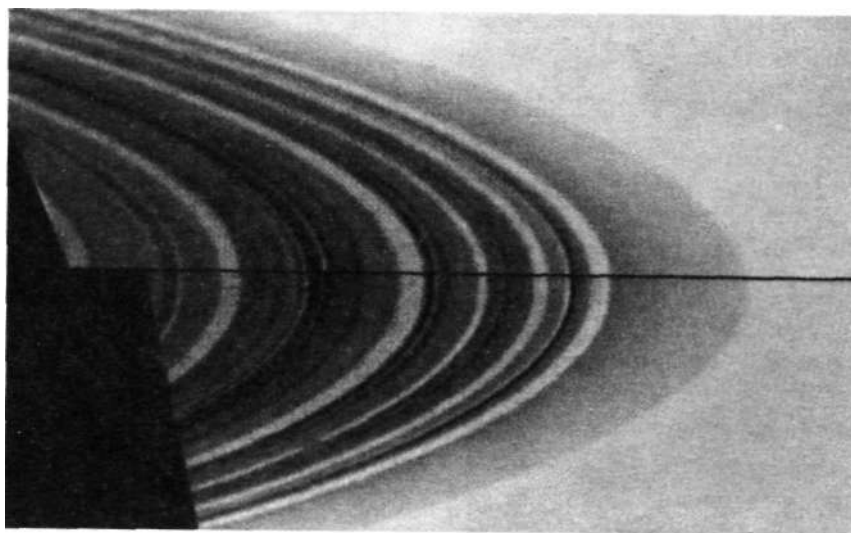


Рис. 6.9. Асимметричное узкое колечко в кольце С. Чтобы продемонстрировать его эксцентricность, здесь сложены две противоположные половинки снимка. Снимок NASA

на теневой стороне колец, по-видимому, в свете, рассеянном Сатурном. Они не подчиняются кеплеровскому распределению скоростей в кольцах и отстают от вращения последних, двигаясь с угловой скоростью магнитосферы. Природа их остается совершенно неясной. Установлено, что спокки развиваются быстро, за время от 15 до 60 мин; при этом они успевают распространиться на расстояние до $12 \cdot 10^3$ км в радиальном направлении, что требует скорости от 3,5 до 15 км/с. Высказано предположение, что они представляют тонкую ледяную взвесь или пыль, удерживаемую силами электростатического взаимодействия над плоскостью колец.

В кольцах действительно наблюдаются электрические явления, вероятно, связанные с механизмами разделения электронов и ионов либо с электризацией соприкасающихся частиц. При пересечении аппаратом плоскости колец (за кольцом G) на него воздействовало нечто, что могло быть потоком частиц тонкой электри-

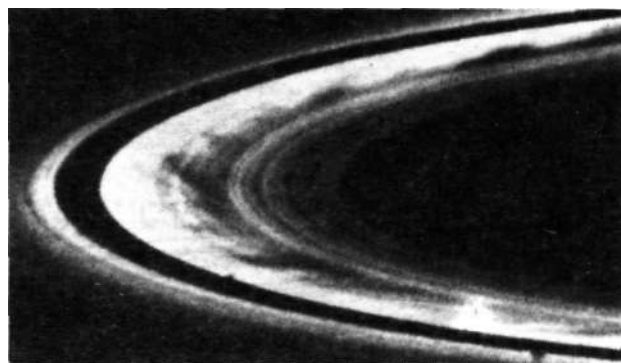


Рис. 6.10. Радиальные образования (спокки) на кольце В. Снимок NASA

чески заряженной пыли, двигающейся со скоростью 13 км/с.

Теория предсказывает, что заряды, которые могут накопиться в кольцах благодаря различным механизмам, например трибоэлектризации, очень значительны. И действительно, оба аппарата отметили мощные электромагнитные

импульсы, источники которых, как предполагалось, находились в кольцах, а импульсы появлялись во время электрических разрядов. Их особенность — очень большая мощность, в 10^4 — 10^5 раз больше, чем в земных молниях.

Но истина снова оказалась сложнее всех гипотез. Предположения о сверхмолниях в кольцах были основаны на следующих соображениях. Во-первых, Сатурн обладает сравнительно плотной ионосферой, которая, согласно теории, не должна пропускать сигналы от планеты в диапазоне частот, принимавшимся «Вояджерами». Во-вторых, периодичность, с которой повторялись короткие всплески в диапазоне 20 кГц—40 МГц, составляла 10 ч 10 мин. На Сатурне нет на первый взгляд объектов с таким периодом вращения — он на полчаса короче периода магнитосферы. Наконец, было просто непонятно, к чему на Сатурне можно отнести огромную мощность этих коротких импульсов, достигавшую 10 тыс. МВт (и с длительностью от 15 до 400 мс).

И все-таки источник оказался на Сатурне. Он связан с быстрым струйным течением в экваториальной зоне, направленным к востоку. Его скорость достигает 500 м/с. В своем движении оно обгоняет вращение планеты, поэтому период повторения положения облачной структуры укорачивается и составляет 10 ч 10 мин. Предполагается, что в этой зоне образуются сверхмолнии, излучение которых в радиодиапазоне и принималось на аппаратах. Излучающая зона вытянута вдоль экватора на 60° (около 25 тыс. км). Кстати, интервал, в течение которого она находится на невидимой стороне планеты, длится 3 ч, а для подозревавшейся части колец — только 2 ч. Это тоже довод в пользу планеты, а не колец, так как перерывы в приеме импульсов на «Вояджерах» составляли по 3 ч (через каждые 7 ч приема).

С прозрачностью ионосферы для радиоволн положение не совсем ясное, но установлено, например, что в тени колец и на ночной стороне планеты прозрачность быстро увеличивается и появляются более низкие частоты.

Здесь стоит упомянуть о том, что похожие импульсы электромагнитного излучения, которые принимались на аппарате в его сближении с Юпитером, кажется, как-то связаны с Большим Красным Пятном.

Мы уже рассказывали о «службе времени» на Сатурне. Оказалось, что электромагнитная (или электрическая?) активность присуща вообще всему меридиану, который проходит через таинственный радиоисточник. Но и это еще не все. Выход этого меридиана из-за утреннего терминатора определяет... появление спок на

кольце. Вот уж, «где Днепр, а где именье». Как, чем связаны меридиан (точнее, сектор вблизи меридиана) и спок, остается загадкой. Но их появление — меридиан на терминаторе, спок на кольце — коррелировано в высокой степени. А прохождение этим меридианом полудня соответствует мощным всплескам низкочастотного радиоизлучения.

Не исключено, что нынешние представления не смогут полностью объяснить механику и физику колец. В таком случае полученные экспериментальные данные послужат хорошей основой для будущих теорий.

Уточнение структуры колец потребовало и уточнения системы наименований. Недавно предлагалось переименовать деление Энке в деление Килера. Основой послужили не вызывающие сомнения наблюдения Килера в Ликской обсерватории, опубликованные в «The Astronomical Journal» за 1889 г. Килер пользовался сравнительно большим телескопом с окуляром, дававшим увеличение $\times 1500$. Предложение мотивировалось тем, что хотя сообщения о наблюдениях Энке относятся к 1837 г., но они связаны, вероятно, с какой-то другой деталью колец, так как различить «деление Энке» в свой 22-сантиметровый телескоп Энке, скорее всего, не мог. В конце концов деления Энке и Кассини остались на своих местах. Щель в кольце С, у 87,5 тыс. км, получила имя Максвелла, щель у 117 тыс. км — имя Гюйгенса, а имя Килера присвоено щели у внешнего края кольца А, 136,5 тыс. км от центра Сатурна, вне деления Энке.

Спутники Сатурна

Система спутников Сатурна довольно сложна. Общее число их, включая ряд малых спутников, открытых в 1980 г. при пролете возле Сатурна космических аппаратов, составляет 17. Часть наиболее крупных спутников (вместе с планетой) показана на фото 62. В 1980 г. были получены телевизионные снимки всех семнадцати. Крупным планом открытые еще в XVII—XVIII вв. Мимас, Энцелад, Тефия, Диона и Рея. Мельче получились снимки Гипериона и Япета. На снимках обнаружено также несколько совсем маленьких тел, которые зарегистрированы как отдельные точки. В число семнадцати спутников они не входят.

Название «ледяные спутники» наиболее соответствует спутникам Сатурна. Некоторые из них имеют среднюю плотность $1,0 \text{ г/см}^3$, что соответствует чистому льду. Плотности других несколько выше, но тоже невелика. Например, Рея, пятый крупный спутник Са-

турна, имеет плотность $1,3 \text{ г/см}^3$. Присутствие большого количества льда в составе спутников Сатурна — это прямое указание на их образование в зоне низких температур, которые и ныне характерны для внешней части Солнечной системы. Согласно существующим теориям, в период формирования планет на периферии протопланетного облака температура была очень низка и легкие летучие вещества, как водяной пар, конденсировались преимущественно на периферии.

Рассмотрим некоторые особенности системы спутников Сатурна. Их основные небесно-механические данные приводятся в табл. 5, причем названия тех девяти из них, которые были известны в докосмическую эпоху, выделены.

В течение 1979—1981 гг. открыто восемь новых спутников Сатурна. Причем некоторые из них открыты новыми наземными средствами благодаря прохождению Земли через плоскость колец.

Спутники планеты и ее кольца предлагают небесной механике несколько загадок; они как раз и возникли в 1979—1980 гг., когда Земля проходила через плоскость колец (экватор Сатурна наклонен к плоскости орбиты на $26^\circ 45'$). Кстати, такие прохождения повторяются 1 раз в 14—15 лет. Это редкое явление наблюдалось в 1966 г., а затем в конце 1979 и начале 1980 г. Земля прошла через плоскость колец дважды: 27 сентября 1979 г. и 12 марта 1980 г. В этот период кольца были повернуты к Земле ребром и почти не видны, что астрономы использовали для поисков слабых образований вблизи Сатурна. В 1980 г. впервые удалось наблюдать с Земли кольцо Е в виде слабого повышения яркости на расстоянии 80 тыс. км от внешнего края наружного кольца А. Но этим дело не ограничилось. Используя современную астрономическую технику, несколько групп исследователей объявили о новых удивительных открытиях. Например, по орбите Дионы, четвертого крупного спутника, движется еще один спутник. Он находится вблизи лагранжевой точки L_4 .

Здесь следует сказать несколько слов о том, что такое «лагранжевы точки». Среди знаменитых задач теоретической астрономии есть такие, решению которых посвятили свою жизнь целые поколения специалистов. Такова знаменитая «задача трех тел», в которой рассматривается динамика трех гравитирующих масс (взаимно влияющих друг на друга). Задача отличается чрезвычайной сложностью, если рассматривать ее в общем виде. Но некоторые частные решения были найдены давно. Так, в работах Лагранжа было показано, что если одно

из трех тел намного массивнее других, то устойчивой может быть конфигурация, когда два тела меньшей массы находятся на одной и той же орбите, на расстоянии 60° друг от друга. Возможно даже присутствие на одной и той же орбите трех тел, также разделенных углами по 60° . Такие спутники называются коорбитальными. (Существуют и другие точки Лагранжа.)

Спутник Елена находится именно в такой «гравитационной ловушке», двигаясь впереди крупного спутника Диона, примерно в 72° , причем по некоторым данным, «качается» относительно точки L_4 и даже может приблизиться к Дионе с тыльной стороны, после чего, отставая, расходится с нею. Как ни странно, позади Дионы, в другой лагранжевой точке, спутника нет.

Все вновь открытые спутники сравнительно малы по размерам, имеют геометрическое альbedo 0,3—0,5 и неправильную, за одним исключением, форму. Кольцо А обладает очень резким краем, что трудно объяснить в рамках старых представлений о динамике колец. Напомним, что в нескольких тысячах километров от внешнего края кольца А находится еще кольцо F Сатурна. Исследование динамики этих колец и близких к ним небольших спутников показало, что именно спутники поддерживают резкую границу колец F и А (а возможно, определяют и другие их особенности). Своим гравитационным воздействием спутники как бы фокусируют движение отдельных частиц в кольцах, не допуская их выпадения из общего ансамбля.

Орбиты малых спутников, обладающих этими особенностями, располагаются следующим образом. У самого внешнего края кольца А, на среднем расстоянии от центра Сатурна 137 670 км, находится «пастух» кольца А — Атлант (1980S28) — размерами около 20 км. Прометей (1980S27) и Пандора (1980S26) — соответственно внутренний и внешний «пастухи» кольца F, с размерами 70×40 и 55×40 км и средним радиусом орбит 139 353 и 141 700 км. Два коорбитальных спутника, Янус и Эпиметей (1980S1 и 1980S3), немного больше: 110×90 и 70×55 км. Их орбиты отличаются всего на 50 км: 151 422 и 151 472 км. На орбите Тефии (294 700 км) в лагранжевых точках L_4 и L_5 находятся маленькие тела размером 50—60 км, Калипсо и Телесто (1980S25 и 1980S13), последнее из которых может иметь более или менее правильную шаровую форму. Наконец, в точке L_4 на орбите Дионы (377 500 км) находится такое же

Т а б л и ц а 5. Спутники Сатурна

Название или обозначение*	Радиус орбиты, тыс. км	Орбитальный период, сут	Эксцентриситет орбиты	Наклонение орбиты к экватору, градус	Радиус спутника, км	Год открытия
Атлант (XV Атлас)	137,67	0,602	0,002	0,3	(19×13)	1980
Прометей (1980S27)	139,35	0,613	0,004	0	70×50×37	1980
Пандора (1980S26)	141,70	0,629	0,004	0,1	55×42×33	1980
Эпиметей (1980S3)	151,42	0,694	0,009	0,3	70×57×50	1966
Янус (1980S1)	151,47	0,695	0,007	0,1	110×95×80	1966
<i>Мимас</i>	185,54	0,942	0,020	1,52	196	1789
<i>Энцелад</i>	238,04	1,370	0,004	0,02	250	1789
<i>Тетия</i>	294,67	1,888	0	1,86	530	1684
Телесто (1980S13)	294,67	1,888			(12×11)	1980
Калипсо (1980S25)	294,67	1,888			15×12×8	1980
<i>Диона</i>	377,42	2,737	0,002	0,02	560	1884
Елена (1980S6)	377,42	2,737	0,005	0,2	(18×15)	1980
<i>Рея</i>	572,04	4,518	0,001	0,35	765	1672
<i>Титан</i>	1221,86	15,945	0,029	0,33	2575	1655
<i>Гиперион</i>	1481,1	21,277	0,104	0,43	175×117×100	1848
<i>Япет</i>	3561,3	79,331	0,028	(7,52)	730	1671
<i>Феба</i>	12954	550,4	0,163	175	110	1898

*) В скобках дается регистрационное название спутника.

маленькое тело — Елена (1980S6). Вся группа спутников-малюток показана на рис. 6.11.

Большое количество спутников малых размеров что-то подсказывает относительно условий формирования системы Сатурна. Не исключено, что они образовались из-за разрушения сравнительно крупного небесного тела в результате его столкновения, например с астероидом или с ядром большой кометы. Заманчиво предположить, что из менее крупных обломков могло образоваться и само кольцо Сатурна.

Перейдем к классическим (крупным) спутникам Сатурна. Все они (кроме Фебы) находятся в синхронном вращении, т.е. постоянно обращены к Сатурну одной стороной. Масса, плотность и отражательные свойства этой группы спутников приведены в табл. 6. Эти спутники известны давно, но данные о размерах, альbedo и средней плотности существенно уточнены либо установлены впервые.

Первый из них (и самый маленький) — Мимас (фото 63). Обращает на себя внимание относительно большая глубина метеоритных кратеров, которые покрывают всю поверхность

Мимаса, подобно Луне или Меркурию. Диаметр Мимаса всего 390 км (примерно 1/10 диаметра Луны); на его поверхности (как и на поверхности других исследованных спутников Сатурна) нет образований, подобных вулканическим кратерам Ио. Зато диаметр наибольшего ударного кратера на Мимасе достигает 130 км, т.е. 1/3 диаметра самого спутника! Находится кратер посередине стороны, обращенной к Сатурну. Диаметр только центральной горки этого кратера около 30 км. Мимас обращается вокруг Сатурна на расстоянии 159 тыс. км и завершает один оборот за 0,9 сут. Средняя плотность Мимаса мала: около 1,2 г/см³, что говорит о его ледяном составе с небольшой примесью силикатных материалов.

Один из интереснейших спутников Сатурна — Энцелад. Это круглое тело диаметром 500 км с плотностью 1,1 г/см³ и очень светлой поверхностью (фото 64). Съемка с высоким разрешением показала, что поверхность Энцелада несет следы каких-то потоков глобальной протяженности, которые на своем пути разрушали кратерный рельеф (что указывает на

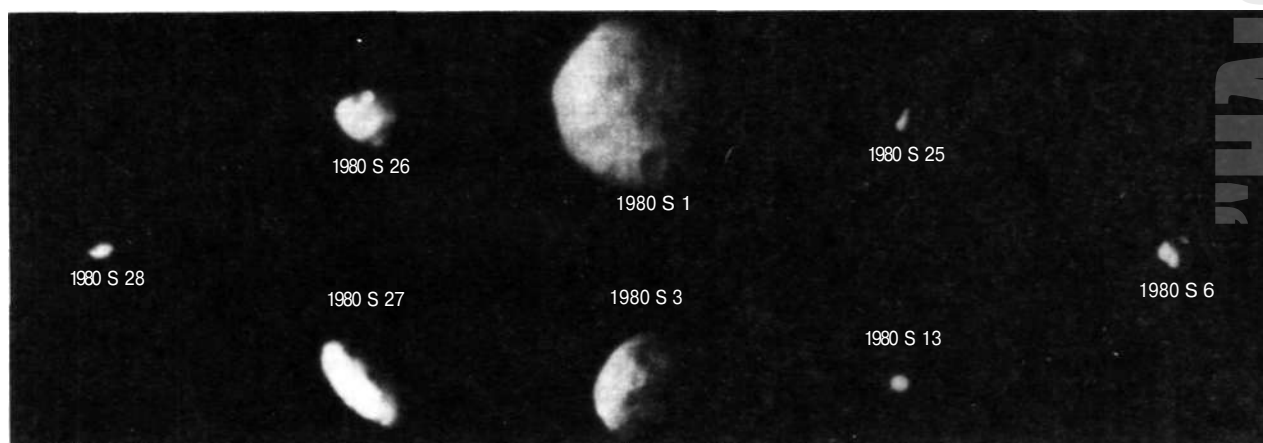


Рис. 6.11. Группа малых спутников. Слева — «пастух» кольца А, затем два «пастуха» кольца F, в центре — два коорбитальных спутника. Справа от центра — два спутника, обращающихся по орбите Тефии; крайний справа обращается по орбите Дионы. Снимок NASA

геологическую «молодость» происходивших явлений).

Т а б л и ц а 6. Масса и отражательные свойства главных спутников Сатурна

Название	Масса, г	Средняя плотность, г/см ³	Геометрическое альbedo
Мимас	$3,8 \cdot 10^{22}$	1,2	0,6
Энцелад	$7,2 \cdot 10^{22}$	1,1	1,0
Тефия	$6,2 \cdot 10^{23}$	1,0	0,8
Диона	$1,0 \cdot 10^{24}$	1,4	0,6
Рея	$2,4 \cdot 10^{24}$	1,3	0,6
Титан	$1,4 \cdot 10^{26}$	1,9	
Гиперион			0,3
Япет	$2,0 \cdot 10^{24}$	1,2	0,5/0,05
Феба			0,05

На границе одного из потоков видны остатки более старого рельефа, причем от одного из кратеров остались лишь половина вала и центральная горка (правая нижняя часть снимка). Геологи различают на поверхности Энцелада следы не менее пяти этапов его геологической эволюции. Бескратерные районы датируются возрастом менее 100 млн лет. Так как это всего 2% всей истории Энцелада, полагают, что его недра активны и сейчас. Казалось бы, какие реки могут существовать при средней температуре поверхности тела — 200 °С? Теоретики в качестве возможного источника активности называют приливное рассеяние энергии, вызываемое Дионой и самим Сатурном, но для этого спутник должен был

находиться на более эксцентричной орбите. Впрочем, как мы уже рассказывали в гл. 4, эксцентриситет орбиты в определенных условиях может изменяться. Поэтому нельзя считать невероятным, что на Энцеладе имелись ледяные вулканы, извергавшие воду, водные растворы аммиака и, возможно, метан. Разрушение старых кратеров, вероятно, объясняется тем, что теплые потоки вызывали таяние элементов ледяного рельефа,

Тефия (рис. 6.12) — один из самых больших и близких к планете спутников. Ее диаметр 1060 км, средняя плотность 1 г/см³. Поверхность ее очень светлая, геометрическое альbedo 0,8. Уже после первой съемки сообщалось о гигантской долине, которая вытянута на 3/4 окружности спутника. С другой стороны спутника расположен кратер диаметром 400 км — в 3 раза больший, чем у Мимаса. Поверхность Тефии, подобно другим спутникам Сатурна, усеяна метеоритными кратерами. Геологи указывают на следы очень древней активности, когда недра этого ледяного спутника застыли и расширились, ломая кору. В этих процессах поверхность Тефии увеличивалась процентов на 10.

Незначительно больше по размерам четвертый спутник — Диона (1120 км), показанный на фото 65. Орбитальный период Дионы около 2,7 сут, расстояние от центра Сатурна 377 тыс. км — как расстояние Луны от Земли. Поверхность Дионы носит следы выброса материала в результате ударов крупных метеоритных тел — системе лучей, хорошо известную по Луне. Не исключено, что лучи представляют собой отложения инея на поверхности. Диаметр наибольшего кратера около

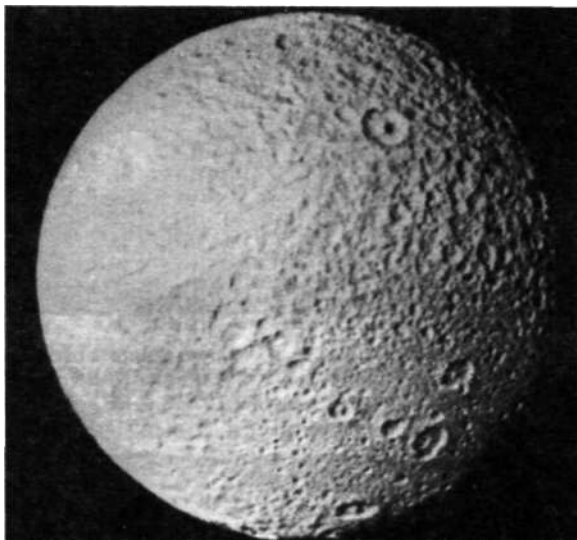


Рис. 6.12. Тетия — третий крупный спутник Сатурна. Представляет собой ледяное тело диаметром 1060 км. Снимок NASA

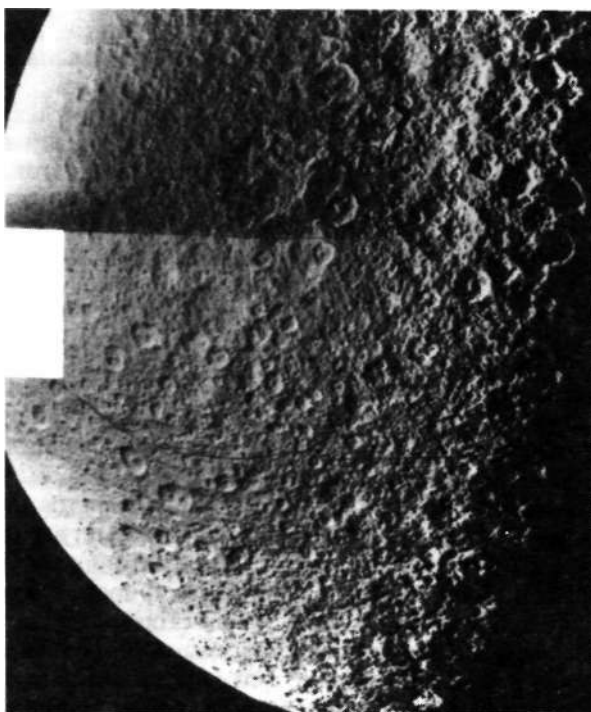


Рис. 6.13. Фрагмент поверхности спутника Рея с насыщенным кратерным рельефом (подобно Меркурию). Диаметр спутника 1530 км. Снимок NASA

100 км. На поверхности Дионы есть извилистая долина, образованная, вероятно, трещинами в ее коре.

Каким образом удастся легко наблюдать с Земли столь малые тела, как Мимас, который

в 10 раз меньше Луны? Ответ прост: у них светлая поверхность. Например, у Дионы отражательные свойства на светлых участках близки к 100%. Именно это свойство спутников Сатурна облегчает их наблюдение наземными средствами.

Плотность Дионы немного выше, чем у Мимаса, и достигает $1,4 \text{ г/см}^3$, что указывает опять-таки на ледяной (с примесью силикатов) состав.

Пятый спутник Сатурна — Рея внешне очень напоминает Меркурий (или Луну). Она показана на рис. 6.13. Это одна из наиболее крупных лун Сатурна. Ее диаметр 1530 км. Кратеры здесь достигают 300 км в поперечнике. Значительное число кратеров имеет отчетливый центральный пик. Как и у других спутников, поверхность Реи очень светлая; даже самые темные области имеют альбедо, достигающее 50%. Орбитальный период Реи около 4,5 сут, расстояние от центра планеты 572 тыс. км. Средняя плотность Реи несколько ниже, чем у Дионы: $1,3 \text{ г/см}^3$. Интересно, что в целом не отмечается такого четкого убывающего распределения средних плотностей, как у галилеевых спутников Юпитера. Все значения средней плотности лежат в пределах от 1,0 (Тетия) до $1,4 \text{ г/см}^3$ (Диона). Лишь у Титана средняя плотность достигает $1,9 \text{ г/см}^3$.

Пропустим пока шестой спутник, Титан, и познакомимся с Гиперионом (рис. 6.14). Оказалось, что переменность его блеска, давно известная по наземным наблюдениям, объясняется его необычной формой, несколько напоминающей плоскую головку сыра. Размеры Гипериона превышают прежнюю оценку (310 км) и составляют примерно $350 \times 230 \text{ км}$. Поверхность его темная, геометрическое альбедо всего 0,3 (в то время как для Мимаса, Дионы и Реи оно равно 0,6, а для Энцелада 1,0). Поверхность Гипериона носит следы интенсивной метеоритной бомбардировки, причем наибольший кратер по размерам таков же, как и спутник. Резко неправильная форма Гипериона может быть связана с разрушением большого родительского тела. Во всяком случае, известно, что несколько меньший Мимас имеет правильную форму шара.

Из-за возмущений в движении, вызываемых его соседом — гигантом Титаном, — синхронное вращение Гипериона может нарушаться. Приводились данные о периоде вращения Гипериона в 21 день.

История поверхности Япета, 8-го крупного спутника (или 16-го спутника, включая малые), по-видимому, более сложна. Как и



Рис. 6.14. Необычную форму имеет Гиперион — седьмой крупный спутник Сатурна (или 15-й, включая вновь открытые спутники). На этом снимке Гиперион виден в трех ракурсах; его размеры 350×230 км. Снимок NASA

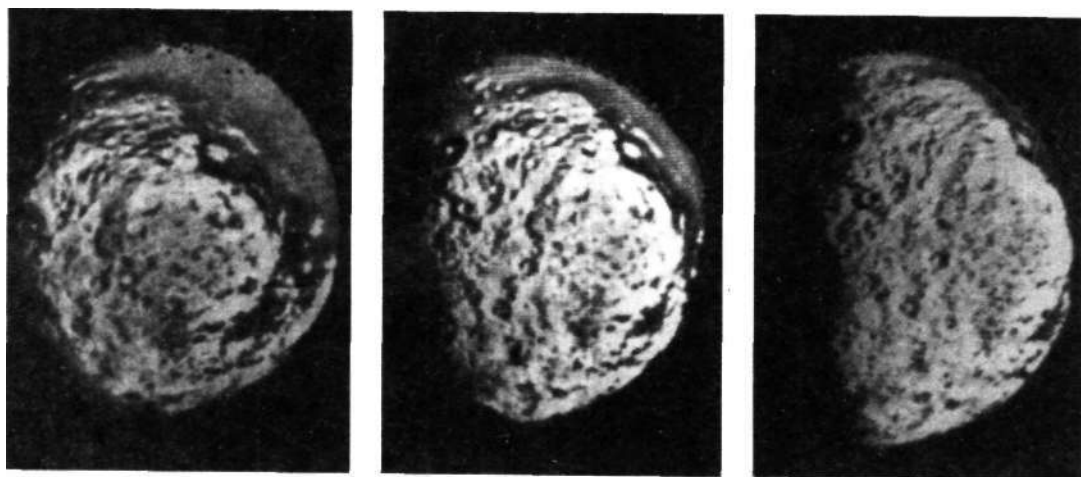


Рис. 6.15. Япет — спутник диаметром 1460 км со средней плотностью $1,2 \text{ г/см}^3$. Альbedo его передней (по движению) и тыльной сторон различаются раз в 10. Снимок NASA

ожидалось, альbedo двух его полушарий, темного переднего по движению и обратного различается в 10 раз (соответственно альbedo 0,05 и 0,5). Таким образом, разгадка меняющейся в 10 раз яркости Япета пришла через 310 лет после его открытия. Лучшее разрешение на снимках Япета составляет 4 км (рис. 6.15). Диаметр Япета 1460 км, средняя плотность $1,2 \text{ г/см}^3$. Плотность метеоритных кратеров на нем весьма высока, и в этом отношении Япет напоминает Рею. Некоторые кратеры на светлой стороне, но вблизи границы с темным районом, имеют темное, точно окрашенное, дно. По спектрофотометрическим свойствам темная поверхность Япета близка к поверхности Фебы и похожа на органические включения в углистых хондритах.

По-видимому, природа различий в отражательных свойствах его поверхности как-то связана с движением Япета. Предполагалось, например, что выброс паров воды и последу-

ющая конденсация инея проходила на обеих сторонах спутника, но затем взаимодействие с плазмосферой Сатурна постепенно удалило иней с передней его стороны. Но могло быть и наоборот: темная передняя сторона постоянно собирала заряженные частицы, которые вызывают постепенное потемнение материала. В последнее время приобрела популярность гипотеза о том, что передняя сторона Япета «загрязнена» пылью, выбрасываемой с Фебы. При соударениях легкие материалы испаряются, а темные тяжелые остаются на поверхности.

Япет имеет круглую форму. Как ни странно, форму правильного шара имеет и «самый маленький из крупных спутников» — Феба диаметром 220 км. Правильная форма столь малого небесного тела была неожиданностью. Феба — самый удаленный спутник Сатурна (13 млн км, или в 3,6 раза дальше Япета). Феба во многом непохожа на других членов семейства Сатурна. Орбита ее сильно наклоне-

на к плоскости экватора Сатурна, причем направление движения по орбите обратное. Феба — единственный в системе Сатурна несинхронный спутник, период ее вращения 8—9 ч. Ее поверхность намного темнее, чем у других спутников, геометрическое альbedo всего 0,05. Все эти особенности позволяют предположить, что Феба — захваченный Сатурном астероид, путь которого однажды прошел слишком близко от планеты.

Титан: несбывшиеся надежды

В своем сближении с Сатурном «Вояджер-1» прошел на расстоянии всего 7000 км от Титана — самого крупного спутника Сатурна. Исследования Титана ожидалось с большим интересом. Титан считался самым крупным из всех спутников планет. По наземным измерениям его диаметр оценивался в 5800 км, т.е. получалось, что он больше Меркурия и Ганимеда. К тому же, это единственный из известных спутников, на котором твердо установлено присутствие плотной атмосферы. Предполагалось, что атмосфера Титана может обладать сильным парниковым эффектом, благодаря чему условия у поверхности могли бы даже оказаться приемлемыми для существования жизни. После марсианских разочарований было много разговоров о возможной жизни на Титане. Увы, Титан тоже не оправдал этих ожиданий. Это один из самых холодных миров в Солнечной системе, который, как это ни парадоксально, обладает большими массами органических веществ в атмосфере и на поверхности.

Космическая съемка показала, что поверхность спутника неразличима сквозь его плотную красно-оранжевую атмосферу (фото 66). Красно-оранжевый и желто-коричневый цвета преобладают у Юпитера и Сатурна, Титана, Ио, Европы и Амальтеи. Но в последних трех случаях цвет относится не к атмосфере, а к поверхности этих тел. В атмосфере Титана отмечено несколько слоев неплотных облаков, в том числе на очень больших высотах. Слоистость тумана заметна на высоте 200, 375 и даже 500 км над поверхностью. Еще в 1979 г. весьма трудные наземные (а точнее, с летающей обсерватории — самолета) радиометрические измерения в тепловом инфракрасном диапазоне дали для Титана яркостную температуру около 80 К. Если отнести ее к поверхности, получалось, что никакого парникового эффекта в атмосфере Титана нет и даже наоборот, поверхность холоднее атмосферы. Так оно и оказалось. Температура верхних слоев атмосферы близка к 150 К, в то время

как температура поверхности составляет 94 К. Температура атмосферы Титана на высоте 50—70 км падает до 75 К (температура конденсации азота). В первых сообщениях указывалось, что на поверхности Титана, возможно, существуют «болота из жидкого азота» с островами из замерзшего метана и из силикатов. Это преувеличение, хотя выпадение дождей из жидкого метана здесь вполне возможно.

Теперь пора сказать о составе атмосферы Титана. В 1944 г. в его спектре была найдена полоса метана. Спустя 30 лет в его атмосфере спектроскопически был обнаружен молекулярный водород, что казалось парадоксальным, так как масса спутника слишком мала, чтобы удержать такой легкий газ. Далее было высказано предположение, что этот водород — продукт фотолиза метана и аммиака, выделявшихся из недр в течение эволюции атмосферы Титана. Другая составляющая, образующаяся в результате фотолиза аммиака, — азотно-водородные соединения — должна была накапливаться в атмосфере. Анализ предсказывал, что если в атмосфере Титана есть парниковый эффект, то в ней должен присутствовать азот. Правда, для этого нужно было немного больше метана, чем показывала спектроскопия.

Космические аппараты передали, что парникового эффекта нет, но азот в атмосфере присутствует. Более того, его количество оказалось огромным — атмосфера Титана примерно на 85% состоит из азота. Около 12% может составлять аргон. Менее 3% (возможно, всего 1%) приходится на метан; имеются небольшие количества этана, пропана, ацетилена, этилена, водорода, кислорода и других составляющих. Спектроскопические измерения позволили отождествить по крайней мере 10 органических компонентов в его атмосфере. Количество азота в столбе атмосферы Титана в 15 раз больше, чем у Земли. Однако из-за малого ускорения свободного падения давление у поверхности лежит около 1,6 бар.

На рис. 6.16 показана схема строения атмосферы Титана и зависимость температуры в ней от высоты. На высотах до 15—20 км находятся облака из метана. Выше появляется окрашенная дымка, которая достигает высокой плотности на том уровне, куда проникает ультрафиолетовая радиация Солнца. Слои дымки наблюдались на высотах вплоть до нескольких сотен километров. Дымка имеет красно-оранжевый оттенок.

Состав красно-оранжевого окрашивающего компонента атмосферы оставался неизвестным, но его, кажется, удалось синтезировать. Для этого в экспериментальной установке смесь

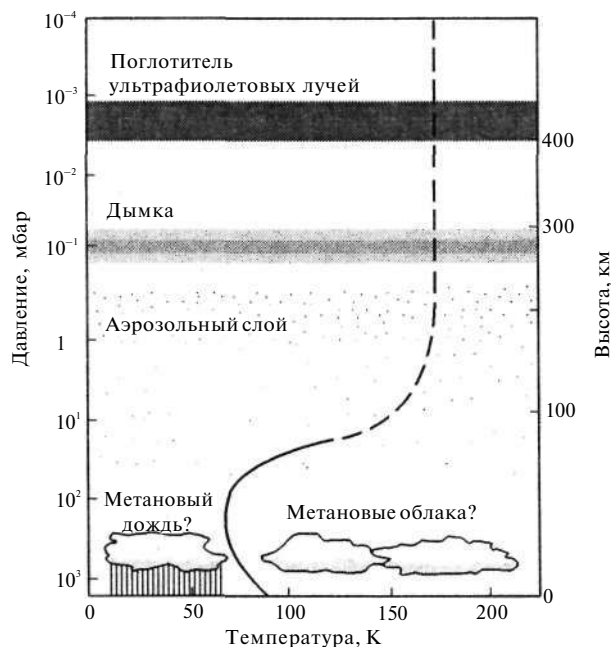


Рис. 6.16. Строение атмосферы Титана по данным аппарата «Вояджер-1». Из работы Т.Оуэна

азота и метана активировали с помощью электрических разрядов, после чего на стенках сосуда появилась красная пленка с такими же отражательными свойствами, как у атмосферы Титана. Это еще мало изученное вещество состоит из сложной цепи карбонатгидридов. Оно получило название «солин» (от греческого «грязь»); обнаружены три типа солинов. На Титане оно образуется в результате фотосинтеза.

Физические условия у поверхности Титана близки к тройной точке фазового состояния метана. Предположение об озерах или морях, возможно, справедливо, но скорее в отношении жидкого метана. Но и это предположение встречает много трудностей, хотя и было очень популярным сразу после первых космических исследований Титана. Было показано, что сплошной или очень протяженный метановый океан, находящийся в равновесии с насыщен-

ными парами метана в нижней атмосфере, требует, чтобы пары метана составляли до 10% атмосферы. Но измерения дают значительно меньше. Недавно выполненные работы показали, что наиболее распространенным углеводородом на Титане должен быть этан (C_2H_6), а океан, если он существует, может состоять на 70% из этана, на 25% из метана и растворенного в них азота (около 5%). Глубина такого океана может достигать 1 км, а ниже должен находиться слой жидкого ацетилена глубиной до 300 м. Обилие органических материалов на Титане даже вызвало предположение о возможной промышленной их разработке в будущем. Технология такой промышленности должна обеспечить работу при криогенных температурах. Титан — это мир глубокого холода; по сравнению с ним климат морозных пустынь Марса представляется теплым зноем.

В конце первого десятилетия XXI в. на Титан опустится первый спускаемый аппарат миссии «Кассини» (запуск состоялся в 1997 г.). Этот крайне сложный проект готовился несколько десятилетий большим международным коллективом ученых. Проект состоит из собственно аппарата «Кассини», будущего первого искусственного спутника Сатурна, и спускаемого аппарата «Гюйгенс» для исследования Титана, с большой научной программой.

Если учесть большую протяженность атмосферы Титана, он все же не самый большой спутник. Его диаметр по поверхности равен 5150 км. Ганимед больше; именно Ганимед остается самым большим спутником планет. Состав Титана — льды с примесью силикатных пород, средняя плотность близка к $1,9 \text{ г/см}^3$, что опять-таки близко к плотности Ганимеда.

Таким оказалось вблизи семейство спутников Сатурна, свойства которых астрономы пытались разгадать в течение нескольких столетий, и такой оказалась вблизи удивительная планета, которая когда-то так озадачила Галилея. Прощальный вид Сатурна с уходящего дальше аппарата приведен на фото 67.

ГЛАВА 7

ПЕРВАЯ ВСТРЕЧА С УРАНОМ

В 3—4,5 млрд км от Земли (а точнее, на расстояниях 19,2 и 30,1 а.е. от Солнца) медленно и величественно движутся по своим орбитам Уран и Нептун, близнецы, далекие планеты-гиганты. Орбитальная скорость их всего 6,8 и 5,4 км/с (у Земли 29,8 км/с). Период обращения Урана вокруг Солнца превышает средний век человека: 84,01 лет. Обе планеты очень трудны для наблюдений. Из-за их удаленности угол, под которым они видны, не превышает нескольких угловых секунд. Различить какие-либо подробности на таком маленьком диске почти невозможно.

24 января 1986 г. «Вояджер-2» сблизился с седьмой планетой Солнечной системы — Ураном — и провел запланированную программу исследований планеты, ее спутников и колец. На пути к Урану дважды был использован гравитационный маневр, у Юпитера и Сатурна. Благодаря маневрам и удачному расположению планет путь занял только 8,5 лет, тогда как простой полет «в одном направлении» к Урану занял бы почти 30 лет. Мы уже говорили, что повторится такая возможность «большого путешествия» только через 175 лет. (Читателю, наверное, тоже хотелось бы познакомиться с подобной книгой, которая будет написана через 175 лет.) В поле Урана был выполнен еще один гравитационный маневр для полета к Нептуну, которого аппарат достиг в 1989 г. В результате гравитационных маневров у Юпитера, Сатурна и Урана часть топлива удалось сэкономить. После встречи с Ураном оставалась еще половина его начального запаса, около 60 кг, чего, по расчетам, должно хватить до 2030 г. Другая проблема, которая возникла уже вблизи Урана, — электроэнергия. Аппарат ее получает от трех радиоизотопных термоэлектрических генераторов (которые сразу после запуска давали 470 Вт электроэнергии). Их мощность из-за естественного распада плутония уже тогда стала менее 400 Вт, что наложило определенные ограничения на программу иссле-

дований Урана. Предельное значение 245 Вт; ниже этой мощности аппарат окажется неработоспособным. Ожидается, что это произойдет не ранее 2013 г.

Открытый У.Гершелем в 1781 г. Уран относится к наиболее далеким планетам. Он удален от нас на расстояние в среднем в 19,2 раза большее, чем Солнце (радиосигналы аппарата шли от Урана до Земли 2 ч 40 мин). Эксцентриситет его орбиты 0,0472, — почти такой же, как у Юпитера. Несмотря на огромный диаметр, более 50 тыс. км (по данным «Вояджера-2», экваториальный радиус 25 559 км, полярный — 25 270 км, если считать по уровню 1 бар), его диск никогда не бывает виден под углом более 3,9" (в среднем 3,7"). Из-за сильного поглощения в красной части спектра планета имеет зелено-голубой цвет. Поглощение вызывают полосы метана, который в небольшом количестве присутствует в атмосфере. Различить на маленьком диске какие-либо детали очень сложно. История наблюдений неясных полос на нем полна противоречивых результатов. Иногда наблюдатели сообщали о слабых полосах, подобных слабым зонам и поясам Сатурна, но зачастую не находили никаких деталей. Имеются сообщения, что детали появлялись и исчезали в течение нескольких месяцев.

Были попытки связать видимость деталей с очень длительными сезонными изменениями на Уране. Плоскость экватора наклонена к плоскости орбиты планеты на 97°55'. Такое положение полярной оси приводит к многим особенностям планеты. Уран вращается, как говорят, «лежа на боку». Наклон приходится считать большим 90°, чтобы направление вращения было таким же, как у других планет (кроме Венеры), — против хода часовой стрелки. Но полюс, соответствующий такому направлению вращения, у Урана обращен в южную полусферу эклиптики и, в отличие от земного,

считается южным. Сейчас он обращен к Солнцу (и Земле). Как следствие, в проекции на плоскость эклиптики планета имеет обратное вращение. Плоскость орбиты наклонена к эклиптике всего на $46'$.

Положение оси вращения приводит к практически максимально возможным сезонным изменениям освещенности. При орбитальном периоде 84 года полярные день и ночь длятся 14 лет на широте 30° , по 28 лет — на 60° и по 42 года на полюсах. Однако из сезонных эффектов (если они действительно сезонные) пока установлена только одна зависимость: радиояркостьная температура планеты в целом за 20 лет, с 1965 по 1985 г., возросла со 140 до примерно 290 К. За это время центр видимого с Земли диска Урана сместился от экватора к полюсу.

Уран, каким его увидел «Вояджер-2»

До сближения «Вояджера» с Ураном оставалось неизвестным, как влияет необычное положение полярной оси на циркуляцию его атмосферы (и какова эта циркуляция вообще). Телевизионные камеры аппарата задолго до сближения стали передавать на Землю одно изображение южной полусферы за другим, но никаких деталей на них не обнаруживалось (фото 68). Ученые из группы изображений JPL тщательно рассматривали снимки ровного голубого шара, более темного к краям. Иногда им казалось, что они видят очень слабые облака, а астрономы из группы «Вояджера» предложили переименовать группу изображений в группу воображений. Сплошная дымка (скорее всего, из кристалликов сконденсированного метана) полностью закрывает нижние слои облаков. Дымка чуть светлее и краснее у полюса.

В январе 1986 г. все же удалось обнаружить четыре небольших голубых облачка на широтах от 30 до 70° ю.ш. Как оказалось, они перемещаются в долготном направлении и описывают концентрические окружности вокруг полюса. Отсюда сразу же был сделан вывод, что циркуляция атмосферы на Уране определяется силами Кориолиса (инерционной природы), а не притоком солнечной радиации. Так же организована циркуляция и в атмосферах других планет. Найденный по движению облачных образований период вращения атмосферы зависит от широты и составил $16,2$ ч у 33° ю.ш. и примерно 14 ч у 70° ю.ш.

Чтобы обнаружить эти образования, понюхавшись всевозможные ухищрения, например исключение потемнения к краю, так как контрасты, с которыми были видны облака,

тонут в нормальном распределении яркости по шару Урана. Не видны они и при других фазах планеты (фото 69). Это снова прощальный снимок, теперь уже Урана, с разрешением около 140 км. Фазовый угол Урана здесь 153° . Белая полоска на самом лимбе — надоблачный туман из кристаллов замерзшего метана.

Атмосфера планеты очень эффективно выравнивает (за счет циркуляции) температуру на всех широтах, в том числе и в темном полушарии. Измерения приходящих от планеты тепловых потоков показали, что в подоблачной атмосфере, уже на уровне 2,3 бар, температура достигает 100 К. Выше, на уровне давления 0,6 бар, температура на экваторе у светлого и темного полюсов одинакова и составляет 64 К, а в средних широтах — градуса на 2 ниже. Минимальная температура (53 К) наблюдалась на уровне давления 0,1 бар (выше видимой поверхности облаков). Еще выше температура снова возрастает, достигая 750 К на высоте до 6000 км над облаками. Ученые считают, что такую высокую температуру экзосферы, состоящей в основном из водорода, нельзя объяснить только излучением Солнца, которого на весь огромный диск планета получает в 140 раз меньше, чем маленькая Земля.

Если два черных шара произвольных размеров поместить на орбиты Урана и Нептуна, их температура установится на уровне 57 и 47 К. При этом они будут излучать в субмиллиметровом диапазоне те же крохи энергии, что они получают от Солнца. Такая температура называется равновесной и относится равным образом и к планетам, если они излучают, как черное тело. Когда позволила техника и были проведены фактические измерения этих ничтожных тепловых потоков, результаты оказались удивительными. Обе планеты имеют одинаковую эффективную температуру: 56—58 К. (Эффективная температура определяет полный излучаемый поток.) Это может означать только одно: Уран почти не имеет собственных источников энергии, а Нептун имеет, причем довольно мощные (подробнее об этом в следующей главе). В результате, Уран излучает столько же, сколько получает, а Нептун — значительно больше. Некоторое различие есть и у Юпитера с Сатурном, но далеко не в такой мере. Если Уран и имеет какие-то внутренние источники, они не превосходят 13% получаемого от Солнца потока (а возможно, и меньше). С глубиной в атмосфере Урана температура растет, но медленнее, чем у Нептуна.

Низкое тепловое излучение Урана выделяет его из ряда других планет-гигантов. Предпола-

гается, что у всех планет-гигантов в результате фазовых переходов водорода, находящегося в условиях колоссальных давлений, гелий становится нерастворимым в водороде и, как более тяжелый элемент, выпадает к центру планеты, что освобождает значительную энергию. Допустить, что для Урана этот механизм исчерпан, не удается, так как соотношение гелий — водород у него такое же, как у Юпитера. Причина в чем-то другом. Есть интересное предположение, что и низкая метеорологическая активность Урана, и слабое его тепловое излучение объясняются особой динамикой атмосферы, образующей теплоизолирующий слой, который заслоняет истинный облик планеты от посторонних взоров. Но для уточнения подробностей нужны дальнейшие исследования.

Равенство температуры у полюсов и экватора заставляет ученых искать какие-то особые причины, определяющие метеорологию атмосферы Урана. Высказано предположение, что ими могут быть процессы конденсации воды в атмосфере. О составе последней будет сказано ниже; здесь же существенно, что в ней содержится, по-видимому, много паров воды. На Земле конденсация влаги и выпадение осадков мало влияют на среднюю плотность атмосферы, изменяя ее не более чем на 2%. Но для Урана такие изменения могут достигать 50%. Тогда движения в очень плотной атмосфере планеты становятся больше похожи на течения в земных океанах (которые вызываются изменениями солёности воды).

В средних и высоких широтах атмосфера Урана вращается быстрее, чем глубокие слои планеты. Такое явление хорошо известно по атмосфере Венеры и носит название суперротации. Но относительно чего отсчитывать вращение планеты, где сама атмосфера занимает почти $\frac{2}{3}$, ее радиуса? Здесь придется обратиться к сведениям о внутреннем строении Урана, где получено много нового.

Масса Урана была найдена методами наземной астрономии (по движению спутников планеты): $8,68 \cdot 10^{28}$ г, в 14,5 раз больше массы Земли. При сближении «Вояджера» с планетой масса была уточнена. Средняя плотность планеты составляет $1,285 \text{ г/см}^3$. Ускорение свободного падения на уровне видимой границы облаков на 10% меньше земного. Сведения о внутреннем строении Урана долгое время опирались только на теоретические расчеты и аналогии с Юпитером и Сатурном. Последние, как теперь выяснилось, вели к переоценке содержания гелия.

К ревизии этих представлений привело открытие в 1977 г. (методами наземной астро-

номии!) темных колец Урана, что имело важные последствия. С тех пор наблюдалось уже 13 покрытий звезд кольцами, благодаря чему удалось установить эксцентриситет некоторых колец, а через него найти постоянную прецессии их обращения вокруг Урана. Прецессия, в свою очередь, позволила определить важные параметры — так называемые сферические гармоники J_2 и J_4 гравитационного поля планеты. Еще один важный параметр — динамическое сжатие планеты α — был найден по снимкам Урана, сделанным со стратосферного аэростата в 1970 г. Коэффициенты $J_2 = 0,0035$ и $\alpha = 0,023$ (в дальнейшем по данным «Вояджеров» сжатие было уточнено: $\alpha = 0,0114$) позволили определить как распределение масс в недрах планеты, так и частоту ее вращения. Полученный таким образом период вращения составил 16 ± 1 ч. Прежде для его определения использовалось движение крайне редко наблюдаемых протяженных светлых деталей. Найденный по ним период заметно изменялся в разные годы. До 1975 г. наиболее надежным считалось значение 10,8 ч. Начиная с 1976 г. разные исследователи получали от 15 до 24 ч, в среднем около 16,3 ч. В 1981 г. были получены значения 16,2—16,4 ч.

Но самый надежный метод определения периода вращения дают измерения радиоизлучения магнитосферы планеты, выполняемые с космического аппарата. Уже говорилось, что так удалось найти периоды вращения Юпитера (9 ч 55,5 мин) и Сатурна (10 ч 39,4 мин). Метод, по существу, дает период вращения магнитного поля. Но так как магнитное поле (если оно имеется у планеты) возбуждается достаточно глубоко в ее недрах, оно должно вращаться с тем же периодом, что и глубокие слои. Пропустим пока некоторые интересные подробности и приведем окончательный результат: период вращения Урана составил 17 ч 14,4 мин, что довольно близко к приведенным выше числам.

Что же касается распределения масс, то полученные на основе коэффициентов J_2 и α результаты заметно отличаются как от прежних теоретических моделей, так и от представлений, полученных из аналогий с Юпитером и Сатурном. Согласно модели, Уран имеет довольно большое ядро (около 0,3 радиуса планеты), построенное из тяжелых элементов — металлов и силикатов, а также так называемых льдов. «Льдами» принято называть метан, аммиак и воду — соединения четырех активных элементов, широко распространенных в космо-

се. (Имеется в виду, что на уровне видимого облачного слоя большинства гигантов все они превращаются в льды.) Ядро окружено толстой оболочкой из водорода и гелия с условной внешней границей около 0,7 радиуса планеты. Атмосфера Урана содержит 12% гелия (как у Юпитера), остальное — главным образом водород. Заметная составляющая Урана — это метан, до 2,3%. Но проблема метана довольно сложна.

Прежде всего, отражательные свойства Урана даже в наиболее глубоких полосах поглощения метана, например у 890 нм (где планета должна быть совсем черной), остаются на уровне нескольких процентов. Это указывает, скорее всего, на присутствие тумана — аэрозолей, что, с одной стороны, увеличивает путь светового луча и увеличивает кажущееся содержание метана, с другой — усиливает отражение света в полосах поглощения метана. Сама дымка, вероятно, состоит из мелких кристалликов замерзшего метана. С учетом всех этих сложностей содержание метана в газообразной фазе может быть значительно меньшим, на уровне десятых долей процента.

В атмосфере обнаружены также некоторые малые составляющие, в том числе ацетилен, образующийся при фотоллизе метана. Метан играет важную роль в образовании облачного слоя Урана. Когда аппарат заходил за планету, на уровне давления 1,6 бар, глубоко под слоем дымки, радиометодами был обнаружен плотный облачный слой, включающий, по-видимому, кристаллы метанового льда. Слои дымки наблюдались и оптическими методами. Так, на уровне 0,1 бар, на 40 км выше облачного слоя, располагается еще один слой.

Для образования метанового инея нужна низкая температура, присущая Урану и Нептуну. Вместе с тем в спектрах Урана не наблюдаются полосы аммиака, имеющегося в атмосфере Юпитера. И снова причина этого в низкой температуре видимых слоев атмосферы, где аммиак выморожен. Но он может находиться в глубине атмосферы. Интересно, однако, что в спектрах теплового радиоизлучения, исходящего именно из глубоких слоев атмосферы, полоса поглощения молекул NH_3 вблизи длины волны 2 см довольно слабая. Не исключено, что аммиака в атмосфере Урана действительно намного меньше, чем на Юпитере и Сатурне. Среди других углеводородов предполагалось присутствие этана, имеющего характерную полосу 12,2 мкм. Пока в излучении Урана она не найдена (хотя наблюдалась в тепловом излучении Нептуна). Ранее высказывалось также предположение о возможном

существовании на Уране и Нептуне облаков из конденсатов нашатырного спирта, что не удивительно, так как аммиак, если он присутствует в облачном слое, соседствует с большим количеством паров и конденсатов воды. По-видимому, облака Урана включают еще один слой — из инея сероводорода, расположенный сразу же под слоем метанового инея.

В последние годы появилось несколько теоретических работ, касающихся уточнения состава недр далеких гигантов. Постепенно выясняется, что по сравнению с Юпитером и Сатурном они обогащены более тяжелыми (чем водород и гелий) элементами. Один из немногих методов узнать кое-что о недрах Урана и Нептуна — анализ данных об их магнитных полях.

Магнитный шторм и строение недр. Кольца Урана

Магнитное поле Урана, его напряженность и структура относились к главным исследованиям «Вояджера-2». Но прежде чем это поле было обнаружено, ученым пришлось немало поволноваться. Еще некоторые наземные наблюдения можно было истолковать как косвенные указания на существование поля. Но «Вояджер» подходил все ближе к Урану, а никаких признаков поля не было. Лишь за 5 дней до сближения удалось принять характерные всплески радиоизлучения, которые можно было интерпретировать как взаимодействие магнитного поля с потоком заряженных частиц. (Кстати, по периодичности этих всплесков и был найден период вращения планеты.)

Магнитное поле обладает определенным давлением. Там, где оно уравнивается газодинамическим давлением солнечного ветра, возникает возмущение электромагнитного поля, так называемая ударная волна. «Вояджер» безрезультатно прошел все предсказанные положения ударной волны и только за 10 ч до наибольшего сближения, 24 января 1986 г., пересек ее. Дальнейшие двое суток аппарат провел внутри магнитосферы Урана, которая оказалась необычайно сложной. Она простирается на 0,6 млн км и заполнена плазмой, образующей радиационные пояса, похожие на земные. На уровне видимой облачной поверхности (где давление около 0,6 бар) напряженность дипольного поля близка к земной: 0,23 Гс. Ось магнитного диполя на 59° наклонена к оси вращения и на 8000 км смещена от оси вращения к ночному (северному) полюсу. Положение полюсов диполя обратно земному, как у Юпитера и Сатурна. Комбинация сильного наклона диполя к оси вращения

и наклона последней к орбите приводит к тому, что магнитосферный хвост Урана вращается в пространстве, подобно штопору.

Поле Урана не строго дипольное. Наряду с дипольной силой квадрупольная и октупольная составляющие. Они выражены здесь даже сильнее, чем на Юпитере. Предполагается, что высшие гармоники сильны из-за близости «составных частей» планетарного магнитного динамо к поверхности планеты. Скорее всего, это объясняется большим содержанием воды и аммиака, которые становятся проводящими при значительно меньших давлениях, чем водород и гелий на Юпитере. Чтобы представить дипольным приближением реальное магнитное поле Урана, понадобилось сместить ось диполя на названные 8000 км. Наглядную модель поля Урана можно представить, если вставить в мячик под углом 60° к горизонтали стержневой магнит и вращать мячик вокруг горизонтальной оси. С каждым оборотом направление поля в «магнитосфере» будет меняться дважды (рис. 7.1).

Высказано несколько гипотез о природе такой необычной магнитосферы; в частности, предполагалось, что она связана с положением полярной оси. Но против этого имеется интересное возражение. По существу, необычно положение полярной оси относительно Солнца, и только. Поле возбуждается в глубоких слоях планеты, которые не могут «знать», где находится Солнце, так как приливные силы в теле Урана совершенно ничтожны.

В первых статьях предполагалось, что магнитное поле Урана возникает в горячем водном перемешивающемся океане, насыщенном различными ионами, что делает его проводящим. Глубина океана оценивалась в 10 000 км, а поверхность его скрыта многотысячекилометровой атмосферой. Такая модель была разработана на основе уже упоминавшихся коэффициентов J_n , α и периода вращения. Но уточнения, сделанные во время сближения «Вояджера» с Ураном, заставили внести в нее исправления.

При прочих равных условиях трехслойная модель («каменное» ядро из металлов, окислов металлов и силикатов, глубочайший жидкий океан и газовая атмосфера) дает большее отношение экваториального диаметра к полярному, чем модель без океана. Данные же «Вояджера» показали, что строение планеты, где над каменным ядром сразу, без океана, начинается плотная атмосфера из перемешанных легких газов и «льдов» (двухслойная модель), дает более близкие к наблюдениям результаты. В верхней, подоблачной части такой атмосферы

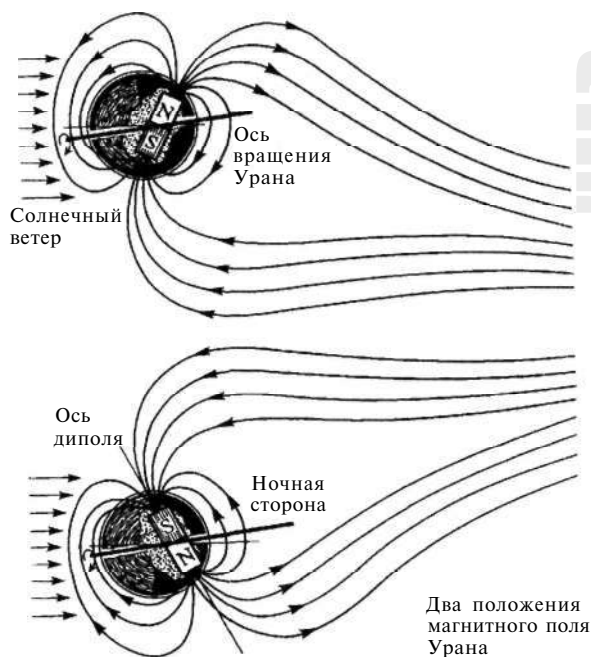


Рис. 7.1. Магнитное поле Урана имеет сложную структуру. Очень приблизительно его можно считать дипольным, если ось диполя сместить от центра на $1/3$ радиуса и наклонить к оси вращения на 60°

может содержаться очень значительное количество воды и пара, без всяких океанов.

Получено много нового о кольцах и спутниках Урана. Наблюдения спутников представляли нелегкую задачу еще и потому, что солнечная освещенность вблизи Урана в 370 раз слабее, чем вблизи Земли. Особенно это ощущалось при телевизионной съемке темных объектов — таких, как кольца Урана.

Кольца были открыты недавно, в 1977 г., с самолетной астрономической обсерватории при наблюдении покрытия Ураном звезды. Кольца находятся близко к планете, в пределах 25,5 тыс. км над облачным слоем. Они оказались очень непохожими на кольца Сатурна — широкие и разделенные узкими «щелями». В случае Урана все наоборот: очень узкие кольца и очень широкие интервалы между ними. Общей массы материала в кольцах хватило бы лишь на самый маленький спутник, диаметром 15 км (для колец Сатурна объем материала в 1000 раз больше). У планеты оказалось 9 чрезвычайно узких, сравнительно плотных колец и ряд диффузных образований той же природы (рис. 7.2). Кольца темнее, чем сажа; наблюдать их с Земли можно только при использовании специальной методики и весьма чувствительных новых физических приборов. Даже со спутников Урана их можно видеть только при благоприятных условиях. Вся

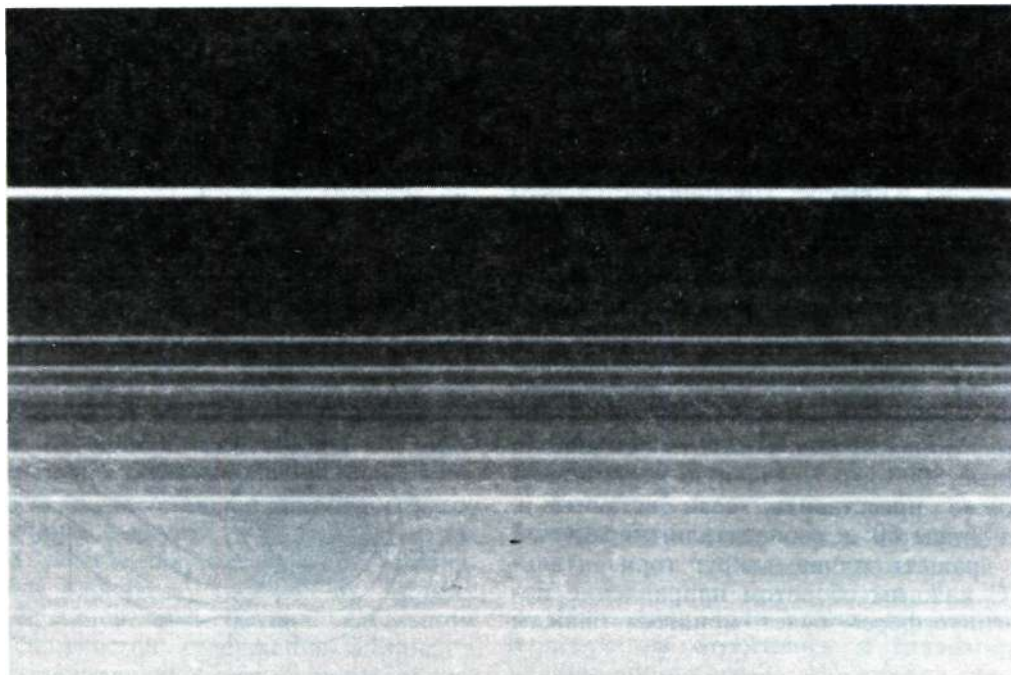


Рис. 7.2. Кольца Урана очень узки. Внешнее (верхнее на снимке) — кольцо ϵ . Снимок NASA

группа занимает интервал высот всего в 9,3 тыс. км. Самое широкое — внешнее асимметричное кольцо ϵ шириной 32 км, со средним радиусом 51 150 км, самое узкое — третье снаружи кольцо γ шириной 600 м. Порядок колец следующий: ϵ , δ , γ , η , β , α , 4, 5, 6. В отличие от колец Сатурна и особенно Юпитера, кольца Урана почти не содержат пылевых частиц. Это глыбовые кольца с размерами отдельных элементов в несколько метров. Когда «Вояджер» скрывался за планетой, радиолуч обоих передатчиков последовательно просветил все кольца. Крупные размеры элементов были подтверждены, куски в 10 см встречаются редко. Темный цвет их поверхности, по-видимому, определяется их положением в поясах заряженных частиц и постоянной бомбардировкой последними.

Кольца Урана вызывают у астрономов-планетчиков большой интерес. Как недавно сказал один французский астроном, кольца подобны запаху духов: малые количества вещества создают сильные эмоции. Если же говорить всерьез, кольца действительно ставят много проблем. Например, установлено, что частицы колец, даже обращающиеся на одинаковом среднем расстоянии от планеты, из-за возмущений приобретают небольшую относительную скорость и иногда сталкиваются между собой, что рано или поздно приводит к их разру-

шению. Косвенно это подтверждает слабое, вероятно, остаточное кольцо Юпитера. Но есть, кажется, даже историческое свидетельство разрушения колец. У.Гершель вел дневник наблюдений. 16 марта 1789 г., спустя ровно 8 лет после открытия Урана, Гершель изобразил Уран с кольцами и приписал: «Кольцо короткое, не такое, как у Сатурна». Специалисты считают эту запись ошибкой: увидеть кольцо в его нынешнем виде Гершель не мог. Но вот что удивляет: кольцо у него показано в том ракурсе и на том месте, где оно действительно находилось в 1789 г. Не значит ли это, что кольцо обветшало всего за 200 лет? Отсюда недалеко до вывода о том, что кольца — образования с коротким временем жизни.

Семейство спутников Урана

Несмотря на сложность наземных наблюдений таких слабых и далеких объектов, как спутники Урана, астрономы прошлого открыли практически все крупные спутники этой гигантской планеты. Схема их орбит (без новых спутников, обладающих очень малыми размерами) показана на рис. 7.3. На схеме отражен наклон орбит спутников к плоскости орбиты Урана, составляющий в среднем $97,8^\circ$. Сейчас южный полюс системы направлен примерно на Солнце. Следовательно, северные полушария всех спутников находятся в тени, а в южных

наблюдается длительный полярный день, достигающий 42 земных годов.

Группа новых спутников была открыта в 1985—1986 гг. при сближении космического аппарата с Ураном. Их орбиты располагаются внутри орбиты Миранды, вплоть до внешнего края колец Урана, которые также показаны на схеме рис. 7.3.

Спутники Корделия и Офелия — небольшие тела размером 15—25 км, открытые в 1986 г. при сближении «Вояджера» с Ураном, оказались такой же группой «сторожевых собак» при кольце ϵ , как пара спутников, «стерегущих» кольцо F Сатурна. Таким образом, предположение об их формирующей роли для кольца ϵ подтвердилось. Но другие кольца уже, до 300 м, а там спутники не найдены. Что же касается спутников Корделия и Офелия, они обращаются в непосредственной близости от кольца ϵ , с внешней и внутренней сторон. Орбиты всех новых спутников расположены в плоскости экватора Урана. В табл. 7 приведены их наименования (ранее известные спутники — это пять нижних).

Общее число вновь открытых спутников составило 10. Все они очень малы (за одним

исключением), не более 80 км, и обращаются в интервале расстояний от центра Урана от 49 до 80 тыс. км. Это соответствует радиусам орбит от кольца ϵ до 0,66 полуоси орбиты спутника Миранда. Наиболее крупный из вновь открытых спутников — Пак. Он обращается на наибольшем расстоянии от Урана, 85,6 тыс. км, был открыт еще задолго до сближения с планетой, в 1985 г. Может быть, его и удалось бы исследовать подробнее, если бы не Миранда (которая отняла основное время телевизионной съемки, и, как увидим ниже, не напрасно). Новый спутник получил название «Пак» — имя одного из персонажей комедии У.Шекспира «Сон в летнюю ночь». Выбор названия связан с происхождением имен ранее известных главных спутников. Так, имена «Оберон» и «Титания», которые У.Гершель присвоил двум самым крупным лунам Урана, открытым им в 1787 г. (через 6 лет после открытия Урана), взяты именно из этой комедии. А в 1948 г. Г.Койпер снова обратился к именам из комедии Шекспира, открыв Миранду («Буря»). Кстати, названия 2-го и 3-го из «старых» спутников У.Ласселл в 1851 г. взял из пьесы А.Попа (Ариэль и Умбриэль).

Но вернемся к спутнику Пак. По размерам он занимает промежуточное место между главными и вновь открытыми мелкими спутниками. Было даже предложено отнести его к группе главных. Новый спутник почти такой же черный, как кольца Урана, альbedo которых чрезвычайно низкое, всего 0,02—0,03. Высказана гипотеза, объясняющая черноту и колец, и ряда спутников (не только малых) наличием на их поверхности конденсатов углеродсодержащих молекул, вероятнее всего, метана (который тем не менее на поверхности спутников пока не найден). Поскольку спутники находятся в относительно плотной плазмосфере Урана, длительная бомбардировка поверхности заряженными частицами приводит к разрушению сорбированных на ней молекул метана и к высвобождению углерода, придающего поверхности черный цвет. Кстати, ни у спутника, ни у колец не найдено каких-либо цветовых оттенков, хотя, как мы видели, поверхность спутников Юпитера и Сатурна слегка красноватая. Ученых удивила форма нового спутника: при диаметре всего 170 км это почти правильная сфера. Вспомним, что бо́льшая по размерам (и более плотная) Амальтея обладает не-

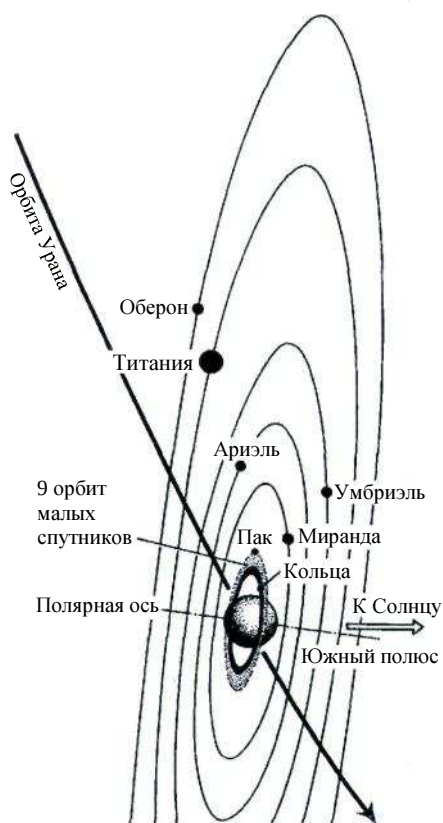


Рис. 7.3. Схема орбит спутников Урана

Т а б л и ц а 7. Спутники Урана

Название	Радиус орбиты, тыс. км	Орбитальный период, сут	Эксцентриситет орбиты	Наклонение орбиты к экватору планеты, градус	Диаметр спутника*, км	Год открытия или номер спутника
Корделия	49,77	0,33			≈50	1986U7
Офелия	53,80	0,37			≈50	1986U8
Бианка	59,17	0,43			≈50	1986U9
Крессид	61,78	0,46			≈60	1986U3
Дездемона	62,68	0,47			≈60	1986U6
Джувелла	64,35	0,49			≈80	1986U2
Порция	66,09	0,51			≈80	1986U1
Розалинда	69,94	0,56			≈60	1986U4
Белинда	75,26	0,62			≈60	1986U5
Пак	86,00	0,76			170±10	1985U1
Миранда	128,8	1,41	0,027	4,22	480	1948
Ариэль	190,2	2,52	0,003	0,31	1161	1851
Умбриэль	265,1	4,14	0,005	0,36	1185	1851
Титания	434,0	8,71	0,002	0,14	1586	1787
Оберон	581,9	13,46	0,001	0,10	1546	1787

*В отличие от табл. 3—5, здесь указан диаметр небесного тела.

правильной формой. С другой стороны, правильную форму имеет также Феба — небольшой спутник Сатурна, но его же спутник Гиперион (большой, чем Пак) имеет резко неправильные очертания.

Причины таких различий остаются непонятными, хотя существует немало гипотез об ударном разрушении и вторичном объединении образовавшихся осколков. 24 столетия назад Аристотель (а до него Пифагор) учил, что сфера и круг — наиболее совершенные формы, поэтому только сфера может быть формой небесного тела и только она должна заслуживать серьезного внимания. Опираясь на мнение Аристотеля, не будем сколько-нибудь подробно рассматривать остальные 9 малых спутников несферической формы. Если же говорить всерьез, из-за малых размеров на их снимках не видно почти никаких подробностей. На «малом большом» спутнике Пак довольно хорошо различаются крупные кратеры, один из которых по диаметру достигает 1/4 диаметра самого спутника.

Главные спутники

Перейдем теперь к главным (известным по наземным исследованиям) спутникам Урана (фото 70). Они расположены в следующем порядке (считая от Урана): Миранда, Ариэль, Умбриэль, Титания, Оберон. Система спутни-

ков Урана очень компактная: большая полуось орбиты Оберона 582 тыс. км, а период обращения вокруг планеты — всего 13,5 сут (что объясняется, конечно, большой массой планеты). Миранда находится в 4,5 раза ближе к Урану и завершает один оборот за 1,4 сут. Основные данные о массах спутников приведены в табл. 8. Все они движутся в радиационных поясах планеты, что приводит к постоянной бомбардировке поверхности спутников заряженными частицами, как уже говорилось выше. Строго говоря, действие радиационных поясов имеет сложный периодический характер, потому что магнитосфера Урана «полощется» относительно плоскости орбит спутников (и плоскости экватора планеты). Поскольку ось дипольного поля планеты отклонена от оси ее вращения на 59°, полярность поля магнитосферы меняется за пол-оборота Урана, т.е. за 8,62 ч. До Урана (и Нептуна) такое явление не было известно ни у одной планеты (у Земли наклон диполя к оси вращения 11,7°, у Юпитера 11°, у Сатурна почти 0). Большой наклон для Урана в конечном счете вызывает периодический характер изменений плотности радиации у поверхности спутников.

Положение полярной оси Урана, которое ныне близко к направлению на Солнце, сделало чрезвычайно сложной программу телевизионной съемки спутников. В самом деле, аппарат шел сквозь плоскость орбит спутников примерно как стрела сквозь мишень. В случае Юпитера и

Сатурна движение было совсем другим: можно было выбрать момент удачного расположения спутников и тогда аппарат последовательно сближался с многими из этих тел. Схема сближения с системой Урана вызывала еще

Т а б л и ц а 8. Массы и отражательные свойства главных спутников Урана

Название	Масса, г (предварительное значение)	Средняя плотность, г/см ³	Геометрическое альbedo (предварительное значение)
Миранда	$7,3 \cdot 10^{22}$	$1,26 \pm 0,39$	0,33
Ариэль	$1,4 \cdot 10^{24}$	$1,65 \pm 0,30$	0,46
Умбриэль	$1,3 \cdot 10^{24}$	$1,44 \pm 0,28$	0,18
Титания	$3,3 \cdot 10^{24}$	$1,59 \pm 0,09$	0,27
Оберон	$2,9 \cdot 10^{24}$	$1,50 \pm 0,10$	0,24

одну проблему: регистрация последовательных гравитационных возмущений от спутников становилась невозможной, а именно таким методом определялись массы (и средние плотности) спутников Юпитера и Сатурна. Поэтому пришлось воспользоваться методом более сложным: наиболее точно была найдена масса Миранды (с которой аппарат сближился наиболее тесно), а затем последовательно учитывались взаимные возмущения спутников с помощью позиционных наблюдений. В табл. 8 приводятся найденные таким образом средние плотности (близкие к $1,4 \text{ г/см}^3$, что указывает примерно на 60% водяного льда в составе спутников). Таким образом, спутники Урана тоже ледяные, но отличаются от спутников Сатурна несколько большей плотностью. По-видимому, в них содержится довольно много гидратированных силикатов; ядро у них может составлять половину диаметра небесного тела или даже больше.

Оберон оказался первым объектом исследований при выбранной геометрии сближения. Геологи (точнее, астрогеологи) предсказывали, что будет найдено много метеоритных (ударных) кратеров и почти ничего другого. Действительно, уже на мелкоплановых телевизионных снимках Оберона угадывались светлые пятна, которые оказались венцами очень светлых лучей вокруг ударных кратеров больших размеров. Природа светлых выбросов — водяной лед, иней, снег. Светлые выбросы контрастируют с очень темной древней поверхностью этого довольно крупного небесного тела. Его диаметр, более 1500 км, составляет почти половину поперечника нашей Луны. Поверхность насыщена старыми ударными кратерами,

и некоторые из них имеют очень темное дно. Полной неожиданностью оказалось темное дно и у крупных «молодых» метеоритных кратеров, окруженных светлыми лучами. Это почти несомненно указывает на «вулканическую активность» в водном варианте, когда сквозь образовавшиеся разрывы в ледяной коре на поверхность изливалась загрязненная вода, которая при застывании образовала темную поверхность. Температура на поверхности спутников Урана очень низка; средние в течение суток значения составляют от 60 К для Умбриэля до 54 К для Ариэля. В таком диапазоне температур физические свойства водяного льда очень отличаются от привычных нам: лед становится минералом.

Более подробное изучение снимков показало, что через все южное полушарие Оберона проходит широкая долина, также свидетельствующая о тектонических процессах ранней геологической истории спутника. Некоторые крупные кратеры частично заполнены затвердевшими темными потоками. По-видимому, в его истории действовали мощные внутренние силы (и потоки тепла), которые разрушали ледяную кору и вызывали ее движение. Их следы мы видим теперь как разломы поверхности спутника. Но происходило все это очень давно.

Не следует, однако, считать, что сведения о присутствии воды (в твердой фазе) на поверхности спутников Урана были получены впервые: об этом говорили наземные спектроскопические исследования и раньше.

Титания заметно светлее Оберона и немного больше по размерам, около 1600 км в диаметре. Это самый большой спутник в системе Урана (рис. 7.4). Снимки Титании, сделанные с высоким разрешением, показали, что древних ударных кратеров здесь значительно меньше, чем на Обероне, причем особенно мало крупных кратеров. Так как они, несомненно, когда-то существовали, действовал какой-то процесс, который привел к их разрушению. Вся поверхность спутника изрезана системой рифтов (долин с обрывистыми краями) и пересекающихся извилистых долин, очень похожих на русла рек. Наиболее длинные имеют протяженность почти в 1000 км. Некоторые из них окружены системами светлых отложений на поверхности. Интересные результаты дал поляризметрический эксперимент: поверхность покрыта слоем пористого материала. Скорее всего, это водяной иней, конденсировавшийся на поверхности после излияний воды в трещинах (вспомним спутник Юпитера Европу).

Наиболее многочисленны мелкие ударные кратеры, которые образовали остатки прото-

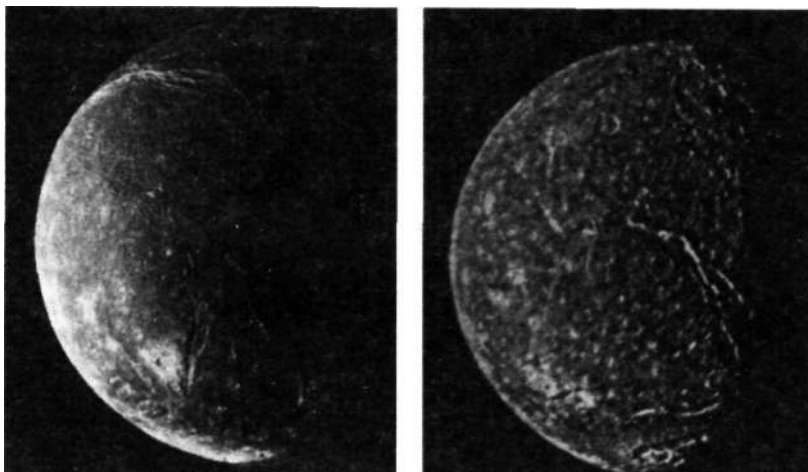


Рис. 7.4. Спутники Ариэль (слева) и Титания. Диаметр Ариэля — 1160 км, Титании — 1590 км. Поверхность обоих тел несет следы глобальной тектонической активности, но поверхность Титании более древняя. Снимки NASA

планетного материала, обломков и других небольших тел, обращавшихся вокруг Урана (независимые от него тела образовали бы более крупные кратеры). Что же касается древнего рельефа, то он, по-видимому, был полностью разрушен под действием значительного выделения внутреннего тепла. Этот разогрев происходил опять-таки в раннюю эпоху жизни Титании. В результате разогрева поверхность плавилась, происходила дифференциация материалов (более тяжелые породы тонули), что, в свою очередь, приводило к выделению тепла в еще больших масштабах. И уже после застывания вновь образовавшейся поверхности и ее многократных перестроек в процессах тектоники образовались те мелкие кратеры, о которых говорилось выше. Такой процесс глобальной переработки поверхности остается пока недоказанным, но очень вероятным.

Нарастание признаков геологической активности от Оберона к Титании почему-то не находит продолжения на Умбриэле (хотя резко усиливается на Ариэле и Миранде). Поверхность его носит примитивный характер крупных ударных образований с высокой степенью насыщения (многократного наложения кратеров). Умбриэль находится на довольно низкой орбите, всего 265 тыс. км. Умбриэль — очень темное небесное тело. Вокруг его кратеров полностью отсутствуют светлые выбросы. Монотонная темная поверхность не имеет оттенков, что можно попытаться объяснить именно ее древностью и переработкой под действием заряженных частиц и внедряющихся в поверхность ионов и нейтральных атомов. Но, чтобы еще больше запутать все дело, найдены несколько крупных кратеров с очень светлым

дном. Самый крупный из них находится на экваторе спутника. Как и у Урана, особенность положения оси вращения Умбриэля проявляется в том, что его экватор в наши дни практически постоянно находится на терминаторе спутника.

Отсутствие контрастных образований и очень темная поверхность выделяют Умбриэль из ряда других спутников Урана. Как это ни парадоксально, именно отсутствие контрастов делает его самым непонятным. Одно из предложенных объяснений заключается в том, что выделение тепла в недрах Умбриэля (в эпоху его образования) почему-то было недостаточным, чтобы вызвать плавление коры и гравитационную дифференциацию (о которой говорилось выше). Поэтому смесь льда и темных каменных пород осталась на поверхности в первозданном виде, а выбросы материала вокруг ударных кратеров неотличимы от основной поверхности. А как в таком случае объяснить белое дно некоторых (единичных) кратеров, спрашивают несогласные? Можно предположить, что темный слой имеет ограниченную толщину, а под ним находится чистый лед. Тогда наиболее крупные тела могли пробить темную корку и обнажить чистые слои. Наконец, толщина темного слоя может быть различной в разных местах. Словом, гипотез немало, как и аргументированных возражений. Вероятно, решение проблемы потребует времени.

Орбита следующего спутника — Ариэля (рис. 7.4) — вдвое ниже, чем орбита Луны, а один оборот он завершает всего за 2,5 сут. Как и другие спутники Урана, он постоянно обращен к планете одной стороной. Диаметр его несколько больше 1 тыс. км. Если геологиче-

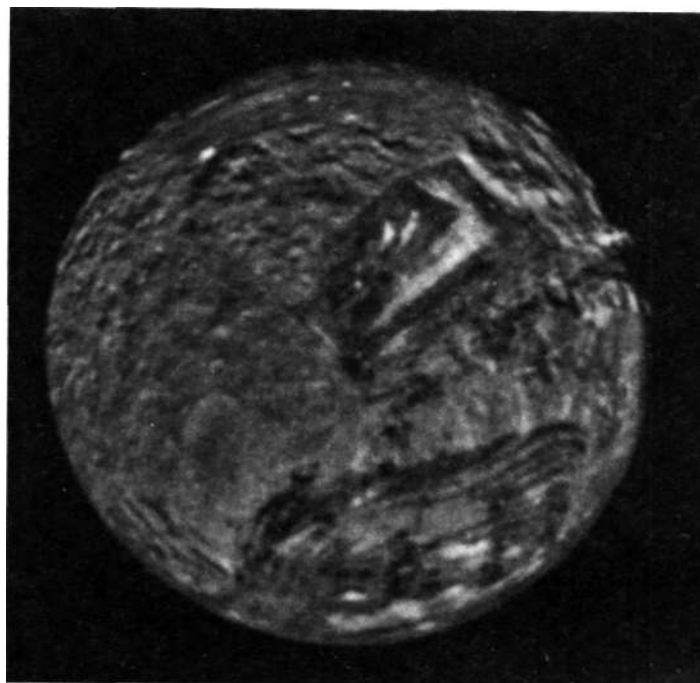


Рис. 7.5. Обработанная мозаика снимков Миранды. Два «стадиона» выше и ниже «шеvrona» размером 250—300 км в длину. Снимок NASA

ская активность Титании не вызывает сомнений, но относится к далекому прошлому, то Ариэль имеет все признаки сравнительно недавней активности.

Была получена мозаика Ариэля из четырех снимков с высоким разрешением. И если предварительные телевизионные снимки говорили об активности не меньшей, чем у Титании, то здесь ученые увидели поверхность, сплошь изрезанную рифтами. Их глубина близка к 10 км, а сами долины достигают нескольких сотен километров в длину. Долины ветвятся, образуя причудливую сеть притоков. Ширина рифтов доходит до 30 км. Их гладкое дно несет следы какого-то движения, что еще больше напоминает древние образования такого же вида на Марсе.

Вероятно, основной источник его энергии был тот же, что и у Ио: приливное трение, вызванное резонансами с Умбриэлем и Мирандой. Проблема, однако, в том, что сейчас таких резонансов в движении Ариэля нет. Возможно, они были в прошлом. Интересно отметить, что расчеты пока опровергают такую возможность, как, впрочем, отвергает теория и возможность разогрева спутника Сатурна Энцелада, с которым мы знакомимся выше. Что ж, как говорят, тем хуже для теории.

Наиболее вероятно, что рифтовые долины образовались в эпоху интенсивной перестройки ледяной коры Ариэля, сопровождавшейся ее

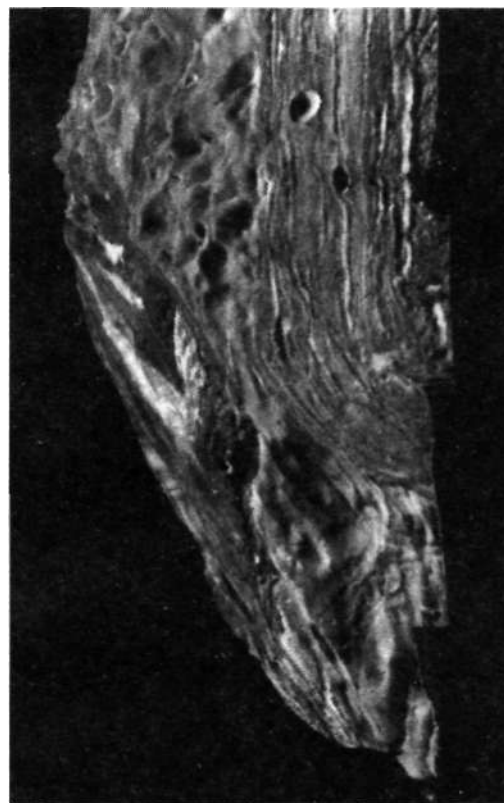


Рис. 7.6. Разлом глубиной более 20 км и «шеvron» над ним. Преобразование перспективы. Из работы Ш.Бу

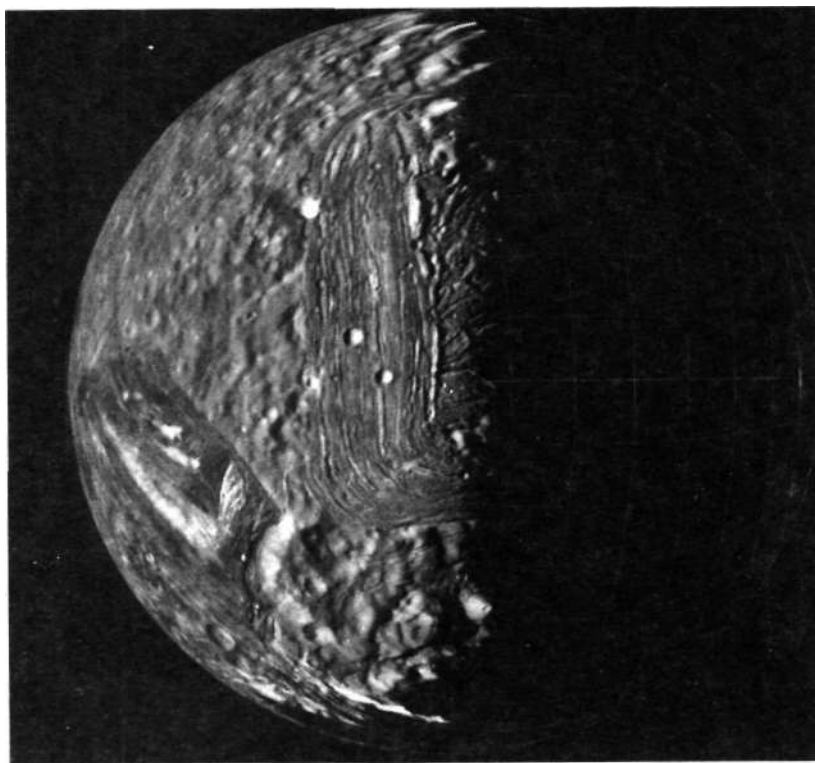


Рис. 7.7. Полусфера Миранды с большим «стадионом», каньоном (внизу) и «шевроном» (слева). Преобразование перспективы. Из работы Ш.Ву

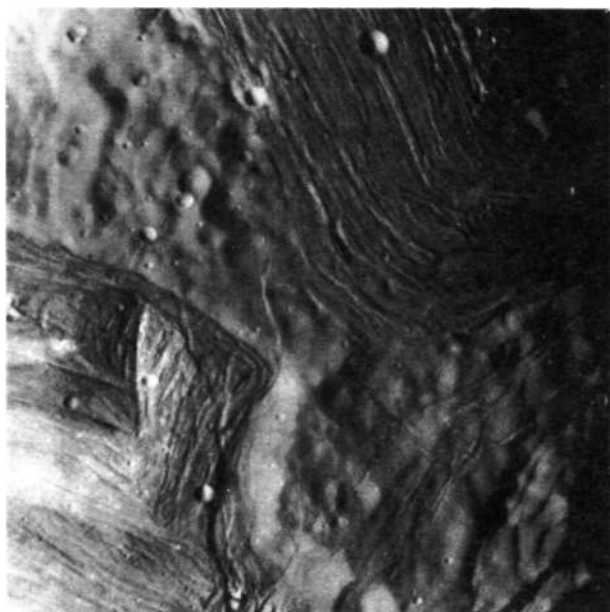


Рис. 7.8. Необычные образования на поверхности Миранды. Слева внизу — «шеvron». Разрешение на снимках Миранды до 600 м. Снимок NASA

разломами, сжатием и тектоникой. На поверхности спутника очень мало метеоритных кратеров, что опять-таки указывает на ее молодость, конечно, в геологических масштабах. Впрочем, высказано даже кажущееся фантастическим предположение о возможной современной активности Ариэля. Но тогда источник его энергии становится совершенно непонятным.

В качестве материала, который мог бы заполнять долины и двигаться вдоль них, предлагается, конечно, лед. Чтобы он был достаточно подвижным при столь низких температурах, в нем должны присутствовать какие-то примеси. Предполагается, что это аммиак и метан, которые вместе с водой выделялись на поверхность сквозь разломы. Но так же, как и на других спутниках Урана, метан не был обнаружен. Есть и другие предположения о возможной природе этих «ледников неподалеку от абсолютного нуля». Во всяком случае, «водяной вулканизм» на Ариэле сомнений не вызывает.

Поверхность спутника покрыта отложениями очень светлого материала, по-видимому, такого же водяного инея, как на спутнике Юпитера Европе.

Миранда

И все-таки «звездой телеэкрана» оказался не Ариэль. Миранда, спутник диаметром 480 км, который судя по плотности, содержит наибольшую долю льда, баллистически оказался самой удобной целью телевизионной съемки. И Миранда оправдала все усилия ученых и инженеров, которым пришлось решить массу технических проблем, чтобы обеспечить эту съемку.

У Урана довольно темно, в 370 раз темнее, чем на Земле. И все же освещенность «сцены» была примерно такой, как в хорошо освещенной рабочей комнате при искусственном освещении. Любой фотограф знает, что в таких условиях приходится увеличивать выдержку. То же относится и к телевизионной съемке с космического аппарата. Но если другие спутники наблюдались с большого расстояния, когда собственные движения аппарата и спутников не мешали длительной экспозиции и особой роли не играли, то в случае с Мирандой эти движения становились трудной проблемой. Впрочем, даже на снимках Ариэля мелкие детали слегка смазаны. Для Миранды расстояние, с которого производилась съемка, было совсем малым, а требовалось получить ряд снимков с высоким разрешением, чтобы затем составить из них мозаичный «портрет» спутника. Каждая выдержка достигала нескольких секунд. Словом, чтобы осуществить эту съемку, пришлось полностью изменить обычный порядок работы, когда изображения передавались по радиолинии на Землю сразу после их получения. При съемке Миранды аппарат все время поворачивался, чтобы скомпенсировать размазывание изображений. Но из-за этого его антенна уже не оставалась направленной на Землю, поэтому изображения пришлось записывать на борту, а на Землю они были переданы лишь на следующий день. Съемкой удалось охватить почти всю освещенную часть спутника, представив ее на восьми снимках с высоким разрешением.

На полученном изображении (рис. 7.5) выше и правее центра ученые увидели почти правильную трапецию, образованную из темных и светлых полос. Трапеция выделяется на фоне остальной поверхности почти полным отсутствием метеоритных кратеров, в то время как окружающий район представляет собой перерезанный небольшими рифтами кратерный рельеф. Трапеция получила условное название «шеvron». Его размеры 140 × 200 км. (На снимках видны детали размерами от 4,6 км и выше.) Полосы, образующие шеврон, имеют вид множества параллельных гряд, которые

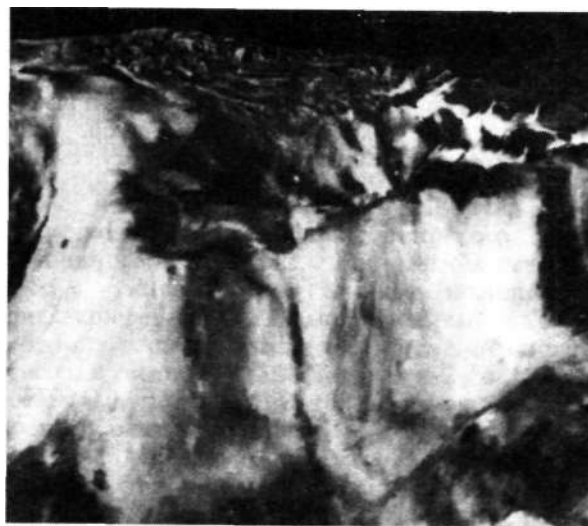
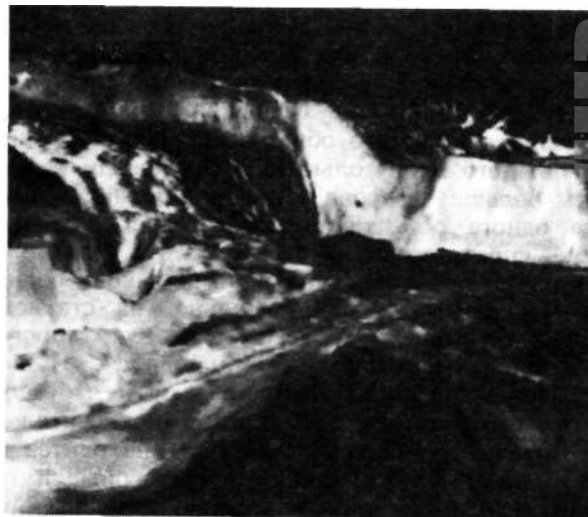


Рис. 7.9. Виды Миранды. Ледяные горы, обрывы и трещины. Из работы Ш.Ву

сходятся с другой такой же системой, образуя почти прямой угол. Странное продолжение шеврона — это глубокий, до 20 км разлом (справа), крутые склоны которого уходят за пределы освещенной части спутника. Шеврон находится у южного полюса Миранды.

Часть полученных снимков была обработана методом преобразования перспективы, что позволяет видеть поверхность с любой заданной точки. Так, на рис. 7.6 Миранда как бы видна с приближающегося к ней низко летящего аппарата.

Не менее загадочные образования (возможно, той же природы) находятся вблизи терминатора (как и у других спутников, из-за положения полярной оси терминатор сейчас постоянно находится в одном и том же

географическом поясе Миранды — вблизи ее экватора). Первое из них (рис. 7.7; 7.8) имеет такую же систему светлых и темных полос, но более широких, чем у шеврона. Похоже, что отснятая часть этого объекта образует стороны правильного пятиугольника, по площади раз в пять больше шеврона. Для него, как и для еще одного объекта, о котором речь пойдет ниже, предложено название «Circi Maximi», которое древние римляне понимали как «большой стадион». И, действительно, на стадион образование очень похоже, хотя для второго из них больше подходит «ипподром». И на «стадионе», и на «ипподроме» почти отсутствуют метеоритные кратеры, т.е. это относительно молодые объекты. «Ипподром» находится с диаметрально противоположной стороны спутника. Его очертания напоминают очертания «стадиона» и выглядят словно след пахоты на краю поля.

Примерно 20 параллельных горных гряд, разделенных такими же долинами, повторяются через каждые 5—7 км. Вся система поворачивает почти под прямым углом и также уходит за терминатор. Этот «ипподром» очень напоминает систему субпа-

раллельных борозд на Ганиমেде. По образному выражению одного из геологов, маленькая Миранда представила коллекцию всех геологических форм, какие встречаются в Солнечной системе.

Чтобы объяснить природу поверхности Миранды, выдвинуто много гипотез. Одна из них предполагает, что первичное тело было расколото в крупных столкновениях, но части не разошлись, а соединились снова, обнажив внутреннюю структуру небесного тела. Однако остается непонятным, почему сохранились ударные кратеры на других частях поверхности спутника. Другая гипотеза допускает, что существовал неравномерный разогрев недр Миранды, и локальное плавление коры обнажило плиты, обладавшие положительной плавучестью, которые мы теперь видим на поверхности спутника.

Спутниковая система Урана преподнесла, как, наверное, согласится читатель, сюрпризы, не менее впечатляющие, чем вулканы Ио. Завершает эту главу рис. 7.9. Это кадр из кинофильма о полете над Мирандой.

Г Л А В А 8

**НЕПТУН: ОТКРЫТИЕ, МИМО КОТОРОГО ПРОШЕЛ ГАЛИЛЕЙ.
КОЕ-ЧТО О ПЛУТОНЕ**

Нептун был открыт в 1846 г. Со школьной скамьи все знают историю открытия Леверье, Галле и д'Арреста. Но история свидетельствует, что Нептун случалось видеть и намного раньше. Вот что происходило за 234 года до его открытия.

...Галилей принял к окуляру и тщательно вел свой телескоп, стараясь не упустить Юпитер из поля зрения. Спутники Юпитера, эти «медицейские звезды», как он назвал их в честь мецената, очень его интересовали. Их движение было удобно проследить, сравнивая положение спутников, особенно если рядом оказывалась какая-нибудь звезда. Галилей редко указывал «звезды фона» в своем журнале, но 28 декабря 1612 г. он отметил две такие звезды. Спустя месяц, 28 января 1613 г., он сравнивает их положение и поясняет: «за неподвижной звездой следует другая, по той же прямой линии... которая наблюдалась вчера ночью, но тогда они отстояли дальше друг от друга». По-видимому, Галилей был слишком занят; как объяснить иначе, что эта движущаяся звезда не привлекла его внимания? А ведь это был Нептун! Выяснилось это только через 366 лет, когда современные исследователи заинтересовались, что же видел Галилей, и даже попытались использовать его наблюдения для уточнения движения планеты. В 1670 г. Флемстид нанес Нептун на звездную карту...

В августе 1989 г. принимавшиеся с «Вояджера-2» изображения Нептуна на телевизионных экранах стали быстро увеличиваться — до цели оставались последние десятки миллионов километров. Каждую секунду аппарат приближался к планете еще на 19 км. Все его жизненно важные системы работали хорошо, и преобладающим чувством среди ученых-планетологов было приподнятое ожидание. Сильнее всего оно ощущалось в расположенном в пригороде Лос-Анджелеса огромном космическом исследовательском центре США JPL

(Лаборатория реактивного движения). Сюда собрались многочисленные гости из разных стран, журналисты, телевидение со своими ярко раскрашенными фургонами, параболическими антеннами и разбросанными под ногами толстыми кабелями. Все места на окрестных автостоянках были заняты. А неподалеку, в Пасадене, собралось на торжество Американское планетное общество, которое через внутренние телевизионные линии получало все новые и новые изображения Нептуна и его спутников. Ученые Калифорнийского технологического института, Лос-Анджелесского и других университетов вихрем носились по пресс-конференциям, выступлениям, научным собраниям и, казалось, одновременно присутствовали всюду. А с «Вояджера-2» поступали все новые данные. Его сближение с Нептуном превращалось в национальное торжество, которое, надо сказать, «Вояджер-2» заслужил. По существу это было полное обновление сведений обо всем семействе планет-гигантов — результат всего одной планетной миссии. На фото 71 «Вояджер-2» показан на фоне Нептуна.

За время полета аппарат передал в целом 115 тыс. телевизионных снимков, в том числе 9 тыс. — в сближении с Нептуном. Конечно, снимков, «захватывающих дух», среди них не так уж много. Самые лучшие из них приводятся на страницах этой книги.

Задолго до сближения журналисты стали требовать от ученых исчерпывающие предсказания: что ждет «Вояджер-2» у Нептуна. Но ученые предпочитали заниматься проверкой и уточнением программ намеченных экспериментов. Ошибиться в них сейчас было бы особенно досадно: следующая возможность задать вопрос природе появится нескоро. Как показало сближение, некоторые из небогатых сведений о физике Нептуна, добытые в трудных наземных исследованиях, оказались довольно близкими к истине. Пожалуй, это не удивительно: все они

были получены с помощью новых изошренных технических средств. Впрочем, и у нас теперь есть возможность сопоставить новые данные с прежними представлениями о Нептуне.

Вода вместо алмазов

Увидеть облака на Нептуне обычными телескопическими методами практически невозможно. Поэтому еще совсем недавно определить период вращения далеких гигантов, Урана и Нептуна, можно было только спектроскопически, по доплеровскому смещению полос, наблюдаемых от левой и правой сторон вращающейся планеты. И хотя полос в их спектрах сколько угодно, но найти период вращения трудно. Последние доваджеровские оценки продолжительности суток Нептуна составляли от 15 до 19,5 ч. «Вояджер-2» позволил из наблюдений радиовсплесков найти более точный период вращения глубоких слоев планеты: 16,11 ч.

Масса Нептуна в 17 раз больше земной: $1,0243 \cdot 10^{29}$ г. Велик и диаметр планеты: 49 528 км экваториальный и 48 680 км полярный: в 3,9 раз больше диаметра земного шара, но немного меньше Урана. Динамическое сжатие 0,0174. Средняя плотность Нептуна $1,64 \text{ г/см}^3$. Сравнительно высокая средняя плотность указывает на большую долю тяжелых соединений и элементов в глубоких слоях планеты. Ускорение свободного падения на уровне видимой поверхности облаков на Нептуне на 16% больше земного (но в 2,3 раза меньше, чем на Юпитере). Особенность орбиты Нептуна — очень малый эксцентриситет (0,009), почти такой же, как у Венеры. Угол наклона экватора к плоскости орбиты составляет 29° . Орбита наклонена к эклиптике на $1,8^\circ$. Год Нептуна длится 164,8 земных года.

Один из лучших снимков Нептуна, сделанных «Вояджером-2», приведен на фото 73. Характерная аквамариновая окраска, еще более глубокого тона, чем у Урана, объясняется присутствием сильных метановых полос поглощения в красной части спектра. Метан в атмосфере Нептуна (как и у других планет-гигантов) составляет лишь небольшую примесь, около 1%. Атмосфера состоит главным образом из водорода и гелия, причем доля гелия, согласно предварительным данным, составляет 15% или чуть больше (но заведомо меньше 25%). Почти все остальное — водород. В общем, гелия больше, чем в атмосфере Урана. Высота атмосферы может достигать 3—5 тыс. км, а давление на ее дне 200 кбар. Для

перехода водорода в жидкомолекулярное состояние, как у Юпитера, этого недостаточно.

По-видимому, на дне непунианской атмосферы находится океан из воды, насыщенной различными ионами. Интересно, что предложенная для Урана и, похоже, не подтвердившаяся для него гипотеза «о горячем перемешиваемом водяном океане» (трехслойная модель, о которой мы рассказывали в гл. 7) оказывается справедливой для Нептуна! Если предварительные выводы правильны, Нептун окажется самым большим океаном в Солнечной системе. Один из сильных аргументов в пользу океана — это поразительное магнитное поле Нептуна, о котором речь будет ниже.

Метан в атмосфере — это, конечно, далеко не весь метан. Предполагается, что значительные его количества входят в ледяную мантию планеты (см. рис. 5.5). При давлении около 1 Мбар смесь воды, метана и аммиака может образовать твердые или газожидкие льды даже при очень высоких температурах, от 2000 до 5000 К. На долю ледяной мантии приходится до 70% всей массы планеты, причем основная ее часть — вода! В качестве курьеза стоит упомянуть недавнюю работу, авторы которой указывали, что в недрах планеты может существовать слой алмазов. Экспериментальное воздействие ударных волн на метан, находящийся под давлением 1 Мбар и при температуре 2000 — 4000 К, вызывало диссоциацию метана с последующей кристаллизацией углерода в алмазы. Толщина слоя алмазов, по оценке авторов гипотезы, может достигать тысячи километров. Гипотеза, естественно, привлекла внимание людей, весьма от астрономии далеких. Но даже если гипотеза окажется в чем-то справедливой, разработка недр планеты вряд ли станет когда-нибудь возможной.

Около 25% массы Нептуна приходится на расположенное внутри мантии ядро. Оно состоит из окислов кремния, магния, железа и его сульфидов. Сейчас специалисты считают, что ядро должно включать также много хондритных материалов, которые в обилии присутствовали в протопланетном облаке на стадии формирования планет.

Теоретические модели далеких гигантов позволяют предложить несколько различающихся моделей внутреннего строения, выбирать которыми можно только на основе экспериментальных данных. Теоретики обычно исходят из того, что состав планеты должен быть близким к составу протопланетного облака в его периферийной части, где образовался Нептун. На этой основе и строится та или иная модель. Но особенности состава протопланетного облака тоже известны плохо.

В общем, типичная модель имеет давление в центре планеты 6–8 Мбар и постоянную температуру в ядре около 7000 К. Критический параметр для моделей — безразмерный момент инерции планеты, который до «Вояджера-2» принимался равным 0,29. Теперь его удалось уточнить в эксперименте (0,26), поэтому набор возможных моделей значительно сузился.

С особенностями строения недр Нептуна связана загадка его теплового излучения. Поток солнечной радиации на его орбите в 2,46 раза меньше, чем на Уране, а отражательные свойства обеих планет близки. В видимой части спектра они отражают около 85% падающего солнечного света. Так что энергетический бюджет Нептуна очень невелик (полпроцента земного). Уран, как мы уже видели, имеет весьма «спокойную» метеорологию. Можно было ожидать, что на Нептуне атмосферные течения будут еще слабее. Как ни странно, нет. Уже наземные измерения позволяли предположить, что Нептун выделяет и излучает значительный поток энергии. «Вояджер-2» показал, что этот поток намного (в 2,7 раза) больше того, что планета получает от Солнца. Температура теплового излучения Нептуна составляет 59,3 К, что даже выше, чем у Урана (56 К).

Гипотезы, которые успешно объясняют большое тепловыделение у Юпитера и Сатурна, здесь не годятся. Поэтому предполагается, что значительный избыток тепла порождают именно хондритные материалы, выделяющие заметные количества энергии в радиоактивном распаде.

На фото 73 планета не слишком богата деталями: ровный голубой фон с довольно слабо выраженными поясами, несколько темных пятен и несколько групп очень светлых облаков. Похоже, что «Вояджер-2» застал не самый эффектный наряд Нептуна. Планета бывает и покрасивее. Лучшие наземные снимки, полученные с ПЗС-камерой в начале 80-х годов и сделанные в спектральной полосе поглощения метана 890 нм, позволяли различать большие, в четверть диска, светлые пятна. Это были расположенные высоко в атмосфере облака из твердых аэрозольных частиц неизвестного состава. Такие снимки потребовали большого труда, применения новейших приборов и сложной обработки изображений на компьютере. 2,5 угл. с — это наибольший угол, под которым с Земли бывает виден диск Нептуна. А в хороших астрономических условиях, с телескопом средних размеров астроном может получить изображение с разрешением около 1 угл. с. Иными словами, Нептун останется точкой. Но с использованием упоминавшихся новых методов в одной из работ удалось

получить разрешение раз в 5 лучше: 0,2 угл. с. На снимках был отчетливо виден темный экваториальный пояс планеты и две широкие полосы облаков в интервалах широт 30–70° в северном и южном полушариях. Удалось даже проследить, как на последовательных снимках смешались крупные массивы облаков, и найти по ним период вращения облачной атмосферы на этих широтах, в среднем 17 ч 50 мин. Это почти на 2 ч больше периода вращения глубоких слоев планеты.

Снимки Нептуна указывают на значительную метеорологическую активность планеты, в отличие от Урана, причем характер атмосферной циркуляции несомненно доказывает, что энергия приходит «снизу», из недр планеты, как и на Юпитере, на Сатурне. С другой стороны, сколь ни мал приток солнечной радиации, для Урана это практически единственный источник энергии (напомним, что его собственное тепло в суммарном тепловом потоке не более 13%). Согласно расчетам, этой энергии слишком мало, чтобы возникли такие мощные явления, как циклоны. И действительно, скорости ветра на Уране невелики. На Нептуне ветры несравнимо сильнее. Одно из возможных объяснений состоит в том, что Уран уже отдал все запасенное тепло, а Нептун еще нет. Словом, эти близнецы не слишком похожи. Давно известно, что Нептун обнаруживает какую-то активность: например, быстрые изменения яркости в узких полосах инфракрасного диапазона на целых 3 звездные величины (в 16 раз).

До Нептуна 4900 км

В задачи сближения входило изучение Нептуна и окружающего его пространства (кольца, спутники, пылевые частицы, магнитосфера, электромагнитные излучения). Сближение произошло в 3 ч 56 мин 25 августа 1989 г., когда «Вояджер-2» отделяло от центра планеты 29 240 км, а до поверхности облачного слоя оставалось лишь 4900 км. Движение аппарата вблизи Нептуна показано на рис. 8.1, где отражены также положения колец и спутника Тритон в момент сближения. Аппарат приближался к Нептуну со стороны освещенного Солнцем южного полушария планеты. После отклонения его полем тяготения планеты (это был последний гравитационный маневр «Вояджера-2») аппарат был направлен к Тритону. Сближение с Тритоном произошло в 9 ч 10 мин в тот же день, минимальное расстояние составило 39 800 км. На рис. 8.1 спутник Нерейда находится за пределами чертежа, в дальней части орбиты, на расстоянии 4,7 млн км.

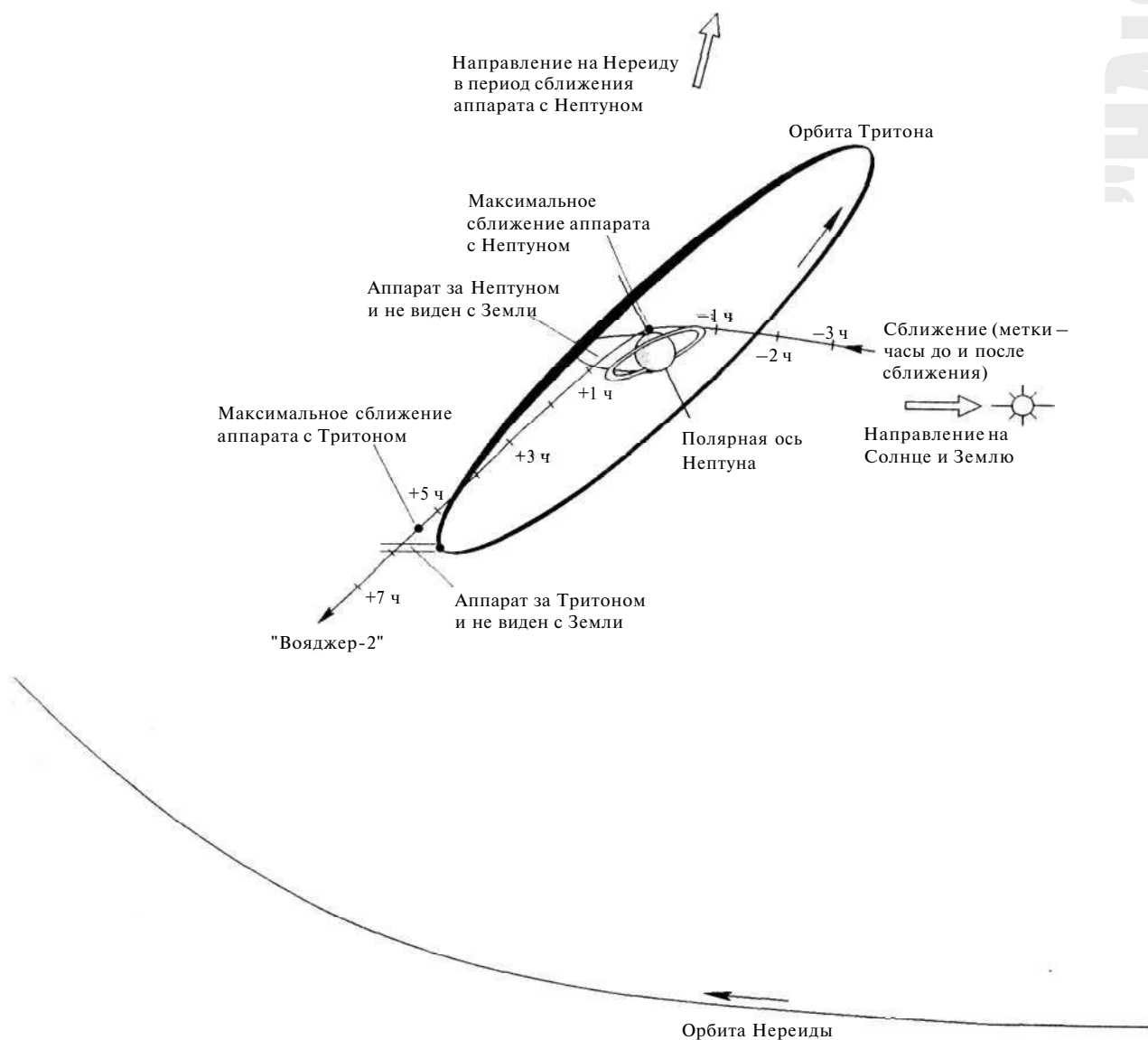


Рис. 8.1. Схема сближения «Вояджера-2» с Нептуном

Часть ее орбиты видна в нижней части рисунка. Спутники Тритон и Нереида были известны до сближения Вояджера с планетой. На рисунке показаны также зоны затмений аппарата Нептуном и Тритоном, где проводились затменные эксперименты, в том числе наблюдение призрачных колец Нептуна. Разумеется, большой объем исследований выполнен также до и после непосредственного сближения с планетой.

Одним из первых открытий «Вояджера-2» было странное образование на диске Нептуна (фото 74), которое по аналогии с Большим Красным Пятном на Юпитере получило на-

звание «Большое Темное Пятно» (БТП). Несмотря на небольшие внешние отличия сходство БТП и БКП несомненно. Пятно на Нептуне по своим размерам хотя и меньше юпитерианского, но близко к размерам земного шара. Его форма и размеры не вполне постоянны. Угловая протяженность БТП практически та же, что и на Юпитере: долготная 38° , широтная 15° (для сравнения: БКП имеет соответственно 30° и 20°). Более того, БТП и находится на том же месте: 20° ю.ш., на широкой светлой полосе, охватывающей широты от 5° с.ш. до 40° ю.ш. несимметрично относительно экватора.

По своей природе БТП — это гигантский антициклон, вытянутый в долготном направлении. Расположенный в южном полушарии, он вращается против часовой стрелки и завершает один оборот за 16 земных суток (значительно дольше, чем на Юпитере). БТП — зона повышенных давления и температуры. Интересно, что при наблюдении поля теплового излучения планеты БТП ничем не выделяется, в то время как Красное Пятно Юпитера хорошо видно на тепловых картах.

Над центром Большого Темного Пятна порой появляются яркие белые облака, которые висят высоко в прозрачной надоблачной атмосфере. По положению их теней на основном облачном слое удалось найти высоту белых облаков — от 50 до 100 км.

В отличие от БКП Юпитера (см. фото 38), сопровождающегося как бы бурлящими потоками, пятно на Нептуне имеет спокойные, однородные очертания. Над южным краем БТП постоянно присутствует массив белых облаков, подобный облакам над горными вершинами Земли. Плотность облаков меняется изо дня в день. По аналогии с горными облаками можно утверждать, что здесь присутствуют мощные восходящие потоки газа. На фото 74 видна широкая облачная полоса, появившаяся 21 августа 1989 г. над БТП. Она как бы разрезала пятно пополам и, кажется, даже немного сместила нижнюю его половину относительно верхней. Почему? Во всем этом пока очень много непонятного. Физика планет-гигантов, по существу, подвергается ревизии.

Изучение метеорологических явлений на Нептуне оказалось непростым делом, и не только по таким очевидным причинам, как в 900 раз более низкая освещенность, чем на Земле. Тяжело пришлось тем ученым, которые разрабатывали подробную программу наблюдений с поворотами телевизионной камеры. Эта программа предусматривала повторные наблюдения некоторых метеорологических объектов на следующий нептунианский день и через несколько оборотов планеты. Программу разворотов надо было послать на борт «Вояджера-2» заблаговременно. Но предсказанные положения изучаемых объектов сплошь и рядом не оправдывались. Зачастую через сутки Нептуна они оказывались на другой широте, а то и вовсе исчезали с голубого диска.

Скорости движений в атмосфере Нептуна огромны. По отношению к самой вращающейся планете некоторые объекты смещаются на 2200 км за 1 ч! По скорости ветров Нептун обогнал даже Сатурн. Уникальная особенность атмосферы Нептуна — движение атмосферы направлено к западу, разумеется, относительно

вращающейся к востоку планеты. Но экваториальная скорость, вызванная вращением, настолько высока (2,7 км/с), что как бы ни неслись облака, результирующая скорость всегда остается направленной к востоку. Иными словами, поскольку сверхураганные ветры дуют в сторону, обратную направлению вращения планеты, период вращения, найденный по движению облаков, получается длительнее истинного периода планеты. (По сравнению с суперротацией Венеры это противоположный случай.)

Большое Темное Пятно несется к западу со скоростью 325 м/с, причем уже за одну неделю уплывает относительно предсказанных долгот и широт. По сравнению с ним Красное Пятно Юпитера может считаться эталоном стабильности: его дрейф составляет всего 3 м/с. Антициклоническое движение БТП примерно соответствует разности скоростей зональных течений с его северной и южной сторон, которые, обтекая, вращают его. Пятно находится на самой яркой полосе («зоне», по аналогии с Юпитером). Темные пояса, тоже расположенные несимметрично относительно экватора, выражены нечетко и охватывают широты от 6 до 25° с.ш. и от 45 до 70° ю.ш. Вокруг южного полюса Нептуна расположена облачная «полярная шапка», по яркости соответствующая полосе на широте 40° ю.ш. Структура вблизи северного полюса неизвестна: там сейчас полярная ночь.

Призраки метеорологии

Структура полос, концентричных относительно полярной оси планеты (а не подсолнечной точки), показывает, что динамика атмосферы в значительной мере определяется притоком тепла из недр. В самом деле, представим себе невращающуюся планету без внутренних источников тепла. «Особой точкой» в динамике ее атмосферы будет, конечно, пятно, обращенное к Солнцу. Сложнее выглядит вращающаяся планета. В игру вступают могучие силы Кориолиса, которые так знакомы нам по погодным явлениям на Земле, где внутреннее тепло несопоставимо с притоком солнечной радиации. По существу, динамика атмосферы отражает баланс между двумя источниками энергии.

Самой низкой температурой на диске Нептуна, всего 52 К, отличаются именно подсолнечные широты, а самыми «теплыми», до 61 К, оказались районы полюсов и экватор. Простейшее объяснение заключается в том, что слегка нагревающийся газ поднимается, охлаждаясь, в подсолнечных широтах и растекается к экватору и к полюсу. Там он снова опускается и

нагревается, сжимаясь. Температура, которую измеряют приборы аппарата, — это не температура газа, а главным образом температура аэрозольной среды, положение которой в этих районах не одинаково.

Роль солнечной радиации сказывается и в несимметричной относительно экватора диаграмме распределения скоростей зональных ветров. Диаграмму было нелегко построить — многие из деталей, по движению которых строилась диаграмма, оказались «метеорологическими миражами»: через несколько часов они куда-то бесследно исчезли. Но и сравнительно крупные детали, которые наблюдались постоянно, тоже вызвали трудности в предсказании их положения. Второе по размерам пятно — Темное Пятно-2 (ТП2) (в нижней части фото 73, 55° ю.ш.) всего за одну неделю сместилось на 4° (2000 км) к северу. При этом его период возрос на 30 мин. Светлое образование «скуттер» (посередине между БТП и ТП2 на том же рисунке) на широте 42° ю.ш. отличалось особенно быстрым движением и за короткое время несколько раз изменяло свою форму. Один из специалистов по динамике атмосферы возмущенно заметил, что детали на диске Нептуна меняют полосы, нарушая все правила дорожного движения...

В некоторых районах скорость ветра достигала скорости звука. Распределение ветров по широтам в среднем такое. На 60° ю.ш. и 30° с.ш. скорости минимальные (± 100 м/с) и возрастают до 400—700 м/с в полосе широт от 0—20° ю.ш.

О природе «метеорологических миражей» пока еще нет единого мнения. Многие считают, что они связаны с локальными восходящими потоками (аналогично явлению апвеллинга в океанах). Малые составляющие, присутствующие в подоблачной атмосфере, выносятся вверх и быстро кристаллизуются в холодном газе, образуя яркие белые облака. Кристаллы затем постепенно оседают и попадают снова в область высоких температур. Кругооборот вещества замыкается. Некоторые специалисты полагают, что природа миражей связана с волнами в атмосфере, на гребнях которых температура падает до замерзания метана, образующего яркие облака.

Видимый облачный слой соответствует давлению 1,2—1,3 бар и среднему диаметру 49 100 км. Заметим, что вывод о конденсированном метане больше опирается на теоретические, чем на экспериментальные данные. На 50—100 км выше видимого облачного слоя иногда наблюдались группы вытянутых облачных полос шириной по 50—200 км с четкими

теньями от них на основном облачном слое. Таков снимок, представленный на фото 72. Здесь можно видеть уходящую в ночь облачную грядку (типа земных циррусов) вблизи терминатора, расположенную на широте 27° с.ш., — примерно на широте БТП, но в северном полушарии. Такие облака появлялись ближе к заходу Солнца.

Природа надоблачной дымки другая. Расположенная выше основного облачного слоя, она наблюдалась над лимбом Нептуна в виде дуг над краем планеты. Скорее всего дымка состоит из углеводородов, возникающих при фотолизе метана: этана C_2H_6 , ацетилена C_2H_2 , образующих слои на высоте 45—60 км, и этилена C_2H_4 на высоте около 120 км.

Во время длившегося 49 мин радиозахода аппарата за Нептун было проведено радиозондирование подоблачной атмосферы с помощью радиолуча «Вояджера-2». Для этого ориентация аппарата изменялась так, чтобы радиолуч попал на Землю после преломления в атмосфере Нептуна. Луч неожиданно исчез, когда пересек уровень 3 бар. Это на 25 км ниже верхней границы облаков. По расчетам здесь должен находиться слой облаков из льда сероводорода H_2S . Но сероводород не мог

вызвать такое поглощение. Более вероятно, что радио-непрозрачный слой состоит из аммиака, причем для этого достаточно небольшого его количества.

В общем, чтобы любоваться игрой облаков, лучше всего оставаться на Земле или отправиться на Юпитер. Все остальные планеты, включая Нептун, в этом отношении проигрывают.

Наклонный ротатор

Работы о магнитном поле Нептуна публиковались и до 1989 г. Удобно сравнить, например, работу 1988 г. с теми сведениями, что через 1 год собрал «Вояджер-2». Читатель, вероятно, помнит, как искали синхротронное излучение радиационных поясов Юпитера. За прошедшие с тех пор годы радиофизики и в прямом, и в переносном смысле шагнули настолько далеко, что была сделана попытка принять на Земле радишумы из магнитосферы Нептуна, вызываемые движением быстрых электронов в магнитном поле планеты. Авторы сочли попытку успешной и заключили, что магнитное поле Нептуна в 2—3 раза сильнее, чем у Земли и Урана. Это было тем более интересно, что задолго до 1988 г. для Нептуна был предсказан необычный механизм возбуждения магнитного поля: вне ядра (что отчасти справедливо и для

других гигантов). Большая масса Нептуна и выделение из его недр больших тепловых потоков предполагают, указывал автор, интенсивную конвекцию в водяной мантии планеты. Напряженность магнитного поля в разных работах оценивалась в пределах от земного (31 000 нТл) до 1,7 млн нТл.

«Магнитный штопор» Урана, который так поразил ученых в 1986 г., привлекает именно своей, скажем так, экстравагантностью. Но уж Нептун, с его «нормальным» положением полярной оси, казалось, должен был бы и магнитное поле иметь «нормального» образца, вроде Земли или Сатурна. Но поле оказалось очень похожим на то, что мы уже видели у Урана, только примерно вдвое слабее. И не менее экстравагантным. Для такого поля предложено название «наклонный ротатор». Если представить его, как обычно, дипольным эквивалентом, угол между осью магнитного диполя и осью вращения Нептуна составит $46,8^\circ$ (для Урана 59°). В свою очередь, ось вращения на 29° отклонена от нормали к плоскости орбиты (рис. 8.2). В результате ось диполя описывает в пространстве конус с раскрытием 94° . В наши дни минимальный угол между образующей конуса и направлением на Солнце близок к 20° , причем к нему обращен южный магнитный полюс. Заметим, что «дипольное» приближение более или менее удовлетворительно работает на расстояниях более четырех радиусов планеты. Ближе сильно сказываются недипольные составляющие.

Ось диполя сдвинута на 14 тыс. км в сторону от центра планеты, а центр диполя смещен на 6 тыс. км в южное полушарие (рис. 8.2). Поэтому напряженность магнитного поля у южного магнитного полюса в 10 раз выше, чем у северного, а в среднем близка к 13 000 нТл (в 2,5 раза меньше земной).

«Вояджер-2» провел внутри магнитосферы Нептуна 38 ч. Как и в случае Урана, во время сближения радиовсплески от заряженных частиц долго не удавалось обнаружить. Их нашли за 8 дней до сближения, на расстоянии 864 тыс. км, в тот же день, когда аппарат достиг ударной волны (у границы магнитосферы и невозмущенного сверхзвукового солнечного ветра). Прохождение ударной волны было настолько растянутым, что заняло больше часа (на Земле на это ушло бы 2 с). Причина оказалась именно в наклонном ротаторе: в этот момент южный полюс диполя был обращен к Солнцу. Поэтому аппарат двигался практически вдоль линий поля, как показано на рис. 8.3,а, со стороны южного каспа (воронки у магнитного полюса). Такое везение впервые

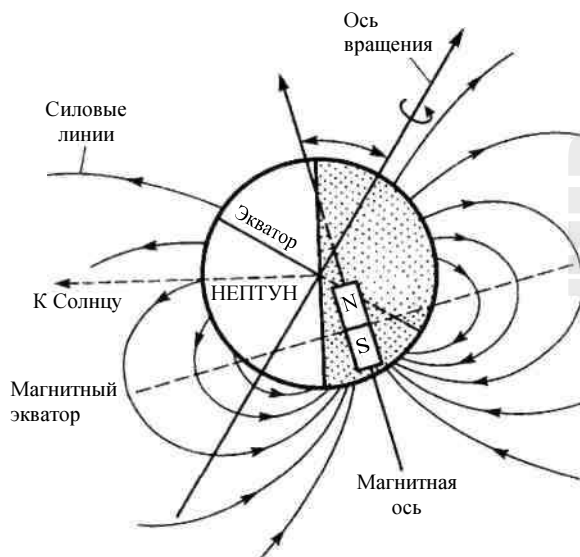


Рис. 8.2. Схема дипольного замещения магнитного поля Нептуна

позволило получить сведения о структуре полярных каспов. За время пересечения магнитосферы магнитное поле изменяло свое направление 5 раз. Два крайних положения магнитосферы показаны на рис. 8.3. Точками отмечены те положения аппарата, прохождение которых соответствовало данной конфигурации магнитосферы.

Из периодичности радиовсплесков удалось наконец найти период вращения Нептуна: 16,11 ч. Радиовсплески принимались уже за месяц до сближения (но их вначале не удавалось выделить из шума) и в течение 22 дней после него. Дюжину раз удалось принять какие-то другие сигналы «спокойного» характера, которые приходили от самой планеты, а не из магнитосферы. Эти сигналы имели направленный характер. Они напоминают подобный же луч на Сатурне.

Особенности поля Нептуна привели ученых к следующим выводам. Поле возбуждается в жидкой проводящей среде — в слое, который находится на расстоянии 0,55 радиуса планеты от центра, т.е. почти в том же слое, что и на Уране. Авторы эксперимента считают, что внутри жидкого слоя находится заведомо твердое ядро, в котором магнитное поле возбуждаться не может. Этим и объясняется своеобразный «флюс» поля Нептуна. Радиальная протяженность проводящего слоя неизвестна, но все экспериментаторы сходятся в одном: над твердым ядром Нептуна расположен огромный, глобальный океан, токи в котором возбуждают сложное по структуре магнитное поле с множеством полюсов. Каждый из компонентов

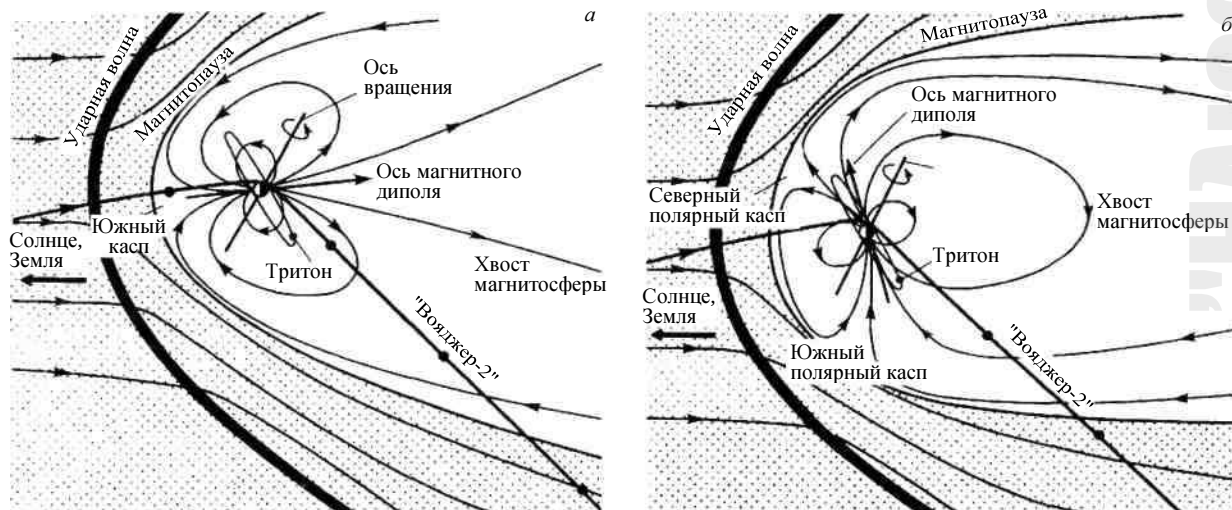


Рис. 8.3. Конфигурация магнитосферы Нептуна в момент входа в нее аппарата (а) и его выхода (б). Точки указывают положение аппарата, соответствующее указанной конфигурации

высших порядков дает все меньшую напряженность, что и позволяет представить поле издали дипольным приближением.

Представления об океане, надо заметить, противоречат выводам об устройстве Урана (см. гл. 7), потому что найденные для Нептуна коэффициенты $J_2 = 0,003539$ и $\alpha = 0,0174$ все же близки к двуслойной модели. Возможно, выводы, касающиеся Урана, требуют пересмотра.

«Наклонный ротатор» Урана был в свое время воспринят учеными как причуда природы. Но Нептун представил практически такой же самый наклонный ротатор, превратив его из причуды в закономерность. Что же касается старой идеи про возбуждение магнитного поля вне ядра, с которой мы начали этот раздел, то она подтвердилась!

Магнитосфера Нептуна с ее вытянутым хвостом обладает наименьшей плотностью заряженных частиц — всего 1,4 протона или тяжелого иона в 1 см^3 . Это в 3 раза меньше, чем у Урана, и в 3 000 раз меньше по сравнению с Юпитером.

Все тела системы Нептуна (кольца и все спутники) находятся внутри его знакопеременной магнитосферы, за исключением Нереиды, которая посещает магнитосферу 1 раз в год.

Кольца бывают и незамкнутыми

В доваджеровские годы появлялись сообщения, что кроме Тритона и Нереиды вблизи Нептуна есть еще какие-то тела. Поиски их с Земли трудны, так как свет от тела на орбите Нептуна почти в миллион раз слабее, чем от такого же тела на расстоянии Солнце — Земля.

(Кстати, свет и радиоволны идут от Нептуна до Земли в их среднем удалении 4 ч 10 мин 10 с.) Более удобно искать с Земли неизвестные объекты, когда Нептун покрывает звезды, что происходит сравнительно часто. В 1968, 1981, 1983 и 1985 гг. при покрытиях отмечались подозрительные явления. Так, 22 июля 1985 г. Нептун прошел близко от звезды SAO 186001. На расстоянии примерно двух радиусов планеты свет от звезды в течение 2 с был ослаблен на 30%. Что это: неизвестный спутник или кольца планеты?

Похожие явления наблюдались и раньше, например в мае 1981 г., когда отмечалось 8-секундное уменьшение блеска звезды. Его зарегистрировали только с одной стороны от планеты, из чего был сделан вывод, что это спутник с размерами около 180 км и с радиусом орбиты примерно 50 000 км. Для такого открытия нужно необычайное везение. Вероятность его была меньше 1%. Но сближение «Вояджера-2» подтвердило существование этого спутника. Им оказалась Ларисса — тело с диаметром около 190 км.

В других случаях дело было сложнее. Покрытие 1985 г. наблюдалось из двух точек в Южной Америке, разнесенных на 100 км. Покрытие видели обе группы ученых, поэтому небесное тело должно было обладать большими размерами. Но это противоречило кратковременности покрытия, всего 2 с. Было высказано смелое предположение: звезду покрыло особое кольцо незамкнутого типа. Таких колец тогда еще никто не видел. На эту мысль ученых навело кольцо ϵ Урана, тоже имеющее



Рис. 8.4. Призрачные кольца Нептуна с тремя арками в лучах Солнца. Изображение Нептуна переэкспонировано. Снимок NASA

значительный эксцентриситет, но замкнутое. Впрочем, многие оппоненты к этой идее отнеслись скептически. И совершенно напрасно, как показало сближение.

На рис. 8.4 показаны два из четырех чрезвычайно слабых колец Нептуна. Увидеть их даже с «Вояджера-2» человек не смог бы. Телевизионной камере аппарата понадобилась 10-минутная экспозиция, чтобы накопить достаточно света для этого изображения. Поэтому центральная часть изображения, сам Нептун, сильно «передержана». На дальнем плане снимка выделяются три дуги повышенной плотности. Кольца наблюдались в прямом рассеянии света, когда аппарат находился за Нептуном. Другие изображения показали, что между кольцами и внутри них есть еще два очень слабых, едва различимых кольца. Арками — так назвали незамкнутые образования — обладает только самое внешнее кольцо 1989 N1R, причем на снимке хорошо видно, что арки сами расположены на сплошном кольце малой плотности. Его диаметр 126 тыс. км, а ширина арок всего 50 км. Другие арки найдены не были. По основным признакам кольцо 1989 N1R похоже на кольцо F Сатурна или кольца δ и η Урана. Наиболее крупные глыбы сосредоточены как раз в том кольце, которое едва заметно (1989 N4R).

Во время сближения удачное положение Нептуна позволило наблюдать покрытие кольцами звезды Σ Sagittarii. Так, было найдено, что в кольце 1989 N1R есть более плотная центральная часть шириной 15 км (табл. 9).

Т а б л и ц а 9. Кольца Нептуна

Кольцо	Расстояние от центра планеты, км	Ширина кольца, км	Содержание пыли, %	Оптическая толщина
1989 N3R	41 900	(1700)	40—70	0,0001
1989 N2R	53 200	<15	40—70	0,01
1989 N4R	53 200—59 000	5800	Небольшое	0,0001
1989 N1R	62 900	<50	Три пылевые арки	0,01—0,1

Арки — это новый вызов небесной механике. Как они возникают, а главное — почему они не распадаются? Теория пока не может дать ответ на эти вопросы. Вот если бы в кольцо были «вмонтированы» небольшие спутники, по паре на каждую арку, иными словами, если бы в непосредственной близости от кольца находились шесть «сторожевых собак», тогда теория легко объяснила бы устойчивость системы. Но все поиски никаких результатов не дали, за исключением того, что крупного глыбового материала в одной из арок, кажется, больше, чем в других. Интересно, что из шести вновь открытых спутников два расположены внутри колец. Но и они не решают задачу. Зато два новых спутника, Деспина и Галатея, по-видимому, могут определять резкие границы близкого к ним кольца, хотя как тела, внешние по отношению к кольцам, они скорее способны расталкивать кольца и спутники и удалять их друг от друга.

Что же касается разорванных плотных частей кольца, то предложена еще одна идея: арки могут стабилизироваться гравитационным воздействием неизвестного сравнительно большого спутника на сильно наклоненной к экватору орбите. Орбита Тритона наклонена на 157° , Нереиды — на 29° . Поэтому ничего невероятного в таком спутнике нет. Но несмотря на все усилия, его не обнаружили. Проблема открытых арок остается открытой. И что еще больше запутало дело, обнаружилось, что структура колец в пределах арок оказалась перебитой, подобно кольцу F Сатурна.

Все другие кольца замкнутые. Они находятся в интервале расстояний от 41,9 до 62,9 тыс. км. Легко видеть, что система колец Нептуна чрезвычайно похожа на систему Урана. Вместе с тем специалисты обращают внимание на то, что суммарная площадь всего материала в кольцах и вновь открытых спутниках Нептуна 10^{15} см², или всего 1% от колец Урана. Один из выводов состоит в том, что кольца Нептуна гораздо старше. На это же указывают их очень низкие отражательные свойства: их сферическое альbedo

около 6%. Вероятно, здесь также действует тот механизм потемнения поверхности за счет освобождения углерода под действием бомбардировки заряженными частицами, о котором уже рассказывалось.

Спутники Нептуна: шесть новых и два старых

«Вояджер-2» навсегда уходит из Солнечной системы. Его последнее сближение со спутником Нептуна Тритоном было не менее эффектным, чем посещение Миранды, хотя остальные (малые) спутники Нептуна, открытые при сближении, сенсаций не принесли.

До «Вояджера-2» были известны только два члена этого семейства: большой спутник Тритон и маленькая Нереида. Полностью показать на одной схеме (см. рис. 8.1) орбиты обоих тел невозможно, так как их полуоси различаются в 15 раз.

В сближении было открыто шесть новых спутников Нептуна (табл. 10). Все они имеют небольшие размеры, от 50 до 190 км, за исключением Протеуса, который оказался больше Нереиды. Его диаметр 400 км. Впрочем, и Нереида «подросла» с 200 до 340 км, но во время сближения она находилась на расстоянии 4,7 млн. км, поэтому удалось только узнать, что она в 1,7 раз больше, чем ожидалось, и что ее геометрическое альbedo достигает 14%. Все остальные спутники, за исключением Тритона, очень темные, с геометрическим альbedo 5–6%. В отличие от него, новые спутники расположены в плоскости экватора планеты, причем большинство — в гуще колец. Поэтому частицы колец постоянно воздействуют на поверхность этих небесных обломков.

Спутники Нептуна малы по сравнению с членами других семейств, но, как заметил один научный обозреватель, даже Ларисса и Галатея по массе в 10 000 раз больше того тела, которое, врезавшись 65 млн лет назад в атмосферу и твердь Земли, принесло гибель динозаврам и многим другим их современникам.

На снимках малые спутники выглядят, как тела не совсем правильной (яйцеобразной) формы и напоминают, насколько можно различить, спутник Сатурна Мимас своей поверхностью, насыщенной метеоритными кратерами. В сближении Протеус был обращен к зрителю стороной с огромным кратером размером не менее 180 км. Подробности на других спутниках видны плохо.

Источником метеоритной эрозии тел системы Нептуна, скорее всего, было (и остается),

как полагают ученые, семейство короткопериодических комет, принадлежащее Нептуну. По минимальным оценкам, к нему относится примерно 1 млн кометных ядер с диаметром, превышающим 2,5 км. По другим данным, их может быть и 20 млн. Однако ныне они образуют очень мало ударных кратеров. На Тритон выпадает вдвое меньше тел с диаметром 10 км, чем на Землю.

Контраст между одним гигантским спутником и полудюжиной спутников-недоделок кажется странным. Многие ученые склонны усматривать в этом следствия особенностей бурной истории Тритона. Сам Тритон очень необычен. Эксцентриситета орбиты у него практически нет, но обращение вокруг планеты обратное, с периодом 5,88 сут. Таков же и период его синхронного вращения. Это единственный случай, когда обратное вращение имеет столь крупный (по размерам подобный нашей Луне) и близкий к планете спутник. Он отстоит от Нептуна почти на то же расстояние, что и Луна от Земли. Тритон отличается сравнительно высокой плотностью, более 2 г/см³. А его поверхность и вовсе необычна.

Формирование Нептуна, согласно существующим представлениям, происходило наиболее медленно, в спокойной, по сравнению с другими планетами, обстановке. Орбитальная скорость на орбите Нептуна в 5 раз меньше земной. «Заготовки планет» (планетезимали) и более мелкие тела имели здесь малые относительные скорости, меньше сталкивались и разрушались. Поэтому естественно было ожидать, что Нептун окружен немислимым количеством уцелевших малых тел. И в том, что их нет, ученые склонны усматривать «вину» Тритона, которого называют «спутником-мародером».

Многие особенности спутниковой системы Нептуна можно понять как результат захвата Нептуном массивного внешнего тела с независимой орбиты и его катастрофического соударения с некогда существовавшим большим спутником. Еще в 1936 г. сторонникам этой идеи удалось доказать теоретически, что воздействие такого тела, сблизившегося с Нептуном, могло даже перевести один из спутников на орбиту, не связанную с планетой. А оставшиеся частично разрушенные спутники могли иметь такие необычные орбиты, как Тритон с его 157-градусным наклоном или Нереида с эксцентриситетом орбиты 0,75 (что больше годится для кометы).

Идея о соударении захваченного тела с доисторическим спутником Нептуна хорошо

Т а б л и ц а 10. Спутники Нептуна

Название	Большая полуось орбиты, тыс. км	Орбитальный период, ч	Эксцентриситет орбиты	Наклон орбиты к эклиптике, градус	Диаметр спутника, км	Средняя плотность, г/см ³	Год открытия
Наяда	48,2	7,1		4,5	54±16		1989
Таласса	50,0	7,5		<1	80±16		1989
Деспина	52,5	8,0		<1	150±30		1989
Галатея	62,0	10,3		<1	180±20		1989
Ларисса	73,6	13,3		<1	190±20		1981/1989
Протеус	117,6	26,9		<1	400±20		1989
Тритон	355,3	5,88 сут	0,001	157	2705±10	2,07	1846
Нереида	5510	360,13 сут	0,75	29	340±50		1949

объясняет не только орбитальные особенности Тритона, но и малочисленность спутникового хозяйства планеты. Наклоненная орбита Тритона вначале должна была иметь большой эксцентриситет. Но за сотни и тысячи миллионов лет торможение Тритона в разреженной газовой среде туманности и приливное рассеяние орбитальной энергии постепенно превратили его эллиптическую орбиту в круговую. На пути этой эволюции из-за большого наклона орбиты Тритон поглотил одно за другим множество меньших тел, расчистив от них окрестности Нептуна. У этого процесса была и другая сторона: в столкновениях выделялось так много энергии, что по «энерговооруженности» Тритон обогнал много других тел Солнечной системы. Результаты этого процесса хорошо видны на снимках поверхности Тритона.

Спросите у Плутона...

В уже упоминавшейся старой гипотезе предполагалось, что катастрофические события в системе Нептуна могли иметь последствия далеко за пределами его орбиты. Вероятный продукт такой катастрофы, указывали авторы, известен нам как девятая планета — Плутон. (Напомним, что гипотеза была предложена в 1936 г., когда еще не знали, что Плутон — двойная планета.) Предполагалось, что исходя из нынешних орбит можно даже рассчитать орбиту первичного родительского тела.

По поводу этой гипотезы было высказано немало замечаний, причем некоторые критики утверждали, что орбиты Нептуна и Плутона вообще никогда не пересекались.

В течение 70—80-х годов о них удалось получить немало новых данных, согласно которым Плутон, действительно, очень похож на Тритон. Идея общего происхождения этих тел постепенно овладевала умами.

В 1984 г. были выполнены подробные расчеты, в которых рассматривалась возможность захвата Нептуном массивного протопланетного тела (планетезимали), распавшегося на Тритон и Плутон. Расчеты, однако, дали совсем другой результат. Они показали, что вторая, «плутонная», половина была бы выброшена вообще за пределы Солнечной системы и что Тритон и Плутон скорее имеют независимое происхождение.

Тем не менее внешнее (и возможно, внутреннее) сходство двух этих тел несомненно, если учесть подобие в составе, средней плотности, размерах, особенностях атмосфер и расстояниях от Солнца. Другой вопрос — вероятность катастрофы таких масштабов и возможность восстановить ее подробности расчетным путем на основе известных в настоящее время орбит. Подобные катастрофы действительно возможны (вспомним Юпитер и комету SL-9!) даже в наши дни. Среди астероидов с необычной орбитой выделяется Хирон, который в каталоге астероидов значится под № 2060. Размеры его довольно велики, несколько сотен километров. В афелии Хирон уходит за орбиту Урана, а в перигелии проникает внутрь орбиты Сатурна. Исследования показали, что в некоторых, очень редких, случаях астероид способен проходить сквозь систему спутников Сатурна, что может вызывать значительные изменения орбит меньших из спутников планеты и даже катастрофическое столкновение (хотя его вероятность очень невелика). К тому же Хирон не может быть единственным самостоятельным крупным телом такого рода в этой части Солнечной системы. Иными словами, за достаточно длительное время такие катастрофы возможны. Но кто может сказать, принимал ли участие Плутон в драме Нептуна?

Кроме того, как мы уже говорили, есть сведения о некоторых принципиальных ограничениях возможностей расследования дел столь

давно ушедших дней путем теоретических расчетов. В конце 80-х годов появилось несколько удивительных работ, от которых доверие к подобным расчетам может сильно пошатнуться. Использование новых типов специальных компьютеров (с так называемыми параллельными процессорами), способных выполнить небывалые объемы вычислений, показало, что зачастую неуловимое изменение начальных условий, на 1 бит младшего разряда, неузнаваемо, полностью меняет конечный результат. Впервые автор исследования встретился с этой проблемой в машинных прогнозах погоды. Каково же было его удивление, когда тот же эффект обнаружился при математическом моделировании эволюции орбит небесных тел на длительные промежутки времени. А ведь физическая непреложность подобных расчетов со времен Ньютона считалась «священной коровой» небесной механики! По утверждению автора работы, такие расчеты на период, превышающий несколько сотен миллионов лет, лишены смысла. Похоже, природа предпочитает прятать свое прошлое в тумане неопределенностей.

Озера и моря на Тритоне?

Предложено немало гипотез, чтобы объяснить, почему на Нептуне действует мощный источник тепла и почему он отсутствует на Уране. Их авторы искали что-то, что существенно различает эти две планеты. Согласно одной из гипотез, различия определяются именно Тритоном, обратное вращение которого, как предполагалось, может вызывать весьма расточительное рассеяние энергии в приливных взаимодействиях с планетой. Было показано, что эта энергия вполне может объяснить различия между Нептуном и Ураном. Но время существования такого источника ограничено.

Гипотеза приливных потерь рассматривалась и в другой интересной работе, появившейся в 1966 г. Высказывалось предположение о том, что Тритон обречен. Потери энергии в приливном взаимодействии с Нептуном не проходят для него бесследно. По расчетам авторов гипотезы, Тритон по спирали постепенно приближается к Нептуну и через 10–100 млн лет войдет внутрь предела Роша, после чего приливные силы рано или поздно разорвут его на части. Не превратится ли Тритон в новое кольцо, которое затмит кольцо Сатурна?

Обе гипотезы исходят из определенной величины так называемого фактора приливного рассеяния энергии. Однако исследования «Вояджера-2» заставляют усомниться в столь прямолинейном развитии событий. Дело в том,

что тело на круговой синхронной орбите вокруг жидкой планеты с ее математически идеальной фигурой рассеивает очень мало энергии в приливных взаимодействиях. Но Тритон и в этом отношении — случай особый. Из-за огромного наклона его орбиты эти потери не равны нулю. Но насколько они велики, будет ясно только после завершения анализа результатов исследований «Вояджера-2».

По своему составу Тритон относится к группе силикатно-ледяных тел, типичных для спутников планет-гигантов. Он отличается сравнительно высокими массой ($2,14 \cdot 10^{25}$ г) и плотностью ($2,07$ г/см³). Диаметр его 2705 км, что лишь на 22% меньше Луны. В его спектре была найдена полоса метана, что позволило еще в 1977 г. предположить, что Тритон имеет атмосферу. Полоса была настолько слабой, что могла соответствовать только очень разреженной атмосфере, примерно в 25 000 раз менее плотной, чем земная. Конечно, атмосфера могла включать не только метан. Были обнаружены также некоторые особенности спектра, которые указывали на метановый иней на поверхности.

В ходе дальнейших исследований удалось найти еще одну полосу вблизи 2,15 мкм. Авторы работы пришли к выводу, что такую полосу создает жидкий азот и заключили, что значительная часть поверхности Тритона покрыта неглубоким морем или океаном из жидкого азота. Указывалось даже, что море расположено у южного полюса Тритона, где полярный день будет стоять еще лет 40. Некоторые авторы, однако, не соглашались с такой интерпретацией и указывали, что форму спектра вблизи 2,15 мкм можно объяснить и без всяких морей.

Вскоре в журналах появились фантастические рисунки, где в азотных морях Тритона плавают острова из замерзшего метана: по наземным измерениям, температура поверхности составляла всего 43 К. Исследований Тритона с «Вояджера-2» ждали с неменьшим интересом, чем его встречи с Нептуном.

Таким образом, еще до сближения «Вояджера-2» были основания считать, что атмосфера Тритона состоит, скорее всего, из азота с примесью метана. Масса спутника и температура его поверхности таковы, что гравитационные силы могут удерживать такую атмосферу.

Тритон: прощальное шоу «Вояджера-2»

Поверхность Тритона оказалась еще холоднее, чем ожидалось (38 К), и на 30% светлее прежних данных. Телевизионные снимки «Вояджера-2» показали, что она представляет со-

бой сочетание нескольких разнородных форм. Наибольшую площадь на мозаике снимков, показанной на фото 75, занимает сравнительно темная, широкая и более или менее однородная равнина «канталупа», которую назвали так за сходство ее с разновидностью дыни. Обращенный к Солнцу южный полюс (нижняя часть рисунка) окружает более светлая «полярная шапка». Обе части имеют очень высокие отражательные свойства: от 62 до 95%. Центр обращенной к зрителю полусферы на этом фото имеет координаты 15° ю.ш., 15° в.д. Разрешение на снимке достигает 1,5–3 км. Шапка занимает значительную часть поверхности спутника (в других ракурсах — больше половины). Она обращена к Солнцу, поэтому ее нельзя считать районом наиболее низкой температуры. Шапка лежит на поверхности того же типа, что и равнина-канталупа, на это указывает характер поверхности в разрывах шапки. Все эти и другие особенности указывают на самобытность природы Тритона.

В правой (восточной) части равнины находятся несколько больших депрессий размерами 150–250 км. Они представлены на рис. 8.5, охватывающем площадь примерно 400 × 500 км. Разрешение на снимке около 900 м. По своей природе депрессии, вероятно, представляют древние ударные «моря», которые затем многократно заполнялись ледяными лавами. Слева виден уступ, образующий границу между последовательными наводнениями. Неровная поверхность в центре окружает кальдеру, через которую происходило последнее извержение. «Лавы» включали водные растворы аммиака, метана, различных солей и их эвтектики. Район несет также следы тектонической активности ледяной коры, которая многократно перерабатывалась в разломах и сжатиях. Поперечник бассейна по горизонтали близок к 200 км. К северо-западу от центра бассейна находится 13-километровый ударный кратер, оставшийся в прямом смысле еще с допотопных времен. Справа на границе снимка видно еще одно такое же море. Рельеф района умеренный, с наибольшей разностью высот около 1 км.

История поверхности и недр Тритона после «Вояджера-2» видится такой. Значительное тепловыделение в процессе захватов и соударений, которыми богато прошлое Тритона, а также приливное рассеяние энергии в его коре приводили к быстрому его разогреву, плавлению льдов и началу гравитационной дифференциации, в свою очередь, выделявшей значительную энергию в недрах небесного тела. Силикатные и, вероятно, хондритные породы

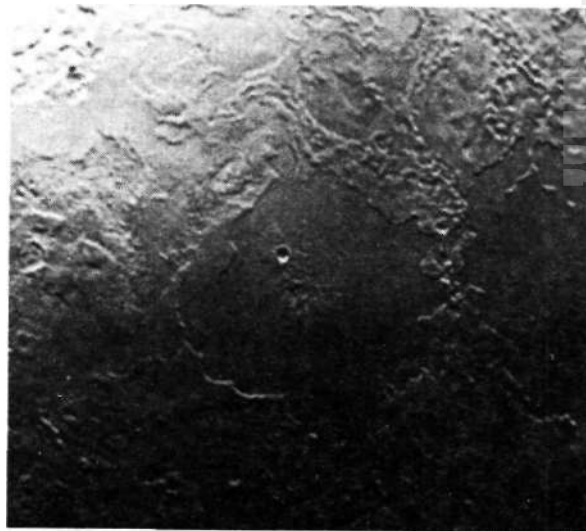


Рис. 8.5. Снимок поверхности Тритона с высоким разрешением (900 м). Затопленный ударный бассейн с поперечником около 200 км. Снимок NASA

образовали очень большое каменное ядро радиусом до 1000 км. Содержание каменных пород у Тритона наивысшее из всех спутников планет-гигантов. Легкие породы, прежде всего лед, образовали мантию и глобальный океан Тритона.

По мере истощения энергии внешних источников поверхность океана стала застывать. Небольшое выделение тепла радиоактивного распада в ядре существенной роли не играло. Наиболее темная, северная часть поверхности на фото 75 — это и есть промерзшая на глубину примерно 180 км ледяная оболочка спутника. Она лежит на водном океане, насыщенном аммиаком, метаном, солями и ионами. Глубина океана около 150 км. Структура ледяной коры Тритона такова, что приток тепла к поверхности ограничен, поэтому жидкое состояние мантии сохранится надолго.

Ледяная кора находится под действием механических напряжений, связанных с тепловыми потоками и вращением Тритона. В коре иногда возникают трещины огромной протяженности (грабены), следы которых на поверхности пересекаются под разными углами (см. фото 75). Трещины сосредоточены в основном в экваториальной части спутника и достигают в ширину 30 км. На рис. 8.6, где разрешение доходит до 750 м, грабен проходит через район округлых образований неизвестной природы, разделенных высокими валами. К метеоритным кратерам они не относятся; предполагается, что они как-то связаны с местным разогревом, плавлением и застыванием материала поверх-

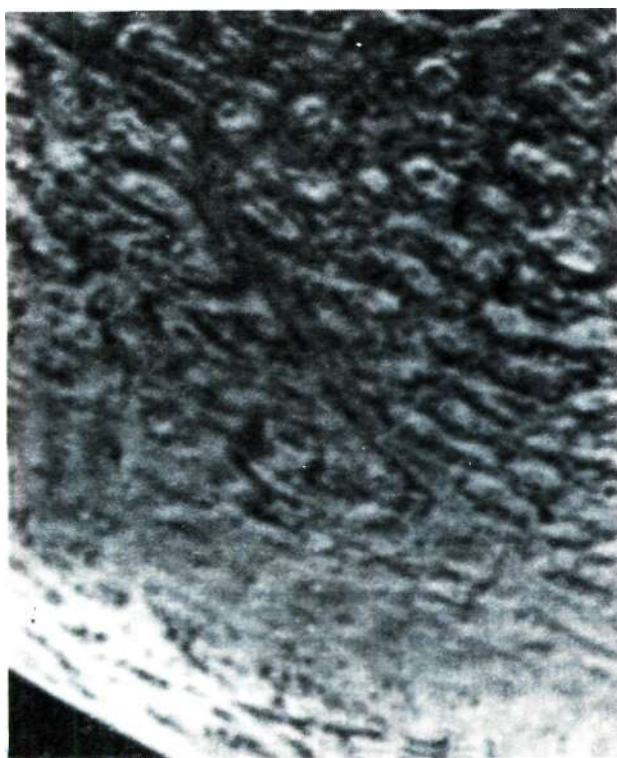


Рис. 8.6. След разлома, проходящего через район необычного рельефа. Ширина участка около 220 км. Снимок NASA

ности. Этот тип рельефа, охватывающий экваториальную часть Тритона, нигде больше в Солнечной системе не встречался. Ширина участка, приведенного на снимке, 220 км. По возрасту его относят к «молодым» образованиям, 2—3 млрд лет, т.е. к поздней части истории Тритона.

Перестройка поверхности спутника под действием многократных извержений и наводнений не позволяет судить о первоначальном ее виде. Как минимум, от первого миллиарда лет его истории не осталось никаких следов. На это указывает низкая плотность ударных кратеров на Тритоне.

Состав атмосферы Тритона оказался близким к предсказаниям. Азотных морей не нашли, но атмосфера почти полностью состоит из азота. Метана, полосы которого наблюдались с Земли, оказалось ничтожное количество, всего 0,01% или около того. В малом количестве присутствуют и другие составляющие, например водород, возникающий при фотолизе метана и тут же ускользающий в космос. Значительная часть ионов, например ионы азота, в магнитосферу Нептуна поступают из атмосферы Тритона.

В процессе фотолиза метана образуются углеводороды — этан, этилен, ацетилен. Предполагается, что слой их конденсатов на поверхности, если исходить из расчетов скорости реакций, может достигать 6 м. Но в атмосфере их концентрация не превосходит миллионных долей.

Снег на поверхности спутника — это главным образом иней азота. Интересно, что за 10 лет у Тритона изменился цвет с красноватого на нейтральный. По-видимому, это нетеропливые сезонные изменения на Тритоне. Вероятно, иней азота маскирует другие отложения.

Давление атмосферы у поверхности оказалось в 67 000 раз ниже земного — 15 миллионных бара (15 мкбар). Тем не менее и в этой тончайшей атмосфере есть и дымка, и легкие облака. Именно атмосфера создает сезонные изменения, образует отложения на поверхности. У Тритона обнаружена ионосфера и даже слабое авроральное свечение. Полярная шапка также образована азотным инеем с вкраплением метанового и водного льдов, но в целом природа ее еще известна не до конца.

Кстати, о небольшом приключении, связанном с полярной шапкой. Полярная шапка испещрена темными пятнами, вытянутыми к северо-востоку (рис. 8.7). Объяснить их природу «с ходу» не удалось. Но она оставалась непонятной всего несколько дней, а затем принесли сенсацию стереоскопические снимки одного из таких районов, сделанные с небольшим интервалом. Снимки недостаточно четкие, но все же видно, что из небольших темных объектов на поверхности вертикально тянутся вверх струи какого-то темного вещества. Оказалось, что это газовые гейзеры. Их струи достигают высоты 8 км, где изгибаются на 90° и превращаются сначала в небольшие, но плотные темные облака, а затем в вытянутые широкие горизонтальные шлейфы, тянущиеся к западу на 150 км и более. Странный излом на высоте 8 км может означать, что здесь расположена тропопауза, выше которой дуют сильные ветры.

У самого лимба (за пределами фото 75) обнаружена группа из трех темных объектов неправильной формы со светлой окантовкой, что-то вроде пересыхающих солончаковых озер с отложениями соли (рис. 8.8). Поверхность их твердая, с какими-то деталями и даже, кажется, с парой метеоритных кратеров. Пока не ясно, что они собой представляют, хотя они и похожи на структуру границы шапки, показанной на рис. 8.7.

Контрасты на рис. 8.7. преувеличены. На самом деле весь материал на поверхности Тритона имеет высокие отражательные свойства.

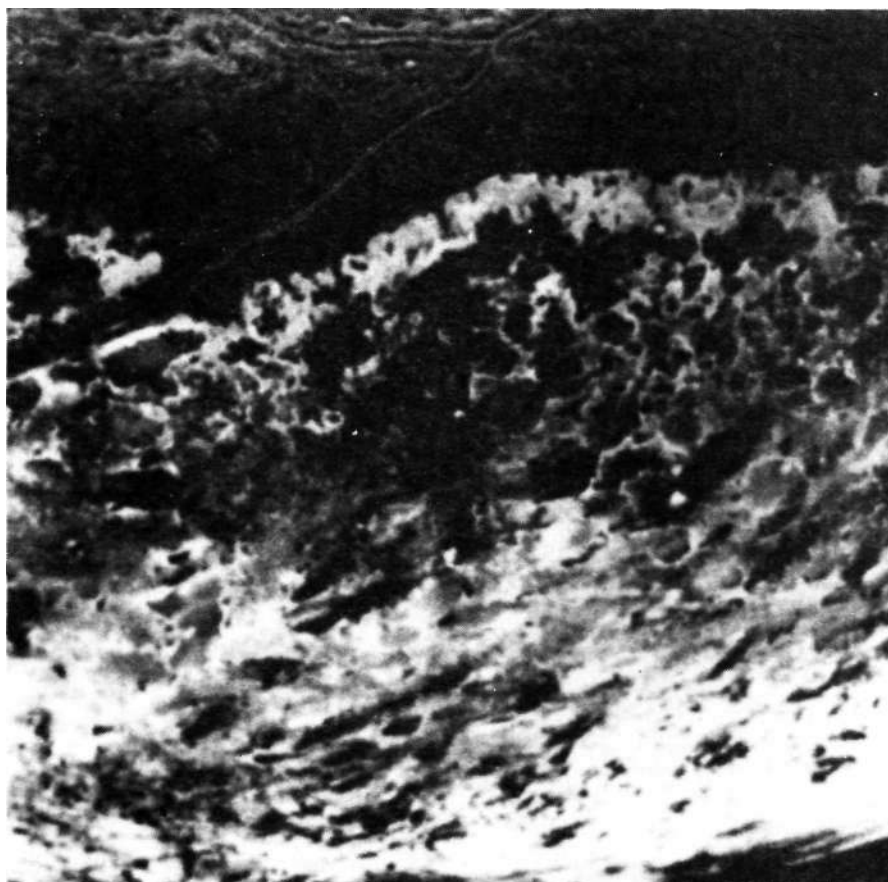


Рис. 8.7. Граница южной полярной шапки Тритона с темными вытянутыми пятнами, связанными, как предполагается, с газовыми гейзерами. Снимок NASA

ва, не ниже 60%. На снимках удалось насчитать до 50 пятен, которые, по-видимому, имеют гейзерное происхождение. Но какова природа этих гейзеров? Об этом можно только догадываться. Наибольший интерес вызвала гипотеза о том, что газ выбрасывается из полостей в полярной шапке, куда он попал в виде конденсированного азота или метана. Если солнечные лучи проникают достаточно глубоко в лед, где создается своеобразный парниковый эффект, они могут вызвать быструю сублимацию конденсатов, повышение давления, а затем и прорыв ледяной оболочки. В результате возникает гейзер, который вместе с газом выбрасывает в атмосферу какое-то темное вещество. Чтобы доказать или опровергнуть эту гипотезу, нужны новые наблюдения. Одно несомненно: гейзеры замечены только над полярной шапкой.

Во время сближения с Нептуном группа астрогеологов составляла внушительную часть научного коллектива «Вояджера». Но когда миссия еще только начиналась, в составе

группы был лишь один (!) геолог. Вся миссия виделась прежде всего как исследование огромных шаров газожидких планет, представляющих интерес для астрофизики, физики особых фазовых состояний вещества, гравиметристов и теоретиков. Постепенно с каждым сближением положение менялось, а центр исследований смещался к твердому веществу спутников. Из известных в Солнечной системе 60 спутников планет, 56 — это спутники планет-гигантов. Им посвящено больше половины всех научных работ по материалам «Вояджеров».

Впереди миллионы лет полета

Нептун остался позади (рис. 8.9). После встречи с ним траектория «Вояджера-2» отклонилась к югу. Теперь его полет проходит под углом 48° к эклиптике в южной полусфере. А «Вояджер-1» поднимается над эклиптикой (начальный угол 38°). Что ожидают ученые от дальнейшего их полета и что ожидает аппараты в будущем?



Рис. 8.8. Три темных образования неизвестной природы, обнаружены у лимба Тритона. Снимок NASA

Из научных исследований «Вояджер» на первом месте — ожидаемое пересечение гелиопаузы (границы между межзвездной и солнечной плазмой). Как известно, солнечный ветер имеет скорость около 400 км/с. Где его динамический напор уравнивается межзвездным магнитным полем, пока никто не знает, но предполагается, что гелиопауза будет пересечена около 2012 г. Плазменный комплекс останется работоспособным до 2015 г. Целый ряд экспериментов выключается навсегда — это телевизионный и спектрофотометрический комплексы, кроме ультрафиолетового спектрометра, который будет применяться для исследования звезд и галактик. Будут продолжены плазменные исследования и исследования космических лучей. Сокращены и сами программы компьютеров. В их память закладываются фиксированные программы, которые для простоты будут вызываться просто по номеру. Администрация NASA намерена сократить штат наземной службы «Вояджера» с 200 до 40 человек.

Технические возможности аппаратов таковы. Энергии в радиоизотопных термоэлектрических батареях хватит для работы аппа-

рата по минимальной программе примерно до 2025 г., когда мощность упадет до 240 Вт. Топливо не будет представлять проблемы, а коррекции траектории в межзвездной фазе полета не предусмотрены. Полноценное управление аппаратом можно будет вести до 2000 г. и даже позже. Проблемой может стать возможная потеря Солнца солнечным датчиком, так как с большого расстояния Солнце становится все более тусклым. Тогда направленный радиолуч уйдет с Земли и прием данных с аппарата прекратится. Это может произойти около 2030 г. Если скорость передачи снизить до 43 бит/с, прием сигналов на Земле будет возможен до 2015 г. с антенной 34 м и не менее чем до 2030 г. с 70-метровой антенной. Инженеры беспокоит, что основная генераторная лампа свой ресурс уже выработала, передатчик перешел на резервную. Замены для нее уже нет.

А дальше... В 8571 г. аппарат будет на расстоянии 0,42 светового года от Солнца и в 4 световых годах от Звезды Барнарда. В 20 319 г. он пройдет на минимальном расстоянии (3,5 световых года) от звезды Проксима Центавра. В 296 036 г. «Вояджер-2» подойдет к Сириусу на расстояние 4,3 светового года. Почти через миллион лет он уйдет от Солнца на расстояние 47,4 световых года...

Послание неизвестному адресату

На видном месте на «Вояджерах» размещен золоченый компакт-диск с записью всевозможной информации о Земле (звуки и изображения). К диску приложена инструкция по применению (в картинках, рис. 8.10) и читающая головка. В двоичном коде сделаны необходимые разъяснения и указано местоположение Солнечной системы относительно 14 мощных пульсаров. В качестве «мерной линейки» указана сверхтонкая структура молекулы водорода (1420 МГц). Вероятность столкновения с чем-либо в межзвездной среде очень мала, поэтому предполагается, что аппарат сможет лететь в неповрежденном состоянии миллиарды лет. И если какой-либо цивилизации доведется его перехватить (что весьма сомнительно), они получат послание от нас нынешних. На диске записаны 118 цветных изображений ландшафтов Земли (и нас самих), 90 минут записей музыкальных шедевров, код ДНК и другие сведения; 3/4 диска занимают звуки, в том числе звуки поцелуя и извержения вулкана. На диске записано также обращение к НИМ Д.Картера, который в 1977 г. был президентом США. Он говорит о том, что аппарат создан в



Рис. 8.9. Прощальный снимок «Вояджера-2». Нептун и Тритон. После сближения с Нептуном аппарат покидает Солнечную систему. Снимок NASA

США, стране с населением 240 млн человек среди 4-миллиардного населения Земли. Человечество, говорит он, все еще разделено на отдельные нации и государства, но страны быстро идут к единой земной цивилизации. «Мы направляем в космос это послание, — продолжает президент. — Оно, вероятно, выживет в течение миллиарда лет нашего будущего, когда наша цивилизация изменится и полностью изменит лик Земли... Если какая-либо цивилизация перехватит «Вояджер» и

сможет понять смысл этого диска, — вот наше послание:

«Это — подарок от маленького далекого мира: наши звуки, наша наука, наши изображения, наша музыка, наши мысли и чувства. Мы пытаемся выжить в наше время, чтобы жить в вашем. Мы надеемся, настанет день, когда будут решены проблемы, перед которыми мы стоим сегодня, и мы присоединимся к галактической цивилизации. Эти записи представляют наши надежды, нашу решимость и

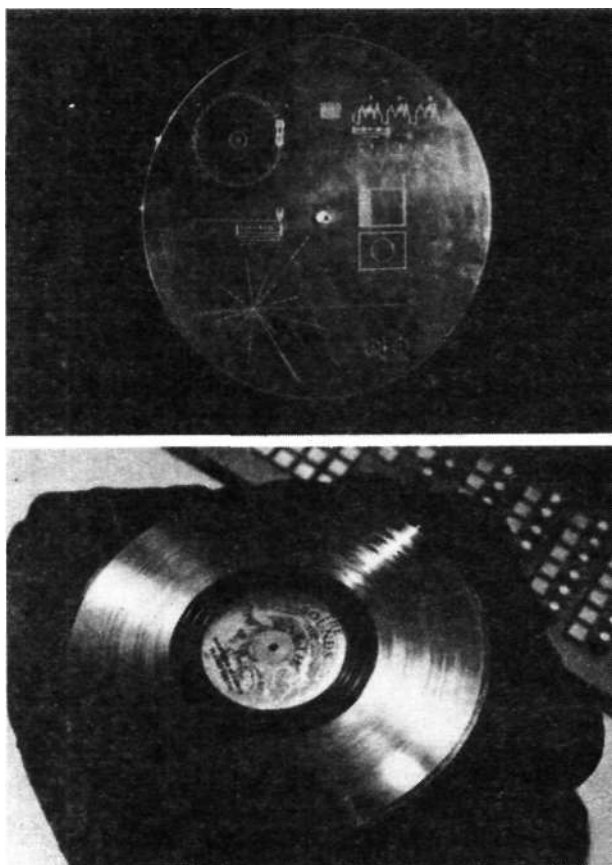


Рис. 8.10. Послание неизвестному адресату. Компакт-диск «Звуки Земли», установленный на видном месте аппаратов (см. фото 70), содержит также изображения. Вверху рисунка — схема-инструкция, поясняющая, как пользоваться диском. Из книги К.Сагана «Космос»

нашу добрую волю в этой Вселенной, огромной и внушающей благоговение».

Плутон и Харон

Из-за большого эксцентриситета орбиты Плутон сейчас находится ближе к Солнцу, чем Нептун и его спутники. Последний остается внешней планетой на период с 1979 по 1999 г. Начиная с 1930 г., когда он был открыт, Плутон находится над плоскостью эклиптики (если смотреть с ее северной стороны), причем сейчас его высота над нею близка к 8 а.е.

Еще в 50—60-х годах нашего столетия было установлено, что блеск самой далекой и самой маленькой планеты Солнечной системы периодически изменяется. Измерения показали, что период изменений блеска составляет 6 сут 9 ч 17 мин. Это значение было принято в качестве периода вращения Плутона. И хотя это было

правильно, это был не только период вращения самого Плутона.

Плутон — слабый объект, но уже в 60-х годах существовали фотографии, на которых он выглядел бесформенным расплывчатым пятнышком (рис. 8.11). Фотографии эти публиковались в научных изданиях, пылились на полках и лежали на столах ученых. И, как это иногда случается, вместе с фотографиями на полках лежало будущее открытие. Стоило только присмотреться: снимки Плутона выглядели слегка вытянутым пятном, ориентированным по-разному. До 1978 г. никто на это не обращал внимания. Никто не предполагал, что за вытянутостью пятна скрывается тесная двойная планета! Разумеется, теперь получены гораздо лучшие его снимки. Оба тела имеют близкие размеры, поэтому правильнее называть их двойной планетой или системой двух планет. Тем не менее принято говорить о Плутоне и его спутнике.

С космического телескопа «Хаббл», для которого не существует проблемы земной атмосферы, удалось сделать снимок (рис. 8.12), на котором можно видеть и Плутон, и Харон. Харон так велик и так близок к планете, что поначалу разделять их удавалось только методами спекл-интерферометрии. Период 6,387 сут оказался также периодом взаимного обращения компонентов (или периодом их

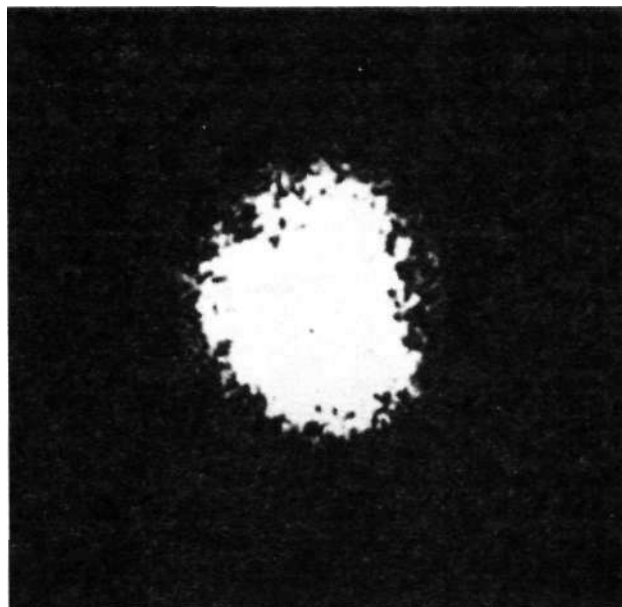


Рис. 8.11. Плутон и его спутник Харон. Из-за крайней удаленности Плутона на фотографии слились эти два небесных тела, разделенные всего 20 тыс. км, но заметно, что изображение вытянуто по вертикали. Снимок обсерватории ВМС США

МЕРКУРИЙ



Фото 1. Цвет поверхности Меркурия — в основном темно-коричневый, подобный цвету поверхности Луны. Хорошее представление о нем дает этот снимок Луны, сделанный аппаратом «Аполло». Земля восходит над пустынной равниной Луны

ВЕНЕРА



Фото 2. Количество воды в морях и океанах Земли $1,37 \cdot 10^{24}$ г. Казалось бы, при сходстве массы, состава, положения в Солнечной системе Венера должна иметь сравнимое количество воды. Куда исчезли океаны Венеры?

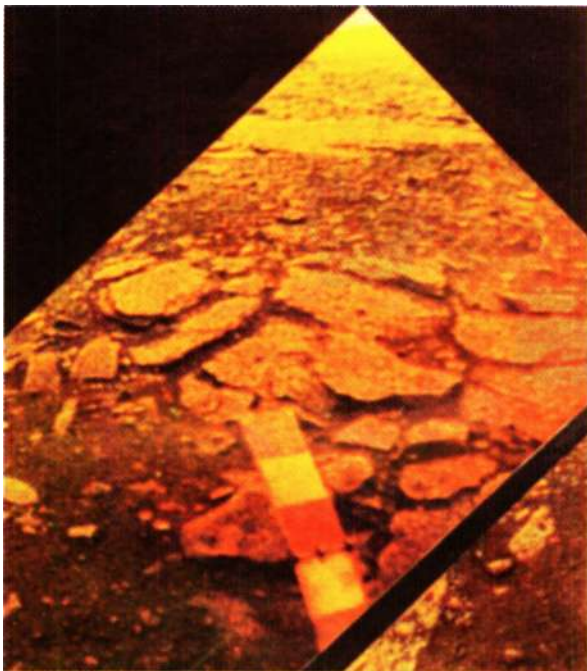


Фото 3. Цветной фрагмент панорамы «Венеры-13». Сквозь желто-зеленую дымку виден склон следующей долины (сравните с рис. 3.1)

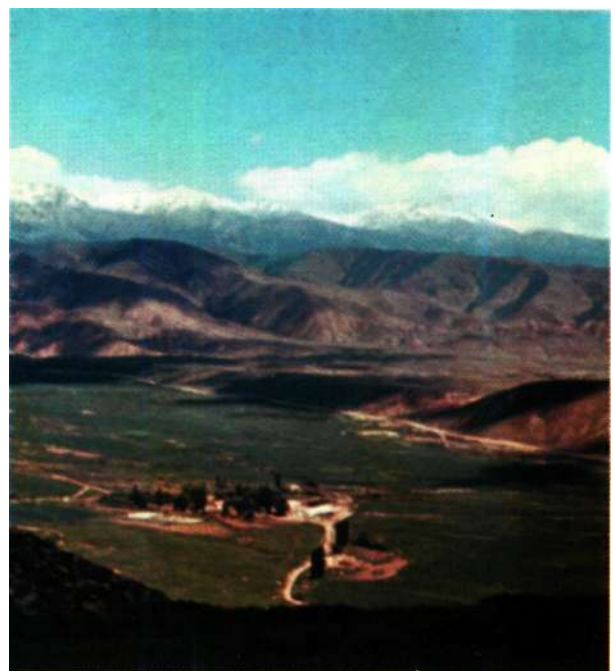


Фото 4. Синий цвет неба Земли определяется рэлеевским рассеянием света в газовой среде (район озера Иссык-Куль, фото автора). На Венере небо низко над горизонтом имеет зеленоватый оттенок, а облачный купол — оранжевый



Фото 5. Цветная версия панорамы, представленной на рис. 3.19 сверху. Более темная центральная часть — тень от широкого аэродинамического щитка аппарата. Контрасты цвета невелики, но некоторые оттенки все же заметны («Венера-13»)



Фото 6. Цветная панорама «Венеры-14». Светлые предметы на первом плане всех панорам — полуцилиндрические крышки телевизионных камер, которые сбрасывались после посадки аппаратов. Диаметр крышек около 200 мм

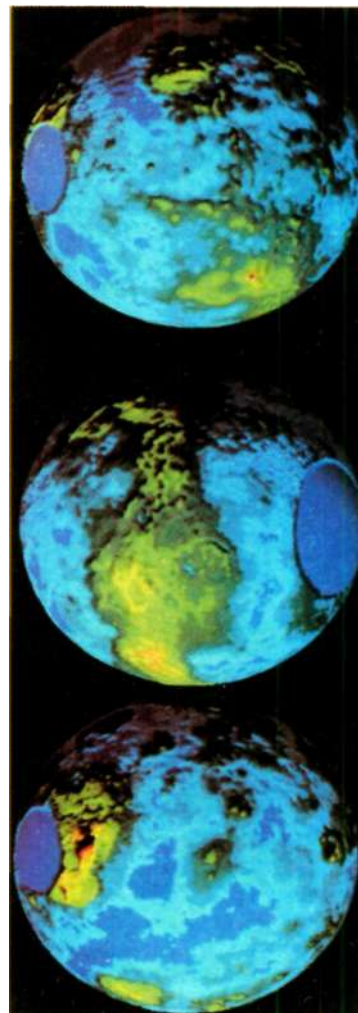


Фото 7. Вид глобуса Венеры в трех положениях: слева — с долготой центрального меридиана 0 (в центре — область Альфа), в середине — с долготой 150°, справа — 240° (левее и ниже центра земля Афродиты с каньоном Артемиды). Глобус представляет собой компьютерную программу с банком данных радиосальтиметрии «Пионер-Венера» и позволяет вызывать на экран любую проекцию. В области северного и южного полюсов (темно-синие овалы) данных тогда не было. Из работы Дж.Блинна и др.

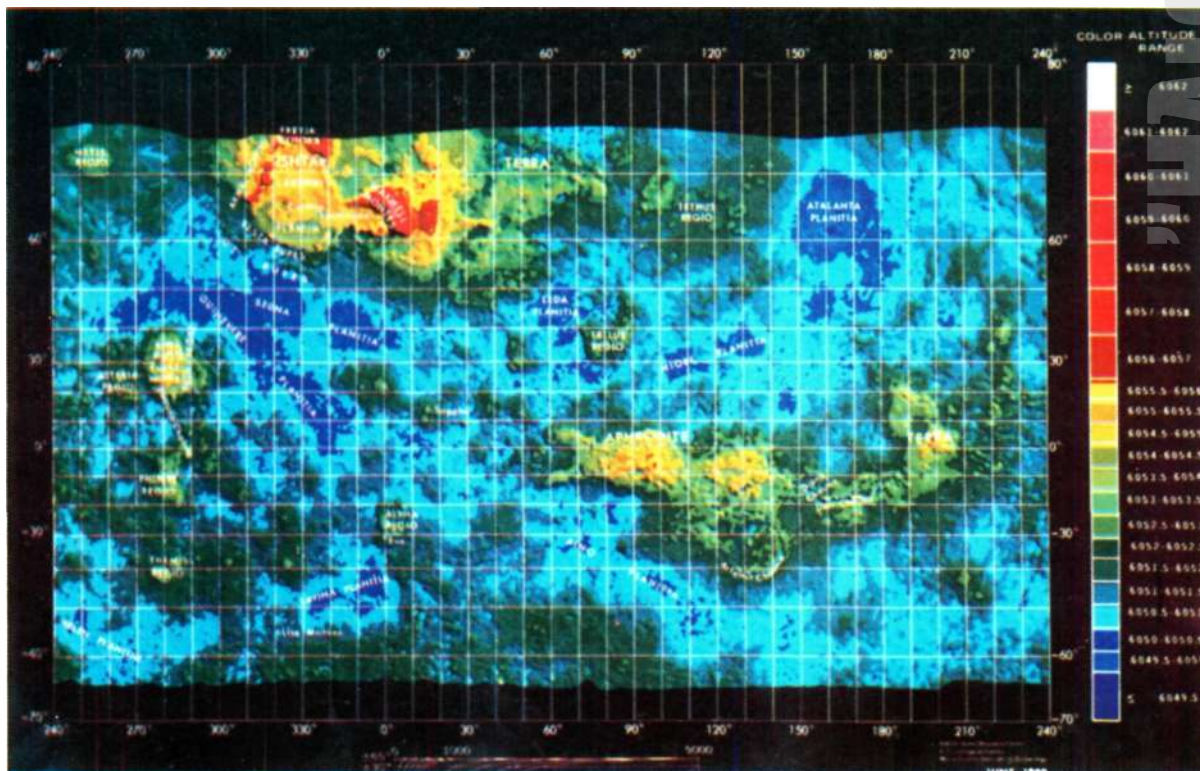


Фото 8. Карта поверхности Венеры в пределах пояса широт от -65° до 75° , составленная по данным радиоальтиметрии с аппарата «Пионер—Венера»

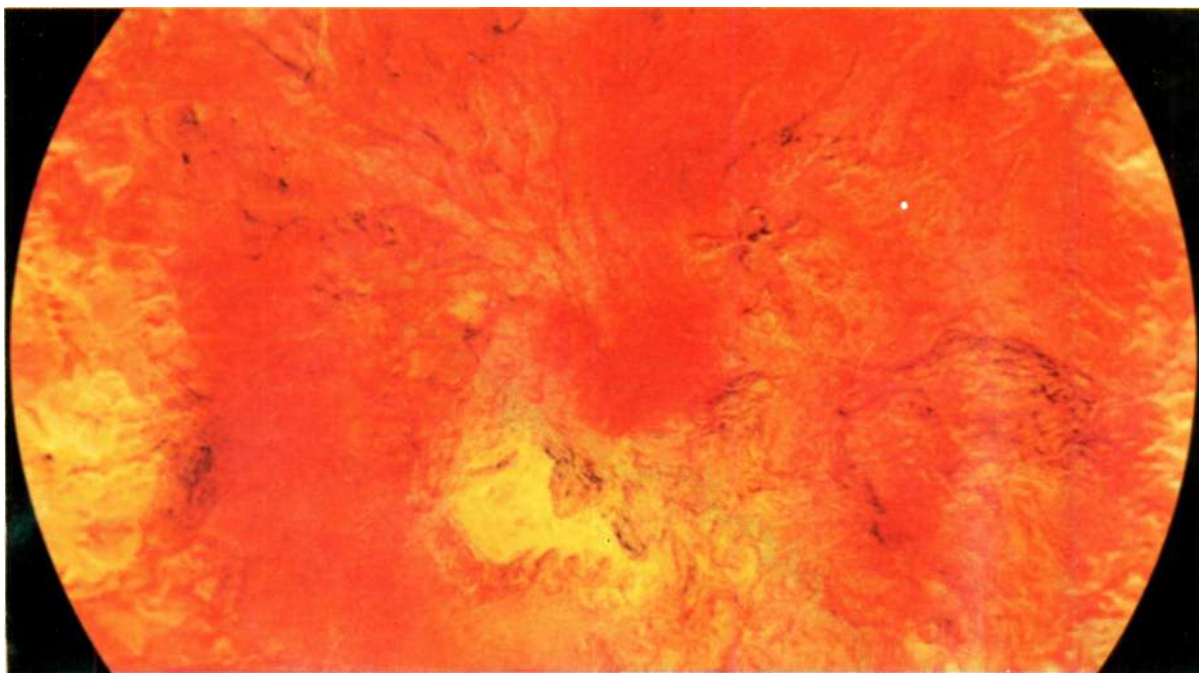


Фото 9. Северный полярный район Венеры. Изображение построено Геологической службой США на основе данных аппаратов «Венера-15 и -16», «Пионер—Венера» и наземной радиолокации обсерватории Аресибо. Нулевой меридиан проходит по вертикали через центр, где находится северный полюс; ниже — Земля Иштар и Плато Лакшми; справа от него — горы Максвелла. Красным показаны низины, желтым — наиболее высокие районы. Из журнала «The Planetary Report»

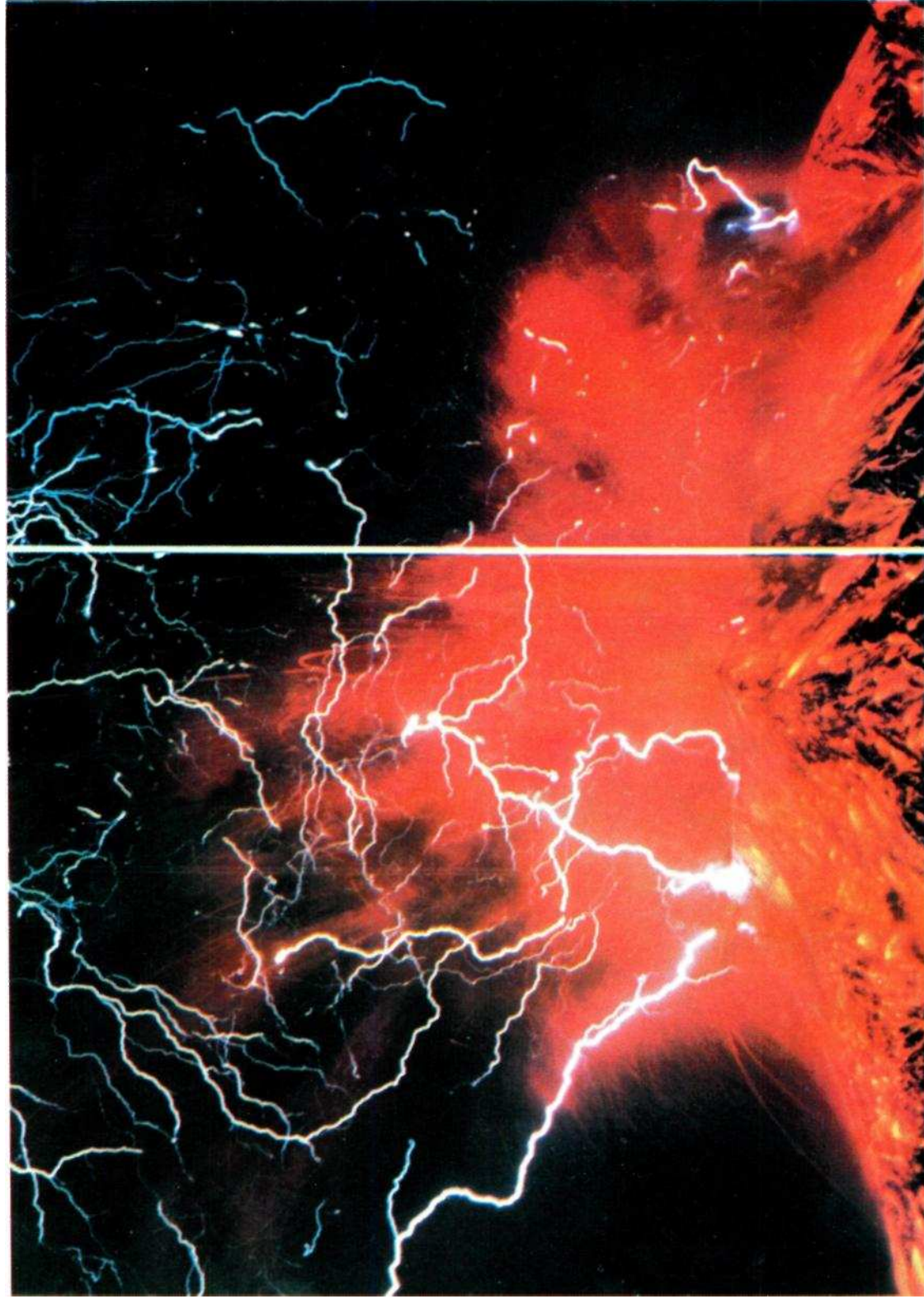


Фото 10. Извержение вулкана Сакура-дзима (южная Япония) 17 ноября 1987 г. сопровождалось многочисленными электрическими разрядами.
Фото профессора Тсуеши Нишиноэ, Университет г. Кагошима

МАРС

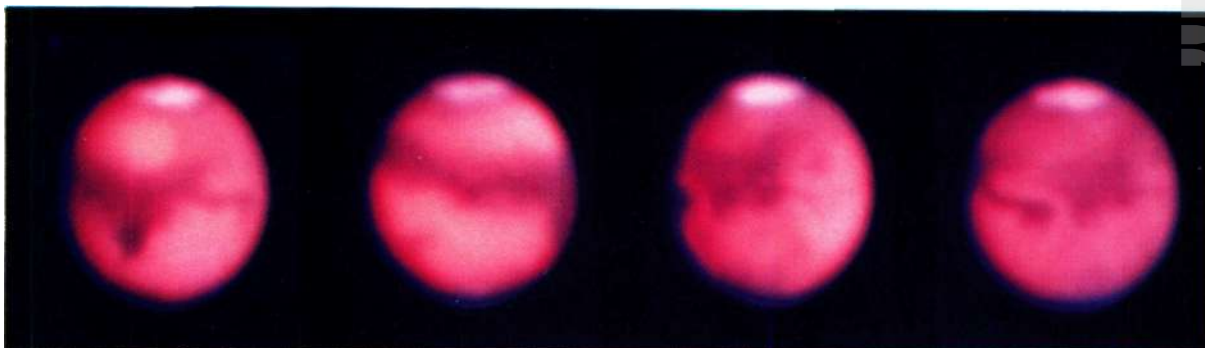


Фото 11. Таким Марс предстает на лучших фотоснимках, которые можно сделать с Земли. Фото обсерватории им. Ловелла

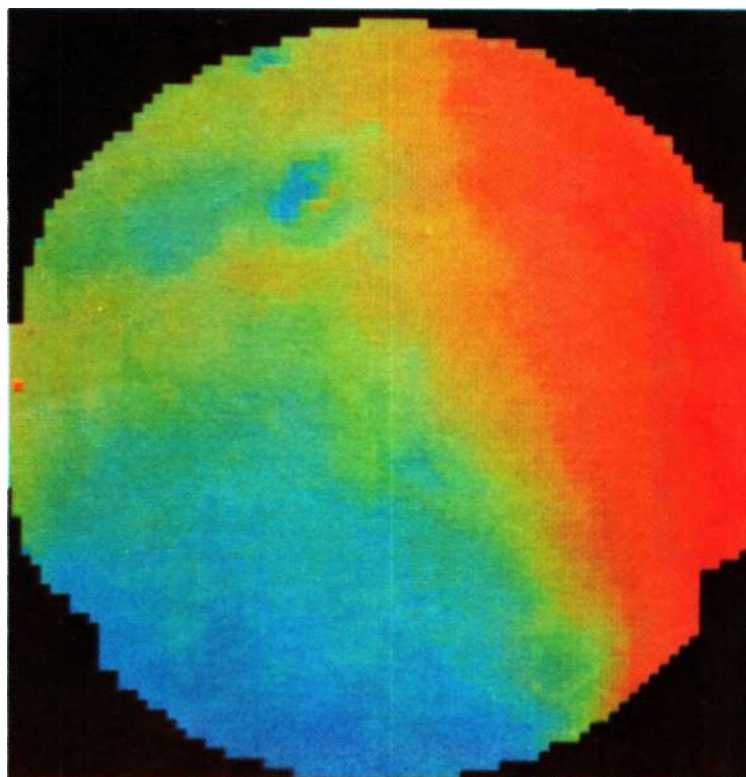


Фото 12. Тепловое излучение Марса, вид с космического аппарата. Холодный район — ночная сторона зимнего полушария (синий тон), теплый — дневная сторона (красный тон)

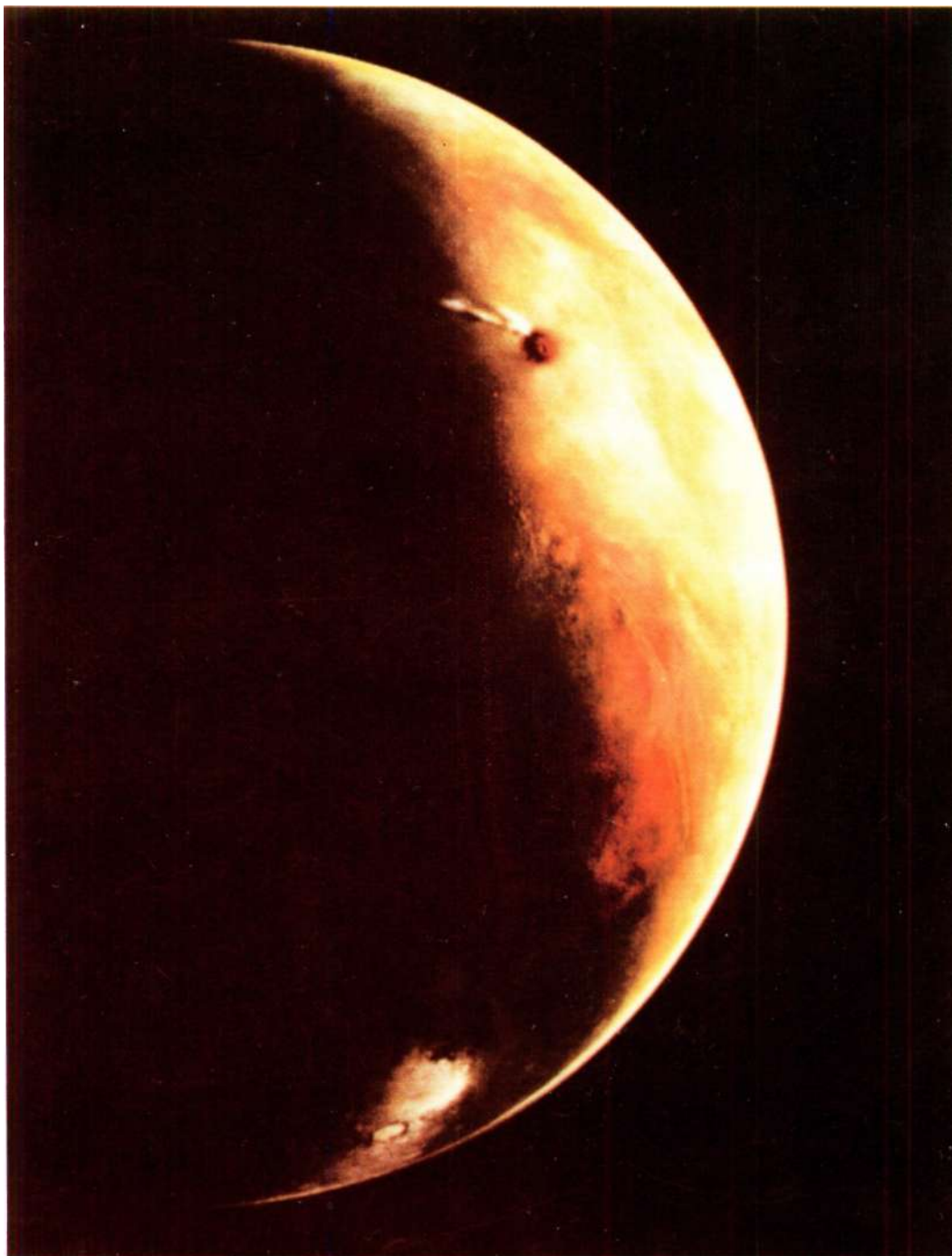


Фото 13. В августе 1976 г. с расстояния 419 тыс. км от Марса с «Викинга-2» получено изображение утреннего терминатора Марса. Вверху и на терминаторе в центре видны гора Аскрийская и гора Павлина. Снимок NASA

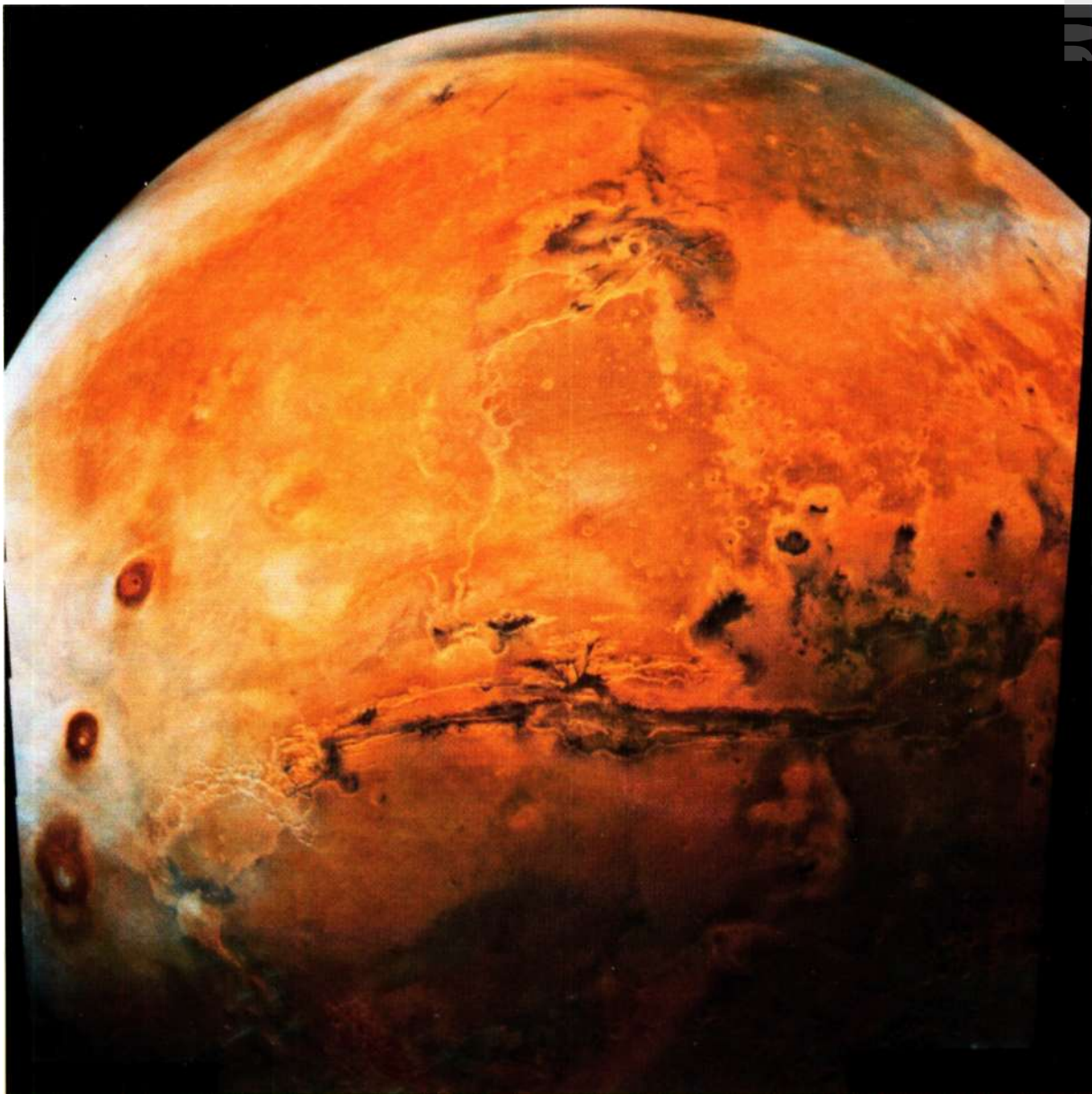
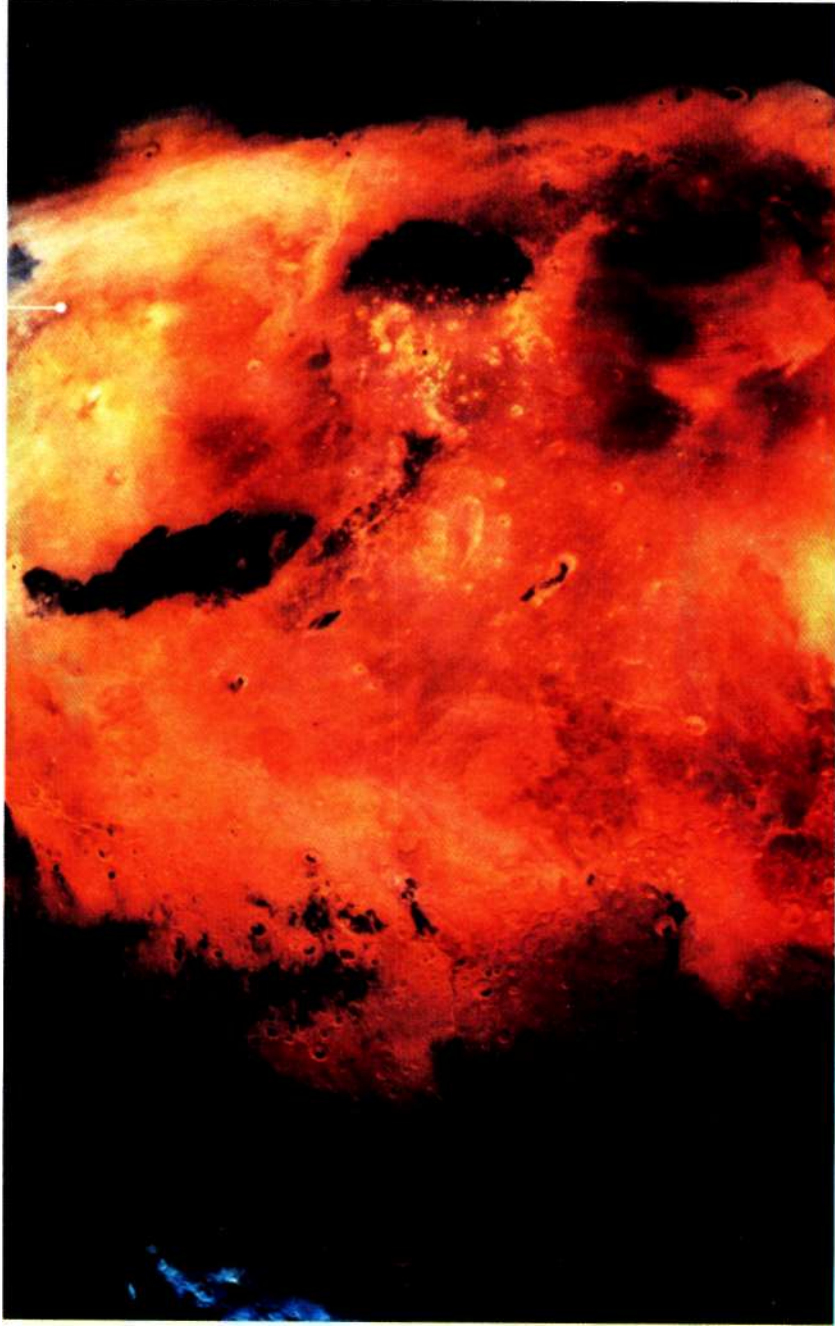


Фото 14. Более подробные изображения получены последующей обработкой. Марс в двух положениях; с долготой центрального меридиана около 75° (слева) и 180° (справа)



"ΗΛΙΟΣ Ρ."

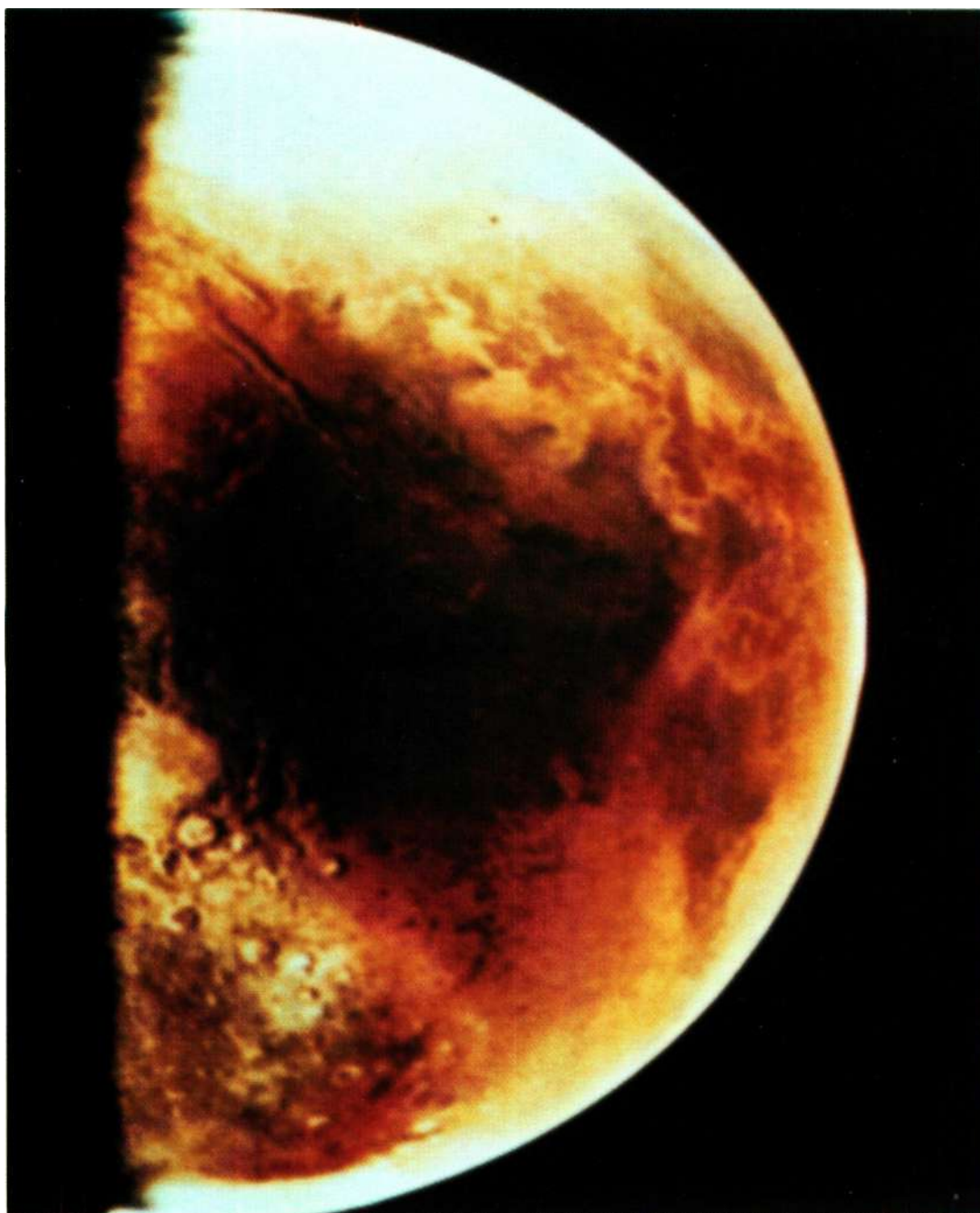


Фото 15. Марс в фазе 93%, недоступной наблюдениям с Земли. Вид с «Викинга-1» летом 1976 г.
На терминаторе — равнина Аргир. Снимок NASA



Фото 16. Высочайшая из известных в Солнечной системе вершин — гора Олимп — поднимается на 27,4 км от подножия. Средний диаметр по основанию — около 600 км. На периферии — крутые склоны. Из работы А.Алисон и А.Мак-Ивена

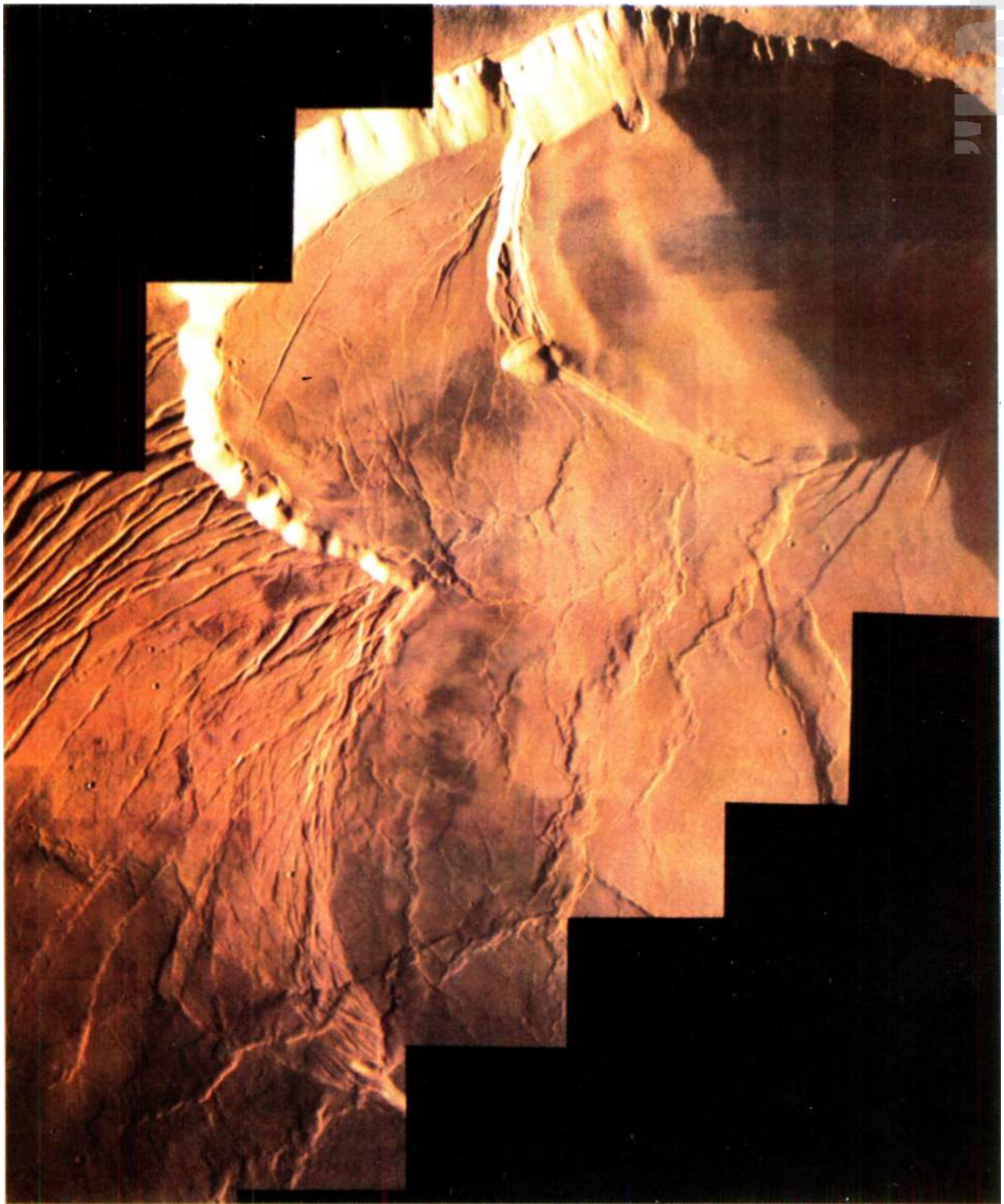


Фото 17. Вулканическая кальдера горы Олимп. Снимок NASA

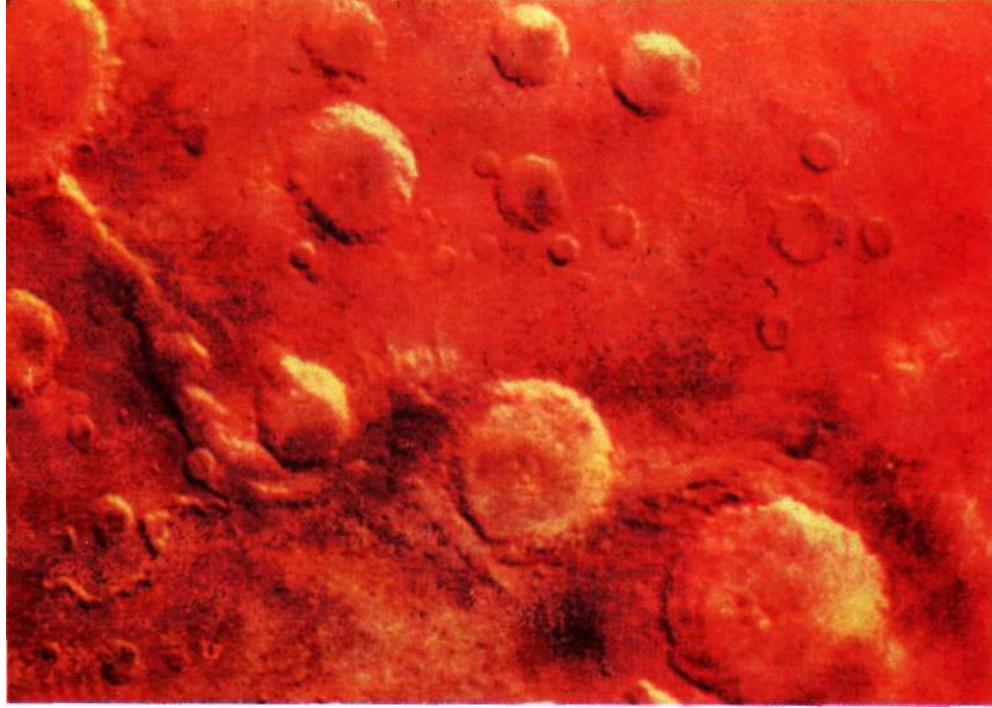


Фото 18. Снимок района Эритрейского моря. Большие кратеры, вытянутые цепью 800 км, вероятно, когда-то образовывали единое водохранилище, в которое впадала древняя река Нертал (слева вверх). Снимок «Марса-5»



Фото 19. Уступ Огига с перепадом высот около 1,2 км и прилегающий к нему с запада район. Снимок «Марса-5»

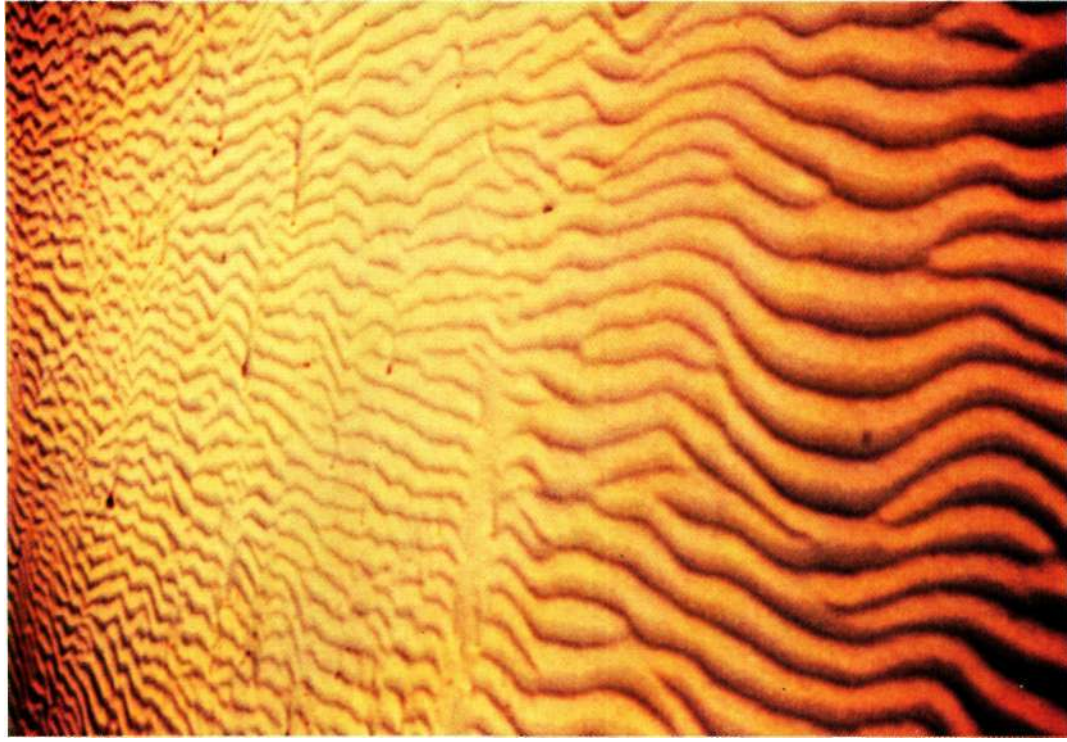


Фото 20. Мелкие дюны, которые образуются под действием ветра на песчаном берегу Юрмалы (слева) и гигантские дюны земных пустынь (справа)



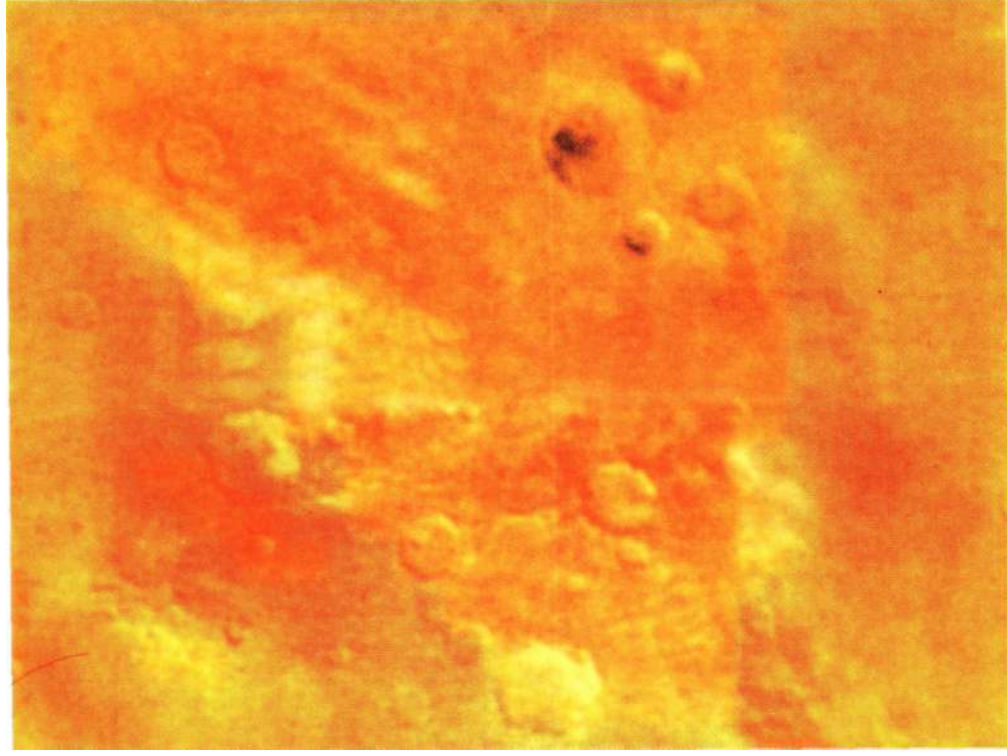


Фото 21. Район горного края высотой 9 км в области Тавмасия — Босфорское плато. На снимке видны темные и светлые кратеры и голубоватые неплотные конденсационные облака над вершинами. Склоны очень пологие, поэтому резких теней нет. Снимок «Марса-5»

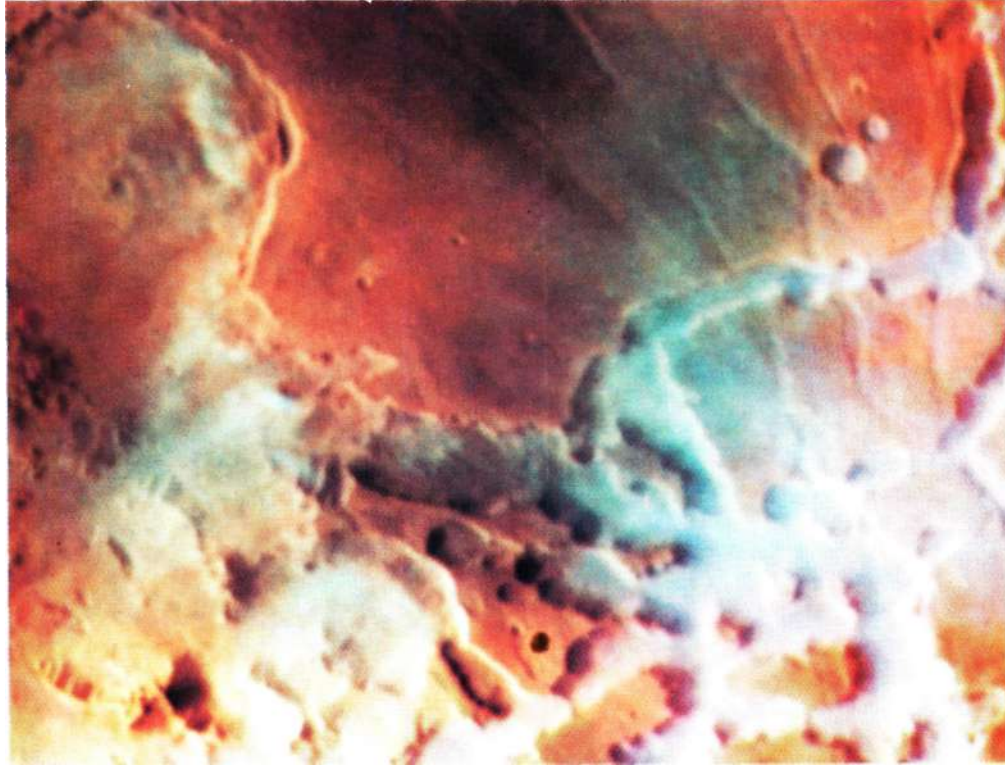


Фото 22. Каньон лабиринт Ночи, заполненный в утренние часы туманом. Снимок NASA

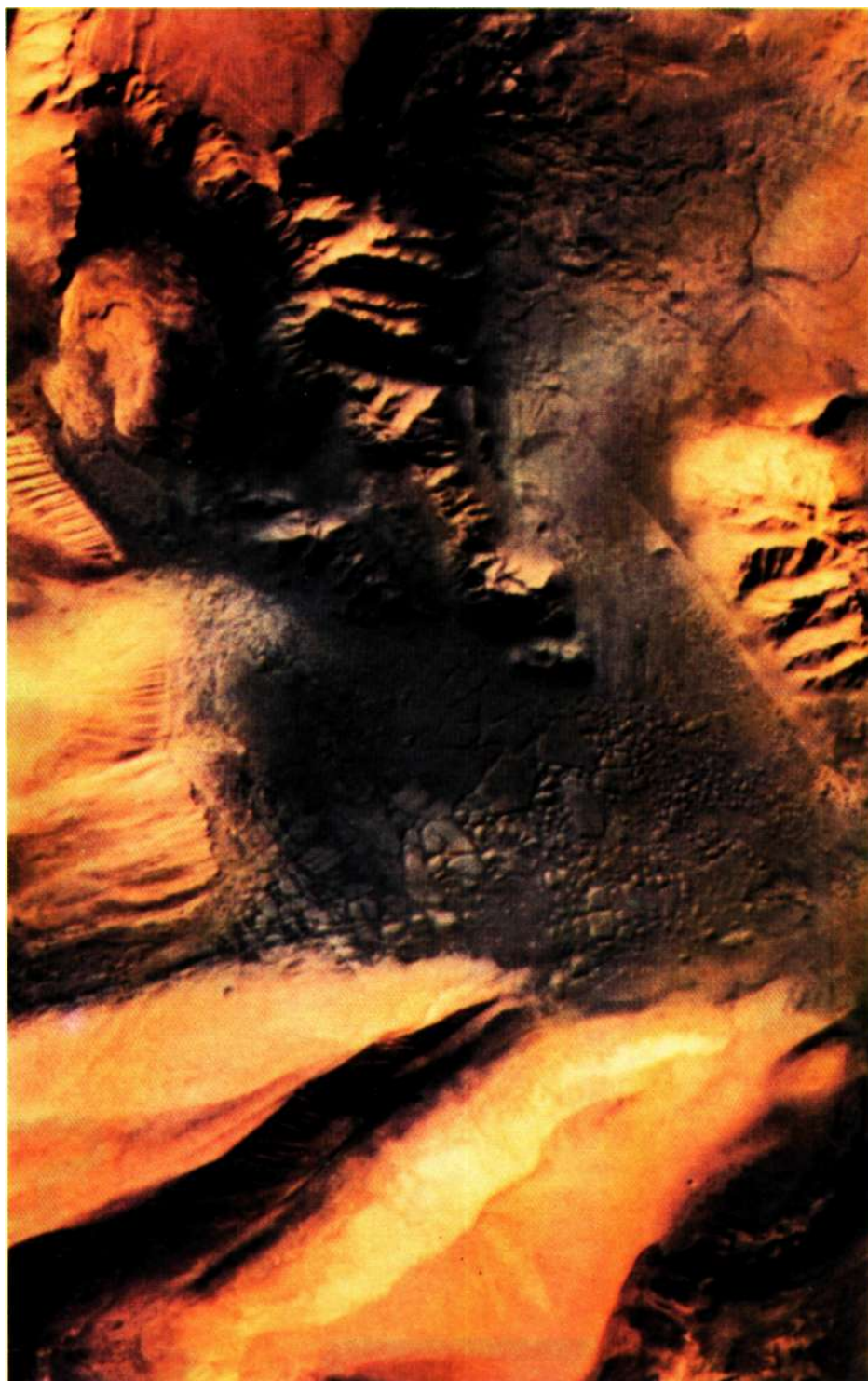


Фото 23. Каньон Кандор (часть долины Маринера). Площадь приведенного на снимке района 190×225 км. Из работы А.Мак-Ивена



Фото 24. Район южного полюса Марса. С наступлением теплого времени года полярная шапка в летнем полушарии тает и уменьшается в размерах. Из работы Л.Содерблома

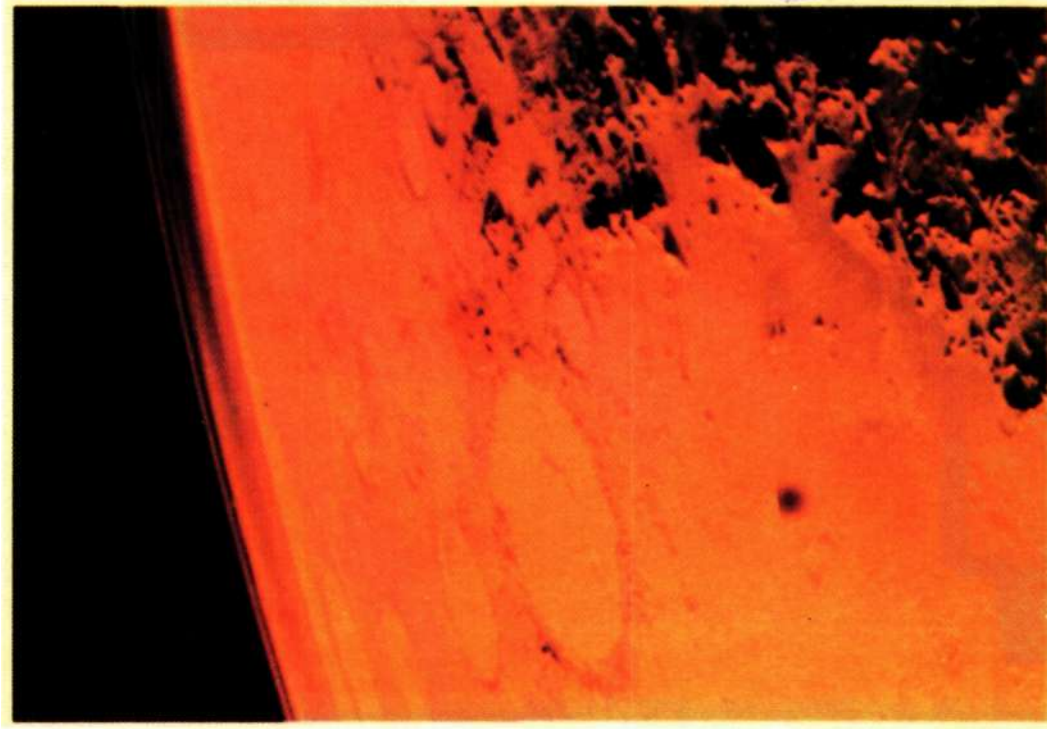


Фото 26. Снимок, полученный с орбитального аппарата «Викинг-1» в условиях необычайно высокой прозрачности атмосферы, показывает детали равнины Аргир. Заметна белая морозная мгла над южным полярным районом, где в этот период была середина зимы. Два слоя тонких облаков на высоте от 25 до 40 км, по-видимому, состоят из кристаллов сконденсированного углекислого газа. Снимок NASA



Фото 25. Обнаженная слоистая структура северной полярной шапки. Снимок NASA



Фото 27. Большой валун имеет высоту 1 м и ширину около 2 м. Камень находится у самого аппарата «Викинг-1» и получил прозвище «Большой Джо». Обратите внимание на «шапку» из тонкого красного песка на камне. Снимок NASA

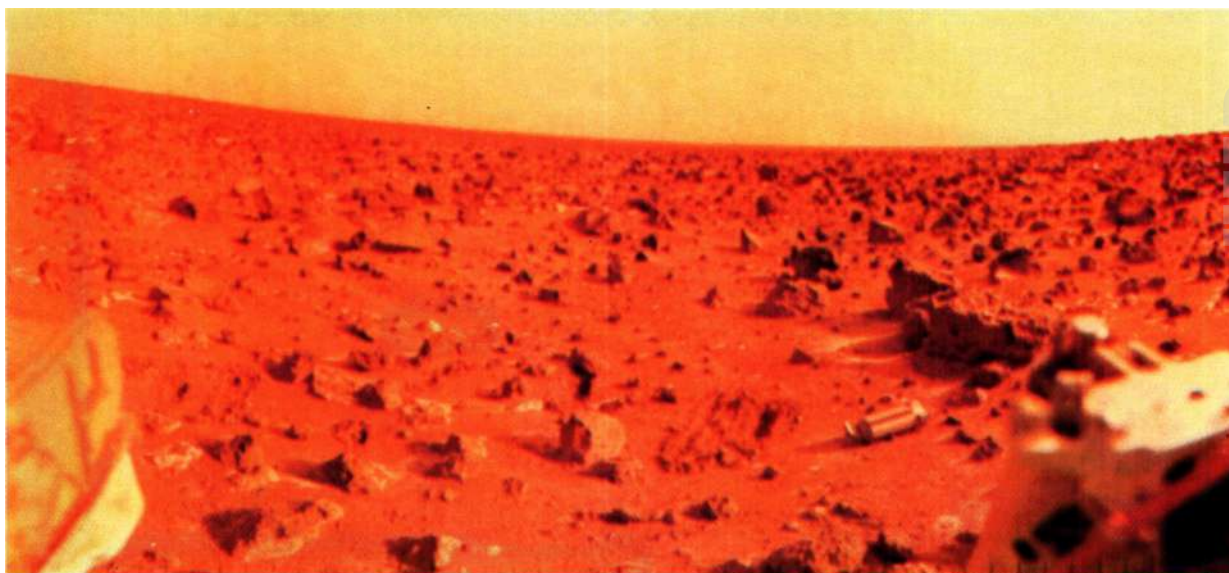


Фото 28. Фрагмент панорамы равнины Утопия в месте посадки «Викинга-2». Это далеко не первый снимок «Викинга-2». Он получен зимой (иней в тени камней) через 1050 марсианских дней после посадки. «Лес камней» — такое название было предложено для этого места. В левой части снимка видна неглубокая канава; скорее всего, она образована ветром. Хотя феномен пылевых бурь уже был известен в физике Марса, его красное небо все же оказалось сюрпризом. Очень тонкая красная пыль висит в атмосфере со времени последней сильной пылевой бури и выпадает настолько медленно, что окраска неба сохраняется до следующей пылевой бури. Из-за пыли яркость неба почти в 100 раз больше расчетной. Камней намного больше, чем ожидалось. На песке видны следы грунтозаборника.

Снимок NASA

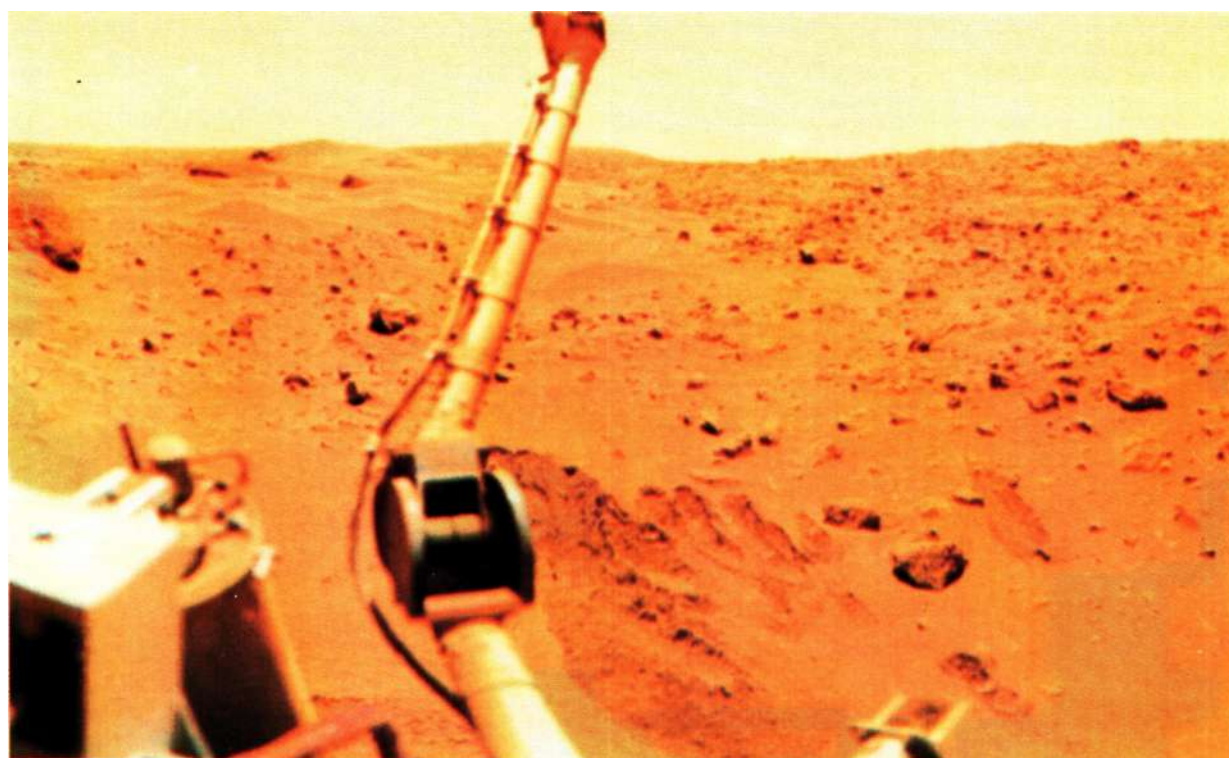


Фото 29. 730-й день на поверхности Марса. Изрытый грунтозаборником «Викинга-1» грунт (канавки перед аппаратом) не дал определенного результата в поиске жизни на Марсе. Снимок NASA



Фото 30. Восход Солнца над равниной Утопия. Резкие тени указывают на низкое положение Солнца над горизонтом. Снимок NASA

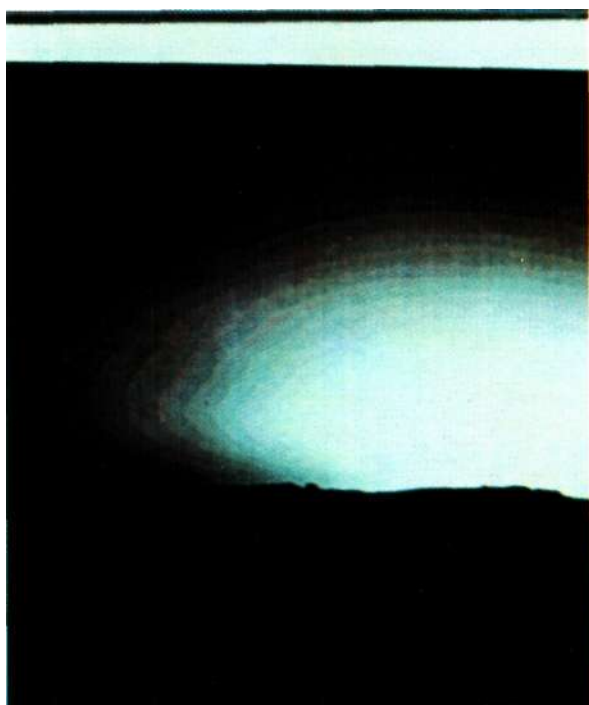


Фото 31. Ночь спускается на равнину Хриса. Снимок NASA

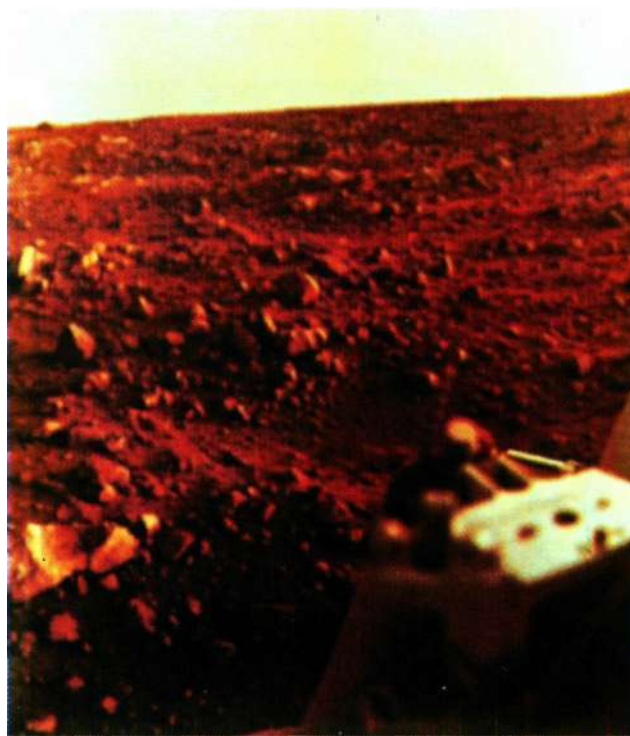


Фото 32. Вид равнины Хриса за 15 мин до захода Солнца. Снимок NASA

ЮПИТЕР

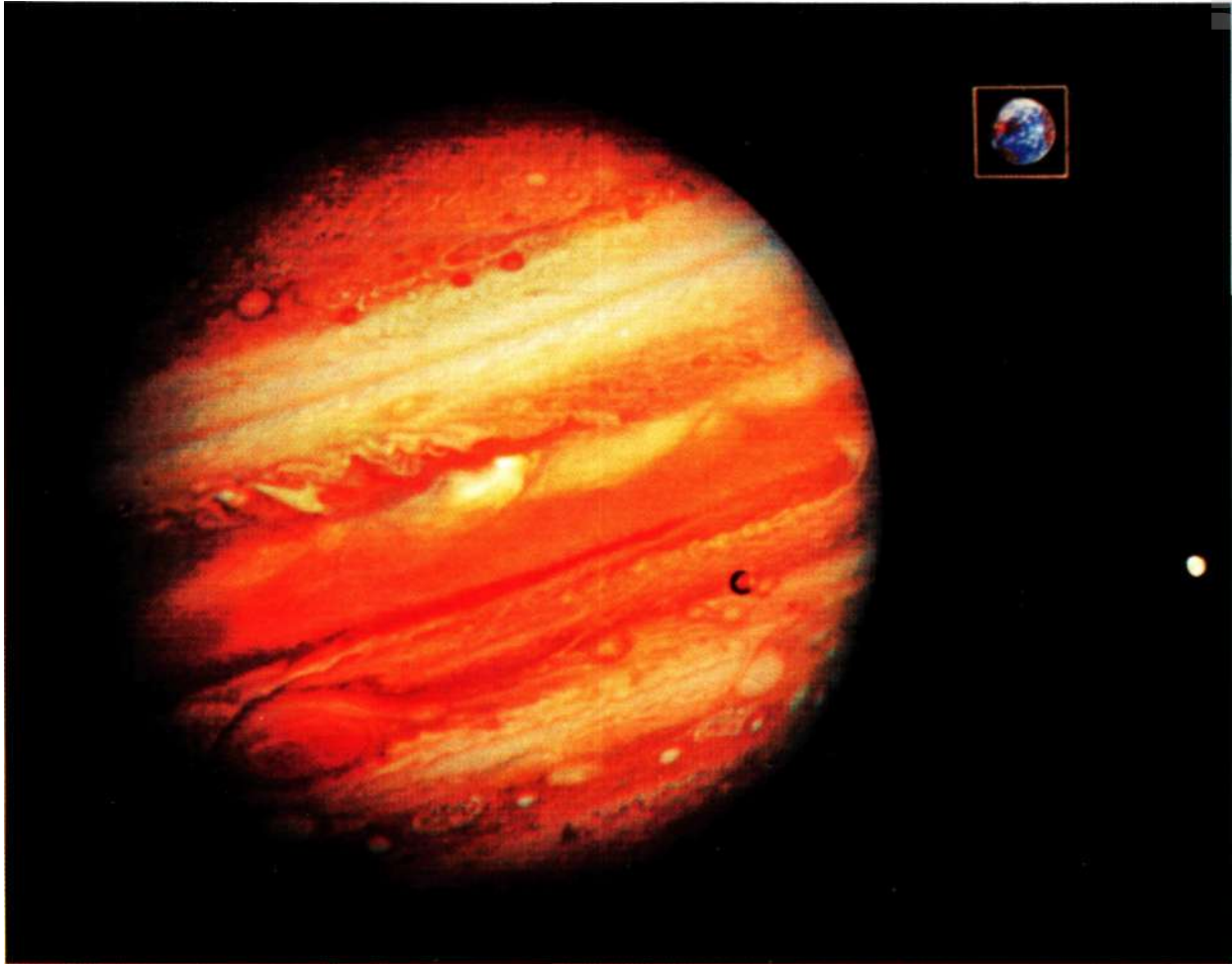


Фото 33. Юпитер — крупнейшая планета Солнечной системы, по диаметру в 11,2 раза превышающая земной шар. На снимке, сделанном с расстояния 28 млн км, видны темные пояса и светлые зоны, охватывающие планету, Большое Красное Пятно (слева внизу) и два из шестнадцати спутников Юпитера: Ио (на фоне планеты) и Европа (справа). Снимок NASA. На врезке — Земля в том же масштабе

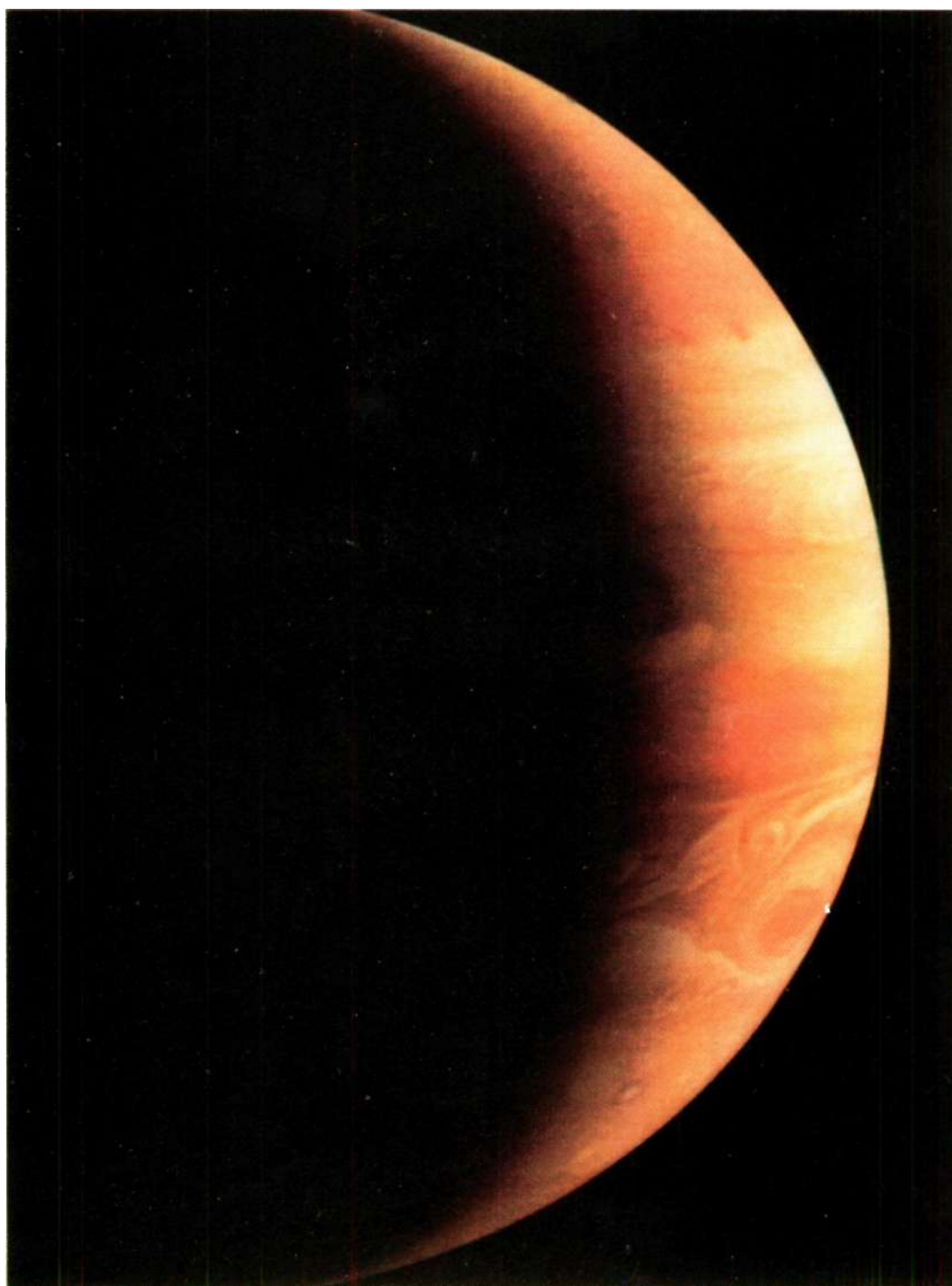


Фото 34. «Серп» Юпитера — фаза планеты, недоступная наблюдениям с Земли. Таким Юпитер можно увидеть только с космического аппарата. Снимок NASA

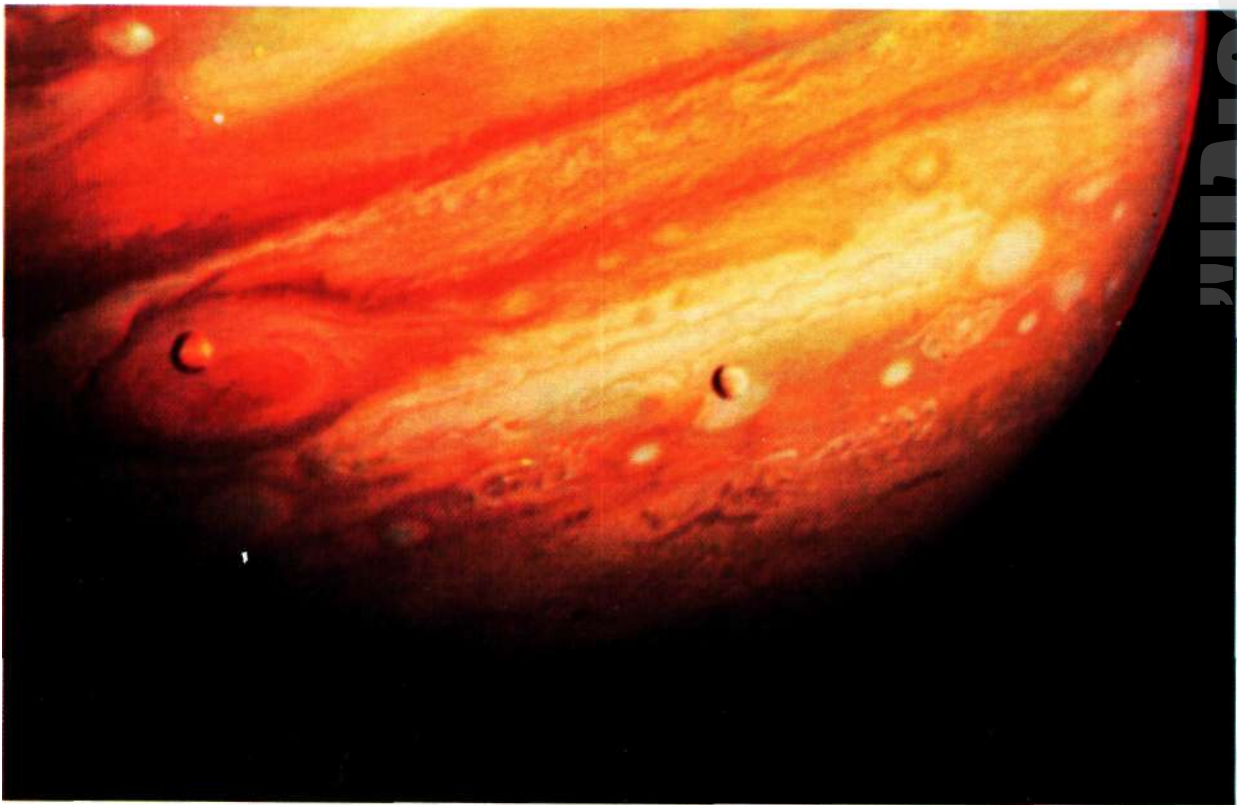


Фото 35. Вид южного полушария Юпитера со спутниками Ио (на фоне Большого Красного Пятна) и Европой (на фоне южного умеренного пояса). Снимок NASA

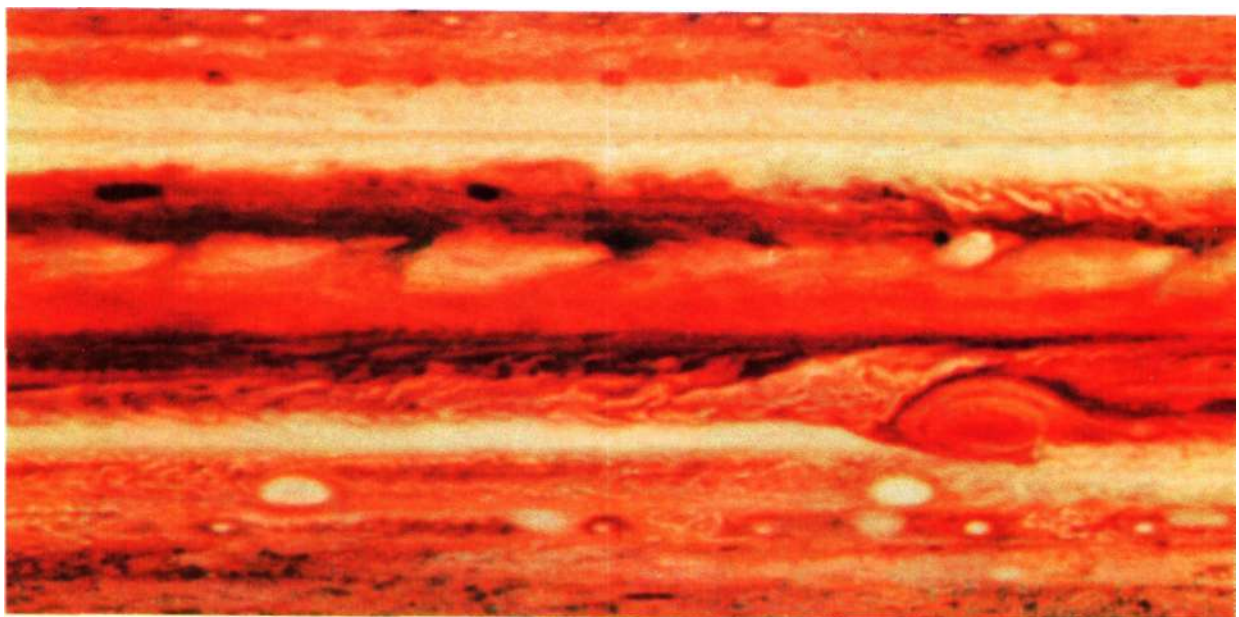


Фото 36. Пояса, зоны, Большое Красное Пятно и меньшие пятна представлены на фрагменте цилиндрической проекции, в которую развернута поверхность Юпитера. Обработка NASA

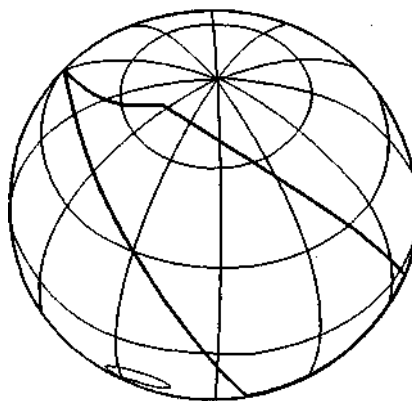
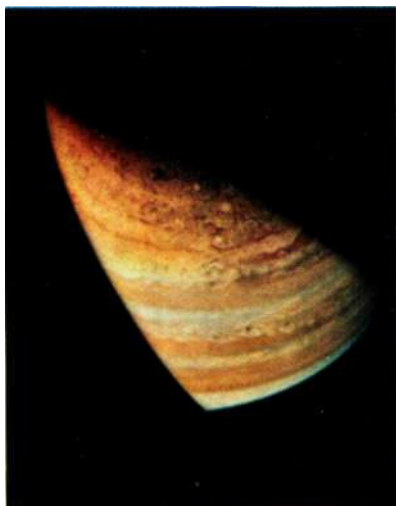


Фото 37. Один из первых снимков Юпитера с космического аппарата. Сектор планеты с приполярным районом. В районе севернее 40° с.ш. и южнее 40° ю.ш. структура облачного слоя меняется. На границе двух типов облачных систем неустойчивость движений проявляется в виде своеобразных «кружев» и «плюмажей».

Снимок аппарата «Пионер—Сатурн». Справа — геометрия снимка

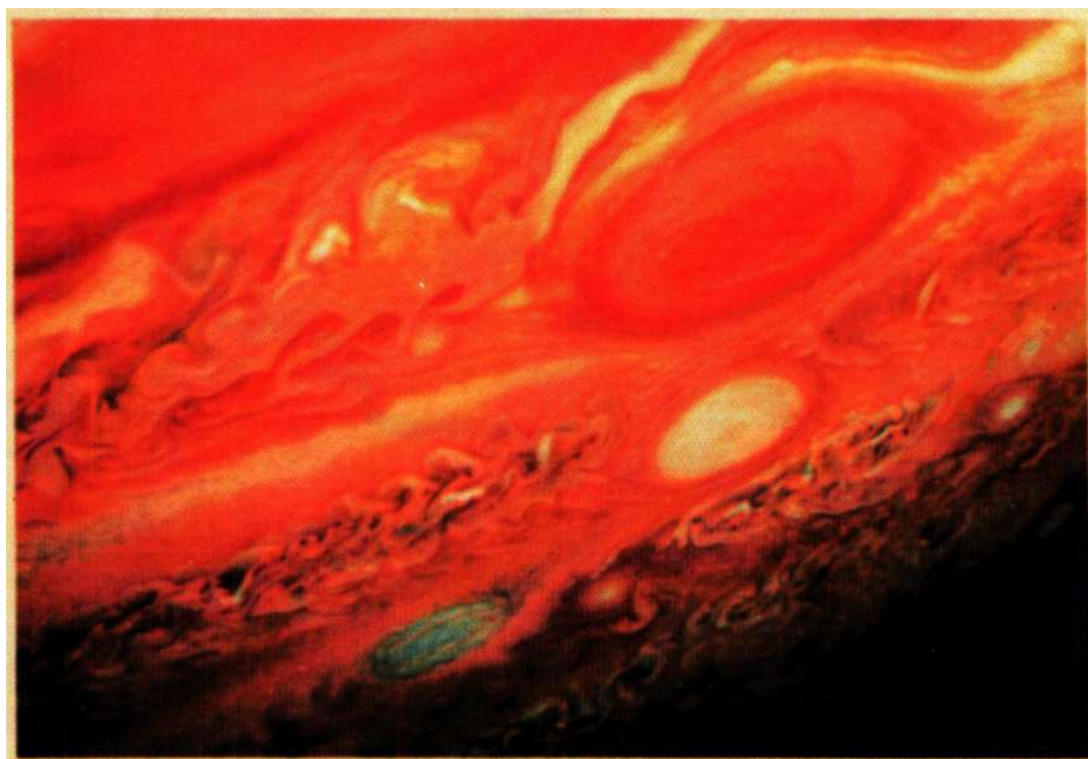


Фото 38. Вид Большого Красного Пятна, белого и голубого пятен с расстояния 5 млн км. Снимок NASA



Фото 39. Иногда в облачном слое Юпитера образуются разрывы, обнажающие нижние ярусы облаков. Снимок NASA



Фото 40. Северная умеренная зона около 30° широты характеризуется быстрым течением в восточном направлении. Скорость ветра вдоль узкой оранжевой полосы достигает 120 м/с. Снимок NASA

"НЛОС Р."

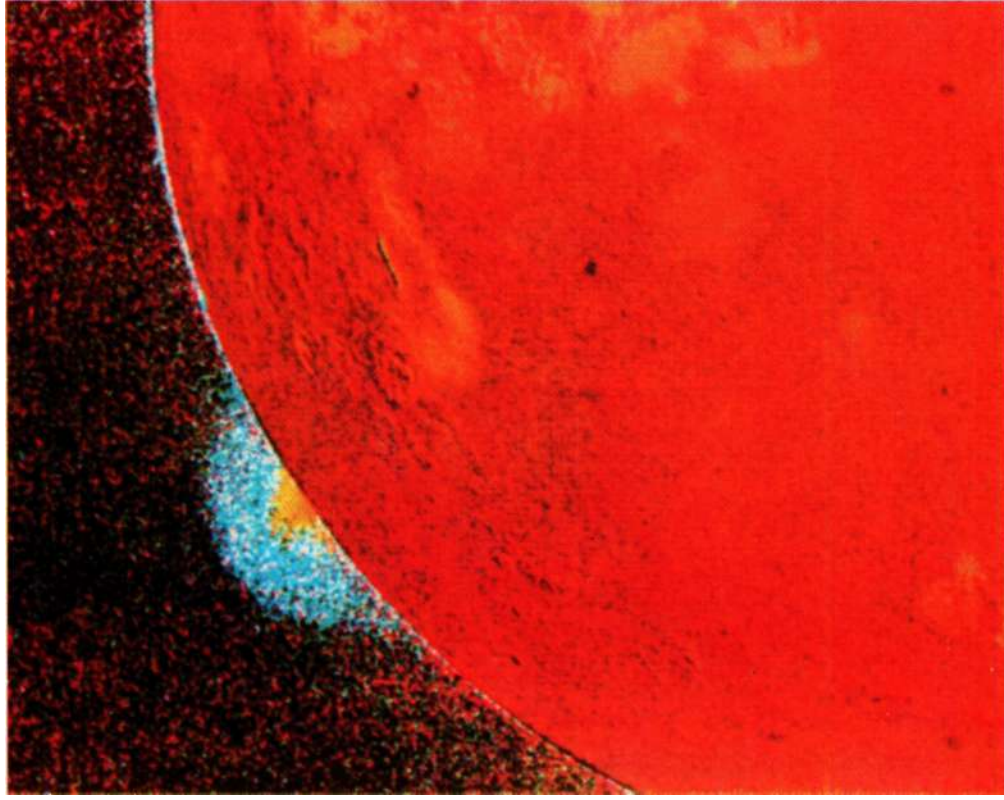


Фото 41. Извержение над лимбом Ио. Газовые потоки над извержением поднимаются на высоту до нескольких сотен километров. Снимок NASA

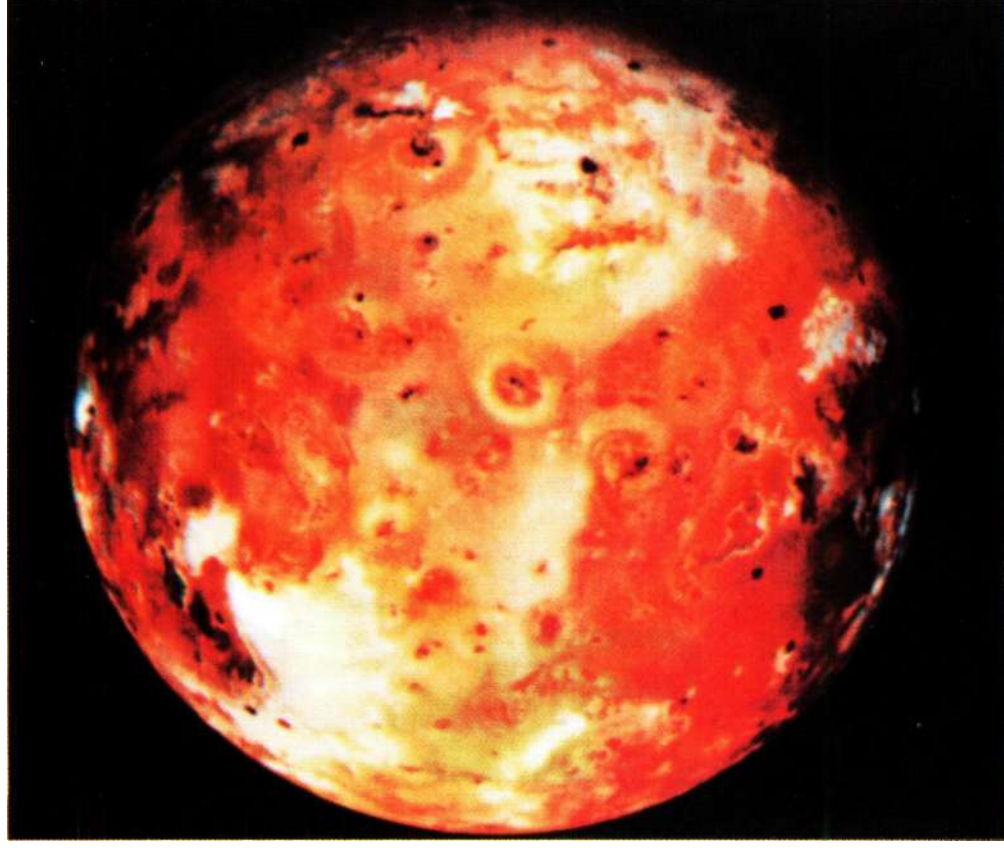


Фото 42. Ио — спутник, поверхность которого образована конденсацией продуктов постоянных вулканических извержений. В извержениях выбрасываются главным образом газообразная двуокись серы. Извержения можно видеть на этом снимке в виде неправильного туманного кольца в центре и таких же колец ниже и выше центра изображения. Снимок NASA

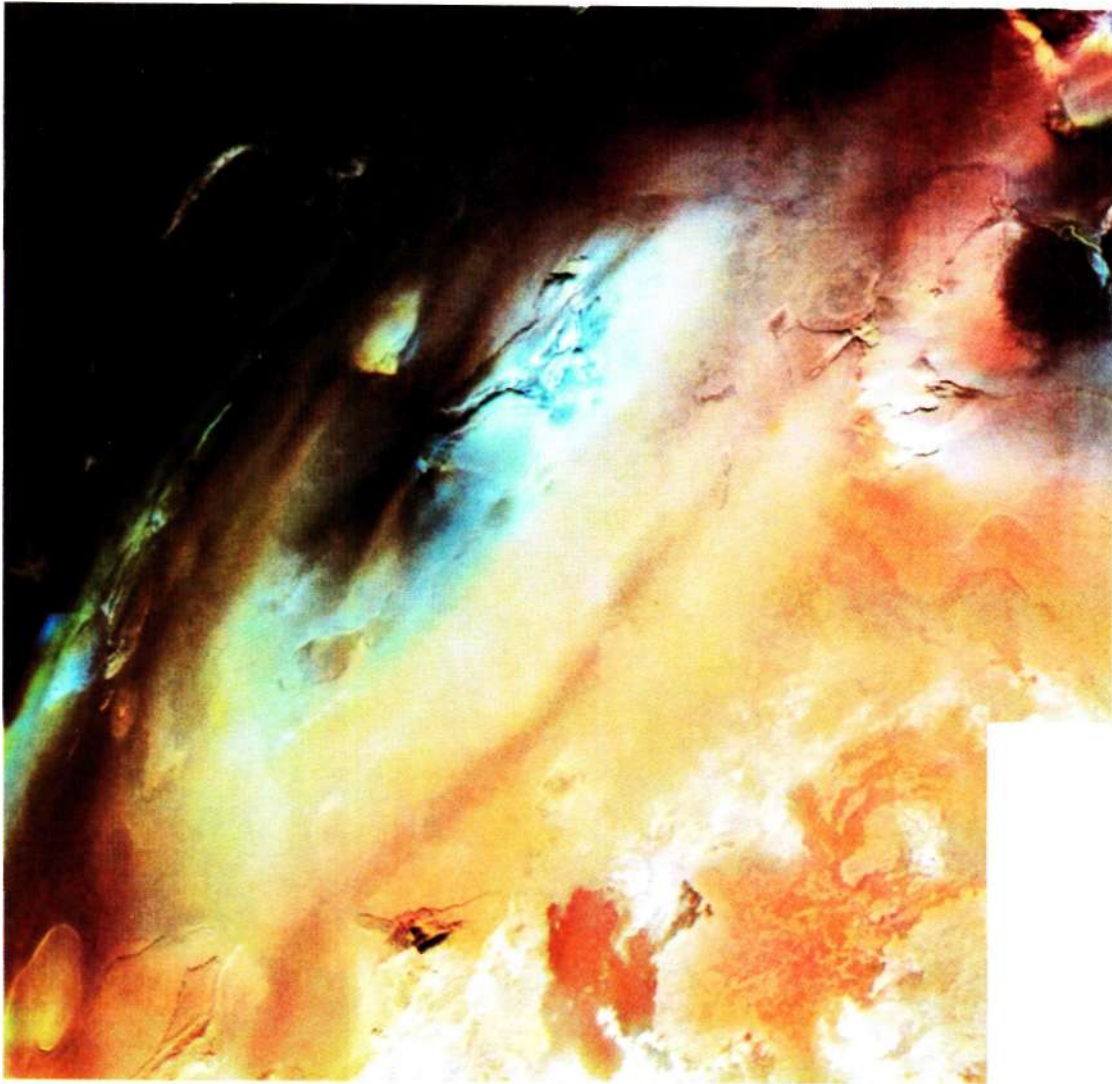


Фото 43. Извержение вулканического комплекса Пеле. Газовый султан, сквозь который видны средняя и верхняя части снимка, поднимается над поверхностью на 280—300 км. Из работы А.Мак-Ивена и Л.Солербома

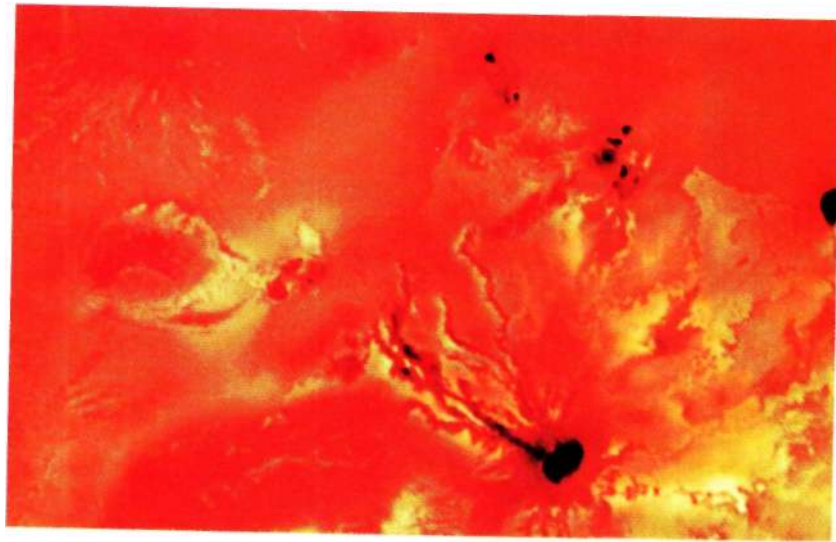


Фото 44. Крупноплановый снимок извержения вулкана патера Ра на Ио. Протяженность района по вертикали около 800 км. Снимок NASA

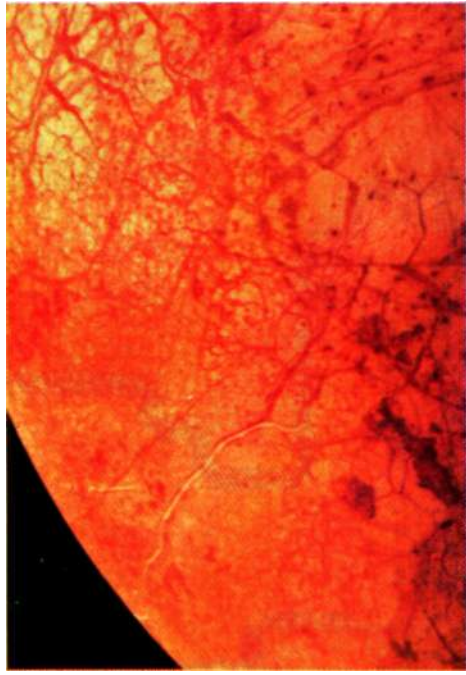


Фото 46. Европа, второй галилеев спутник Юпитера, по размерам близка к Луне. Светлая поверхность Европы представляет собой ледяную кору, покрытую сеткой многочисленных разломов.
Снимок NASA



Фото 47. Ганимед — наибольший из спутников в Солнечной системе. По своим размерам он превосходит планету Меркурий. Темная область Галилей, вероятно, относится к самым древним участкам поверхности, с возрастом до 4 млрд лет.
Снимок NASA



Фото 45. Крупнейшее «горячее пятно» на Ио — патера Локи (справа внизу). Извержения происходят из правого и левого краев 200-километрового разлома над патерой Локи. Изображение в условных цветах. Из работы А.Мак-Ивена и Л.Содерблома

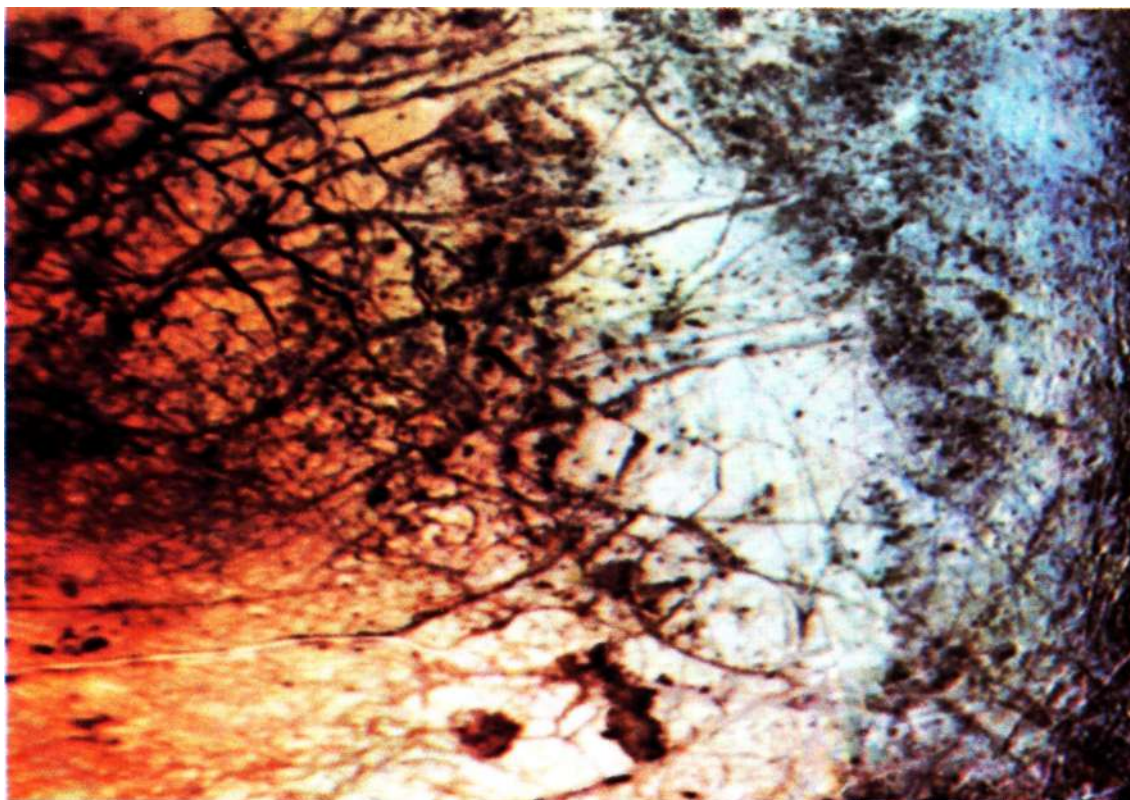


Фото 48. Заполнение трещин в коре Европы материалом, поднимающимся из глубин, создает структуру цветной сетки, образованной застывшим веществом. Разломы не приводят к какому-либо движению коры (фрагмент фото 46). Снимок NASA

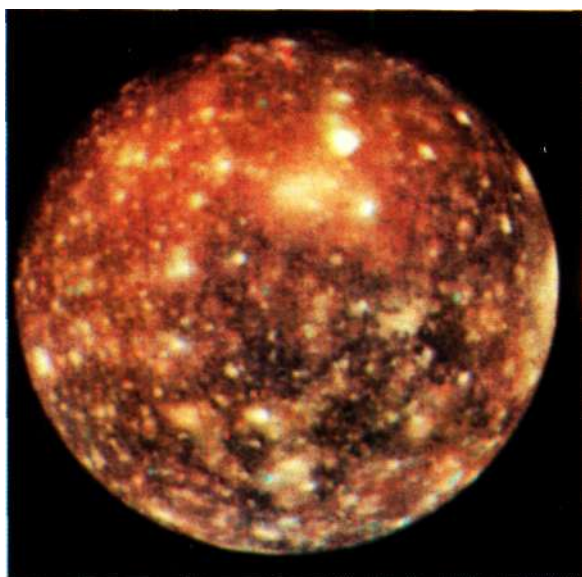


Фото 49. Каллисто, четвертый галилеев спутник Юпитера, по размерам почти не уступает Ганимеду. Низкая средняя плотность указывает на значительную долю водяного льда в его составе. Снимок NASA



Фото 50. Ближайший к планете спутник Амальтея завершает оборот вокруг Юпитера за 12 ч и имеет неправильную форму с размерами $135 \times 85 \times 75$ км. Снимок NASA



Фото 51. Почти полтора десятка концентрических трещин диаметром до 2600 км окружают след удара метеоритного тела, столкнувшегося с Каллисто в древнейшие времена его истории (кратер Валгалла).
Снимок NASA

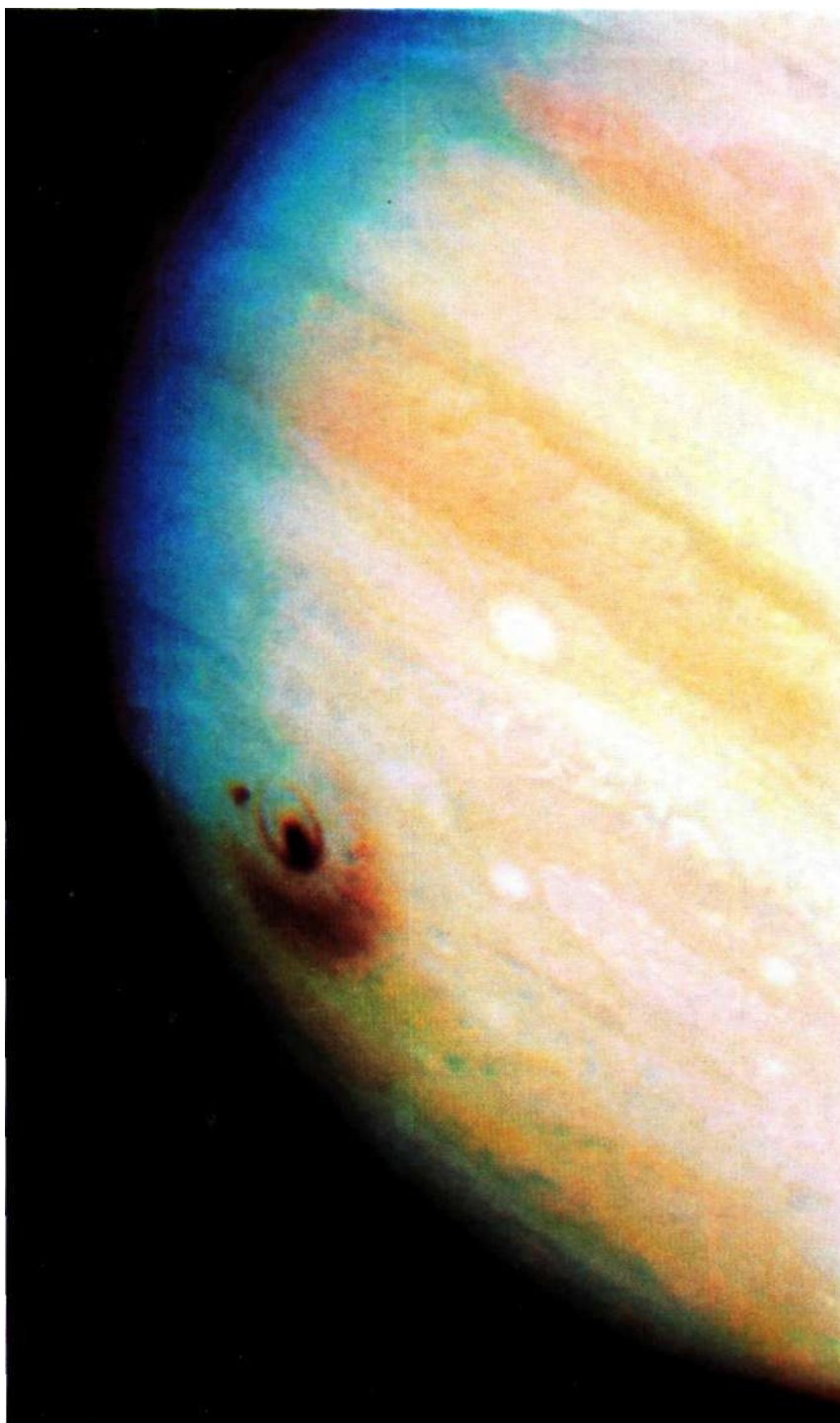


Фото 52. Южная полярная область Юпитера (18 июля 1994 г.). Из-за лимба появился район взрыва фрагментов А (кружок слева) и G (темный объект, кольцо и дуга). Энергия взрыва оценивается как эквивалент 6 млн ядерных бомб по одной мегатонне. Диаметр темного кольца немного меньше Земли. Снимок Группы телескопа «Хаббл» и NASA

САТУРН

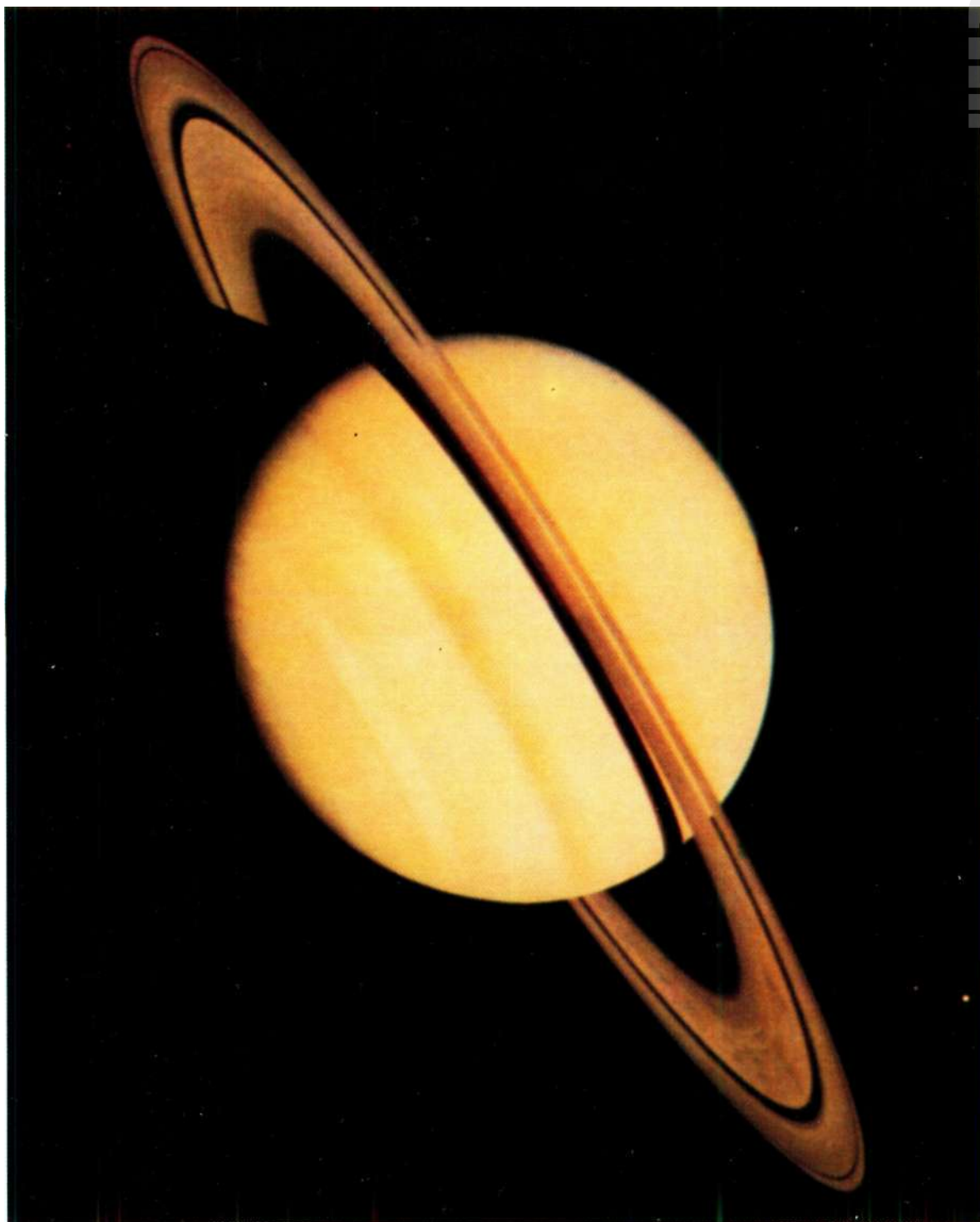


Фото 53. Сатурн с расстояния 18 млн км. Темная полоса на планете — тень кольца. На снимке показаны внешнее кольцо А, среднее В и деление Кассини между ними; внутреннее кольцо С не видно. Снимок NASA

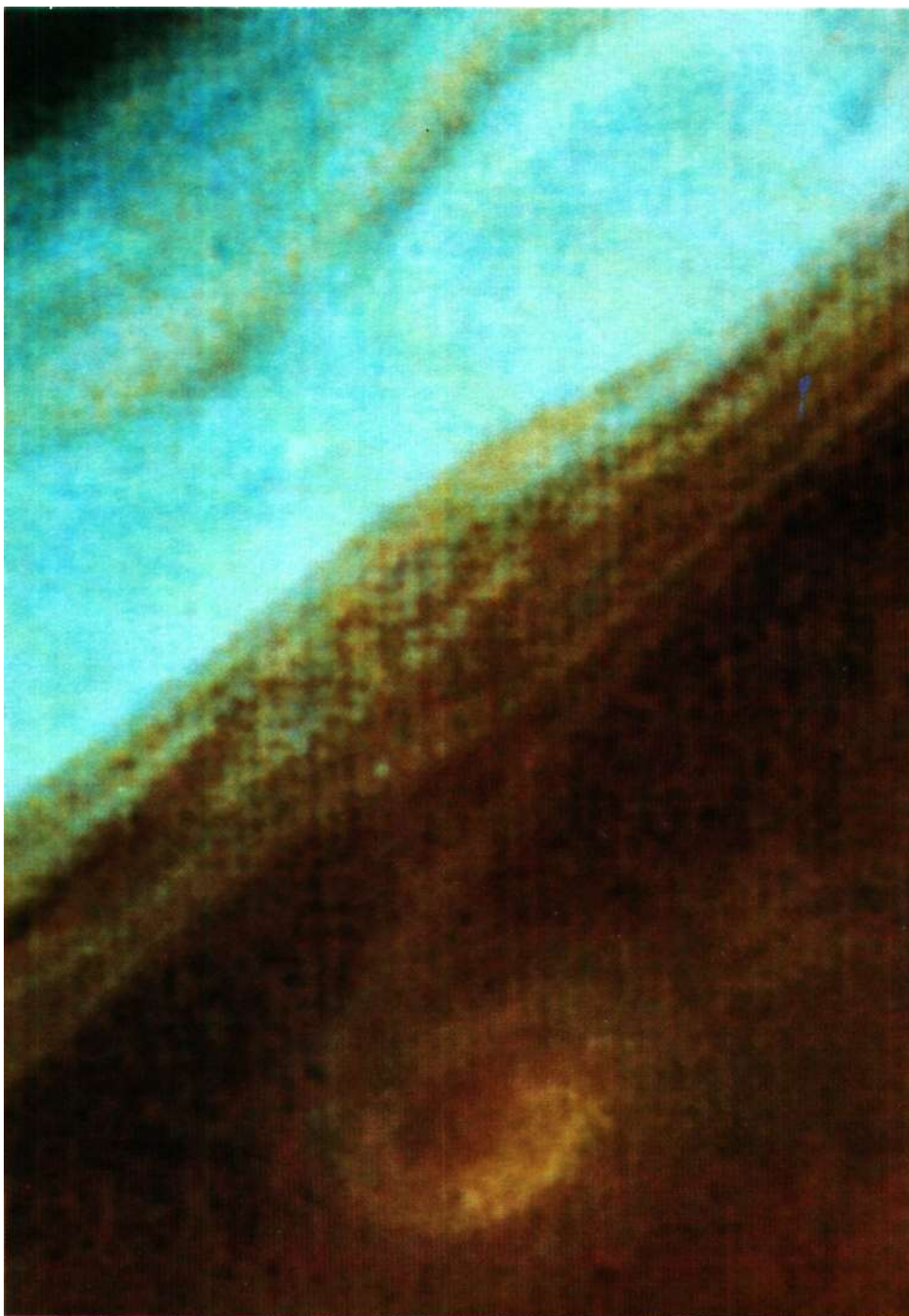


Фото 54. Один из крупных вихрей вблизи 40-й параллели Сатурна имеет вид цифры 6.
Снимок NASA

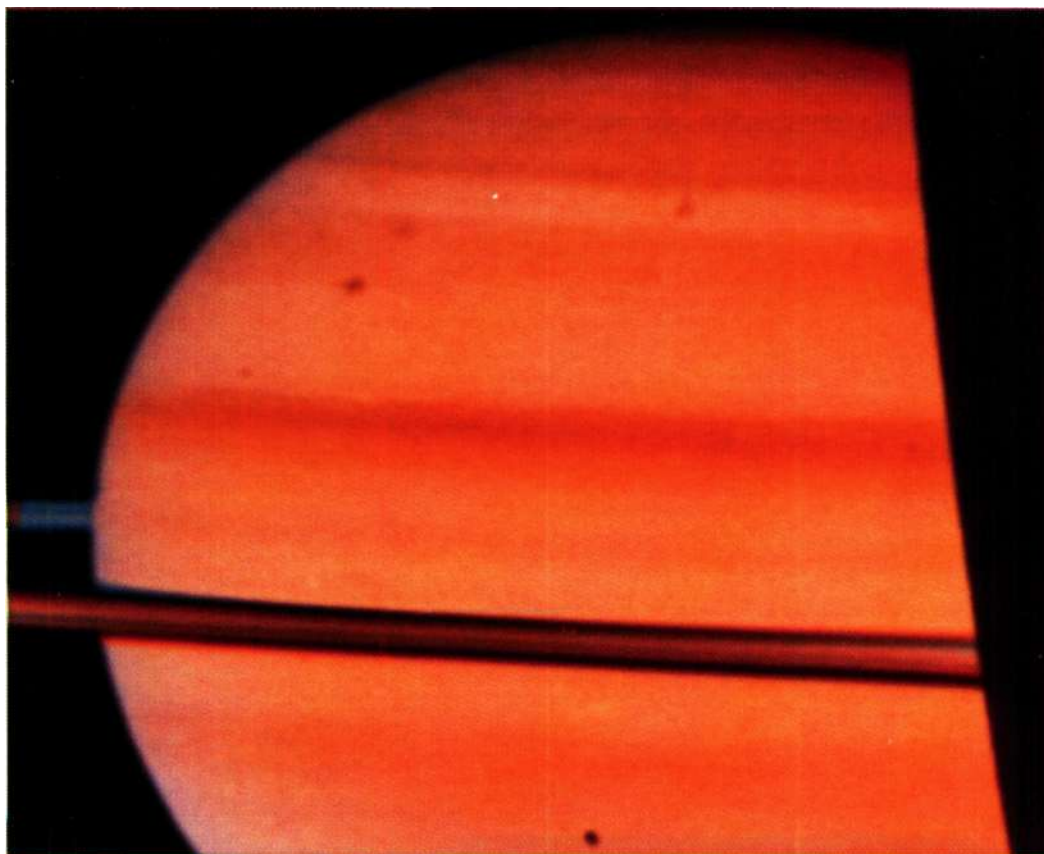


Фото 55. Пояса и зоны Сатурна, в отличие от Юпитера, доходят до очень высоких широт, почти до полюса на этом снимке. Аппарат находился близко к плоскости колец. Снимок NASA

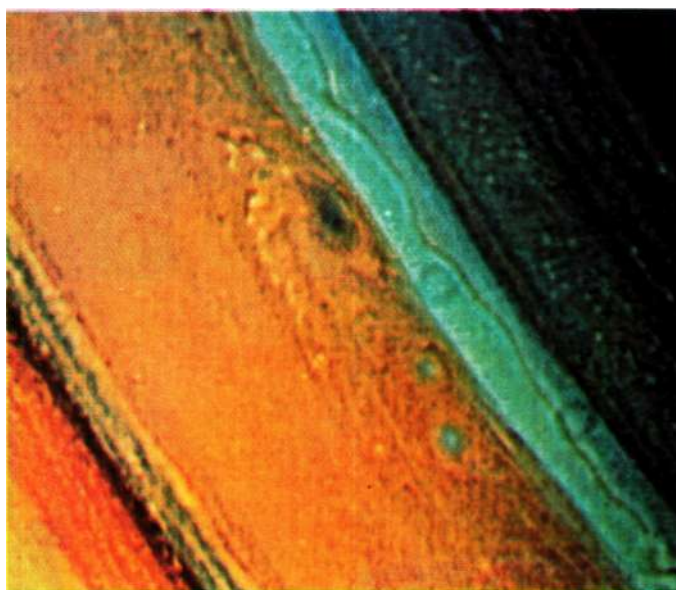


Фото 56. Изображения в условных цветах позволяют выделить элементы, характерные для динамики атмосферы Сатурна. Сильное струйное течение в форме извилистой линии обладает скоростью до 580 м/с. Наибольшее из трех вихревых пятен (ураганов) имеет диаметр 5000 км. Высокие северные широты.
Снимок NASA

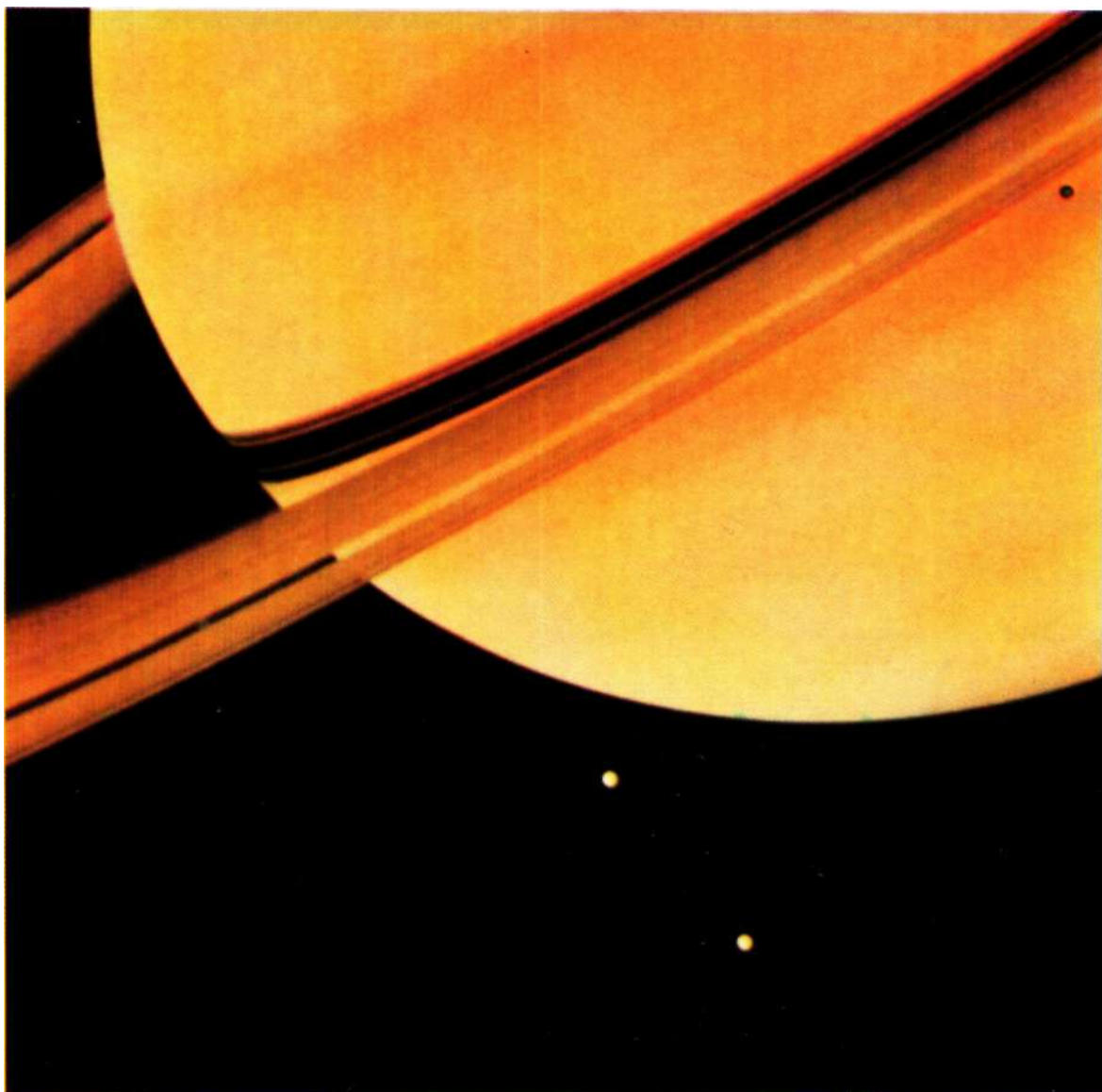


Фото 57. На снимке видны кольца А, В, С, деления Энке (у внешнего края кольца А) и Кассини и четкие тени от каждого из колец. Внизу — спутник Тетия (его тень — справа под кольцом), ниже — Диона.
Снимок NASA

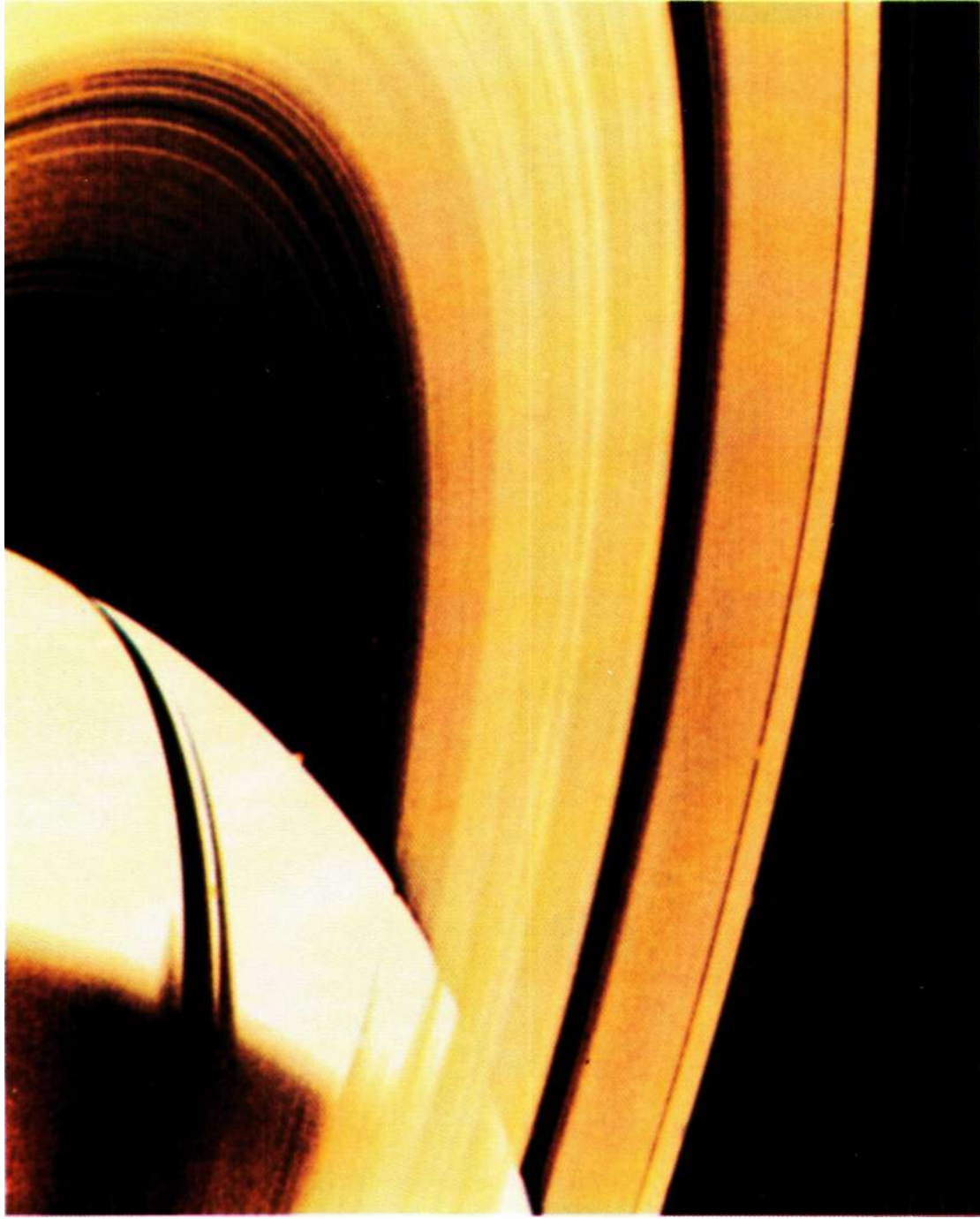


Фото 58. Три основных кольца, снятые с расстояния 1,5 млн км, в тысячу раз ближе, чем с Земли. Внутреннее кольцо С наиболее прозрачное. Снаружи кольца А видна тонкая полоска кольца F. Снимок NASA

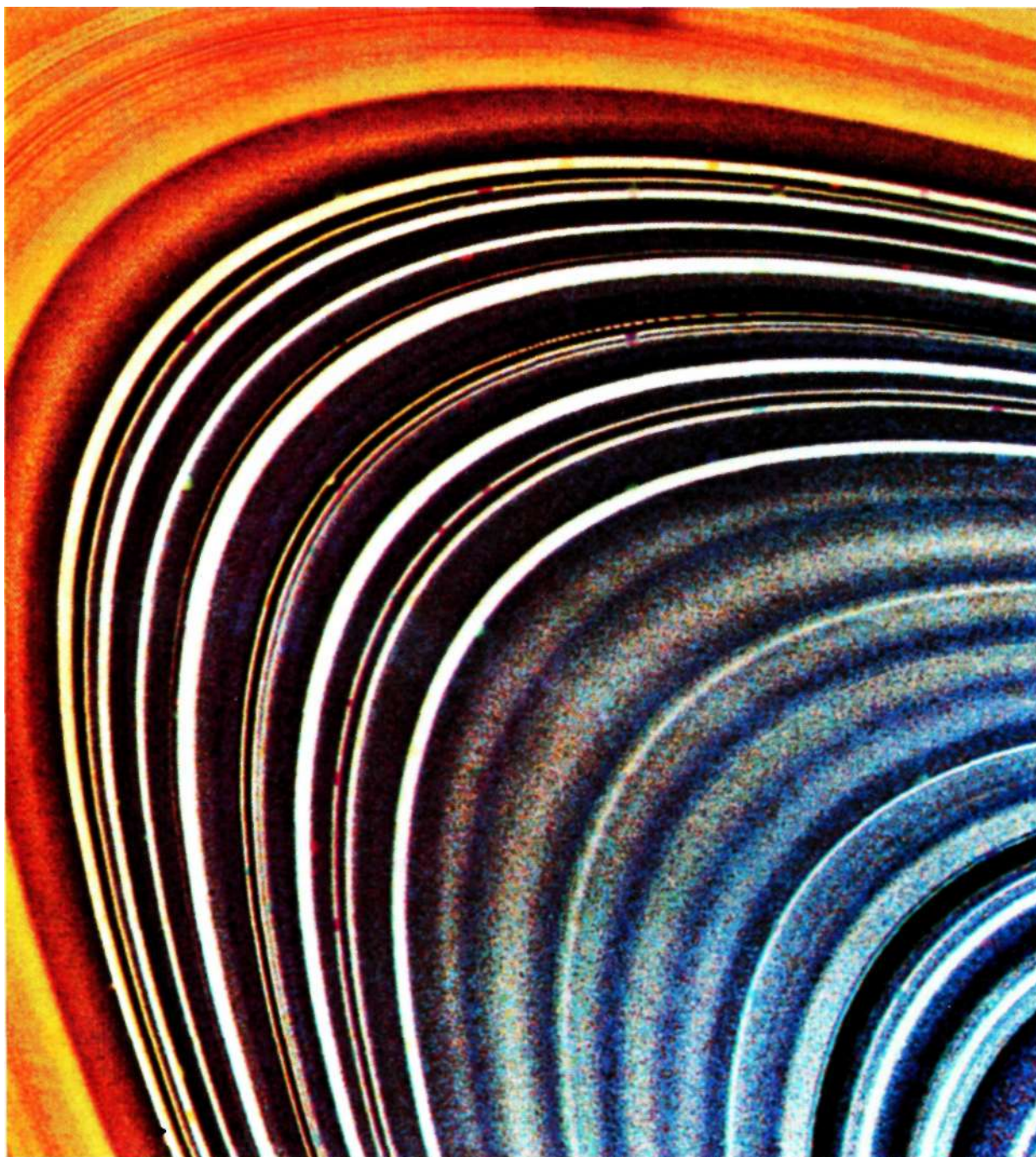


Фото 59. Подробные снимки показывают много тысяч отдельных колец. Снимок NASA

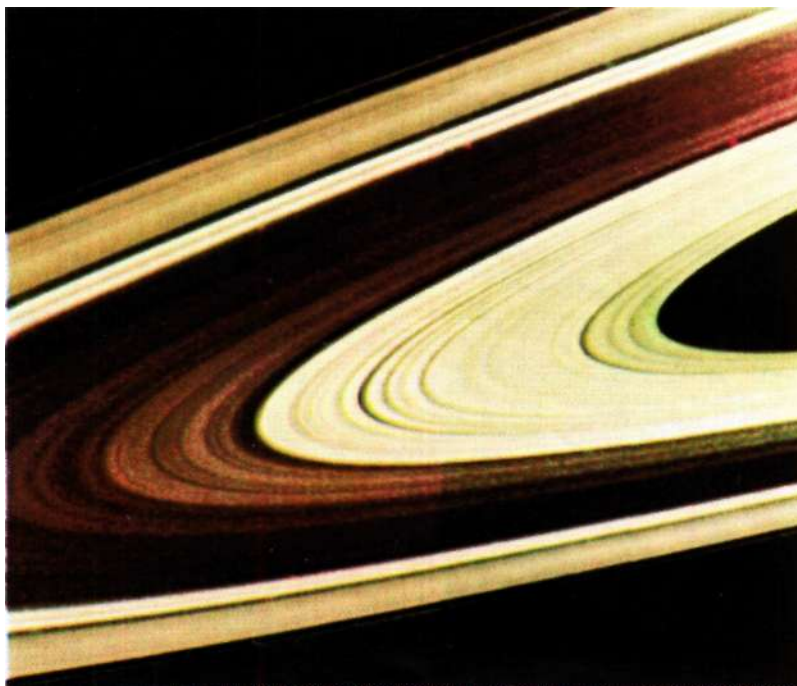


Фото 60. Фрагмент снимка колец Сатурна, наблюдаемых с теневой стороны. Наиболее светлыми оказываются части с малой оптической толщиной, где присутствует много мелких частиц. Таковы кольцо С и деление Кассини.
Снимок NASA

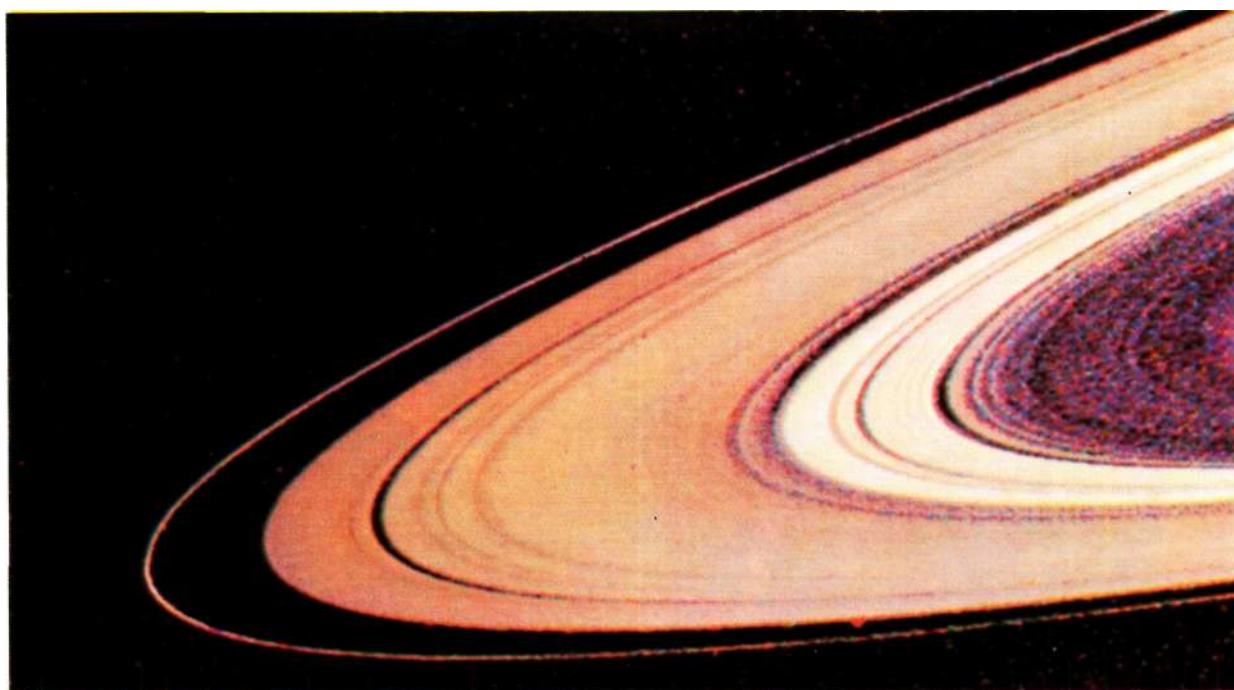


Фото 61. Кроме ярких кольца и деления Кассини, на снимке хорошо видно кольцо F — тонкая линия вдоль внешнего края кольца A. Условные цвета отражают распределение размеров частиц. Снимок NASA



Фото 62. Сатурн и часть семейства его спутников (фотомонтаж): на первом плане — Диона; справа — Тетия и Мимас, слева — Энцелад и Рея, вверху — Титан. Снимки NASA

„НЛ105 Р.“

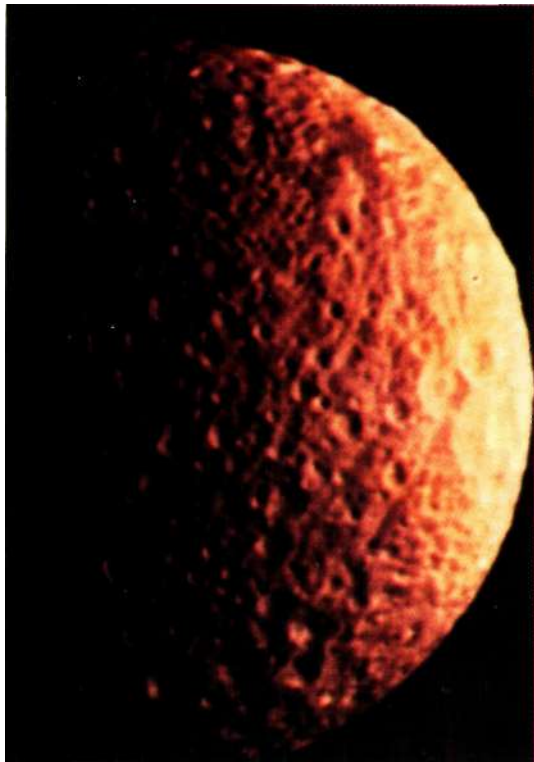


Фото 63. Вид спутника Мимас. Его диаметр в 10 раз меньше Луны. На обращенной к Сатурну стороне спутника расположен ударный кратер диаметром в 1/3 Мимаса. Снимок NASA



Фото 64. Энцелад — спутник со следами потоков на поверхности. На фрагменте показано, что от одного из кратеров (внизу) осталась лишь половина. Снимок NASA



Фото 65. Диона. Передняя по движению сторона спутника. Трещины или длинные долины вблизи полюсов свидетельствуют о тектонике в его ледяной коре. Снимок NASA



Фото 66. Аэрозольные слои в красной атмосфере Титана. Титан — пока единственный известный в Солнечной системе спутник с атмосферой. По диаметру он больше планеты Меркурий. Снимок NASA

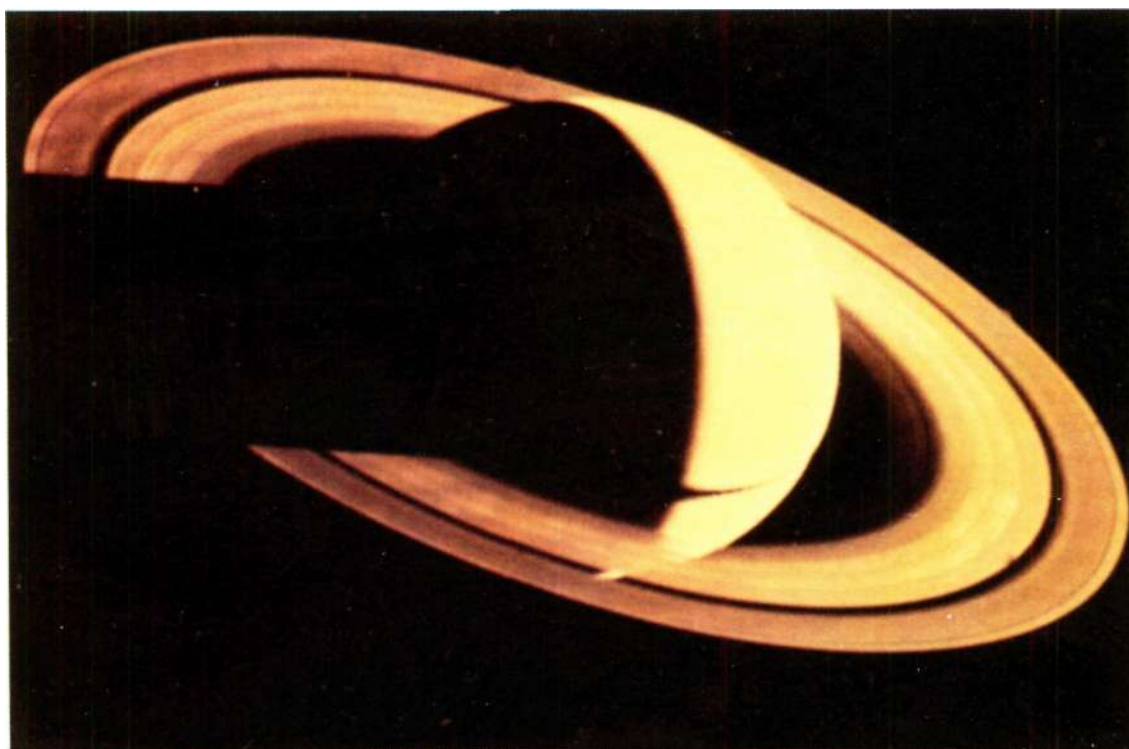


Фото 67. Вид Сатурна с удаляющегося аппарата «Вояджер-1». Снимок NASA

УРАН



Фото 68. Вид Урана с расстояния 9,1 млн км. Атмосфера Урана значительно прозрачнее атмосферы Сатурна. Снимок NASA



Фото 69 (справа). Уран с уходящего аппарата (расстояние 1 млн км). Снимок NASA

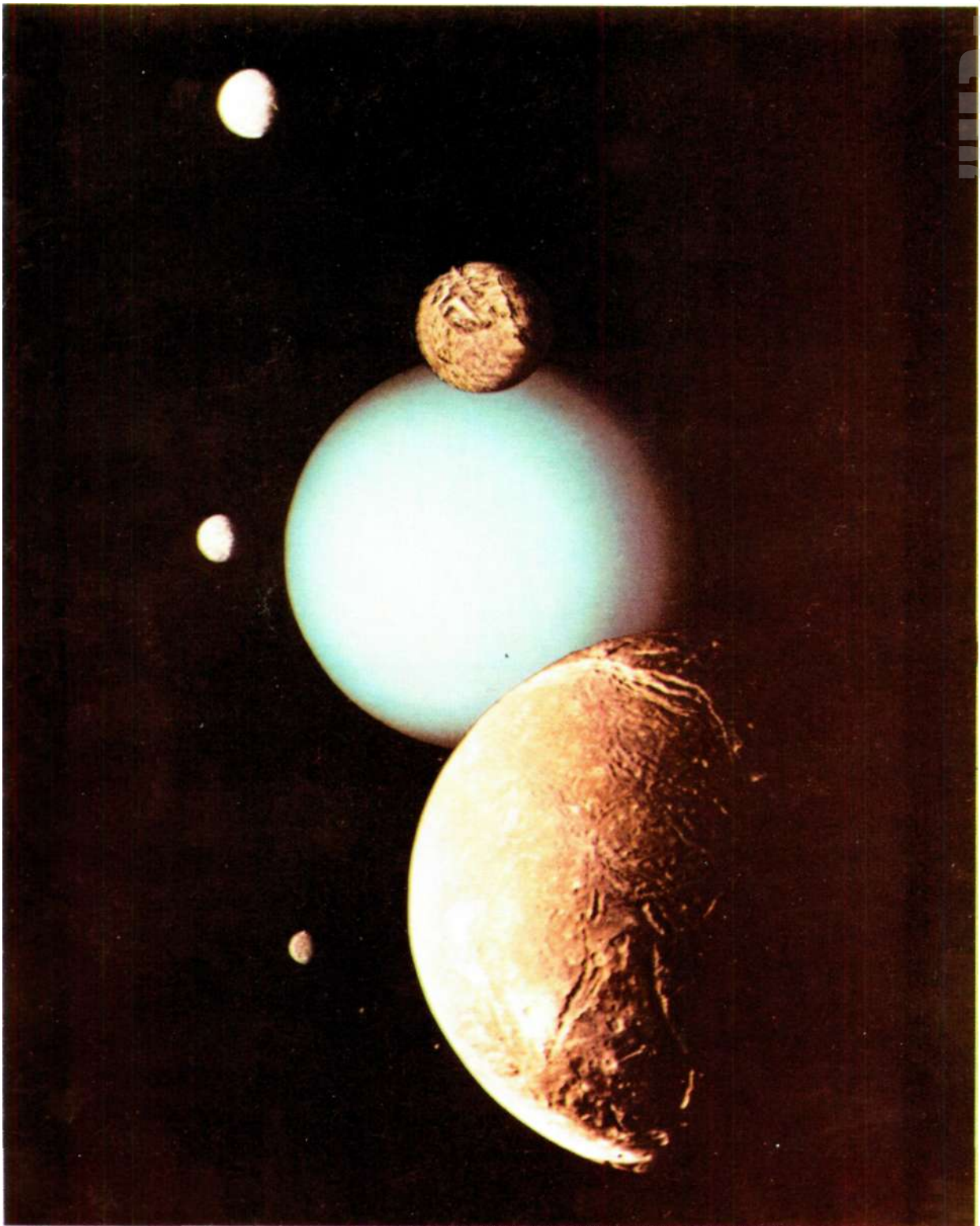


Фото 70. Семейство крупных спутников Урана: на первом плане — Ариэль, над ним — Миранда, слева (сверху вниз) — Титания, Оберон, Умбриэль. Фотомонтаж NASA

НЕПТУН

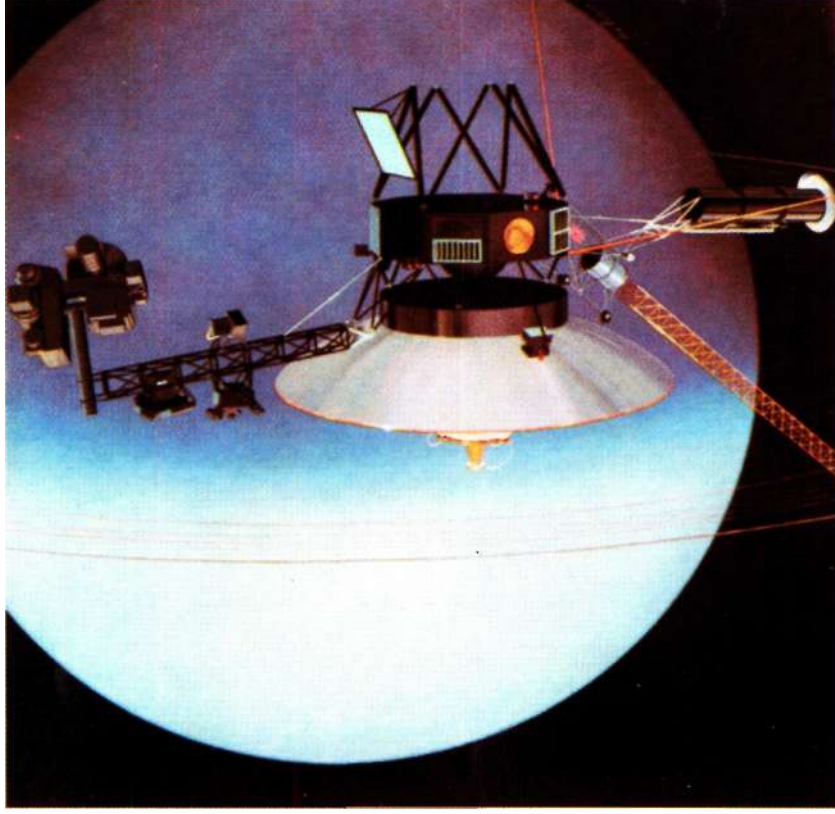


Фото 71. За время 1977—1989 гг. аппарат «Вояджер-2» облетел всю внешнюю часть Солнечной системы и передал на Землю бесценные научные данные о Юпитере, Сатурне, Уране, Нептуне и их спутниках



Фото 72. Облака, похожие на земные циррусы, на высоте около 100 км над плотным слоем облаков Нептуна (27° с.ш., вблизи терминатора). Снимок NASA

"HΛΙΟΣ P."

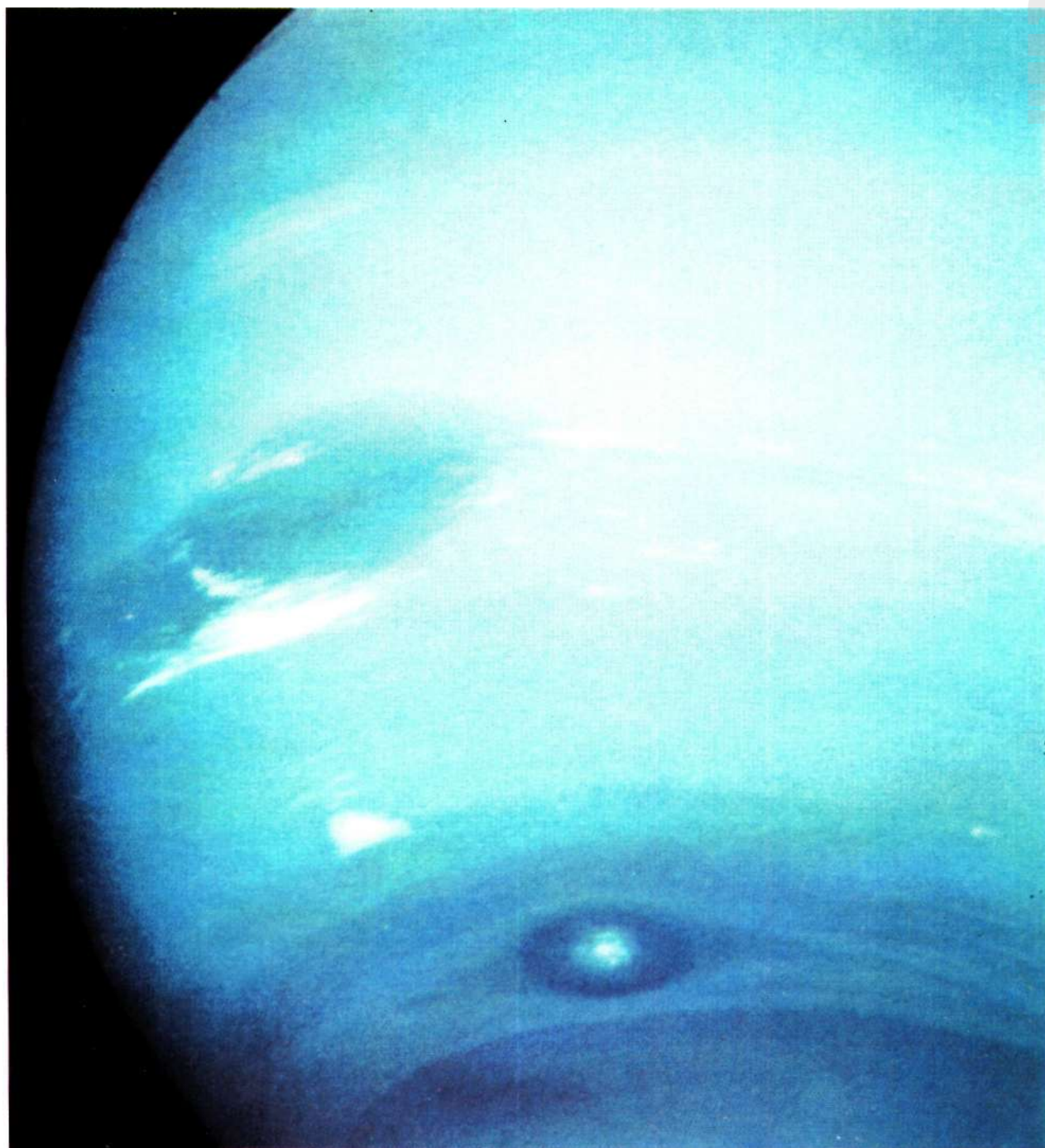


Фото 73. Вид Нептуна за два дня до сближения «Вояджера-2». Большое Темное Пятно (левее центра) имеет период обращения 18,3 ч. На снимке видны также Темное Пятно-2 (внизу) и «скуттер» между ними. Снимок NASA

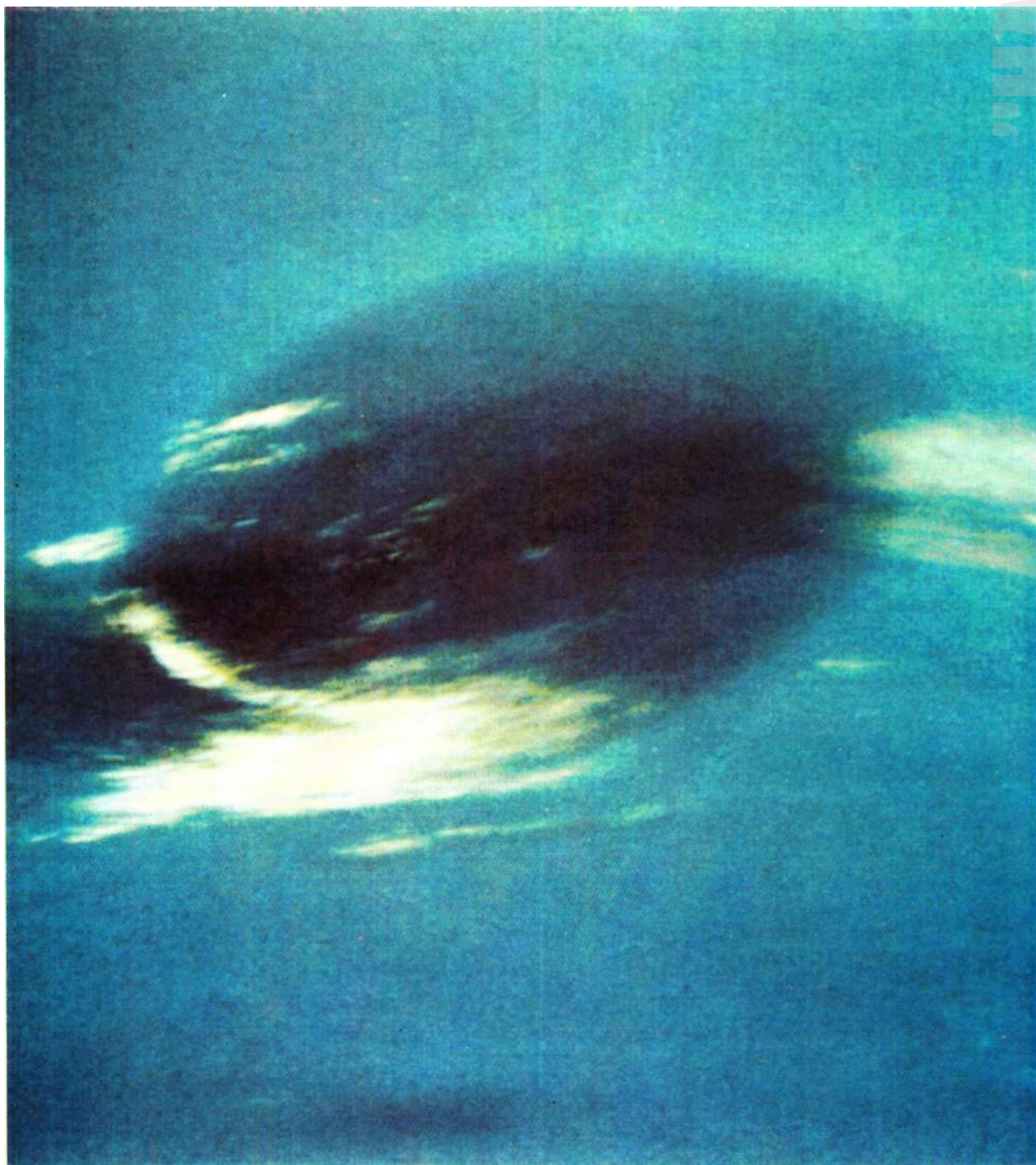


Фото 74. Большое Темное Пятно с расстояния 2,8 млн км. По размерам оно близко к земному шару. Снимок NASA

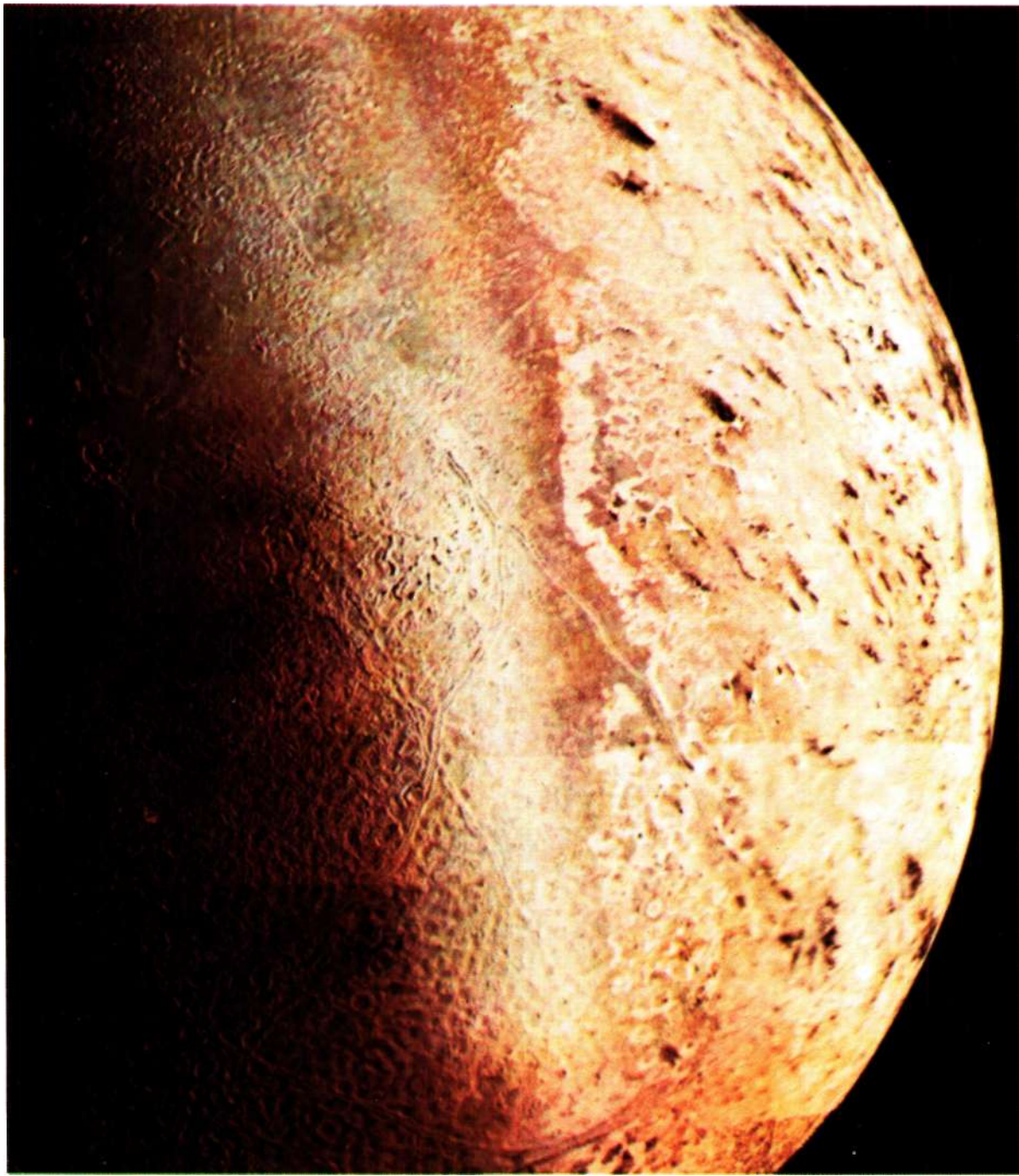


Фото 75. Мозаика поверхности Тритона (внизу — южный полюс). Снимок NASA

"HΛΙΟΣ P."

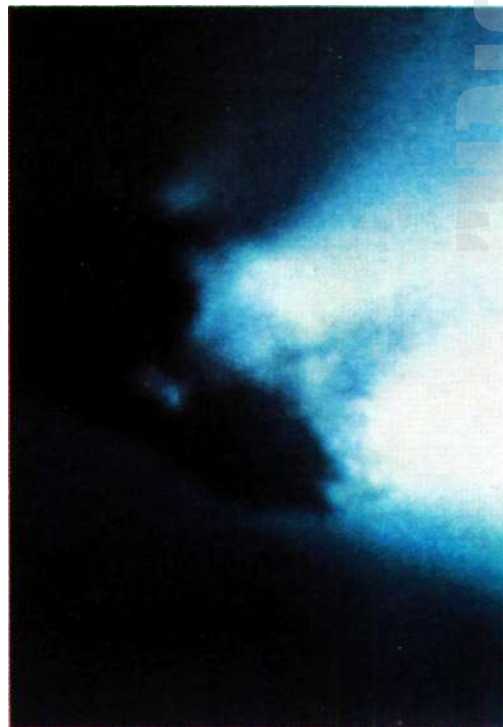
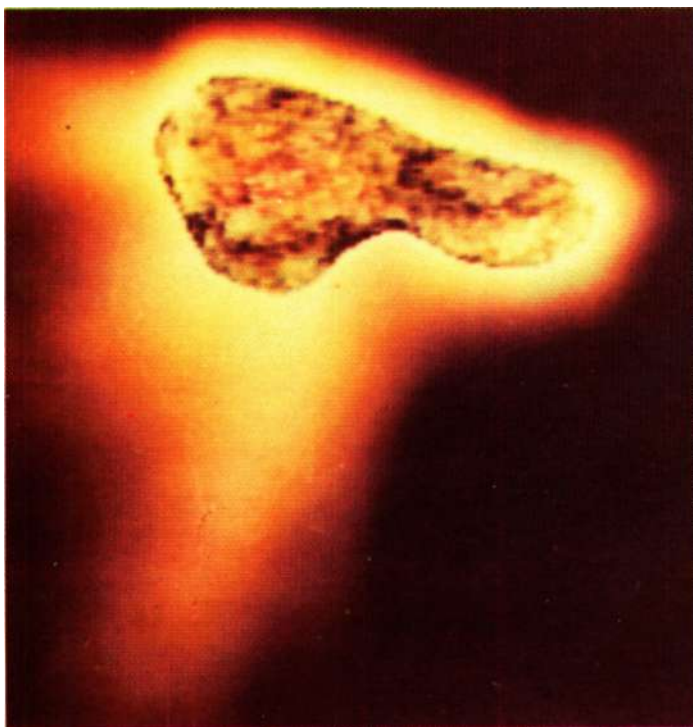


Фото 76. Слева — комбинированный снимок ядра кометы Галлея (с повышенной контрастностью), наложенного на первичное изображение выбрасываемых из ядра газовых фонтанов (снимок с аппарата «ВЕГА-2», обработка Института космических исследований РАН). Справа — другая сторона ядра кометы Галлея (аппарат «Джотто», снимок и обработка Европейского космического агентства)



Фото 77. Возможна ли жизнь при венерианских температурах? Немного воображения и перед вами — обитатель Венеры



Рис. 8.12. Плутон и его спутник Харон. Снимок сделан космическим телескопом «Хаббл» в 1994 г. Снимок NASA

обращения вокруг общего барицентра). Исходя из оценок массы системы (около 0,00247 массы Земли, $1,47 \cdot 10^{25}$ г), по значению периода удалось найти расстояние между Плутоном и Хароном. Оно оказалось неправдоподобно малым, всего 19—20 тыс. км (последняя оценка 19 400 км). Орбиты каждого из тел, как они известны сейчас, почти круговые. На рис. 8.13 система Плутон—Харон сравнивается с нашей Луной.

Плоскость орбит компонентов расположена так, что в 1985 г. начались их систематические взаимные затмения, повторявшиеся дважды за орбитальный период и длившиеся по несколько часов. Полная фаза затмений была в 1988 г., а окончание затмений в 1991 г. Затмения позволили не только уточнить размеры компонентов, но даже исследовать распределение альбедо по дискам, по крайней мере в направ-

лении их общей орбиты. Наблюдения Плутона в наше время наиболее удобны весной. Следующий период затмений повторится только через 124 года. Сейчас видимая плоскость орбиты компонентов вытянута почти точно в направлении север—юг. Уменьшение блеска при затмениях составляет поочередно 4 и 8%, из чего сделан вывод, что поверхность Харона на 30% темнее, чем у Плутона. Разумеется, никакими наземными средствами различить поверхность системы невозможно, так как диаметр Плутона не превосходит 0,1 угл. с. Поэтому только тщательная регистрация изменений блеска при взаимных затмениях позволит кое-что узнать о поверхности этих тел. Тем не менее, с телескопа «Хаббл» уже получены нечеткие еще изображения Плутона. Пока это единственная возможность.

Спектрометрические измерения уверенно указывают на присутствие метана на Плуtone. Но в течение нескольких лет продолжалась дискуссия: относятся ли наблюдающиеся метановые полосы к атмосфере или к инею на поверхности? Сторонники как той, так и другой гипотезы приводили свои доказательства. Вероятно, есть и иней метана, но существование атмосферы доказано, и она даже не очень разреженная. Вначале исследователи исходили из того, что она состоит из метана, и заключали, что атмосфера Плутона тонка, но на пределе возможностей современной аппаратуры ее удастся обнаружить. В полученном спектре отражения Плутона (рис. 8.14) имеются полосы

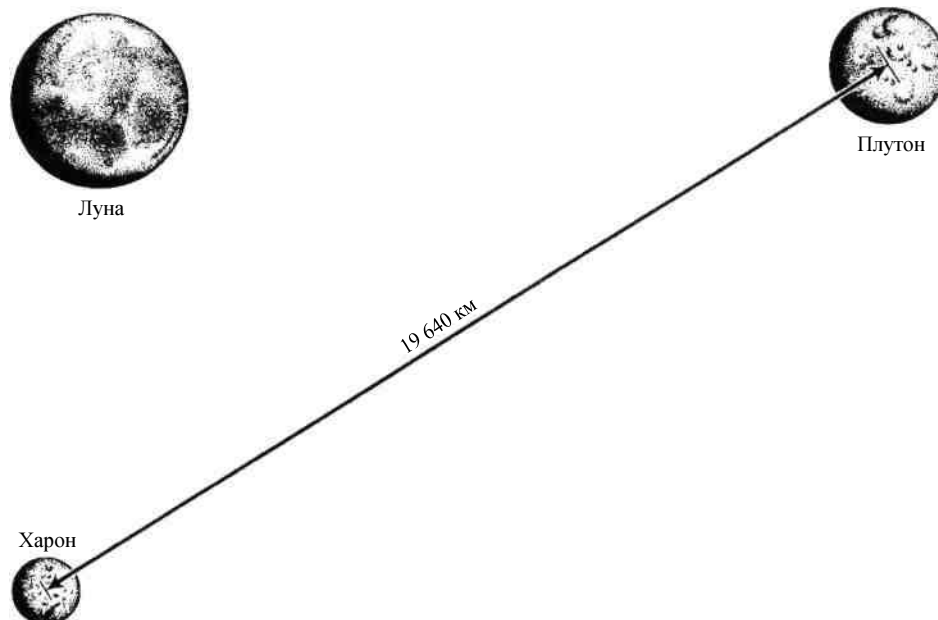


Рис. 8.13. Сравнительные размеры Луны и пары Плутон—Харон

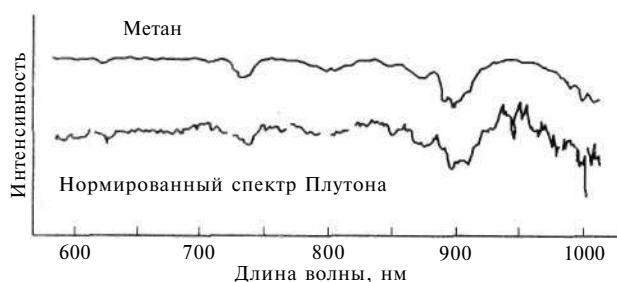


Рис. 8.14. Спектр отражения Плутона

у тех же длин волн, которые приводились выше (620, 790 и 840 нм) и которые совпадают с расчетным спектром поглощения метана. Эти полосы, вероятнее всего, относятся к газовой фазе (атмосфере). Толщина атмосферы Плутона оценивалась всего в 27 м·атм, или $7,3 \cdot 10^{22}$ молекул/см² (около 1/3 содержания углекислого газа в столбе атмосферы Марса). Но эта оценка относится только к метану. Важный результат исследований Тритона и Титана — их азотные атмосферы. В атмосфере Плутона его тоже может быть много. Вероятно присутствие и других компонентов, например инертного газа аргона. Согласно последним измерениям, атмосфера Плутона может быть более плотной, чем предполагалось, а азот (и аргон) — даже ее основной составляющей. В 1988 г. произошло покрытие звезды Плутоном. При покрытии яркость звезды убывала постепенно в течение нескольких секунд, что несомненно указывает на довольно плотную атмосферу. Имеются также наблюдения покрытия в 1985 г. в неблагоприятных атмосферных условиях, но с тем же результатом. Авторы тогда заключили, что атмосфера может состоять главным образом из аргона (с примесью неона), который при температурах Плутона не даст спектральных полос. Роль азота не оценивалась.

Что же касается метана, то его роль пересматривается. Он может быть значительной, но все же не главной составляющей, как и неон. Содержание метана должно меняться в зависимости от положения Плутона на орбите. Из-за ее огромного эксцентриситета (0,25) солнечная радиация, достигающая Плутона, изменяется на $\pm 56\%$ за 248 лет. Перигелий Плутон прошел в 1989 г. Ожидается, что значительная часть отложений метана и азота на поверхности при этом переходит в атмосферу, а изменения давления можно зарегистрировать спектроскопическими методами. С другой стороны, смена сезонов на Плуtone также должна характеризоваться накоплением

конденсатов метана и азота в полярных шапках и увеличением массы атмосферы и ее плотности в период таяния (а точнее, сублимации) полярной шапки. Такой процесс хорошо известен для Марса, где в полярных шапках откладывается конденсированный углекислый газ. Согласно расчетам, уменьшение температуры всего на 2 градуса приводит к конденсации половины всего метана из атмосферы Плутона.

Неожиданный результат был получен в расчетах структуры атмосферы Плутона. Оказалось, что из-за малого расстояния между Плутоном и Хароном у них должна быть общая атмосфера. Но это требует подтверждения.

Присутствие метана в атмосфере Плутона косвенно позволяет оценить такие параметры планеты, как массу, альbedo поверхности и ее температуру. Дело в том, что метан в атмосфере Плутона находится на грани диссипации, если существующие оценки массы компонентов (Плутона и Харона) правильны и если температурный профиль атмосферы не имеет некоторых особенностей. Молекулярный азот удерживать легче. Для сохранения метановой атмосферы требуются примерно такие параметры: масса Плутона $2,3 \cdot 10^{25}$ г (1/3 массы Луны, или в 2 раза больше принятой ныне), радиус 1400 км, средняя температура поверхности не более 52 К, максимальная 62 К. Средняя плотность получается близкой к 2 г/см³, что типично для силикатно-ледяных тел вроде Тритона, Титана или Ганимеда. Сферическое альbedo оценено значением 0,45, ускорение свободного падения у поверхности 80 см/с². Давление у поверхности для чисто метановой атмосферы было бы всего 0,1 мбар.

К несколько другим, хотя и довольно близким оценкам привели новые наблюдения Плутона и Харона на высокогорной обсерватории Мауна Кеа (Гавайи). Для разрешения (оптического разделения) планеты и спутника использовался метод спекл-интерферометрии. Согласно полученным результатам, сферическое альbedo должно быть около 0,2 — значительно меньше приведенного выше значения, а диаметр Харона может достигать 2000 км, или половины диаметра Плутона (для которого эта оценка также несколько увеличивается). Блеск Плутона и Харона в этой тесной двойной системе в средней оппозиции составляет 15,3 и 16,9 звездной величины. Общая масса около $3 \cdot 10^{-3}$ от массы Земли, что близко к значению, указанному выше. Таким образом, после многократных «уценок» массы системы

Плутон — Харон наметилась тенденция к ее повышению.

Наконец, приведем одну из самых последних оценок: расстояние между центрами компонентов: 19 640 км, диаметр Плутона 2284 км, диаметр Харона 1192 км. Полная масса системы $1,47 \cdot 10^{25}$ г, из которых на Харон приходится 8—10%.

Удачное положение орбит пары Плутон — Харон в 1988—1991 гг. позволило методами астрометрии (положение тел на небесной сфере) определить положение центра масс и оценить среднюю плотность Плутона как 1,8—2,1 г/см³ и Харона 1,2—1,3 г/см³. Сделаны интересные выводы: если состав Плутона — это каменные породы и водяной лед, то Харон — аналог ледяных спутников Сатурна. Такое различие указывает на независимое происхождение этих небесных тел. Таким образом, вопрос о происхождении Плутона и пары Плутон—Харон остается открытым.

Угол между осью вращения Плутона (или, что то же, системы Плутон—Харон) и плоскостью его орбиты близок к 98°, т.е. положением оси Плутон напоминает Уран. Это приводит к очень сильным сезонным эффектам на планете, включая полярные ночи с длительностью до 124 годов на полюсах. Кстати, ныне в северном полушарии Плутона осень.

Еще менее определенные данные касаются физики Харона. И, к сожалению, ждать экспериментальных уточнений придется еще очень долго.

Выше уже говорилось о том, что некоторые ученые сомневаются в статусе Плутона как планеты. Высказывались предположения, что своим образованием и сама двойная система Плутон—Харон тоже обязана космической катастрофе, хотя многие ученые склонны искать менее экзотические решения. Известно, что положение Плутона в Солнечной системе противоречит эмпирическому правилу Тициуса — Боде (см. гл. 9), которое предсказывает

для него большую полуось орбиты 77 а.е. (при действительном значении 39,75 а.е.). Правда, для Нептуна тоже нет хорошего соответствия (30 а.е. вместо предсказываемых 38,7 а.е.). Недавно был опубликован ряд работ, в которых положение планетных орбит предсказывается теорией резонансов. Предполагается, что формирование планет-гигантов началось с Юпитера, который далее определял положение следующей резонансной орбиты. Авторы показали, например, что положение орбиты Сатурна соответствует резонансу 2:5 относительно Юпитера, Урана — 1:3 относительно Сатурна, Нептуна и Плутона — 1:2 и 1:3 относительно Урана и, наконец, 2:3 для Плутона относительно Нептуна. Короче говоря, большие полуоси орбит Нептуна и Плутона «выбраны с расчетом».

Отметим в заключение, что система Плутона с компонентами, в 20 раз более близкими, чем Земля и Луна, очень тесная. Эта двойная планета представляет к тому же мир наиболее глубокого холода в Солнечной системе. А с открытием Харона, одного из крупнейших спутников, можно сравнить только открытие Тритона, состоявшееся в 1846 г.

В доисторические времена человек уже знал четыре или пять планет. Наука довела их число до девяти и позволила открыть несколько десятков спутников планет. Появление космических средств не только увеличило количество известных спутников в несколько раз, но позволило также выделить их в самостоятельный класс небесных тел — ледяные и силикатно-ледяные спутники. По своей природе близкими к ним оказались планета Плутон и ее спутник Харон. Несмотря на крайне низкие температуры, во многих случаях самые низкие в Солнечной системе, ледяные спутники эволюционируют по общим для Вселенной законам и в этом смысле отнюдь не являются мертвыми и навсегда застывшими телами.

Г Л А В А 9

ОБЛОМКИ ПЛАНЕТЫ, КОТОРОЙ НЕ БЫЛО.
АСТЕРОИДЫ И КОМЕТЫ

История изучения астероидов не слишком часто освещалась в нашей научно-популярной литературе. Поэтому в этой главе мы назовем несколько имен их исследователей, которые работали и жили в прошлые столетия.

Перейдя от главы о Марсе к главе о Юпитере, мы перенеслись сразу минимум на 3,5 а.е. С давних пор астрономы предполагали, что здесь что-то должно быть. Убеждала их в этом очень простенькая формула, которую (единственную в этой книге) мы предлагаем читателю. Она гласит, что расстояние a от

значения больших полуосей орбит планет в а.е. (табл. 11).

Числа в двух последних строках оказываются очень близкими. Правда, чтобы сошлось все, приходится считать Юпитер не 5-й, а 6-й планетой. Эта несообразность была воспринята современниками Боде как указание на существование еще одной неизвестной планеты — совсем «под носом» если не у Земли, так у Марса. Любопытно, что задолго до Боде и Тициуса, в 1596 г., сам великий Кеплер в книге со «скромным» названием «Введение в

Т а б л и ц а 11. Большие полуоси орбит планет

Элементы формулы Тициуса—Боде	Меркурий	Венера	Земля	Марс	?	Юпитер	Сатурн
Номер планеты	1	2	3	4	5	6	7
n	$-\infty$	0	1	2	3	4	5
Большая полуось орбиты a , а.е.	0,4	0,7	1,0	1,6	2,8	5,2	10,0
Действительное среднее расстояние, а.е.	0,39	0,72	1,00	1,52	?	5,20	9,54

Солнца до какой-либо планеты (в а.е.) составляет $a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$, где n — номер планеты в своеобразной нумерации: минус бесконечность для Меркурия, 0 для Венеры, 1 для Земли, а дальше все в естественном порядке. Предложена она была очень давно, в 1766 г., профессором физики Виттенбергского университета Тициусом (тогда на нее никто не обратил внимания). А подробно описал ее несколько позже немецкий астроном Боде (1772 г.), после чего она стала широко известна как закон Боде. Ныне ее называют правилом Тициуса — Боде. Однако формулу никто не выводил. Тициус просто взял геометрическую прогрессию: 3, 6, 12, 24, 48 и т.д. и приписал впереди 0, затем к каждому из чисел добавил 4 и все поделил на 10. Получился ряд чисел, который выглядит очень интересно, если под ним написать

трактат о мире, содержащее в себе тайну Вселенной» писал, что интервал между орбитами Марса и Юпитера чересчур велик, чтобы не быть занятым планетой.

И тем не менее найти планету между Марсом и Юпитером никому не удавалось. В 1781 г. был открыт Уран. Формула предсказывала для него расстояние 19,6 а.е. Действительное значение большой полуоси его орбиты составило 19,18 а.е. Таким образом, недоказанная формула давала правильные результаты. Отметим, что в дальнейшем успехи формулы были далеко не такими впечатляющими. Нептун и Плутон находятся на средних расстояниях 30,06 и 39,75 а.е., в то время как вычисленные значения составляют 38,8 и 77 а.е.

В гл. 8 мы уже рассказывали о новой, «резонансной» теории, которая предсказывает правильные положения планет, но... указывает на незаполненное место между Ураном и

Нептуном. Впрочем, тема этой главы — небесные тела, относящиеся к «планете № 5». Эта колонка таблицы оставалась совершенно пустой вплоть до 1 января 1801 г.

Малые планеты, или астероиды (крупные астероиды иногда называют планетоидами), остались вне нашего внимания при переходе от Марса к Юпитеру. Их не «заметил» и «Пионер-10» в 1973 г., когда проходил зону от 1,6 до 5,2 а.е., двигаясь в плоскости эклиптики. А ведь здесь находится около 50 тыс. планет с размерами от 1 км до 1 тыс. км и огромное количество менее крупных тел. Полет «Пионера-10» опроверг представление, что весь этот небесный «мусор», обращающийся вокруг Солнца со скоростями от 16 до 19 км/с, представляет серьезную угрозу для аппарата, движущегося сквозь пояс астероидов. Очень редко мимо «Пионера-10» проходили небольшие обломки, но вреда ему не причинили. Микрометеориты, которые часто встречались аппарату до самого Юпитера, почему-то отсутствовали только в небольшой зоне на расстоянии 1,16 а.е. от Солнца (в 24 млн км от орбиты Земли).

Большой объем сведений об астероидах дали новые средства наземных обсерваторий, появившиеся в распоряжении астрономов в последние десятилетия. Кроме того, можно считать доказанным, что в ряде случаев обломки астероидов сами прилетают на Землю, благодаря чему мы получаем новую и очень ценную информацию. Она вполне сравнима с тем, что дают космические аппараты. Результаты этих исследований представляют большой космогонический интерес, ибо астероиды — древнейшие тела Солнечной системы, ровесники той поры, когда не существовало еще самой Земли как планеты, а ее будущие составные части носились в пространстве, безжалостно сталкиваясь между собой.

Ученые уже сумели вывести кое-что у астероидов об этой таинственной поре, когда наиболее прочные и массивные глыбы давали начало нашей Земле. Существует много работ, которые доказывают, что развитие процесса формирования Земли приобрело лавинообразный характер: всего через 40 млн лет после его начала на поверхность будущей планеты за 1 ч выпадало до 15 млрд тонн протопланетного вещества. Рост размеров Земли шел очень быстро, в среднем каждые сутки на 0,24 мм, а еще через 60 млн лет — одно мгновение в ее истории — Земля уже имела почти нынешнюю массу. В эту пору (4,6 млрд лет назад) формировались и другие планеты. Но, вероятно, только астероиды остались в первозданном виде.

Впрочем, все по порядку.

Первое открытие XIX века

Вечером новогоднего дня 1 января 1801 г. профессор Палермского университета Пиацци случайно обнаружил в созвездии Тельца неизвестную слабую звезду. Это было открытие первого астероида, который получил имя Цереры. Было установлено, что большая полуось орбиты Цереры составляет 2,8 а.е., в полном соответствии с правилом Тициуса — Боде. Вскоре Пиацци заболел и прекратил наблюдения. Планета была потеряна. Дело спас математический гений Гаусса, который по сведениям о прежнем положении планеты сумел вычислить новое ожидаемое ее место на небосводе. И ровно через год, 1 января 1802 г., воспользовавшись этим прогнозом, Цереру снова обнаружил астроном-любитель, врач по профессии, Ольберс. Он, вероятно, знаком читателю по носящему его имя знаменитому парадоксу. В вольном изложении парадокс звучит так: если число звезд бесконечно, почему между ними мы видим темное небо? Впрочем, этот вопрос не входит в список достопримечательностей нашей темы.

Через 3 месяца Ольберс открыл по соседству с Церерой еще один астероид — Палладу. С его же участием спустя 2 года была открыта Юнона, а через 5 лет — Веста, все с большой полуосью орбиты от 2,36 до 2,77 а.е. Поскольку до открытия следующей, 5-й малой планеты прошло 38 лет, можно было спокойно поразмышлять. Еще в 1802 г. Ольберс предположил, что малые планеты — обломки некогда существовавшей на орбите, предсказанной правилом Тициуса — Боде, большой планеты, которая разрушилась по неизвестным причинам. Более того, он даже предложил искать обломки планеты там, где пересекались орбиты Цереры и Паллады. Именно так и были открыты Юнона и Веста. Однако многие серьезные ученые скептически отнеслись к этой идее. Нужно ли добавлять, что их скептицизм ничуть не уменьшил энтузиазм широких масс любителей астрономии?

Темпы открытий астероидов нарастали. К 1850 г. знали уже 13, к 1861 г. — 62, к 1900 г. — 463 астероида. На 1976 г. зарегистрировано 1832 астероида, орбиты которых известны, а на 1984 г. в списки уже было внесено 3000 астероидов с точно известными орбитами. Кроме того, около 6000 тел зарегистрировано, так сказать, «качественно»: у них меняющиеся эллиптические орбиты. Некоторые астрономы открыли очень много астероидов. Рекордсменом был астроном прошлого века Вольф: на его счету 228 открытых им малых планет! В книге «Загадки Вселенной» (М.:

Мир, 1970) У. Корлисс пишет: «Несмотря на тщательную регистрацию и вычисление орбит, планетоиды иногда «терялись». Ведь это были очень слабые объекты, которые обращались по вытянутым орбитам, и притяжение больших планет сбивало их с курса. Один из открывателей планетоидов Дж. Уотсон решил предусмотреть все случайности, которые могли бы привести к потере его персонального астероида Андромаха. Он оставил некоторые денежные средства для непрерывного слежения за Андромахой. Однако средства эти не помогли, и Андромаха была потеряна между 1877 и 1893 гг.»

В последние десятилетия XX в. открытие новых астероидов было, по существу, автоматизировано, благодаря созданию особой службы с несколько другой задачей. Ученые, пусть не все, осознали опасность возможного столкновения массивного метеоритного тела (астероида на вытянутой орбите или кометы) с Землей. Заметим, что «те, от кого зависят решения» (и финансирование работы), от этой проблемы отмахиваются. Их довод: ученые могут сколько угодно тешиться своими кратерами, но уже миллионы лет как на Землю не упало ни одно крупное тело. Зачем же попусту тратить деньги?

Энтузиасты-одиночки в разных обсерваториях все же делают, что могут, — на плохоньких телескопах (других им не дают), но с отличной электроникой, компьютерами и программами. Было создано несколько таких систем контроля окружающего пространства, и открытия новых астероидов, как говорят, пошли косяком. Правда, не все они интересуют службу метеоритной опасности, а только небесные скитальцы, представляющие опасность реальную. «Оседлое» население пояса астероидов обычно далеко за его пределы не выходит.

Все астероиды отличаются малыми размерами — за несколькими исключениями они меньше 500 км в поперечнике, а подавляющее большинство — около 100 км и менее. Исключения — Церера, Паллада, Юнона, Веста, Хигея, Интерамния, Давида и еще несколько малых планет. Астероиды принято обозначать порядковым номером открытия и названием, например 433 Эрос, а первоначально им давались имена женского рода. Лишь «выдающиеся» объекты получали мужские имена. В дальнейшем все они были пронумерованы, а каждому новому астероиду присваиваются номер и имя. Очень опытный астроном на пределе возможностей может заметить и измерить у них крошечный диск. Так были определены размеры самых больших астероидов. Для четырех

первых (из семи названных) это соответственно 767, 489, 193 и 386 км. Ныне эти размеры пересматриваются. Но для остальных астероидов, диск которых не виден, использовался фотометрический метод определения размеров. Он очень прост. В соответствии с третьим законом Кеплера из периода обращения малой планеты вокруг Солнца находится расстояние до нее. Если все астероиды имеют одинаковое происхождение, логично принять, что отражательные свойства поверхностей имеют близкие значения. Далее, если среднее значение сферического альбеда известно, то по блеску малой планеты можно определить ее размеры. Больше блеск — больше размеры. В каталогах обычно указывается блеск астероидов в абсолютных звездных величинах на условном единичном расстоянии от Солнца, что и используется для определения размеров.

Но идея о «разрушенной планете» продолжала жить.

Естественно, интересно узнать, каков был размер гипотетической первичной планеты. Да и существовала ли она вообще, эта планета?

Царица небес — небесная механика в некоторых случаях позволяет рассчитать первоначальную орбиту тела, движение которого испытало значительные, но известные возмущения. Однако для астероидов это практически невозможно: необходимо учесть огромное число факторов, которые приводят к возмущениям в движении малых планет. Хорошая иллюстрация — диаграмма распределения больших полуосей орбит. Она показывает некоторые детали, сходные со структурой кольца Сатурна. Только число частиц в последнем неизмеримо больше. Между кольцами А и В Сатурна имеется промежуток — деление Кассини. Деление Кассини было чисто наблюдательным фактом. Его объяснение пришло гораздо позже.

Для пояса астероидов существует полный аналог «деления». Его название — щели (или люки) Кирквуда. В отличие от Кассини, Кирквуд, который в 1866 г. установил существование щелей в распределении количества астероидов в зависимости от величины большой полуоси орбиты, сумел догадаться о причине возникновения щелей. Они отчетливо видны на кривой распределения периодов обращения вокруг Солнца наиболее крупных астероидов. На рис. 9.1 можно видеть, что средние расстояния от Солнца, а следовательно, и периоды астероидов распределены в пределах от 1,8 до 5,2 а.е. очень неравномерно.

Догадка Кирквуда состояла в том, что он сопоставил периоды обращения для тех интервалов, которых астероиды избегают, с периодом обращения Юпитера. Ответ не оставлял сом-

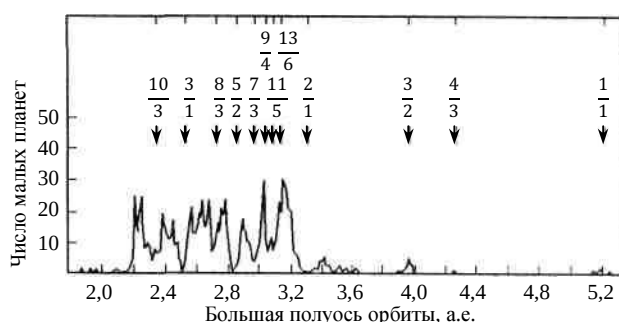


Рис. 9.1. Распределение малых планет в зависимости от среднего расстояния от Солнца. Периоды обращения астероидов группируются в виде пиков, разделенных промежутками («щелями»). Положение щелей определяется отношением периодов Юпитера и астероида. По горизонтали — большая полуось орбиты, по вертикали — соответствующее число зарегистрированных астероидов

нений: астероиды избегают тех периодов, которые находятся в определенных соотношениях с периодом обращения Юпитера вокруг Солнца (например, $3/1$, $5/2$, $7/3$, $2/1$). Интересно отметить, что наблюдается и обратное явление: вблизи 4 а.е., точнее, на расстояниях, соответствующих $2/3$ периода Юпитера, имеется группа астероидов, а ближе и дальше — обширные пустые зоны. Эти кратные соотношения называются вековыми резонансами.

Периодическое воздействие Юпитера вызывает уход астероидов из щелей. (В случае деления Кассини в роли Солнца выступает Сатурн, а в роли Юпитера — спутник Мимас.) Щели Кирквуда подтверждают, что от первоначального вида орбит астероидов мало что осталось. Тем не менее было показано, что даже в этом случае существует величина, которая остается постоянной для каждой отдельной малой планеты, несмотря на возмущения, вызываемые Юпитером и другими планетами. Интеграл Якоби (так называется эта величина) вычисляется по кинетической энергии тела и некоторой функции его координат, также имеющей размерность энергии. (Существуют и другие инварианты.)

В 1923 г. директор Токийской обсерватории Хираяма приступил к таким вычислениям и выполнил их для 993 астероидов. После завершения весьма трудоемких расчетов он пришел к выводу, что астероиды образовались в результате распада не одного, а пяти больших тел. Каждое из них положило начало своему «семейству». Так, семейство астероида Флора насчитывает 57 малых планет. Дальнейшая работа как самого Хираямы, так и других ученых, показала, что число семейств в действительности намного больше и достигает

по разным оценкам 12 или даже 30. Астрономы убедились, что гипотетическая планета, для которой уже было припасено имя — Фазтон, никогда не существовала, хотя за свою историю малые планеты, вероятно, разрушались. Возможно, эти «заготовки» и могли бы стать Фазтоном, если бы им не помешало соединиться притяжение Юпитера, который «взбалтывал» весь пояс астероидов на каждом обороте. Но есть и другие мнения. Некоторые ученые утверждают, что близкие параметры орбит или инвариантов, вроде интеграла Якоби, могут быть никак не связанными с общностью происхождения астероидов данной группы. Это просто устойчивые орбиты, на которые в силу случайных причин собрались самые различные небесные бродяги.

Орбиты отдельных семейств сильно различаются между собой. Примерно половина известных малых планет движется по орбитам, мало наклонным к эклиптике (до 8°). Другая половина имеет орбиты, наклоненные к эклиптике до 25° , а некоторые до 50° . Для 97% астероидов большие полуоси лежат в пределах от 2,17 до 3,64 а.е. Эксцентриситеты орбит довольно велики и для большинства малых планет составляют 0,10—0,17, а в отдельных случаях достигают 0,8. Благодаря этому многие астероиды заходят внутрь орбиты Марса, а некоторые даже внутрь орбиты Земли (например, группа Аполлона). А вот астероид Икар в перигелии оказывается в 2 раза ближе к Солнцу, чем Меркурий, за что и получил свое имя.

С другой стороны, многие астероиды выходят далеко за пределы пояса. Малая планета Гидальго в афелии почти достигает орбиты Сатурна, а ее среднее расстояние 5,8 а.е. — больше, чем у Юпитера. В перигелии Гидальго оказывается внутри орбиты Марса.

Периоды обращения большинства малых планет вокруг Солнца лежат в пределах от 3,2 до 7 лет, хотя и здесь есть интересные исключения. Период обращения малой планеты Эрос составляет всего 644 сут. Его среднее расстояние от Солнца 1,46 а.е. — меньше, чем у Марса. А Гидальго завершает свой оборот вокруг Солнца за 14 лет. Некоторые семейства образуют отдельные тесные «пояски». Таковы группа Гильды, обращающаяся на среднем расстоянии 3,97 а.е., и группа Флоры (2,2 а.е.).

В 1772 г. Лагранж показал, что одно из решений знаменитой задачи трех тел, взаимно притягивающих друг друга, ведет к их устойчивому движению в вершинах равностороннего треугольника («либрационные точки»). Он отнесся к такой возможности как к математиче-

скому курьезу. Но в 1906 г. была открыта малая планета, которая именно так и движется: она находится в одной из вершин, а в других вершинах — Солнце и Юпитер. Позже выяснилось, что в этих точках много малых планет. Они получили название троянцев. Одна из групп движется на 60° впереди, а другая на 60° позади Юпитера (иногда первую группу называют греками, а вторую троянцами). Ныне есть сведения о том, что в последней группе находится около 700(!) довольно крупных астероидов. Пока не обнаружены подобные группы на орбитах других планет. Вероятно, они должны существовать и у Сатурна, но их блеск там будет раз в 15 слабее, поэтому обнаружить их трудно. Зато нечто похожее было найдено на орбите нашей Луны. В либрационных точках системы Земля — Луна движется ... облака пыли.

Ревизия размеров астероидов

Недавно удалось существенно уточнить размеры многих астероидов. Для этого было предложено несколько способов. Один из них основан на эмпирической зависимости между альбедо поверхности и изменениями степени поляризации отражаемого ею света в зависимости от угла фазы. Чем темнее поверхность, тем круче поднимается вверх кривая поляризации после так называемой точки инверсии. Для подавляющего большинства астероидов наибольший угол фазы меньше 30° , а для очень многих — меньше 20° , поэтому можно исследовать только начальный участок кривой (так называемую отрицательную ветвь). Но и этого достаточно. Способ основан на законе взаимодействия света с поверхностью тела, открытом в конце XIX в. русским физиком Умовым. Результаты поляриметрии заставили усомниться в прежних измерениях. Размеры Цереры выросли до 1050, Паллады — до 560, Юноны — до 225 и Весты — до 515 км.

Столь же значительная ревизия размеров была проведена на основании другого, более строгого приема. Приемники инфракрасного излучения, установленные в фокальной плоскости телескопа, позволили измерить температуру таких холодных небесных тел, как спутники Нептуна. Но особенно плодотворной радиометрия оказалась при определении размеров астероидов. Метод основан на сопоставлении количества света, отраженного телом, с тепловым излучением тела. Как мы уже видели, при фотометрических измерениях доля солнечного излучения, отраженная планетой, пропорциональна сферическому альбедо A_v .

Поглощенная же часть составит $1 - A_v$. При условии теплового равновесия эта энергия будет переизлучена планетой в тепловом (инфракрасном) диапазоне. Типичное значение A_v — около 10%, а для Луны, также не имеющей атмосферы, 7%. Отсюда следует, что полное тепловое излучение малой планеты в 5—15 раз больше отраженного. Правда, тепловое излучение, в отличие от отраженного, изотропно, поэтому при измерениях такой большой разницы не получается. Если оценка сферического альбедо сделана неверно, одна из этих частей будет завышена, а другая занижена и баланс не сойдется. Способ измерения размеров как раз и заключается в нахождении баланса для отраженного солнечного и теплового потоков излучения.

Измерения, проведенные для довольно большого числа малых планет, показали, что принятый фотометрический метод оценки размеров астероида необоснован. Если геометрическое альбедо астероида Бамберга составляет всего 3% (астероид буквально чернее сажи), то Веста имеет A_v , достигающее 28%, что превосходит отражательные свойства поверхности Марса. Размеры тех же астероидов, измеренных этим способом, получились такими: Церера — 1000 км, Паллада — 530, Юнона — 240, Веста — 530. Все это довольно близко к значениям, полученным поляриметрическим методом.

Определение размеров ряда других астероидов показало, что Юноне придется потесниться: Хигея, Давида и Интерамния оказались больше, около 300 км. Очень выросли также оценки размеров астероида Бамберга. Таким методом исследовано много малых планет.

Еще точнее метод спекл-интерферометрии. Последние определения показывают, что астероид Веста имеет размеры $580 \times 530 \times 470$ км, Юнона — 293×252 км, Геркулина — $263 \times 218 \times 215$ км. В последнем случае даже удалось различить на ней большое (115 км) светлое пятно.

Астероид 433 Эрос, который заходит внутрь орбиты Земли, был сфотографирован с расстояния около 40 млн км. Его размеры, по предварительной оценке, $41 \times 15 \times 14$ км.

Давно известно, что астероиды вращаются вокруг собственных осей. Для подавляющего большинства ось вращения не слишком отклонена от нормали к плоскости эклиптики. Точные измерения, конечно, затруднены. Период вращения определяется по кривой изменения блеска — это связано с «пятнистой» поверхностью астероидов, вид которых не очень отлича-

ется от того, что представляют собой спутники Марса. Средние периоды вращения составляют 8—9 ч, а отклонения от этого значения у разных астероидов достигают 50% и больше.

Близость начальных периодов вращения астероидов и больших планет называется изохронизмом. Принцип изохронизма был предложен Х.Альфвеном. Предполагалось, что если тело не заторможено приливным трением (как Меркурий, Венера, отчасти Земля и синхронно вращающиеся спутники), оно сохраняет начальный период вращения. Но даже для астероидов это оказалось не совсем верно. Для наиболее распространенного типа С астероиды с размерами меньше 250 км вращаются тем быстрее, чем больше их размеры. Например, для тела диаметром 60 км период составляет 0,48 сут, для 230 км — 0,27 сут. Есть астероиды с очень медленным вращением. Таковы Эльза с периодом 3,33 сут, Флорис — 6,9 сут. Впрочем, найдены два астероида с еще большим периодом вращения: 288 Глауке и 1220 Клокус, 48 и 31 сут соответственно. Это явный вызов упоминавшемуся уже принципу изохронизма, так как соударение, которое могло бы затормозить вращение астероида, должно было бы быть нацелено так точно, что его вероятность ничтожно мала. А тут сразу три, включая 253 Матильду, о которой речь пойдет ниже. Таким вращением могли бы обладать ядра «вымерших» комет.

Форма и масса астероидов. Бывают ли у них спутники?

Некоторые астероиды имеют резко неправильные формы. Это естественно, если считать их обломками крупных тел. Более удивительно, что многие из них, даже незначительные по размерам, — сравнительно правильные сферические тела. По-видимому, им посчастливилось избежать разрушительных соударений.

У астероидов неправильной формы свои загадки, одна из которых возникла после уточнения размеров. Большой астероид Гектор из группы троянцев при вращении изменяет свой блеск в несколько раз с периодом 7 ч. Была предложена модель его формы в виде цилиндра длиной около 110 км с отношением длины к диаметру 5,5. Но непонятно, как он уцелел до сих пор: невысокая прочность материалов, из которых, как полагают, состоит Гектор, не может противостоять центробежным силам, возникающим при его вращении. Однако радиометрические измерения показали, что дело обстоит еще более странно: действительные размеры Гектора в 3 раза превышают

приведенную выше оценку. При ничтожном ускорении свободного падения (в 2 тыс. раз меньше, чем на поверхности Земли) силы тяжести на расстоянии более 0,8 радиуса Гектора становятся меньше его центробежных ускорений. Не «сделан» ли Гектор из нержавеющей стали?

Подобные парадоксы привели к предположению о том, что некоторые астероиды имеют спутники или просто представляют собой двойные планеты. Гектор, согласно этой гипотезе, состоит из двух почти касающихся друг друга довольно крупных тел. На подозрении были также Геркулина, Метис, Паллада и другие. Но во всех случаях, которые удалось проверить, гипотеза не подтверждается. О форме Геркулины мы уже говорили; по-видимому, исследователей ввело в заблуждение большое светлое пятно с альбедо на 75% выше остальной поверхности. Палладу удалось исследовать методами радиолокации — это тоже одиночное тело. Что же касается Гектора, его низкое альбедо и удаленность — большая полуось орбиты около 3,7 а.е. — затрудняют исследования.

Если бы эта книга вышла в конце 80-х годов, этими сведениями, да еще напоминанием, что типичный астероид — это Фобос, пришлось бы ограничиться. Но Парад Планет и Спутников, которым стали достижения астрономии в последние 30 лет XX в., продолжается. В пути новые исследовательские аппараты, у ученых новая техника.

В декабре 1992 г. на расстоянии 2,5 млн км от Земли прошел астероид 4179 Тутатис. Методами наземной радиолокации, о которых рассказывалось в гл. 3, удалось исследовать форму этого «бродяги», который пересекает орбиту Земли и у которого подозревалось наличие спутника. Форма Тутатиса оказалась резко неправильной, как бы образованной двумя крупными глыбами размерами в 2 и 3 км. Похоже, что они либо соприкасаются, либо разделены совсем небольшим промежутком. Авторы открытия назвали Тутатис «контактно-двойным» астероидом и предположили, что такие тела среди малых планет могут быть нередкими.

Всего за год до этого, в октябре 1991 г., «Галилей» сблизился с астероидом Гаспра, первым на своем пути (см. рис. 5.1). Астероид был открыт в начале XX в. русским астрономом Неуйминым и получил название в честь поселка в Крыму, вблизи Симеизской обсерватории в районе Ялты. Снимок Гаспры, сделанный с расстояния 1600 км, показан на рис. 9.2. В общем, это то, что и ожидалось, — небольшое тело неправильной формы, размерами



Рис. 9.2. Астероид 951 Гаспра стал первой малой планетой, с которой сблизился космический аппарат «Галилей» (1991 г.). Гаспра представляет собой большое небесное тело неправильной формы. Его размеры $19 \times 12 \times 11$ км примерно те же, что у Фобоса. Снимок NASA

$19 \times 12 \times 11$ км, что почти совпадает с размерами Фобоса (гл. 4). Разрешение на снимке 160 м. Единственной неожиданностью оказался «молодой» возраст поверхности Гаспры, не более 200 млн лет. Ученые пришли к выводу, что в современном виде Гаспра существует не более 500 млн лет и что это обломок более крупного, примерно в 100 км, древнего небесного тела. Вся поверхность астероида испещрена кратерами, причем 600 из них, с диаметром больше 96 м, приходится на сравнительно небольшой исследованный участок в 90 км^2 (полная поверхность около 800 км^2). Имеются широкие, до 90 м, трещины и разломы, которые мы уже видели на Фобосе. Поверхность носит следы многих катастрофических событий. По характеристикам поверхности, Гаспра отнесена к астероидам S-типа (к этому типу относятся примерно 15% всех астероидов. Это тела слегка красноватого оттенка; в состав их поверхности входят оливин, пироксен и железо). Астероид вращается с периодом 7 ч 4 мин, что близко к длительности, предписываемой принципом изохронизма.

Спустя почти 2 года «Галилей» снова прошел сквозь пояс малых планет и 28 августа 1993 г. сблизился с более крупным астероидом Ида (рис. 9.3). Ида тоже относится к телам класса S. Она вдвое больше Гаспры, $56 \times 24 \times 21$ км. Ее поверхность насыщена ударными кратерами, что указывает на большой возраст, значительно больший, чем у Гаспры. В правой части снимка виден большой метеоритный кратер диаметром около 10 км. Неровная поверхность с многочисленными провалами также указывает на сложную историю Иды. В левой части снимка, из под более мелких образований, проглядывает вал боль-

шого разрушенного кратера, а слева от него — мелкие образования со светлыми окантовками, уже знакомые по снимкам Деймоса.

Еще один вид Иды показан на рис. 9.4. Когда-то А.Экзюпери писал о маленьком принце, который жил на астероиде и у которого был личный маленький вулкан. Вулканов на Иде нет, зато на рис. 9.4 можно увидеть другой поразительный объект: справа от астероида — маленькая луна! Вопреки кажущейся удаленности, спутник был ближе к «Галилею», чем сам астероид, просто он очень мал. Расстояние, на которое удалена «луна» Иды, оценивается в 100 ± 50 км. Спутник совсем маленький, всего 1,5 км, но он также весь усеян кратерами (вставка на рис. 9.4). От Международного Астрономического Союза спутник уже получил имя: Дактиль.

Таким образом, спутники астероидов и двойные астероиды — это уже не гипотеза, а твердый факт.

На очереди еще несколько малых планет. Исследования астероида 433 Эрос — главная цель нового аппарата «Ниар» (Near), запущенного в США в 1996 г. Наибольший размер Эроса оценивается пока в 32 км. В процессе постепенного сближения с астероидом, на что будет потрачено около года, начиная с конца 1998 г., «Ниар» сначала проведет съемку Эроса с разрешением до 3 м, а в начале 2000 г. должен совершить на него посадку. На пути к нему летом 1997 г. «Ниар» сблизился с большим астероидом 253 Матильда и передал его изображение. Если 243 Ида, 951 Гаспра и 433 Эрос относятся к типу S, наиболее распространенному во внутренней части пояса астероидов, то в отличие от них, 253 Матильда — астероид типа C (основной тип во внешней части пояса). Это тело с очень темной поверхностью, альбедо Матильды всего 4%. Ее орбитальный период равен 4,31 года. Размеры Матильды составляют $50 \times 50 \times 70$ км. Как оказалось, она обладает чрезвычайно медленным вращением, с периодом 418 ч (17,4 сут), что заметно больше приводившихся выше основных значений. Всю «коллекцию» из трех астероидов можно видеть на рис. 9.5.

Масса астероидов в эксперименте на «Галилее» не оценивалась. Но можно предсказать, что средняя плотность этих тел близка к $1,9\text{--}2,1 \text{ г/см}^3$, а массы Гаспры, Иды и Дактиля, как нетрудно сосчитать, должны быть близки к $3,8 \cdot 10^{18}$, $4,7 \cdot 10^{19}$ и $3 \cdot 10^{15}$ г. Это и много, и немного: чтобы составить нашу Луну, понадобилось бы 20 млн тел с массой Иды.

Но массы астероидов, конечно, очень различны. Масса Цереры, самого большого

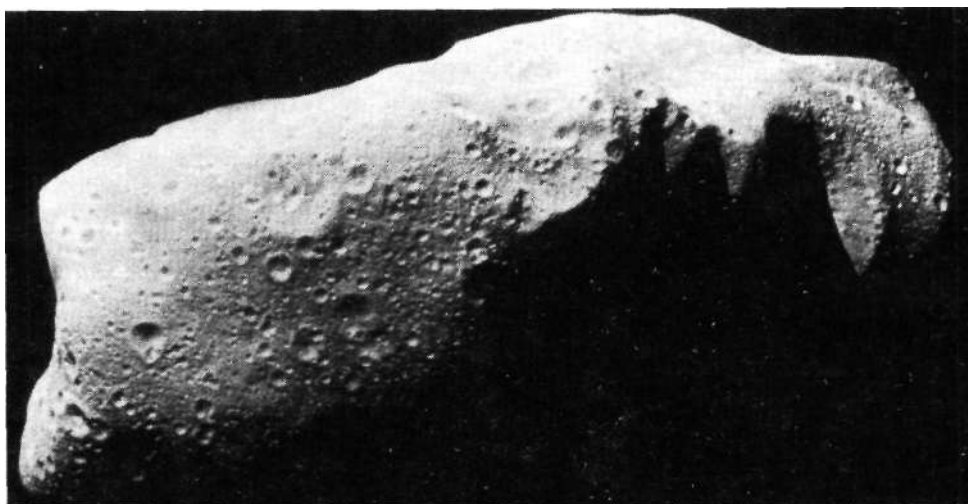


Рис. 9.3. Астероид 243 Ида — вторая цель «Галилея» в поясе астероидов, достигнутая в августе 1993 г. Размеры 56×24×21 км, астероид S-типа. Снимок NASA

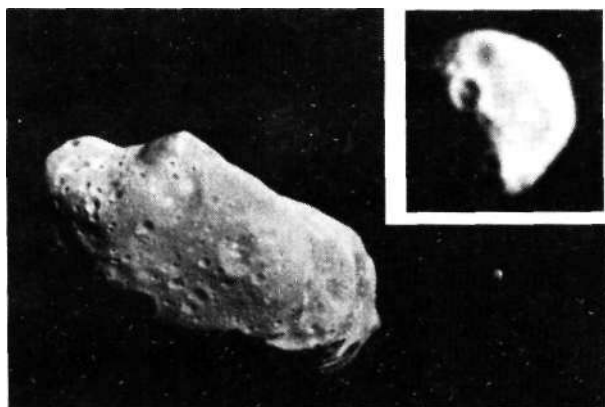


Рис. 9.4. Миниатюрная луна у астероида Ида. На врезке — спутник Иды Дактиль крупным планом. Снимок NASA

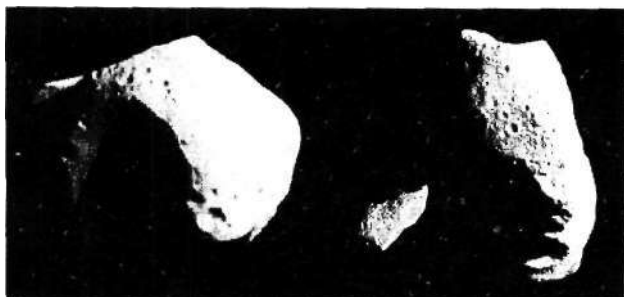


Рис. 9.5. Маленькая галерея: Слева направо — астероиды 253 Матильда, 951 Гаспра и 243 Ида (в одинаковом масштабе). Снимок NASA

астероида, $1,3 \cdot 10^{24}$ г. Это в 4,6 тыс. раз меньше массы Земли и в 57 раз — Луны. Гермес с размерами около 1 км имеет массу всего

10^{15} г. Тело, сходное по размерам с метеоритом, который образовал когда-то кратер «Каньон Дьявола» в Аризоне (США), должно иметь размер около 100 м и массу около 10^{12} г.

Ныне принято считать астероидами все тела пояса малых планет, размеры которых не менее 1 км. Тела меньших размеров получили название «метеороиды». Общее же число астероидов от 30 до 70 тыс. Суммарный их объем должен составить шар диаметром около 1450 км. Масса такого шара будет немного больше 0,001 массы Земли. Есть и другие оценки. По одной из них и шар больше, и масса до 0,1 земной. О такой большой массе свидетельствуют некоторые небесно-механические данные. Однако специалисты больше склоняются к первой оценке — 0,001.

Средняя плотность астероидов тоже различна: от 2 г/см³ для рыхлых, непрочных тел, до 7—8 г/см³ у железоникелевых астероидов. Есть также астероиды промежуточного состава. Таков, по некоторым данным, Икар, который представляет негладкое, почти сферическое железокамennое тело.

С составом астероидов связаны спектральные различия их отражательных свойств. Большая разница в альbedo малых планет заинтересовала ученых, изучающих спектральные характеристики их поверхности. Кстати, первые такие исследования были начаты 80 лет назад, но затем лет 40 не возобновлялись. И если для большинства астероидов спектральные кривые оказались маловыразительными или даже совсем плоскими, как у Паллады, то

Веста преподнесла сюрприз. Спектрофотометрия позволила сделать вывод о том, что поверхность Весты сложена из известного на Земле метеоритного материала — относительно редких базальтоидных ахондритов. Это удивительно, так как базальтоидные ахондриты образуются при очень высоких давлениях и температурах, именно при таких, какие наблюдаются в недрах довольно больших планет. Вроде Земли. Или Фаэтона?! Конечно, это противоречит утверждению, что астероиды всегда были сравнительно небольшими небесными телами, уж во всяком случае, с тех пор, как они входят в Солнечную систему, но как это часто бывает в науке, когда «уже почти все известно», появляется факт, который нарушает стройную картину. В 1997 г. таким фактом стало сообщение о небольшом собственном магнитном поле Гаспры. Но она настолько мала, что ее магнитное поле может быть только «осколком» поля гораздо более массивного тела.

Минералогия считает, что по меньшей мере некоторые из астероидов представляют собой обломки массивных небесных тел. Однако многие малые планеты имеют иной, не ахондритовый состав. Плотность Цереры близка к $2,2 \text{ г/см}^3$, что типично для углистых хондритов, которые встречаются в выпадающих на Землю метеоритах. Вообще, есть много доказательств того, что состав большинства метеоритов совпадает с составом астероидов.

Метеоритные кратеры и метеорит в почтовом ящике

С падением огромных метеоритов ученые связывают такие образования как «Каньон Дьявола» в Аризоне, Тунгусское явление 1908 г., вымирание динозавров и 80% видов других животных, населявших Землю 65 млн лет назад, и много других интересных явлений в истории нашей планеты. Несколько лет назад появилась модная гипотеза о периодичности в 29—30 млн лет, с которой на Землю обрушиваются с неба огромные тела.

Мы уже говорили о службе метеоритной опасности. Ее наблюдениями было установлено, что раз в 1—2 месяца в опасной близости от орбиты Земли проходят довольно крупные, в десятки метров, тела, которые потенциально способны принести людям и Земле массу неприятностей. В начале 1993 г. в какой-нибудь сотне тысяч км от Земли, втрое ближе Луны, прошло одно из таких тел. Несовпадение положения Земли и пересекающего ее орбиту небесного обломка составило всего несколько часов. Таких «бродяг» немного, но они

существуют. Могут возникнуть случаи, когда периодические возмущения от большой планеты (Юпитера) постепенно «раскачают» и уведут с орбиты достаточно массивное тело, и если оно окажется на пути Земли... Впрочем, обратимся к отрывку из повести А.Кларка «Космическая вахта». Кларк предсказывает, как реально может выглядеть метеоритная опасность.

«...Рано или поздно, это должно было случиться. 30 июня 1908 г. лишь 3 часа и четыре тысячи километров — ничтожное отклонение по стандартам Вселенной — спасли Москву от полного разрушения. 12 февраля 1947 г. другой русский город оказался еще ближе к месту катастрофы, когда второй огромный метеорит XX столетия взорвался менее чем в 400 км от Владивостока с силой, соперничающей с взрывом только что изобретенной урановой атомной бомбы.

В те дни не существовало ничего, чем человек мог бы защитить себя от последствий случайных актов космической бомбардировки, которая когда-то оставила такие шрамы на лице Луны. Метеориты 1908 и 1947 гг. угодили в ненаселенные дикие районы; но в конце XXI в. на Земле не осталось места, которое можно было бы безвредно использовать в качестве мишени для небесной стрельбы. Человеческая раса распространилась от полюса до полюса. И поэтому случилось неизбежное...

В 9 ч 46 мин по Гринвичу утром 11 сентября удивительно прекрасного лета 2077 г. большинство обитателей Европы увидело ослепительный огненный шар, появившийся в восточной части неба. На секунды он оставался ярче Солнца, и пересекая небосклон — сначала в полной тишине — оставлял за собой клубящийся хвост пыли и дыма.

Где-то над Австрией шар начал разрушаться со взрывами такой силы, что миллионы людей оглохли навсегда. Но им еще повезло.

Двигаясь со скоростью 50 км/с, тысячи тонн скалы и металла врезались в равнины северной Италии, уничтожив за несколько пылающих мгновений труд столетий. Города Падуа и Верона были стерты с лица Земли. Последняя слава Венеции навсегда погрузилась в морскую пучину, когда ревущие воды Адриатики хлынули на сушу после удара небесного молота. Погибли шестьсот тысяч человек; общий ущерб составил более триллиона долларов. Но потери, нанесенные искусству, истории, науке, всей человеческой расе, на все последующие времена, не поддавались исчислению. Словно огромная война разразилась и была проиграна всего за одно утро. И лишь немногие могли извлечь удовольствие из того факта, что когда пыль от разрушений медленно осела,

месяцами можно было видеть самые великолепные со времен Кракатау восходы и закаты.

После первого шока человечество отреагировало решительностью и единством, которых никогда не было в прежние века. Люди поняли, что подобная катастрофа может не повториться в течение тысяч лет... но может произойти и завтра. И в следующий раз последствия могут быть еще хуже. Очень хорошо: следующего раза не должно быть.

Ста годами раньше мир, куда более бедный, со своими хилыми ресурсами, самоубийственно проматывал свое состояние, пытаясь уничтожить запущенные и приближающиеся баллистические ракеты. Эти усилия не оказались успешными, но приобретенный опыт не был забыт. Теперь его можно было использовать для значительно более благородной цели и к тому же на бесконечно большем пространстве. Ни один метеорит настолько больших размеров, что он мог бы вызвать катастрофу, не преодолеет защиту Земли...» (перевод автора).

В приведенном отрывке есть только одна неточность: «когда пыль от разрушений медленно осела». Замутнение атмосферы пылью от подобного катаклизма едва ли не более опасно, чем сама катастрофа. Атмосфера перестает пропускать солнечный свет надолго, на годы. Эти последствия подробно изучались как результат возможной ядерной войны. Наступает продолжающаяся несколько лет «ядерная зима», холод, быстрое истощение ресурсов и никаких урожаев, что приводит к вымиранию основной части животного мира и человечества. Пожалуй, единственное преимущество метеоритной опасности перед термоядерной — отсутствие опасной радиации. И еще одна мысль Кларка заставляет задуматься: а возможно ли ныне создать подобный ракетный «щит»?

Но чаще падение метеоритов оказывается совсем безобидным, а иногда и курьезным. Как-то вечером метеорит пробил крышу и потолок дома и упал возле камина у ног пожилых супругов, коротавших вечерок у телевизора. Несколько лет назад, в США, обитатели деревенского дома слышали, что кто-то ломает их почтовый ящик, прибитый у ворот. Оказалось, в него угодила довольно крупный метеорит, который разворотил ящик и остался внутри.

По-видимому, падение метеоритов на крыши домов не такое уж редкое событие; скорее люди просто не понимают или не замечают, что произошло. В апреле 1990 г. о таком падении узнала специальная научная комиссия Лейденской обсерватории в Нидерландах. Метеорит с массой 1 кг пробил крышу жилого

дома и проник в спальню. По месту падения метеорит назвали Гланербрюгом. Комиссии удалось установить, что начальная масса тела была около 500 кг, а скорость его была необычно высокой, 28 км/с. Разумеется, скорость была потеряна в атмосфере, как и большая часть массы.

Еще в начале XIX в. все сообщения о падении метеоритов трактовались Французской академией наук как «антинаучный вздор». В самом деле, камни с неба? Какая глупость! Никакие доказательства не принимались к рассмотрению. Положение изменилось только после 28 апреля 1803 г., когда метеоритный град выпал буквально на головы высокопоставленным французским чиновникам.

Позже, когда были накоплены большие коллекции метеоритов, возник вопрос: откуда они приходят? Направления ярких следов во время вспышки болидов позволяли получить кое-какие сведения, если находилось достаточно очевидцев в удаленных точках. К сожалению, этот метод давал очень неточные результаты. Дело намного улучшилось, когда в некоторых странах ввели службу фоторегистрации метеоритных следов. Одной из первых создала такую службу Чехословакия. Вскоре удалось надежно определить орбиты некоторых болидов. Оказалось, что они восходят к поясу астероидов.

Находки метеоритов довольно редки. Общее число их едва составляет 5 тыс. Поверхности Земли достигает лишь 1 из 10 тыс. метеоритных тел, влетающих в атмосферу. Метеоритные выпадения, как Сихотэ-Алинское (12 февраля 1947 г.) или Альенде (8 февраля 1969 г.), — настоящий подарок ученым. Чтобы метеорит достиг поверхности Земли, нужно сочетание относительно низкой скорости (не более 22 км/с), благоприятного угла входа в атмосферу и высокой прочности метеорита. В других случаях метеоритные тела, движущиеся со скоростью до 70 км/с (а в среднем 10–30 км/с), распыляются и испаряются в атмосфере, даже если их масса достигает тысяч килограммов. Подсчитано, что количество метеоритного вещества, рассеянного и медленно оседающего в атмосфере Земли, составляет 1–2 млн тонн. Если масса метеоритного тела достигает сотен тысяч тонн, оно при ударе о поверхность Земли может образовать метеоритный кратер. Упомянувшийся Аризонский кратер образован телом массой в 1 млн тонн. (Эквивалент взрыва от 5 до 20 Мт.) Однако такие случаи исключительно редки. Подавляющее большинство метеоритов имеет размеры чуть больше 0,1 мм. Они-то и приносят основную массу метеоритного вещества, состав-

ляющую всего 40 тыс. тонн в год, или около 100 тонн в сутки (по другим оценкам много больше). Прирост земного шара за счет этой пыли очень мал, всего 1 мм за 30 млн лет.

Предполагалось, что значительную часть этого вещества могут поставлять так называемые вымершие кометы, у которых все летучие, сосредоточенные во льдах, уже растрчены и осталась только неиспаряющаяся часть ядра. Но более подробные исследования показали, что главный источник метеоритного вещества находится в поясе астероидов.

Что же заставило астероиды разрушаться и как попали на Землю их обломки?

Близость орбит астероидов только в редких случаях приводит к столкновениям между ними. Ученым удалось рассчитать время жизни нескольких астероидов группы Аполлона, часто сближающихся с Землей. Оказалось, что оно не превосходит 100 млн лет. Очевидно, разрушения, иногда весьма значительные, вызывает большая скорость этих тел. Обломки, выброшенные в некоторых направлениях со скоростью до 1 км/с, под действием возмущений от Марса и Юпитера могут отклониться от орбит первичных тел и в конце концов попасть на Землю. Именно такова, по данным американских ученых, судьба обломков астероида 43 Ариадна, которые мы встречаем как в виде астероида Торо, так и в виде гиперстеновых хондритов. Подобные же катастрофы положили начало и ряду метеоритных потоков (например, железоникелевых). Однако, по мнению многих ученых, число потоков не очень велико. «Поток» здесь мы называем просто метеориты общего происхождения, что не обязательно должно приводить к одновременному их выпадению. Косвенное подтверждение общности происхождения метеоритов дает измерение их возраста.

Интересно отметить: лет 20 назад ученые обнаружили, что на одном из континентов Земли метеориты найти значительно легче, чем на других. К тому же здесь они мало подвергаются земным загрязнениям. Это — Антарктида, где выпавшие метеориты консервируются в толще льда и обнажаются затем в тающих ледниках.

Как ни редко сталкиваются между собой астероиды, обломки и пыль все же образуются. Кстати, недавно со спутника, оснащенного приборами для регистрации теплового излучения холодных небесных тел, обнаружено излучение пыли в поясе астероидов. (Ее не следует путать с частицами, образующими «зодиакальный свет».) В большинстве случаев метеориты — это действительно обломки астероидов и продукты разрушения комет. Но не

только. Когда лунный грунт стал доступен для анализа, ученые призадумались: где-то они это уже видели. И действительно, есть группа метеоритов, состав которых практически совпадает с лунными образцами. Впервые такое отождествление было сделано в 1982 г. и встретило недоверие. В самом деле, такие сложные экспедиции («Луна», «Аполло») доставляют образцы лунного грунта, а лунные камешки валяются на льдах Антарктиды и в других местах. Не поленитесь, найдите и подберите! Но как они попадают на Землю? Пожалуй, лишь наша наивная вера в изолированность Земли от космоса не позволяла сообразить это раньше.

Падение крупного метеоритного тела на Луну создает каменные «брызги», причем некоторые из них долетают до Земли и, при благоприятных углах, скоростях и траекториях могут выпасть как метеориты. Конечно, вероятность такого события невелика, но времени у природы сколько угодно. Орбиты таких обломков достаточно сложны, но на Землю они попадают. А если лунные камни валяются на Земле, зачем тогда нужна стерилизация аппаратов, карантин для вернувшихся с Луны астронавтов?

Есть и более интересный вопрос: если метеоритный материал может приходиться с Луны, то почему бы ему не добраться до нас с другой планеты? Особенно с Марса, где из-за очень тонкой атмосферы условия рассеяния обломков отличаются от лунных главным образом большей гравитацией.

Метеоритный материал, который называют SNC, встречается очень редко. (На 1997 г. известно 12 метеоритов SNC.) Называется он по первым буквам названий населенных пунктов, вблизи которых эти метеориты нашли — Шерготти, Накла и Шассиньи (Shergotty, Nakhla, Chassigny). Четыре метеорита SNC удалось обнаружить сразу после выпадения, поэтому они не загрязнены земными материалами. Метеорит Накла (Египет, вблизи г. Александрия), который выпал в 1911 г., долгое время был известен главным образом тем, что при падении убил собаку. Эта жертва — единственный известный случай в истории. Но наибольшую известность SNC-метеориты получили по другой причине: они пришли с Марса! Еще несколько лет назад в это просто не верили. Но подробные исследования не только убедили скептиков, но и показали, как это происходит.

Чтобы покинуть поле тяготения Марса, осколки от метеоритного удара должны разлетаться со скоростями не менее 5 км/с. Теория указывает, что для этого давление взрыва в

момент удара должно было достигать 1,5 Мбар, но при таких давлениях материал разрушается и плавится. По признакам, которые содержит материал самих метеоритов, выяснилось, что фактически они испытали лишь 1/4 давления, предсказанного теорией. Дело в том, что высокие давления в момент взрыва имеются только на достаточно большой глубине. Разрушенный и выброшенный материал подхватывает обломки на поверхности, которые таким образом приобретают необходимую скорость, но сами не разрушаются. (Для лунных образцов достаточно давлений 0,2 Мбар и скорости обломков 2,4 км/с.) Так SNC оказались в космосе. Дальнейший путь марсианских камней был, вероятно, очень запутанным и продолжался много миллионов лет. Часть таких каменных брызг возвращается в конце концов на Марс, часть захватывается полем Юпитера и частично попадает в его атмосферу, частично выбрасывается из Солнечной системы. Наконец, небольшая часть достигает Земли и, возможно, Венеры и становится «обменным фондом» между планетами.

Были проведены эксперименты, расчеты и полевые работы. Все подтвердилось; более того, несомненно, что такие же выбросы возможны и с Земли. Метровые обломки породы, выброшенной из большого (24 км) метеоритного кратера Риис (Ries) в южной Германии, найдены в Швейцарии. Для этого их начальная скорость должна была составлять 1,4 км/с. А еще более разрушительные соударения могли выбрасывать обломки и за пределы земного тяготения. «Космическая почта» действовала в обе стороны.

Как же выглядят камни с Марса? Шерготти — обломок, который выпал в Индии в 1965 г., содержит следы его «изготовления» глубоко в ванне магмы на другой планете. Другой представляет собой кусок слоистого материала, содержащего карбонаты, что может дать некоторые данные о прошлом климате Марса. Этот образец был недавно найден в Антарктиде... Надо ли посылать на Марс экспедицию за другими образцами?

И еще несколько вопросов вызывают SNC-метеориты. Если на Марсе когда-либо была жизнь, не сохранились ли ее следы в этих метеоритах? Наконец, если планеты обмениваются метеоритным материалом, то чем это не феномен панспермии?

Сейчас столкновения крупных тел очень редки, и «космическая почта» приносит на Землю мало «посылок». И все-таки, по оценкам ученых, 1/2 тонны марсианского материала за год поступает на Землю. Но на ранних этапах истории Солнечной системы планетный пинг-

понг должен был переносить очень много обломков, которыми обменивались все планеты земной группы.

Итак, метеориты — обломки небесных тел, доставляемые на Землю без всяких усилий со стороны человека. Как пишут журналисты: звездный грунт на Земле! Остается только проанализировать его состав и сделать выводы о природе астероидов. Разумеется, все это было сделано. Но общая картина получается довольно сложной.

Метеориты распадаются на несколько типов. Самые распространенные — каменные — встречаются примерно в 92 случаях из 100. Их состав — силикаты железа и магния с примесями металлических железа и никеля. Железокаменные метеориты составляют 2% и почти чисто железоникелевые 6%. Фотография такого метеорита приведена на рис. 9.6.

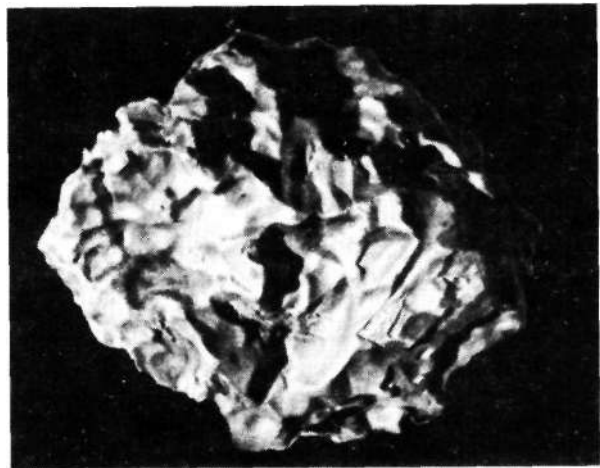


Рис. 9.6. 12 февраля 1947 г. в Приморском крае, в западных отрогах Сихотэ-Алинского горного хребта выпал железный метеоритный дождь. В числе найденных кусков, которых набралось 27 т, был и этот обломок. Его масса 43 кг. Он находится в Московском планетарии

В свою очередь, каменные метеориты также делятся на ряд типов. Хондриты (85%) включают округлые силикатные частицы, хондры, размерами до нескольких миллиметров. Самые распространенные — гиперстеновые хондриты. С их составом совпадает, по данным спектрофотометрии, состав небольшого астероида Торо, который иногда очень близко — на расстояние всего 24 млн км — подходит к Земле. Некоторые ученые предполагают, что Торо происходит от того же большого астероида, от которого откололись более мелкие обломки, выпадающие в виде метеоритов. Ахондриты — метеориты без хондр, несколько похожи на изверженные горные породы и, судя по спек-

грам, сходны с составом Весты. Довольно редко встречаются углистые хондриты, в которых присутствуют органические соединения (как полагают, небιοгенного происхождения). Плотность углистых хондритов — около $2,2 \text{ г/см}^3$. Напомним, что такова же, по некоторым данным, плотность Цереры.

Предполагается, что углистые хондриты могли образоваться при конденсации протопланетного облака.

Исследование структуры хондритов показывает, что они всегда оставались в первозданном виде. Содержание металлов в них близко к содержанию металлов на Солнце. Совсем иначе выглядит структура железоникелевых метеоритов, которые образовались в результате плавления первичного материала и погружения металлических капель к центру небесного тела. Исследования показывают, что это происходило в условиях довольно низкой гравитации (при небольшой массе планеты). Железокаменные метеориты образовались в окрестности границы между ядром массивного небесного тела и его внешними слоями.

Структура ряда метеоритов говорит о весьма высоких давлениях, которые им когда-то довелось испытать. Об этом свидетельствуют микроскопические алмазы, которые были найдены в некоторых образцах. Но вскоре было доказано, что эти алмазы образовались при столкновении довольно массивного метеоритного тела с поверхностью Земли в момент взрыва, когда давления действительно были очень велики.

И еще один интересный результат был получен при исследовании металлических метеоритов. Структура железоникелевого сплава говорит об очень медленном его охлаждении, примерно 10 К за 1 млн лет . Такими темпами (от 1 до 50 К за 1 млн лет) идет охлаждение в глубине тел размером от 100 до 200 км (типичные размеры астероидов). И здесь мы снова сталкиваемся с той же проблемой, о которой уже говорилось в гл. 1. Расчеты опять показывают, что выделение тепла существующими в природе радиоактивными элементами было совершенно недостаточным для плавления вещества в астероидах размером до 500 км . Источник тепла снова остается загадкой.

Три возраста метеоритов

Собственно, «возрастов» у метеоритов несколько. Во-первых, это возраст от времени формирования малой планеты. Он определяется, например, рубидиево-стронциевым методом, который сводится к следующему. Среди естественных радиоактивных изотопов элемен-

тов имеется рубидий-87. При его распаде образуется стронций-87 — стабильный изотоп стронция. Определение содержания стронция-87 по отношению к нерадиоактивному его изотопу стронцию-86 позволяет найти возраст метеорита. Этот метод дает хорошо известные числа: от $4,5$ до $4,7 \text{ млрд лет}$, что совпадает с возрастом планет, в том числе и Земли.

Другой, гелиево-аргоновый, метод позволяет найти важные даты в возрасте метеорита. Он основан на сопоставлении удержанных в образце количеств гелия и аргона, образовавшихся в результате распада соответственно тория и радиоактивного изотопа калия (калий-40). Гелий — газ своеобразный. Среди множества его особенностей есть и такая: он способен проникать, например, сквозь стекло. Иногда в лабораториях выходят из строя дорогие электронно-вакуумные приборы, если в воздухе присутствуют очень незначительные количества гелия. Диффузия гелия особенно велика при повышенных температурах. Из метеоритного тела гелий диффундирует при температуре выше 200°C . Аргон просачивается сквозь вещество метеорита труднее, для него нужна температура около 300°C . Поэтому, измеряя накопленные в результате радиоактивного распада количества гелия и аргона, можно определить время вторичных нагреваний образца. Такие нагревы тело могло испытать, например, при изменении орбиты, при приближении к Солнцу или в результате сильного соударения. Для некоторых гиперстеновых хондритов этим методом получается возраст всего 600 млн лет .

Наконец, есть еще один возраст метеоритов — космический. Под ним понимается время существования метеорита как самостоятельного небесного тела. Благодаря воздействию на него космическим лучам, прежде всего протонам с высокой энергией, некоторые ядра в атомах вещества обломка расщепляются. В результате в образце накапливаются продукты таких ядерных реакций. Их количество можно установить при анализе. Космические лучи не могут проникать глубоко в вещество и задерживаются в слое около 1 м толщиной. Поэтому если произошло столкновение, разрушившее астероид, то начнут экспонироваться совершенно свежие слои. Установленный таким образом возраст обломка будет отсчитан от момента разрушения первичного тела. После анализа ряда образцов выяснилось, что космические возрасты метеоритов получаются различными для разных классов метеоритов.

Гиперстеновые хондриты оказались совсем «юным». У них преимущественно два возра-

ста — 7 и 20 млн лет. Железониелевые намного старше — около 700 млн лет.

Если рассматривать эти числа как даты разрушений исходного астероида, получается статистика для изучения частоты их столкновений. Однако было высказано сомнение в справедливости величин космического возраста, по крайней мере для каменных метеоритов. Дело в том, что столкновения между обломками и более мелкими частицами понемногу разрушают поверхность обломков. При разрушении слоя толщиной всего $5 \cdot 10^{-6}$ см в год вычисленный возраст метеоритов не сможет превысить 55 млн лет. Поэтому космический возраст каменных метеоритов всегда будет сравнительно небольшим. Однако не все согласны с этим объяснением: во-первых, остается неясным, почему регистрируются два возраста, во-вторых, количество вещества, выбрасываемого при такой эрозии в космос, оказывается чересчур большим. Не исключено, что мы действительно видим метеориты разных дат происхождения.

Ученые обычно исходят из того, что в Солнечной системе есть один пояс астероидов. Мы уже говорили, что астероиды дают не слишком много космического мусора и пыли — микрометеоритов. Кажется очевидным, что их концентрация должна быть высокой в поясе астероидов и уменьшаться по мере удаления от него в обе стороны. Для оценки реального распределения метеоритной пыли в пространстве и исследования метеоритной опасности для космических аппаратов на «Пионер — Сатурн» имелся метеоритный датчик, который регистрировал удары микроскопических частиц. Сведения о числе соударений аппарат транслировал на Землю. Датчик состоял из большого числа ячеек, которые перед запуском аппарата все находились в активном, «верхнем» состоянии. Имелось 2 канала, для мелких и более крупных частиц. Во время полета ячейка, в которую попадал микрометеорит, переходила в нерабочее «нижнее» состояние и на дальнейшие воздействия уже не реагировала. Поэтому эффективная суммарная площадь ячеек постоянно уменьшалась. Соответственно, при неизменной частоте соударений зарегистрированных событий становилось бы все меньше.

На первой ветви трассы от Земли до Юпитера все шло, как и ожидалось: по мере приближения к поясу астероидов частота соударений возросла раз в 5–6. Удивительно, однако, что частота соударений оставалась высокой и после прохождения пояса астероидов, вплоть до самого Юпитера. Здесь аппарат круто повернул и стал подниматься над плоскостью

эклиптики. Частота соударений почти не снижалась. Далее аппарат на короткое время стал снова приближаться к Солнцу. Но и дальнейшее движение к Сатурну сопровождалось неуклонным ростом полного числа соударений, вплоть до самой планеты (рис. 9.7). Как понять эти странные результаты?

Во-первых, можно предположить, что второй пояс астероидов действительно существует и микрометеориты приходят оттуда. Во-вторых, можно связать увеличение числа микрометеоритов с обнаруженным в 1987–1988 гг. поясом афелиев короткопериодических комет за орбитой Нептуна.

Остановимся теперь на одном из главных парадоксов астероидов.

Итак, астероиды никогда не могли составлять одну большую планету. Они — наиболее древнее население Солнечной системы. Часть астероидов представляет собой обломки первичных тел, разрушившихся в столкновениях. С ними, вероятно, связано происхождение многих групп метеоритов. Некоторые из обломков попадают в руки исследователей. Вещество их свидетельствует о том, что одна часть этих тел когда-то подверглась сильному нагреву недостаточно известными источниками тепла, в то время как другая, большая, никогда сильно не нагревалась. Наименее понятна именно первая их часть.

Было бы неразумно игнорировать очевидность, поэтому одна из наиболее разработанных гипотез допускает, что и базальтоидная кора, и металлические глыбы возникли в результате гравитационной дифференциации наиболее крупных из малых планет. Их вещество либо было сильно разогрето в период формирования, либо содержало относительно много короткоживущих радиоактивных изотопов, вероятнее всего — алюминия-26. Он быстро распадается, выделяет много энергии и превращается в магний. Откуда взялся алюминий-26 или другой короткоживущий радиоактивный изотоп — неизвестно (возможно — близкий взрыв сверхновой звезды, см. гл. 1). В хондритах Альенде действительно найдены следы распада алюминия-26.

В любом случае, недра части астероидов на ранней стадии их эволюции были настолько горячими, что в них происходила гравитационная дифференциация с выплавлением железоникелевого ядра и образованием базальтоидной коры. Затем эти тела довольно быстро остыли. Их кора во многих случаях была разрушена в сильных соударениях, а ядро частично или полностью сохранилось. Так на свет появились металлические астероиды, а там, где дифференциация была неполной, —

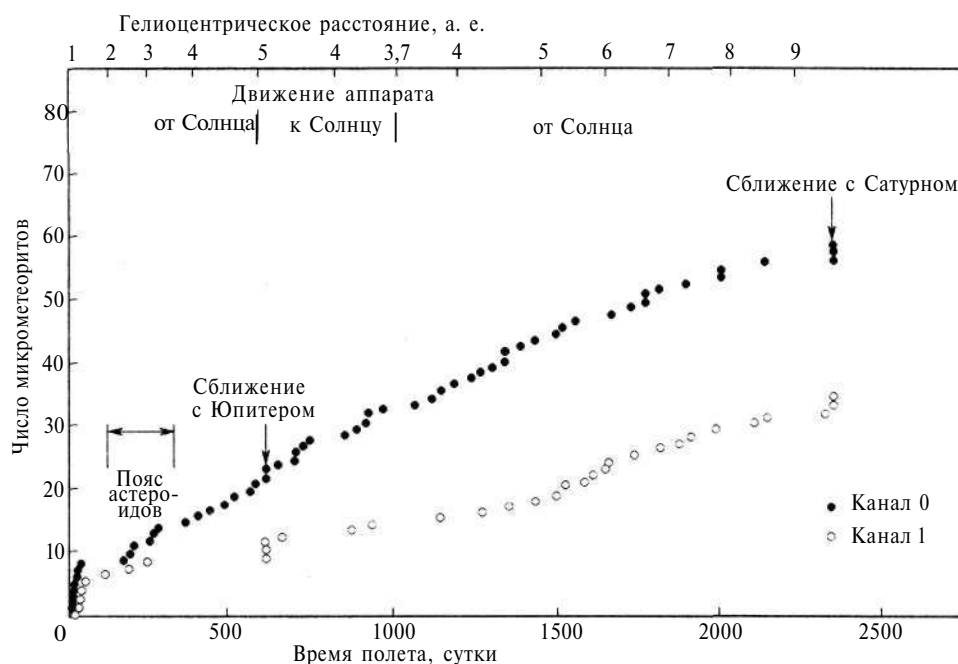


Рис. 9.7. Число микрометеоритных соударений (нарастающий итог), зарегистрированное аппаратом «Пионер—Сатурн» на его пути в Солнечной системе. После каждого соударения число действующих датчиков уменьшалось на единицу. Из анализа кривой следует, что частота соударений после прохождения пояса астероидов не уменьшилась. Это доказывает, что микрометеоритная пыль возникает не только в поясе астероидов. Из работы Т.Герелса

металлосиликатные, с каплями металла в силикатной массе. Возможно, металлические астероиды почти правильной сферической формы — это и есть бывшие ядра. Два таких тела в 1986 г. наблюдались внутри орбиты Земли (1986 DA и 1986 EB), но они могут быть и энстатитовыми хондритами, содержащими лишь 25% металла. Радиоэхо при их локации было очень сильным. Такие тела когда-нибудь в будущем будут находкой для промышленной разработки. Так, или примерно так, ученые объясняют многообразие природы астероидов.

Изучение малых планет приводит к тем же проблемам, что и изучение больших. Но здесь эти проблемы выступают в более обнаженном виде. Вполне возможно, что астероиды позволят прочесть историю ранних периодов формирования планет.

Иногда говорят, что для исследований астероидов можно было бы использовать их прохождение вблизи Земли. Это основано на недоразумении. Скорость астероидов при движении мимо Земли настолько велика, что операция их «перехвата» невозможна энергетически. Если же говорить о полете на специально подобранный астероид, орбита которого мало наклонена к эклиптике, то при выборе экономичной схемы полета такой полет

мало отличается от полета к другим планетам. Космический аппарат может приблизиться или даже причалить к малой планете, а после выполнения своих задач стартовать с нее без особых энергетических затрат. В этом действительно есть резон. Таков проект «Ниар».

Кометы — гости из далёка

Кометы остаются в основном за рамками нашего повествования, но иногда взламывают эти рамки и бесцеремонно и шумно вторгаются в мир планет. В начале XX в. комета 1908 г. была причиной Тунгусской катастрофы на Земле, в его конце — комета Шумейкера—Леви вызвала серию несравненно больших по своим масштабам взрывов на Юпитере. Более 100 лет назад популяризаторы науки нашли для комет запоминающийся образ: «видимое ничто». Образ, в общем, справедливый, если вспомнить охватывающие иногда полнеба роскошные хвосты комет. Но ядро кометы, способное вызывать взрывы мощностью в миллионы мегатонн, этому образу явно не соответствует.

Физические явления в атмосфере и на поверхности планет и спутников, с одной стороны, и явления в их плазмосферах и магнитосферах, с другой, чаще всего относят

к разным разделам физики. Но в физике комет все эти процессы происходят в одном месте и одновременно. Сублимация твердого вещества с поверхности, его фотолиз и ионизация, химические и фотохимические реакции в плазме и фазовые переходы — все это происходит, когда кометы из природного холодильника на периферии Солнечной системы устремляются к Солнцу. Комета выбрасывает десятки тонн пыли и газа в секунду, образует ровный или изломанный хвост (рис. 9.8), худеет и иногда распадается на куски. Физика комет — большой, специальный и хорошо разработанный раздел науки о Солнечной системе. Чтобы не отвлекаться от основного нашего повествования, здесь мы остановимся только на нескольких темах: откуда приходят кометы, как разрушаются и как выглядит ядро активной кометы вблизи перигелия.

Кометы играли одну из основных ролей во время формирования планет. Благодаря высокой температуре центральной части протопланетного облака, летучие уходили на его периферию, где конденсировались, образуя вместе с пылью и более крупными частицами ядра комет. Когда протопланеты набрали достаточную массу, взаимодействие комет с ними, прежде всего с протояпитером, приводило к нескольким возможным сценариям, из которых наиболее существенны: 1) захват кометы и поглощение ее Юпитером; 2) ускорение в его поле тяготения (естественный гравитационный маневр) и уход на очень далекие орбиты за пределами зоны планет; 3) ускорение и последующий уход из Солнечной системы; 4) отклонение траектории кометы во внутреннюю часть планетной системы и возможное столкновение ее с Землей или другой планетой. Так как Земля формировалась из сухого материала, именно кометы принесли на нее основные запасы воды, именно им мы обязаны красотой земных морей, океанов, озер и рек. Кометы, которым выпал второй сценарий, образовали огромный сферический клубок, «облако Оорта», в котором сосредоточено 10^{12} – 10^{13} комет, обращающихся вокруг Солнца на расстояниях от 3000 до 160 000 а.е., что составляет половину расстояния до ближайших звезд (2 световых года). На таких расстояниях Солнце — обыкновенная звезда.

Существует много короткопериодических (период появления менее 200 лет) и долгопериодических (более 200 лет) комет. Некоторые кометы появляются впервые. До недавнего времени предполагалось, что «новые» кометы приходят из облака Оорта (что оказалось правильным лишь отчасти). Здесь влияния

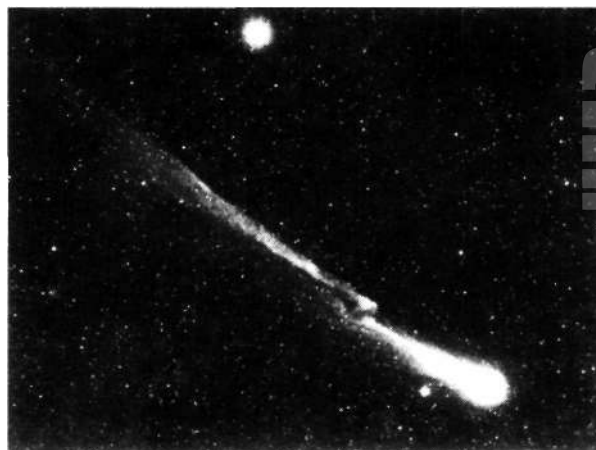


Рис. 9.8. Короткопериодическая комета Галлея в XX в. появлялась дважды. На снимке ее вид на небе Земли в 1986 г., во время сближения с кометой аппаратов «ВЕГА». Излом хвоста возник, когда от ядра отделился крупный обломок (снимок Абастуманской обсерватории, Грузия)

Солнца и звезд сравнимы. Благодаря возмущениям, вызванным влиянием звезд, орбиты комет меняются. Иногда кометы оказываются в ближайших окрестностях Солнца. Орбиты комет значительно отличаются от орбит большинства метеоритных частиц. Основная часть ядра кометы — это льды, которых миллионы лет не «касались» лучи Солнца. Вблизи Солнца кометы отчасти разрушаются, испаряются и образуют рой мелких частиц, которые иногда пересекают путь Земли, образуя «звездопады». Постепенно они рассеиваются в межпланетном пространстве, повышая плотность вещества в окрестностях нашей планеты до 10^{-22} г/см³, что в 100–1000 раз выше плотности газопылевых межзвездных облаков.

Общее количество пылевого вещества внутри орбиты Земли относительно невелико и составляет 10^{21} г — масса довольно хилого астероида.

Интересно, что существует особый природный «пылесос», который убирает совсем мелкие частицы. Это так называемый эффект Пойнтинга — Робертсона. Солнечный свет, падающий на частицу, из-за эффекта абберации света постепенно уменьшает ее момент. Явление чем-то напоминает дождь, косо падающий на движущийся автомобиль. Небольшие запасы кинетической энергии маленькой частицы постепенно исчерпываются, и она по спирали опускается на Солнце. Силикатная частица диаметром 2 мкм, находящаяся на расстоянии орбиты Земли, достигает Солнца всего за 1,5–2 тыс. лет.

В 1951 г. Г.Койпер высказал гипотезу о существовании, наряду с облаком Оорта, еще одного, более близкого резервуара комет. Ныне гипотеза подтверждается; эта зона получила название «пояс Койпера». В 1992 г. в результате многолетних поисков был обнаружен очень далекий и слабый объект, названный 1992QB₁, принадлежащий Солнечной системе и находящийся далеко за орбитами Нептуна и Плутона, в наши дни на расстоянии 41 а.е. Объект оказался гигантским ядром кометы, размерами 200—500 км (ядро большой кометы Галлея было «всего» около 10 км). Уточненная орбита оказалась именно такой, как предсказал Койпер: почти круговой, с большой полуосью 44 а.е. и ничтожным наклоном орбиты к эклиптике (2°). Всего через год, в 1993 г., авторы открытия обнаружили еще один такой же объект, 1993FW, также с большой полуосью 44 а.е. и наклоном 8°, тех же размеров. Так как был исследован очень небольшой участок неба, авторы считают, что таких образований должно быть очень много. В том же 1993 г. были обнаружены еще 4 объекта тех же или немного меньших размеров в интервале от 32 до 34 а.е. снова с малым наклоном орбиты. Поэтому первичные предположения, что 1992QB₁ и 1993FW могут быть кометами, идущими из облака Оорта, были полностью отвергнуты.

Астрономы давно подметили странную особенность: если орбиты большинства короткопериодических комет лежат примерно в той же плоскости, что и орбиты планет, то орбиты долгопериодических комет бывают расположены как угодно. Теперь это объясняется просто: первые приходят из пояса Койпера, вторые — из облака Оорта. В отличие от тел облака Оорта тела пояса Койпера сформировались здесь, на окраине Солнечной системы, поэтому плоскость их орбиты близка к эклиптике. Здесь могла бы сформироваться еще одна планета, но из-за взаимной удаленности находящихся в поясе Койпера тел на это не хватило всех 4,5 млрд лет существования Солнечной системы. Общая численность тел в поясе Койпера должна составлять 10^8 — 10^{10} . Эта оценка следует из числа наблюдаемых короткопериодических комет. Сейчас, после длительных поисков, астрономы уверены, что планеты № 10 в природе нет. Поэтому все возмущения кометных орбит, превращающие их из круговых в вытянутые, может создавать только Нептун (ничтожная масса Плутона позволяет им полностью пренебречь).

Расчеты показали, однако, что влияние Нептуна на население пояса Койпера ограничено. Во-первых, дальше 42 а.е. находится стабильная зона, где движение кометных тел от Нептуна уже практически не зависит. Во-вторых, на возмущение Нептуном орбит даже более близких тел, 40—41 а.е., требуется около миллиарда лет. Четыре объекта, найденных в пределах 33—35 а.е., находятся на нестабильных орбитах и на своем пути к появлению в качестве короткопериодических комет. Внешняя граница пояса Койпера может находиться очень далеко, на расстоянии сотен а.е., а общая масса его населения может составить много десятков масс Земли.

Разрушение рыхлых ядер комет во внутренней части Солнечной системы вносит свой вклад в образование микрометеоритов и метеоритов. Для последних «твердое» вещество комет, представляющее собой грязный лед, твердые включения и куски твердой корки неизвестного состава, образующейся при прохождении перигелия и вблизи него, слишком непрочны. Но при очень большой массе ядро кометы, по расчетам, может достичь поверхности Земли. Большая группа специалистов уверена, что Тунгусский метеорит 1908 г. был именно ледяным кометным ядром. Несмотря на многочисленные (неподтвержденные) сообщения, не было найдено никаких осколков ядра, что считается доводом в пользу его рыхло-ледяной природы. Ведь в 1947 г. в Сихотэ-Алине обломков было сколько угодно (см. рис. 9.6).

Проведенные в 1986 г. космические эксперименты (на аппаратах «ВЕГА» и «Джотто») показали, что с углистыми хондритами, о которых говорилось выше, может иметь сходство вещество «вымерших» комет, которые израсходовали все свои летучие. Как ядра таких комет подозреваются несколько астероидов, например Бетулия. 23 мая 1976 г. она прошла на расстоянии всего 19,5 млн км от Земли. Многие астрономические обсерватории мира исследовали Бетулию различными методами. Результаты спектрофотометрических измерений говорят именно об углистых хондритах, а наклон орбиты, составляющий рекордно большой угол (52°) отличает Бетулию от других астероидов. Очень велик ее эксцентриситет — 0,49. Она имеет темный нейтральный цвет поверхности с геометрическим альбедо 6%. Поляриметрия и инфракрасная радиометрия заставили пересмотреть в большую сторону ее размеры. Это грубо сферическое тело диаметром около 6 км. Период вращения 6,1 ч, что близко к периоду других астероидов. Это, пожалуй, скорее говорит против ее кометной

природы. При радиолокации от Бетулии было получено довольно сильное радиоэхо. В сообщении об этих результатах указывалось, что поскольку никто не знает точно, как выглядят вымершие кометы, весьма вероятно, что именно рыхлые углистые хондриты и составляют их ядро.

Даже на самых лучших наземных снимках комет их «голова» представляет небольшое туманное пятнышко, не позволяющее увидеть само ядро кометы. Эта мечта астрономов сбылась лишь в наши дни, когда в 1986 г., 6 и 9 марта, с ядром короткопериодической кометы Галлея сблизилась советские аппараты «ВЕГА-1 и -2», а 14 марта — аппарат «Джотто» Европейского космического агентства. Вопреки тому, что говорилось выше об орбитах короткопериодических комет, орбиты некоторых из них наклонены к эклиптике очень значительно. Это комета Свифта—Туттля (Swift—Tuttle), продукты разрушения которой хорошо известны каждому как «звездный дождь» ежегодно в августе, и комета Галлея.

Комета Галлея — одна из наиболее интересных комет. Она движется по очень вытянутой эллиптической орбите и возвращается к Солнцу один раз в 76 лет. Поэтому говорят, что только долгожитель может увидеть ее дважды.

Сближение космических аппаратов с кометой происходило на встречных курсах, поэтому скорость сближения была около 75 км/с, и каждая крупинка пыли представляла большую опасность для аппаратов, которые пересекли пылевую оболочку, вошли в голову кометы, сблизилась с ее ядром и выполнили подробные исследования выбрасываемых кометой пыли и газа, а также окружающей комету плазмы. Исследовались и физические характеристики ядра. Ядро, состоящее из водяного льда с примесями других веществ, оказалось значительно больше по размерам, чем ожидалось.

С расстояния около 8000 км от ядра аппараты «ВЕГА» передали изображения, на которых из освещенной и нагретой Солнцем поверхности ядра бьют газовые струи. Обработанный снимок, где усилена резкость затуманенного ядра, наложен на первичное изображение выбросов из ядра (фото 76). «Джотто» подошел к ядру еще ближе, на 610 км, но это вызвало нарушение в работе его систем. Один из его снимков, сделанный с гораздо большего расстояния и через 5 дней после снимка «ВЕГИ», показан в правой части фото 76.

Ядро кометы представляет собой ледяную глыбу, напоминающую стоптанный башмак, с длиной большой оси около 14 км и малых осей по 7,5 км. Его масса близка к $6 \cdot 10^{17}$ г. Ядро медленно вращается, примерно вокруг оси, проходящей сквозь «каблук» на фото 76, завершая один оборот за 53 ч. Поверхность ядра очень темная, альбедо около 4%. Температура поверхности на расстоянии 0,8 а.е. от Солнца была близка к 360 К. Темная поверхность и высокая температура на первый взгляд несовместимы с ледяной природой ядра. Оказалось, однако, что темный слой на поверхности — это своеобразная теплоизоляция, закрывающая твердый лед. Там, где он тает, струи пара вырываются из-под корки, как можно видеть на снимке. В струях выбрасываются и другие газы, прежде всего углекислый, а также пыль. В максимальной фазе комета теряет около 45 т газообразных веществ и 5—8 т пыли каждую секунду. Но это происходит лишь вблизи перигелия. Запасов вещества комете Галлея хватит, вероятно, еще на сотню тысяч лет, после чего пополнит число вымерших комет.

Новые исследования комет намечено провести в недалеком будущем. Такова миссия КРАФ (KRAF), где предполагается более подробно исследовать ядро другой гостьи издалека.

ГЛАВА 10

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКА НЕОБИТАЕМЫХ И ОБИТАЕМЫХ ПЛАНЕТ.
ПЛАНЕТЫ ДРУГИХ ЗВЕЗД**

Через несколько страниц мы простимся с нашим читателем. Перед нами прошли планеты и спутники Солнечной системы — тела холодные и раскаленные, твердые, ледяные, газообразные. По мере их исследований все меньше оставалось надежд встретить в Солнечной системе жизнь помимо Земли, пусть в любых, даже самых примитивных формах: И теперь эти надежды можно связать только, по-видимому, с перспективами обнаружения планетных систем у других звезд. Но существуют ли они, эти другие планетные системы?

В 1983 г. астрономическая общественность с большим интересом восприняла весть о том, что с борта специального спутника ИРАС, оборудованного инфракрасной аппаратурой высокой чувствительности, обнаружен ряд ранее неизвестных объектов. Один из них создает инфракрасное излучение, исходящее от области вокруг яркой звезды Веги. Вопреки некоторым поспешным сообщениям, таким объектом не может быть планетная система, подобная нашей: телесный угол, под которым можно было бы видеть планеты Веги, слишком мал, чтобы уловить их тепловое излучение. Оно исходит от пылевого диска, окружающего звезду. Но именно такой диск должен предшествовать образованию планетной системы. Поэтому полученный результат представляет большой интерес для оценки перспектив поисков планет у других звезд. Результаты, полученные со спутника ИРАС, привели к поискам аналогичных образований с помощью новой наземной техники. Использование матрицы приборов с зарядовой связью, «телевизионной камеры в нагрудном кармане», как их называют, вместе со специальной программой обработки данных позволило получить снимок пылевого диска у звезды Бета в созвездии Живописца (см. рис. 1.1). Оценка размеров диска показывает, что он намного превышает размеры Солнечной системы на уровне орбит

Нептуна и Плутона и достигает 800 а.е. В центре пылевого диска имеется свободная от пыли полость диаметром в 20—30 а.е. На первый взгляд, это не похоже на нашу компактную Солнечную систему; но если вспомнить размеры пояса Койпера и считать, что 30 а.е. — это область, где уже сформировались планеты и вобрали в себя все имевшиеся здесь пылевые частицы, то сходство с Солнечной системой получается поразительное. Оценки массы внешней части пылевого диска Беты Живописца лежат между 15 и 300 массами Земли. Кстати, высказано предположение, что если наблюдать с таких расстояний, то и наша Солнечная система, возможно, будет иметь такой же диск — пояс Койпера.

Другая группа ученых в 1987 г. сообщила еще об одном пылевом диске, обнаруженном методами радиоастрономии у звезды HL Tельца . В обоих случаях зерна пыли достаточно крупные, что отличает их от межзвездной пыли и указывает на процессы роста зерен, что предшествовало также образованию нашей планетной системы. Обе звезды, β Живописца и HL Tельца , молодые, как и Вега.

Тем не менее даже эти очень впечатляющие открытия еще не дают ответа на один из основных вопросов: как и почему пылинки в газопылевом диске вдруг начинают укрупняться? Но как только этот процесс начинается, образование планет становится, видимо, лишь вопросом времени. Насколько часто образуются планетные системы, пока неизвестно.

Задача их обнаружения у других звезд становилась с каждым годом все более актуальной, причем интерес к проблеме диктовался как стремлением понять сам механизм формирования планетных систем, так и интересом к поискам внеземных цивилизаций. И вот в 1995—1996 гг. стали известны первые подтвержденные работы об открытии планет у других звезд.

Охота за планетами

На каждого, живущего на Земле в конце XX в., в нашей Галактике приходится примерно по 25 звезд. Конечно, изучению доступна ничтожная часть звезд Галактики. Имеют ли они свои планетные системы? Можно ли надеяться на новые открытия в недалеком будущем? Всерьез эта проблема стала рассматриваться только в два-три последних десятилетия, причем ученые начали, конечно, с ближайших звезд. Постепенно вырисовывались возможные пути таких исследований.

В качестве «ближайших окрестностей» Солнца обычно рассматривают сферу, окружающую Солнце и имеющую радиус 5 пк (16,3 светового года). В ней находятся 53 звезды, из которых 5 относятся к белым и 40 к красным карликам крайне низкой светимости. Для поиска планет у ближайших звезд предложено по меньшей мере пять методов.

Начнем с самого «очевидного» способа (который оказался фактически бесперспективным) — с поиска планет фотометрическим методом в видимом или инфракрасном диапазонах. Предполагалось, что если заслонить свет звезды непрозрачным экраном (как это делается в телескопе-коронографе), то можно получить изображение наиболее ярких обращенных вокруг звезды планет. К сожалению, рассеянный оптикой телескопа (и, конечно, атмосферой) свет звезды совершенно маскирует даже очень крупные планеты, если они и существуют. Для наглядности отнесем мысленно нашу Солнечную систему на расстояние 5 пк. Тогда Солнце будет видно как звезда 4-й величины, а наиболее удобная для наблюдений планета Юпитер будет в миллиард раз слабее звезды и будет находиться на расстоянии всего 1 угл. с от нее. Немного лучше положение с наблюдениями в инфракрасном тепловом диапазоне, но там возникают другие проблемы. Увидеть планету, тонущую в блеске звезды, практически невозможно.

Немного интереснее спекл-интерферометрия — разновидность фотометрического метода. Здесь используются тысячи отдельных изображений, получаемых за очень короткое время, в течение которого атмосферу можно считать спокойной. (Для планируемого эксперимента с большим телескопом на спутнике спекл-интерферометрия сводится к обычной фотометрии.) В 1985 г. группа ученых из США сообщила о своем успехе в поиске яркого спутника у звезды VB-8. Методом спекл-интерферометрии им, как сообщалось, удалось найти близкий к звезде весьма массивный спутник, не менее 40 масс Юпитера, с мощным

собственным излучением в основном в инфракрасном диапазоне. Тела с такой массой, от 0,04 до 0,20 масс Солнца, получили название «коричневых карликов», хотя в их существование не все верят. Кстати, и само существование спутника звезды VB-8 подтвердить не удалось — он исчез. По-видимому, это была ошибка наблюдений. Но «коричневые карлики» рассматриваются всерьез: это «недозвезды», в которых термоядерная реакция не зажглась из-за недостаточной массы звезды. Температура их поверхности составляет примерно 1200 К — звезд с такой температурой не бывает.

Третий способ — затменный. Можно выбрать группу каких-то звезд и постоянно измерять световой поток от них, чтобы поймать момент, когда по диску звезды проходит планета. Принимая, что это снова Солнце и Юпитер, такое явление можно было бы наблюдать один раз в 4330 дней с продолжительностью 27 ч, если, конечно, наблюдатель находится в плоскости орбиты Юпитера. (Вероятность такого благоприятного расположения составляет всего 0,06%.) Ослабление света звезды при прохождении планеты составило бы всего 1%. Простой расчет показывает, что для успешного обнаружения планет таким методом нужно наблюдать примерно по 10 млн звезд в сутки при условии, что у каждой из них есть планета.

Более реальный метод — астрометрический. Если планета достаточно массивная, обращение звезды и планеты вокруг общего барицентра приводит к тому, что на прямолинейное собственное движение, которое специальными методами можно обнаружить у ближайших звезд, накладывается их орбитальное движение. В общем случае оно наблюдается как ничтожные периодические отклонения положения звезды от прямой линии или как ее неравномерное движение вдоль такой линии. Долгие годы наблюдений (около полувека) позволяли предположить, что таким движением обладает звезда Барнарда.

«Летающая» Барнарда находится в созвездии Змееносца. Это маленькая звезда, красный карлик. Звезда находится на расстоянии 1,81 пк от Солнца и, в отличие от других звезд, быстро перемещается по небу, со скоростью более 10 угл. с в год. Масса звезды мала, 0,14 солнечной, поэтому ее смещение под действием предполагаемых планет должно быть достаточно большим. Особенности в ее движении предлагалось объяснить присутствием двух спутников с массами 0,7 и 0,4 массы Юпитера. Однако независимые работы не подтвердили их существование. Вместе с тем развитие астрономической техники идет быстро. Теперь, как ука-

зывают создатели одного из наиболее совершенных позиционных инструментов, за час можно обнаружить настолько малые собственные движения звезд, что раньше это потребовало бы тысячелетия работы. Если такой прибор вынести в космос, его эффективность возрастет в 100 раз. Предполагается, что это удастся сделать еще до конца XX в.

Разумеется, все технические достижения никак не влияют на продолжительность орбитального периода планеты. Поэтому любые позиционные измерения требуют длительного цикла: для планеты типа Юпитера — не менее 12 лет. Это в полной мере относится и к пятому методу — спектрометрическому. Он аналогичен позиционному (астрометрическому) с той лишь разницей, что вместо смещения звезды измеряется приращение ее лучевой (направленной к наблюдателю) составляющей скорости. Правда, в оптимальном для астрометрии случае, когда планетная система видна «плашмя», спектрометрически изменения скорости не обнаруживаются.

В обычных измерениях спектрометристы умеют находить лучевые скорости от 800 м/с и более. Но скорость орбитального движения Солнца вокруг общего с Юпитером барицентра составляет всего 12,5 м/с. Новые технические приемы позволили довести спектрометрически регистрируемые скорости примерно до 15 и даже до 5 м/с. Авторы метода сообщили, что у 7 звезд из 15 исследованных им удалось обнаружить что-то подозрительное. Но критики возразили, что такой же эффект даст периодическое «дыхание» звезд, оболочки которых ритмически поднимаются и опадают, как у нашего Солнца. Однако в некоторых случаях, например у звезды γ Цефея, для этого потребовалось бы совершенно невероятное раздувание звезды. Возможно, здесь удалось обнаружить очень массивный спутник, в 10 раз больше Юпитера с периодом около 84 дней, т.е. примерно на расстоянии орбиты Меркурия (масса звезды близка к солнечной). Такой спутник близок к критериям «коричневого карлика».

Таким образом, есть много интересных исследований, но результаты еще недавно были только отрицательными. В обзоре, опубликованном в 1989 г., говорилось, что «ни один исследователь еще не сделал такого заявления об открытии планет, которое бы не было опровергнуто или было бы признано таковым». Были опубликованы итоги тщательных спектрометрических наблюдений, охвативших последние 11 лет, вплоть до 1995 г. Специально созданная аппаратура была установлена на высокогорной обсерватории Мауна Кеа (Га-

вайи) и позволяла обнаружить у 100 ближайших звезд эффекты, которые должны возникать под действием планеты с массой Юпитера на его орбите или с половиной его массы на орбите Земли. Для исследований была выбрана 21 звезда типа, близкого к Солнцу. Никаких признаков планет не обнаружено. Одновременно те же звезды наблюдались в одной из обсерваторий США и с тем же отрицательным результатом.

И все-таки именно спектроскопическим методом удалось сделать так долго ожидавшееся открытие. Первой оказалась звезда 51 в созвездии Пегаса. На первый взгляд, это было торжество теории: планета у звезды класса G2 — в точности того же, что и класс Солнца. Но планета какая-то странная, с массой в пол-Юпитера и расположенная буквально вплотную к звезде: всего в 9 радиусах звезды (0,05 а.е.) от ее поверхности. В модельных расчетах планеты располагались гораздо дальше, а главное — здесь должны быть планеты вроде Земли, а не гигант. Планета обращается вокруг звезды всего за 4,2 дня, что и позволило быстро подтвердить открытие. Разумеется, это не исключает существования других планет, но их обнаружить гораздо сложнее. Изменения лучевой скорости Солнца под действием Земли составляет всего 9 см/с, и если у 51 Пегаса есть что-либо подобное, то это пока далеко за пределами инструментальных возможностей.

За 51 Пегаса тут же последовали звезды 47 Большой Медведицы и 70 Девы. Планеты имеют массы 2,4 и 6,4 массы Юпитера, удаленные на 2,1 и 0,43 а.е. соответственно. Здесь можно усмотреть черты сходства с нашей планетной системой, причем обе звезды похожи на Солнце. Но следующее открытие, звезда 55 в созвездии Рака, это снова гигант, 0,9 массы Юпитера на расстоянии всего 0,11 а.е. и с периодом 14 дней. Сообщалось и о других звездах с подобными массивными планетами, которые получили временное название «горячий юпитер». Планеты удалось обнаружить и астрометрическим методом: у красного карлика Lalande 21185. К концу 1996 г. было известно уже 7 (или 8) звезд главной последовательности, имеющих не менее одной планеты, и 5 пульсаров с планетами. Следует учесть, что спектроскопический метод дает результат с точностью до синуса угла наклона орбиты, поэтому обнаруженные планеты могут быть еще более массивными.

Наряду с экспериментальными появляются теоретические работы, авторы которых полагают, например, что число пригодных для жизни планет должно быть уменьшено по сравнению с первоначальными предположениями на два

порядка. Серьезной критике подвергся и другой, более косвенный аргумент в пользу существования планетных систем. Речь идет о наблюдательном факте, касающемся момента количества движения у звезд различных классов. Классы звезд характеризуют их основные параметры. Яркие массивные звезды с высокой, от 40 000 до 10 000 К температурой фотосферы — это классы О, В, А. Классы F, G имеют меньшую светимость и температуру около 5500 К. Солнце — звезда класса G2. Более холодные звезды класса К имеют температуру фотосферы около 4000 К. Класс М — тусклые красные карлики с температурой около 3000 К. Каждый класс делится на подклассы, например K5.

Массивные звезды классов О, В, А0 вращаются быстро и имеют, как правило, большой вращательный момент, убывающий от класса О к классу А5. Однако далее при сравнительно небольшом уменьшении массы (А5, F0, F5, G0) момент снижается на полтора порядка. Поскольку на долю всего 0,2% массы Солнечной системы, т.е. на планеты приходится 98% момента количества движения, логично предположить, что момент просто перераспределился, и надо рассматривать суммарный момент системы. Тогда различия в моменте устраняются. Следовательно, можно предположить, что у звезд класса А5—G0 происходит перераспределение момента количества движения между звездой и образующейся планетной системой. Предположение такого рода подразумевает массовое образование планетных систем у звезд А5—G0. В свою очередь, из этих рассуждений следует, что образование планетных систем — закономерное явление во Вселенной. Критический анализ проблемы показывает, однако, что уменьшение момента может быть объяснено потерей вещества с поверхности звезды, а также явлением кратности звезд. Таким образом, и потеря момента количества движения не может рассматриваться как безошибочное указание на образование планетной системы.

Какие планетные системы могут быть обитаемыми?

Уверенная регистрация присутствия планетных систем у карликовых звезд, например у красных карликов (звезды Барнарда или Проксимы Центавра), тоже была бы очень важна. Но если идти дальше и искать планеты, пригодные, с точки зрения человека, для жизни, планеты карликовых звезд проблемы не решают. Дело в том, что возникновение жизни на этих планетах представляется весьма

сомнительным, хотя в печати и встречаются такие предположения. Так, их авторы указывают, что, поскольку звезды-карлики расходуют свою энергию очень экономно, можно представить планеты вблизи звезд, расположенные в комфортной, с точки зрения человека, энергетической зоне. Такие планеты были бы обеспечены постоянным потоком энергии от центрального светила на многие миллиарды лет. Отсюда — рекомендации изучать планетные системы звезд-карликов. Указывалось, например, что если укоротить большие полуоси планетных орбит, т.е. «прижать» планеты к родительской звезде, то у каждой звезды класса М может оказаться несколько планет, пригодных для жизни. Однако такое утверждение основано на недоразумении: «прижимать» планеты к звезде приходится буквально вплотную!

На основе спектральных классов, примерных болометрических светимостей, масс и радиусов звезд-карликов было рассчитано, на каком расстоянии от звезды следует поместить планету со сферическим альбедо, равным альбедо Земли, чтобы освещенность была равна известной для Земли солнечной постоянной. Иными словами, на такой гипотетической планете будут «нормальные» земные условия. Оказалось, что во всех случаях планета должна находиться на расстояниях в пределах большой полуоси орбиты Меркурия (0,39 а.е.). Для звезд класса М5 и М3 большая полуось орбиты составит всего 3—6 млн км, а период обращения не превзойдет 6 сут. Но и для звезд классов М0—K5 большая полуось орбиты такой гипотетической планеты была бы 25—41 млн км, а период обращения 38—70 сут. Для звезд классов K7—K5 расстояние настолько мало, что планета окажется вблизи предела Роша, где приливные воздействия центральной звезды очень сильны. Следовательно, во всех случаях планета неизбежно должна быть заторможена, т.е. должна иметь синхронный период вращения, когда одна ее половина постоянно обращена к звезде и сильно нагрета, а на другой — вечная ночь и низкие температуры. Возникновение и развитие жизни в таком мире представляется довольно сложным, не говоря уже о том, что планета, по-видимому, просто не могла сформироваться в этой зоне.

Поэтому для звезд классов от K5 до самого позднего класса М существование обитаемых планет представляется маловероятным. Звезды малой массы и низкой светимости — неподходящее место для возникновения жизни. Разумеется, можно представить себе планету, атмосфера которой обладает сильным парниковым эффектом, подобно Венере. Такая планета,

действительно, могла бы располагаться дальше от звезды, но ненамного.

Есть и более тонкие, но очень существенные ограничения. Одно из них — низкая энтропия излучения звезд поздних спектральных классов. Ограничение связано с механизмом фотосинтеза, который обеспечивает энергетические потребности практически всей земной биосферы. Некоторые особенности фотосинтеза позволяют предположить, что альтернативы его устройству в природе может не быть. В частности, его свойства не вполне соответствуют условиям Земли. Механизм фотосинтеза весьма чувствителен к энтропии излучения. Так, он мог бы работать даже на Плутоне, если обеспечить другие необходимые условия. Но он не станет функционировать даже на Меркурии, если Солнце заменить звездой позднего класса.

Рассмотренные ограничения оставляют для поиска обитаемых систем только звезды классов G, K1—K2 и, возможно, часть класса F. Вблизи Солнца среди упоминавшихся 53 звезд их можно перечислить по пальцам.

Проблема происхождения жизни сложнее проблемы образования планет, но космические исследования Солнечной системы уже дали некоторые минимальные основания для такой оценки. Слабые надежды найти жизнь на спутнике Сатурна Титане также оказались напрасными, и, вероятно, вообще обитаемость планет-гигантов вряд ли можно рассматривать серьезно. Таким образом, «земной шовинизм», т.е. поиск жизни в проявлениях, аналогичных земным, оправдан, а жизнь в белково-нуклеинокислотной форме не имеет альтернативы, во всяком случае в Солнечной системе. Диапазон комфортных температур в последней имеется только на Земле. Уже марсианская средняя температура поверхности (около 220 К) находится на самом нижнем пределе, а температура свыше 350 К опасна в отношении коагуляции белков.

Если учесть небольшой парниковый эффект Земли (около 35 К) и задаться серединой комфортного температурного диапазона, можно рассчитать среднее расстояние гипотетической обитаемой планеты от центральной звезды (рис. 10.1). Для звезд с абсолютной болометрической светимостью от 5,75 до 3,75 звездной величины и планеты с альбедо от 0,23 до 0,55 большая полуось орбиты лежит довольно близко к 1 а.е., изменяясь на —37%, +59% при изменении светимости на ± 1 звездную величину. Таким образом, пределы, в которых такую планету можно искать, тоже довольно узки, а наиболее существенны в этом отношении исследования Марса. Мы сейчас не

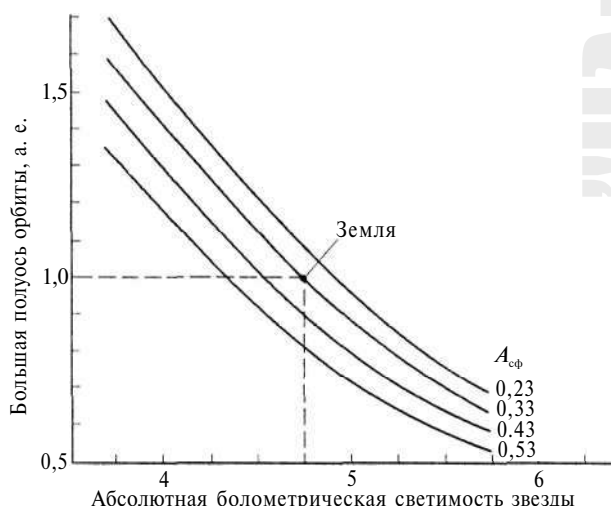


Рис. 10.1. Расчетное значение большой полуоси орбиты гипотетической планеты с равновесной температурой Земли в зависимости от абсолютной болометрической светимости центральной звезды и альбедо планеты

можем ответить на вопрос, почему на Марсе не возникла жизнь, но она могла бы там быть. Впрочем, так ли уж «не возникла»?

Окаменелости с Марса

В августе 1996 г. все информационные агентства мира сообщили о так долго ожидавшемся открытии — о следах внеземной жизни в метеоритном теле, найденном в Антарктиде. Обычно метеориты мало выделяются на фоне почвы, поэтому их редко находят, разве только если кто-то заметит их падение. Другое дело — безбрежные снежно-ледовые пустыни Антарктиды. На находку свежих образцов, конечно, надеяться не приходится: горячие метеориты уходят глубоко в лед и снег. Но при выветривании старых льдов замороженные когда-то метеориты выходят на поверхность. Так удалось найти до 400 образцов в год, и так были найдены метеориты ЕЕТА 79001 в 1979 г. и ALH 84001 в 1984 г., отнесенные к группе SNC, о которой рассказывалось в гл. 9 и в которую сейчас входят уже 12 образцов. Быстрое развитие технологии позволило создать научные приборы, которые способны провести анализ состава вещества на основе всего нескольких десятков тысяч его атомов. В 1980 г. удалось провести изотопный анализ газа, в микроскопических количествах содержащегося в ЕЕТА 79001. Результаты оказались сенсационными: химический состав газа и его изотопные отношения совпали с такими же данными для атмосферы Марса, найденными аппаратами «Викинг» на Марсе в 1976—

1978 г. Изотопный состав — это своеобразный паспорт, химический состав может значительно изменяться, но изотопный очень стабилен. Так удалось доказать, что EETA 79001 (и другие SNC) действительно прилетели с Марса.

Метеорит ALH 84001 очень не похож на остальных «членов клуба SNC». Довольно крупный (рис. 10.2), весом 1,9 кг, он пролежал после находки 10 лет, не привлекая внимания исследователей. Но в 1993—1994 г. удалось доказать, что изотопный состав содержащегося в нем кислорода также соответствует марсианскому, а метеорит обладает скрытыми признаками SNC.

В августе 1996 г. группа ученых объявила о возможном присутствии в этом метеорите древних окаменелостей биологического, но не земного происхождения. (Как правило, все метеориты загрязнены земной флорой. Вопреки распространенному мнению Антарктида вовсе не стерильное место на Земле: микроорганизмов там сколько угодно.)

Методы современной физики и химии позволяют определить возраст таких обломков и длительность их пребывания в открытом космосе. Возраст 11 образцов SNC не очень большой, от 180 до 1300 млн лет. Но ALH 84001 оказался самым старым. По первым определениям он возник из жидкой магмы 4,5 млрд лет назад, когда Марс еще даже не до конца сформировался. Затем (3,9 млрд лет назад) он подвергся сильному удару, который оставил в нем многочисленные трещины. За 16 млн лет до нас еще более мощный удар выбросил его с поверхности Марса в космос, где он и оставался до встречи с Землей. 13 тыс. лет назад он выпал на льды Антарктиды в районе Алан Хилс, где его и нашли.

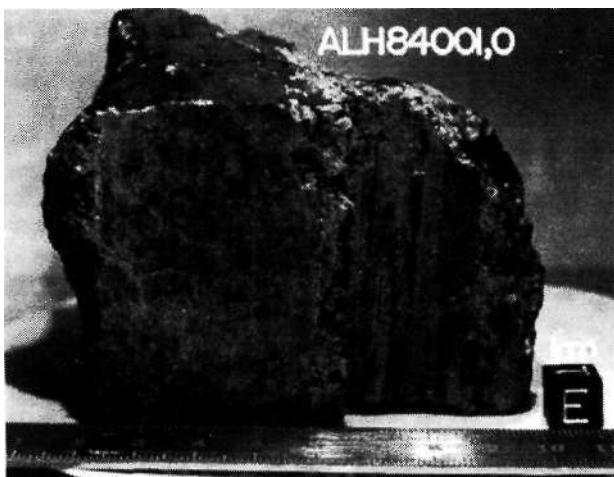


Рис. 10.2. Метеорит ALH 84001, найденный в Антарктиде в 1984 г.

«Мы уверены, что где бы ни образовался этот метеорит, что-то в нем жило», — писала «Нью-Йорк Таймс». «Состав углеводов... указывает на биологическую активность». Эта цитата относится, однако, вовсе не к образцу ALH 84001. История повторяется. В 1961 г. сенсационные статьи посвящались метеориту Оргей, выпавшему во Франции в 1864 г. Его исследовал еще Луи Пастер. В 1961 г. группа специалистов в США объявила о том, что органические включения в метеорите имеют биологическое происхождение. Споры в научной прессе длились 14 лет (!) и закончились признанием, что включения «имеют земное происхождение». Но вернемся к ALH 84001.

Состоявшейся в августе 1996 г. пресс-конференции по итогам 1,5-летней работы с образцом ALH 84001 предшествовало телевизионное выступление президента США Б.Клинтона, что подчеркнуло значимость открытия. Конференцию провели ученые, представляющие различные научные направления. Кроме того, были независимые критические выступления. Заподозрив присутствие в метеорите микроокаменелостей древних бактерий неземного происхождения, ученые провели тщательные исследования по нескольким независимым направлениям, используя самую совершенную технику. Докладчики не утверждали, что какое-либо из выбранных направлений привело к «железному» выводу о древних марсианских микроорганизмах. Скорее, вывод можно сформулировать так, что ни одно из проведенных исследований не отвергает такой возможности.

Первый аргумент исследователей: вблизи поверхности (но не у самой оплавленной корки) обнаружена колония многочисленных овальных, а в некоторых случаях — удлинённых и червеобразных образований (рис. 10.3), очень похожих на окаменелые колонии древнейших земных бактерий. Сходство замечательное, а «черви», кажется, даже имеют сегментированное строение. Одна из статей в сугубо научном журнале «Nature» была названа: «Открыли банку марсианских червей». С другой стороны, критики замечают, что земные бактерии с типичными размерами 0,5—20 мкм в 100—1000 раз больше этих образований. Последних скорее следует отнести к «нанобактериям», так как их размеры всего 10—100 нм, и увидеть их удалось лишь благодаря большому прогрессу в технике электронных микроскопов. Есть одно-два сообщения, что что-то похожее найдено и на Земле (в чем, опять-таки, снова нет уверенности). Другое серьезное возражение касается невозможности размещения в столь малом объеме элементарного аппарата наслед-

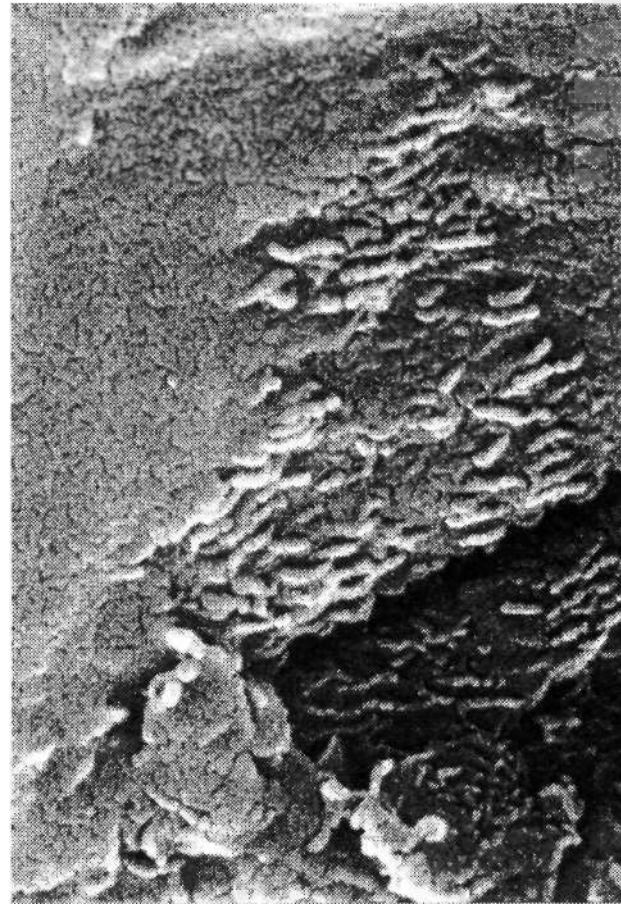


Рис. 10.3. Образования, похожие на окаменелости колоний земных микроорганизмов, но значительно меньшие их по размерам. Они могут также быть продуктами фрагментации тонкой неорганической пленки (в верхней левой части правой половины рисунка)

ственности (ДНК/РНК), а также всех клеточных механизмов. Не обнаружены и следы стенок (клеточных мембран), удерживающих протоплазму. Можно добавить, что фотосинтез при таких размерах столкнется с проблемой дифракции света; поэтому нанобактерии должны пользоваться другими источниками энергии. Наконец, остается вопрос, как и почему окаменелости нанобактерий оказались в изверженной, а не в осадочной породе.

Второй аргумент: присутствие заметных количеств особых органических соединений — полициклических ароматических углеводородов, которые образуются после разложения погибших микроорганизмов. Вокруг каждого из пятнышек, которые могут быть такими следами, имеются также отложения карбонатов, окислов, сульфидов и сульфатов железа. Именно такие образования сопутствуют земным окаменелостям: это продукты их жизнедеятельности и разложения после гибели. Ученые считают, что эти карбонатные «глобулы» и

окружающие их органические соединения образовались около 3,6 млрд лет назад, причем кроме радиоизотопного определения возраста об этом же говорят проходящие через отложения трещины, возникшие еще на Марсе. Интересен изотопный состав карбонатов. Дело в том, что земные бактерии обладают удивительной способностью «сортировать» изотопы, в результате чего в ферментах (и в следах бактерий) изотопа ^{13}C углерода меньше, чем в природных материалах. Именно это и обнаружено в ALH 84001 методами тонкой лазерной спектроскопии. Возможно, это наиболее убедительный аргумент. Микроотложения магнетита и моносульфида железа (пиротина) также очень напоминают следы, которые остаются от земных бактерий. Авторы открытия указали, что не знают другой химической среды, кроме бактерий, которая оставила бы подобные микроотложения.

Третий аргумент: возраст образований, совпадающий с тем, когда климат Марса был

благоприятным для возникновения жизни. Но и здесь оппоненты представили другую оценку возраста того же образца, всего 1,39 млрд лет, а это уже совсем другие условия на Марсе. Кто прав, пока неясно.

Рассматривались и другие стороны проблемы. В частности, почему нет более поздних образований? Если жизнь на Марсе была, то почему ее нет сейчас? Возникшую однажды жизнь уничтожить очень непросто. Жизнь приспосабливается к окружающей среде и приспосабливает ее к себе. Поэтому многие высказывают мнение, что *жизнь на Марсе, если бы она сейчас существовала, было бы трудно не обнаружить*. Некоторые специалисты задаются вопросом, почему так похожи пути примитивной жизни на Земле и Марсе (и видят в этом проявление панспермии — проникающих повсюду зародышей жизни, носящихся в космосе). Общее мнение таково, что результаты требуют не только дополнительной проверки, но, возможно, и новых исследований еще более тонкими методами.

В 1997 г. позиции критиков стали жестче. Они подчеркивают, что даже размеры одной рибосомы (один из важнейших элементов клетки) больше, чем у целого марсианского образования. Но такая жизнь должна пользоваться совсем другими, неизвестными молекулярными механизмами.

Уроки SNC показали, что наука конца XX в. готова к открытию простейших форм жизни на некоторых других небесных телах, где для этого имеются минимально сносные условия. Эти условия уже понятны, как и пути возникновения примитивных микроорганизмов, и сформулированы в научной литературе. «Жизнь возникла естественным образом, путем бесчисленных химических реакций, имевших на ранней Земле высокую вероятность» — указывает К. де Дюве, лауреат Нобелевской премии. Солнечная система — не единственная в своем роде, и физические условия, подобные земным, могут реализоваться еще на какой-то планете.

Пожалуй, это и все, чем мы ныне располагаем для оптимизма. Все почти 50-летние поиски разумных сигналов из космоса не дали ровно ничего. Для объяснения этого факта приводятся самые тонкие и остроумные идеи, но ученые все больше склоняются к тому, что земная цивилизация уникальна, по крайней мере в нашей части Галактики. Великое Молчание Вселенной, по-видимому, действительно определяется крайне малой вероятностью перехода от простейших одноклеточных к сложным многоклеточным организмам. Только эволюция последних может привести к

появлению разума. Половина жизненного пути Солнца и 5/6 истории Земли понадобились, чтобы 570 млн лет назад состоялся наконец «кембрийский взрыв» — внезапное и необъяснимое появление на Земле многоклеточных, как пишет С.Гулд в своей книге «Удивительная жизнь». Сколько сотен миллионов лет понадобится, чтобы эта вероятность реализовалась где-то еще во Вселенной? Факт доисторического существования простейшей жизни на Марсе, если ALH 84001 действительно его содержит, может быть посланием об одиночестве нашей цивилизации во Вселенной, безмерные пространства которой если где-то и населены, то скорее всего одноклеточными. Можно закончить такими словами из передовой статьи в выпуске журнала New Scientist, целиком посвященном находкам в ALH 84001: «Возможно, мы — одна из первых развитых цивилизаций [в Галактике], обреченная блуждать в космосе и находить массу протоплазмы, но никого, с кем можно было бы поговорить».

Другие ограничения на обитаемость планет

Некоторые сведения о вероятном присутствии в гипотетической планетной системе тел, пригодных для обитания, получены из модельных экспериментов на ЭВМ. Задавалась модель пылевого облака и число ядер конденсации, под действием которых в дальнейшем формировались планеты. Оказалось, что деление планет на «земную группу» и планеты-гиганты типично. Во всех случаях на расстоянии, близком к 1 а.е., присутствует планета (одна или несколько) с массой, близкой к массе Земли. В одном случае получилась планетная система с гигантом втрое массивнее Юпитера, находящимся примерно на орбите Меркурия (вроде случая 70 Девы). Однако учет других факторов — таких, как разрушение планетезималей вблизи предела Роша, а также слишком большие скорости их столкновений делают проблематичным существование таких планет.

Если предположить, что расчеты, выполненные для звезды с массой Солнца, типичны и для других звезд с близкой массой, планета с температурным режимом, пригодным для возникновения белково-нуклеинокислотной формы жизни, может существовать в произвольной планетной системе. Разумеется, это зависит и от состава такой планеты, наличия у нее атмосферы, достаточного количества воды и т.д.

Важный для существования жизни фактор — это подходящий период вращения планеты. Так, слишком долгая ночь, вероятно, помешала бы развитию растений, использующих фотосинтез. Напомним, что длительность

солнечных суток на Венере составляет 117 земных суток. Вероятно, это слишком много. С другой стороны, планета может иметь подходящий период вращения, но слишком большой наклон оси к плоскости орбиты, как Уран. Длительность полярной ночи, попеременно охватывающей там целое полушарие, северное или южное, составляет половину орбитального года. Можно предположить, что столь длительная полярная ночь также не способствует развитию жизни на планете.

Еще один существенный фактор — гравитация. Планеты группы Земли имеют малые массы. Если предположить, что в комфортной зоне оказалась планета с большой массой, физические условия на ней, по-видимому, отличались бы от земных. Так, большая масса привела бы к удержанию легких газов в атмосфере, следовательно, другим был бы ее состав. Повышенное давление у поверхности сместило бы в область высоких температур точку кипения жидкостей. Характер экологических ниш на такой планете также отличался бы от планет малой массы уже хотя бы потому, что функционирование живых организмов в условиях повышенной силы тяжести потребовало бы больших энергетических затрат на передвижение, более сильных мышц и т.д. Хорошая иллюстрация сказанного — изменение характера ходьбы человека в условиях малого ускорения свободного падения. Напомним, что космонавты на Луне перешли от нормального шага к «порхающему», который оказался там более удобным.

Дать какие-либо количественные оценки оптимальной массы планеты трудно. Поэтому разумно принимать ее близкой к массе Земли.

Мы здесь совершенно не касались другой стороны проблемы — оценки реальной вероятности возникновения живых форм материи. Это не наша тема. Генетики и биофизики находят проблему настолько сложной, что она порой ставит их в тупик. И хотя до преодоления основных трудностей еще далеко, вывод о чрезвычайно низкой вероятности появления высших форм жизни даже на пригодной для нее планете вряд ли изменится в дальнейшем. Поэтому поиск обитаемых планет можно уподобить ожиданию выигрыша в особой лотерее, где единственный приз разыгрывается дважды и выплачивается, только если в обоих случаях выпал на один и тот же билет.

Из множества физических условий, которыми природа ограничивает возможность возникновения и развития единственной известной аминокислотной формы жизни на планете, перечислим основные, которые образуют своеобразный лабиринт со множеством

тупиков. Прежде всего планету, пригодную для возникновения жизни, следует искать только в планетных системах звезд, начиная от спектрального класса F до ранних подклассов K. Такая планета должна обладать следующими особенностями:

- масса около $5 \cdot 10^{27}$ г,
- наличие зон с комфортным для аминокислотной формы жизни интервалом температур окружающей среды,
- способность атмосферы поглощать внешнюю жесткую радиацию,
- доступ сквозь атмосферу к поверхности фотонов с $E = 1 - 3$ эВ,
- достаточная плотность лучистой энергии,
- наличие других (химических) источников энергии, например, окислительной среды и окисляемых материалов,
- умеренный уровень гравитации планеты,
- не слишком большой период вращения,
- наличие открытых водоемов и водяного пара в атмосфере,
- наличие на планете континентов или крупных островов,
- наличие достаточно близкого и массивного спутника,
- величина большой полуоси орбиты достаточно жестко определяется светимостью звезды,
- умеренный эксцентриситет орбиты,
- наклон экватора к плоскости орбиты не должен быть большим,
- важную роль играет вулканизм и/или тектоника плит,
- космические катастрофы могут вызывать обновление видов и появление среди них наиболее приспособленных.

Земля представляет собой уникальное сочетание физических свойств, необходимых для эволюции аминокислотной формы жизни и ее перехода к многоклеточным формам, не повторяющееся ни на одной из планет земной группы. Анализ показывает, что лишь очень узкие интервалы многих параметров и их сочетания могут обеспечить условия, необходимые для возникновения аминокислотной формы жизни и ее эволюции в разумные формы. Возможно ли подобное сочетание на планетных системах других звезд — станет ясно не раньше, чем системы, подобные Солнечной, будут реально обнаружены.

Если вдуматься, весь ход наших рассуждений в конечном счете ведет к Земле, как к единственному подходящему для обитания месту. Но правильно ли это? Может быть, для кого-то комфортны совсем другие условия?

Представим себе, что где-то там, в далеком будущем, в каком-то космическом эксперименте на планете некоей звездной системы в условиях высоких температур и давлений, как на Венере, найдены живые существа. Что сказала бы по этому поводу биохимия? И какие понадобились бы новые критерии и диаграммы?

В правой части первой панорамы Венеры, полученной 22 октября 1975 г. (представленной в обработанной версии на рис. 3.16), виден предмет диковинной формы, размером около 30 см. Насколько можно различить, вся его поверхность покрыта странными наростами, причем в их положении можно увидеть какую-то симметрию. Влево от предмета выступает длинный прямой белый отросток, под которым, повторяя его форму, видна глубокая тень. Белый отросток очень похож на прямой хвост. С противоположной стороны предмет оканчивается большим белым округлым выступом, похожим на голову. Весь предмет покоится на короткой толстой «лапе». Разрешение снимка недостаточно, чтобы можно было четко различить все детали загадочного предмета. Если, ничего не добавляя, выделить его цветом, получается странное существо, показанное на фото 77. Телевизионная камера эту часть панорамы передала дважды: при прямом и обратном ходе развертки изображения. За исключением черной точки на хвосте, которая связана с помехой, все детали предмета полностью повторены на каждой из панорам. Повторен даже странный венчик из белых пятен вокруг «хвоста».

Удивительное это существо. В центральной части «головы» что-то вроде глаза циклопа. «Голова» массивная, приплюснутая. На «спине» — пара коротких крыльев с наростами вроде перьев. Именно такие крылья-плавники достаточны были бы для полета в очень плотной атмосфере Венеры. На «загравке» еще одна пара совсем коротких «плавников». Две «лапы» — мы видим одну из них — короткие, толстые, с расширенной ступней. Нижняя часть туловища лишена наростов, покрывающих «крылья». Вокруг основания «хвоста» — венчик из расположенных полукругом белых пятен. «Хвост» длинный, прямой.

Неужели «Венера-9» опустилась рядом с живым обитателем планеты? В это уж очень трудно поверить. К тому же за 8 мин, что прошло до возвращения объектива телекамеры к предмету, он совершенно не изменил своего

положения. Это странно для живого существа. Вероятнее всего, мы видим камень необычной формы, похожий на вулканическую бомбу размером 25—30 см. Другие детали — «голова», например, — проецируются на него случайно. Случайна также кажущаяся симметрия форм и непонятный венчик вокруг «хвоста». Это просто вулканическая бомба. С хвостом.

Опубликование этого снимка в 1978 г. вызвало волну писем читателей, которые очень хотели видеть на нем подлинного обитателя Венеры. Не помогли никакие ссылки на непригодность атмосферы Венеры для дыхания, на отсутствие источников энергии для существования на ее поверхности... А цель публикации была несколько иной.

История науки показывает, что как только появляется новый экспериментальный факт, теоретики, как правило, быстро находят ему объяснение. Можно даже предсказать, каким было бы это объяснение: синтезированы весьма термостойкие органические соединения, в которых используется энергия так называемых пи-электронных связей. Такие полимеры способны выдержать температуру до 1 тыс. градусов и более. Поразительно, но некоторые земные бактерии используют пи-электронные связи в своем метаболизме, однако не для повышения теплостойкости, а для связывания атмосферного азота (что неизбежно требует огромной энергии связей). Как видим, «заготовки» для моделей высокотемпературных живых клеток природа создала даже на Земле.

Но может быть, где-то во Вселенной действительно существуют такие организмы?

Здесь автор прощается с читателем.

Земля — уютный родительский дом человечества. Но в стремлении людей увидеть, узнать, постигнуть Земля уже теперь становится им тесной. Их большим домом, по видимому, станет вся Солнечная система, самые далекие миры которой будут известны нашим близким потомкам не хуже, чем удаленные уголки Земли. Но людям всегда будет дорога зелено-голубая Земля, где когда-то зародилось величайшее чудо природы — жизнь и разум.

В своих бесконечных поисках ученые обнаружат планеты и у других звезд, которые, как и наша Солнечная система, хранят бесчисленное множество загадок для науки будущих времен. Как сказал Сенека, «Природа не раскрывает свои тайны раз и навсегда».

Некоторые характеристики планет

Характеристики	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
Среднее расстояние от Солнца, а.е.	0,387	0,723	1	1,524	5,203	9,539	19,182	30,058	39,439
млрд. км	0,058	0,108	0,1496	0,228	0,778	1,427	2,870	4,497	5,9
Сидерический период обращения, лет	0,24	0,62	1	1,88	11,86	29,46	84,01	164,8	247,7
Синодический период, лет	0,32	1,60	—	2,14	1,09	1,04	1,01	1,006	1,00
Звездный период вращения, суток	58,7	243	0,996	1,03	0,413	0,444	0,718	0,739	6,39
Орбитальная скорость средняя, км/с	48	35	30	24	13	9,6	6,8	5,4	4,7
Эксцентриситет орбиты	0,206	0,007	0,017	0,093	0,048	0,056	0,047	0,009	0,250
Наклонение орбиты к плоскости эклиптики, град.	7,0	3,4	—	1,9	1,3	2,5	0,8	1,8	17,2
Масса, г	3,30·10 ³⁶	4,87·10 ²⁷	5,98·10 ²⁷	6,42·10 ²⁶	1,90·10 ³⁰	5,69·10 ²⁹	8,68·10 ³⁸	1,02·10 ²⁹	1,4·10 ²⁵
Масса, в массах Земли	0,055	0,815	1	0,107	318	95,1	14,5	17,2	0,002
Средняя плотность, г/см ³	5,44	5,24	5,52	3,94	1,27	0,64	1,285	1,64	2?
Экваториальный радиус, км	2439	6051	6378	3394	71 392	60 268	25 559	24 765	1400
Полярный радиус, км	—	6051	6357	3376	69 894	58 300	25 270	24 340	—
Ускорение свободного падения у поверхности или у поверхности облачного слоя на экваторе	0,38	0,905	1	0,38	2,54	1,06	0,86	1,11	0,06
Момент инерции	0,324	0,34	0,3309	0,377	0,20	0,22	0,23	0,29	0,39?
Альбедо	0,082	0,77	0,39	0,16	0,70	0,75	0,90	0,82	0,2?
Плотность солнечной радиации на орбите, кВт/м ²	9,08	2,60	1,36	0,59	0,05	0,015	0,004	0,0015	0,0009
Поглощаемая планетой солнечная радиация, 10 МВт	1600	700	1090	180	2400	430	8	5,4	0,04
Эффективная температура, К	435	228	255	216	134	97	57	57	32
Количество спутников	—	—	1	2	16	17	15	8	1
Атмосферное давление у поверхности, бар	—	90	1	6,1·10 ⁻³	—	—	—	—	—
Основные составляющие атмосферы, объемные %	—	CO ₂ ~96% N ₂ ~4%	N ₂ ~79% O ₂ ~21%	CO ₂ ~95% N ₂ ~2,5% Ar~1,6%	H ₂ ~89% He~11%	H ₂ ~94% He~6%	H ₂ ~88% He~12%	H ₂ ~90% He~10%	Ar, Ne, CH ₄

и небольшие примеси других газов