

С. А. Язев

ЛЕКЦИИ О СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ



С. А. ВОЛЕВ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2011



ЛЕКЦИИ О СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Генеральный директор
Федерального государственного
экономического университета
В. Г. СУРДИНА

Издательство
«ЛАНЬ»



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2011

С. А. ЯЗЕВ

ЛЕКЦИИ О СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Под редакцией кандидата
физико-математических наук
В. Г. СУРДИНА

*Издание второе,
исправленное и дополненное*



ЛАНЬ®
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ·
МОСКВА ·
КРАСНОДАР ·
2011

ББК 22.68я73

Я 40

Язев С. А.

Я 40 Лекции о Солнечной системе: Учебное пособие / Под ред. В. Г. Сурдина. 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 384 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-1253-2

Учебное пособие, посвященное изложению современных данных об объектах, входящих в состав Солнечной системы, с использованием информации, полученной с помощью методов космонавтики. Рассмотрены планеты и их спутники, Главный пояс астероидов и пояс Койпера, кометы, Солнце, основные вопросы космогонии Солнечной системы. Отдельно изложены современные представления об астероидной опасности.

Пособие предназначено для студентов направлений подготовки и специальностей «География», «Геология», научных журналов, старших школьников, всех читателей, интересующихся астрономией и космонавтикой.

ББК 22.68я73

Рецензент

В. М. ГРИГОРЬЕВ, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, зам. директора ИСЗФ СО РАН

Обложка

А. В. ПАНКЕВИЧ

*Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2011

© С. А. Язев, 2011

© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

На протяжении многих лет в процессе изучения астрономии в отечественных университетах использовался классический учебник П. И. Бакулина, Э. В. Кононовича и В. И. Мороза «Курс общей астрономии», изданный массовым тиражом в 1983 г.

Тем не менее упомянутый учебник, а также его прекрасный современный вариант (Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии, 2004) предназначены для будущих профессиональных астрономов. Значительная часть излагаемого в них материала в большинстве случаев остается невостребованной студентами-неастрономами. С другой стороны, учебник быстро устаревает (это не недостаток авторов, но преимущество стремительно развивающейся астрономии). Кроме того, там отсутствует специфический материал, касающийся, например, номенклатуры названий небесных тел и объектов на их поверхности, что важно и интересно студентам географических специальностей. Представляется целесообразным расширение той части курса, адресованного студентам-географам, которая касается вопросов сравнительной планетологии. Это позволило бы рассматривать планету Земля в общем контексте ее связи с историей формирования и эволюции Солнечной системы, делая особый упор на космогенные факторы, влияющие на развитие геосистемы.

Учебное пособие «Лекции о Солнечной системе» предназначено в первую очередь для студентов географических и геологических факультетов. Кроме того, оно может быть

рекомендовано будущим журналистам, которые намерены писать на космические темы, и всем, кто интересуется астрономией. Пособие представляет собой краткий ознакомительный курс сравнительной планетологии, рассматривающий планеты, их спутники, Главный пояс астероидов, планеты-гиганты, объекты пояса Койпера, кометы и Солнце. В первых лекциях курса приведена информация о составе и строении Солнечной системы, законе Всемирного тяготения и его следствиях — законах Кеплера и феномене приливов. Рассмотрение планет земной группы в сопоставлении с данными о Земле позволяет уяснить место Земли в ряду других объектов Солнечной системы, осознать связь условий на Земле с внешними космическими причинами. В пособии использованы современные данные о планетах и малых телах Солнечной системы, полученные с помощью миссий межпланетных космических аппаратов и пока еще не вошедшие в учебники и энциклопедии. Особое место в пособии занимают современные данные об астероидах и астероидной опасности. Учитывая ограниченный объем математической подготовки студентов специальности «География», в пособии минимизировано использование математического аппарата, и основной упор делается на описании природы рассматриваемых небесных тел.

Автор счел необходимым прямо указывать и обсуждать вопросы, которые еще не получили окончательного ответа либо имеют альтернативные интерпретации. В астрономии, несмотря на ее стремительное развитие, еще много белых пятен. Очевидно, нет смысла скрывать от студентов это обстоятельство и создавать ложное впечатление, что теория Солнечной системы полностью построена и завершена. Автор надеется, что ознакомление с открытыми на сегодняшний день интересными вопросами может оказаться для студентов стимулом для их будущей работы в сфере научных исследований, в том числе имеющих отношение к астрономии.

При подготовке пособия использовались базовый вузовский учебник «Общий курс астрономии» Э. В. Коновича и В. И. Мороза (2004), «Справочник любителя ас-

трономии» П. Г. Куликовского (2002), книги Л. В. Ксанфомалити «Парад планет» (1997), О. Г. Сорохтина «Эволюция и прогноз изменений глобального климата Земли» (2006), С. А. Вишневого «Астроблемы» (2007), коллективные монографии «Угроза с неба — рок или случайность?» (1999) под редакцией академика А. А. Боярчука, «Катастрофические воздействия космических тел» (2005) под редакцией академика В. В. Адушкина, «Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра» (2010) под редакцией члена-корреспондента РАН Б. М. Шустова и Л. В. Рыхловой, а также текущая информация о работе космических аппаратов «Кассини», «Венера-Экспресс», «Мессенджер», «Марс-Экспресс», «Стерео», «Новые горизонты» и других, статьи, размещенные на профессиональных астрономических сайтах.

Автор благодарен редактору пособия кандидату физико-математических наук В. Г. Сурдину, а также рецензентам — члену-корреспонденту РАН, доктору физико-математических наук В. М. Григорьеву и доктору физико-математических наук П. Г. Ковадло за полезные советы и рекомендации.

С. А. ЯЗЕВ

Иркутск, март 2011 г.



ПОНЯТИЕ О СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Во Вселенной распространены *планетные системы*, включающие в себя звезду и множество гравитационно связанных с ней менее массивных космических тел,двигающихся по своим траекториям (орбитам) вокруг общего центра масс. Вообще говоря, звезда может быть не одна: хорошо известны так называемые кратные звезды, когда вокруг общего центра масс могут двигаться несколько близко расположенных звезд.

Важным и естественным свойством планетных систем является общность происхождения и эволюции центральной звезды (звезд) и входящих в систему других космических тел.

Солнечная система представляет собой пример планетной системы, где вокруг общего центра масс обращаются одна звезда (Солнце) и множество космических тел разных типов (рис. 1.1). Поскольку масса Солнца составляет более 99% массы всей совокупности этих тел, центр масс Солнечной системы находится вблизи центра Солнца (внутри самого Солнца). Это позволяет упрощенно говорить, что все остальные тела Солнечной системы обращаются вокруг Солнца.

В перечне типов космических тел, находящихся на орбитах вокруг Солнца, можно указать *планеты* с обращающимися вокруг них спутниками планет и так называемые *малые тела* Солнечной системы, к числу которых относятся *карликовые планеты*, *астероиды*, *метеороиды*, *кометы*, а также *частицы пыли и газа*. Все имею-

щие данные указывают на то, что Солнечная система формировалась и развивалась как единое целое, и малые тела Солнечной системы вместе с Солнцем являются продуктом развития единого газопылевого облака.

Рассмотрим кратко объекты, которые входят в состав Солнечной системы.

Солнце. Звезда Солнце является основным системообразующим объектом Солнечной системы, содержащим более 99% вещества, входящего в систему. Солнце состоит преимущественно из водорода и гелия. Гигантская масса Солнца приводит, благодаря силе тяжести, к сильному нагреву вещества в чрезвычайно плотных недрах Солнца. При высоких давлениях и температурах в ядре звезды создаются условия для реакций *термоядерного синтеза*, в ходе которых при объединении ядер атомов водорода образуются ядра атомов гелия и некоторых других элементов. При этом выделяется энергия в виде интенсивного электромагнитного излучения. Это излучение, выходя на поверхность звезды, распространяется в окружающем пространстве, обеспечивая нагрев обращающихся вокруг

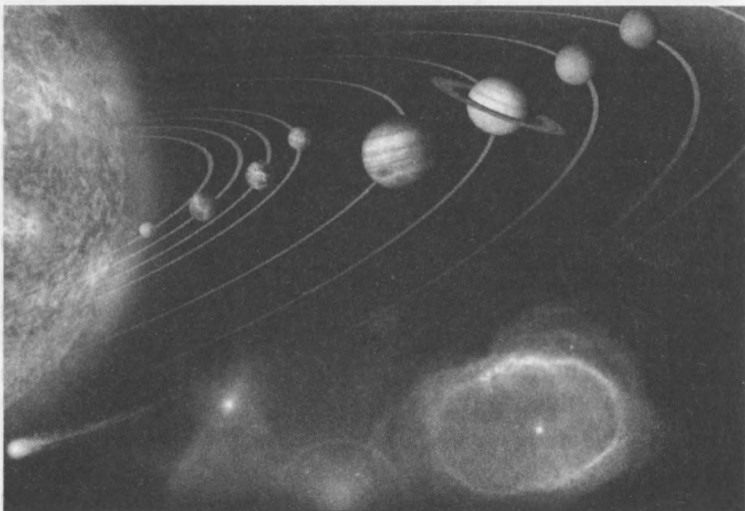


Рис. 1.1
Схема Солнечной системы

Солнца космических тел. По мере удаления от Солнца освещенность поверхности космических тел падает и их температура уменьшается почти до абсолютного нуля на больших расстояниях от Солнца.

Планеты. На протяжении длительного времени строго определения планеты не существовало, понятие *планеты* вводилось через описание свойств планет Солнечной системы. Издавна были известны хорошо наблюдаемые невооруженным глазом на темном ночном небедвигающиеся вокруг Солнца планеты Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн, которые выглядят как яркие звезды. Однако если взаимное расположение звезд остается практически неизменным на протяжении длительных промежутков времени, планеты заметно перемещаются по небу среди звезд, плавно меняя при этом свою яркость. Смещение планет относительно звезд и вызвало к жизни их название: слово «планетос» на древнегреческом языке означало «блуждающие».

Долгое время считалось, что все указанные планеты обращаются вокруг неподвижной Земли. В 1543 г. польский астроном Николай Коперник опубликовал свой труд «О вращении небесных сфер», в котором предлагалась иная идея: все указанные планеты вместе с Землей вращаются вокруг Солнца, причем Земля находится на третьем месте от Солнца, после Меркурия и Венеры. Позднее идея Коперника была подтверждена наблюдениями.

В 1781 г. английский астроном Вильям Гершель открыл с помощью телескопа седьмую планету Солнечной системы — Уран. Яркость Урана на небе невелика, и его очень трудно увидеть невооруженным глазом. В 1824 г. расчеты французского астронома Урбена Леверье, анализирувавшего отклонения в движении Урана от ожидаемой траектории, привели к открытию восьмой планеты — Нептуна. Тяготение Нептуна воздействует на движение Урана, что и позволило рассчитать местоположение этой планеты, а затем и обнаружить ее на небе.

Исследования планет позволили разделить их на две группы. Меркурий, Венера, Земля и Марс принято называть планетами земной группы. Это самые близкие к Солн-

цу планеты, сравнительно небольшие по размерам и достаточно плотные, имеющие в недрах плотное железоникелевое *ядро*, нагретую пластичную *мантию* и твердый поверхностный слой — *кору*. Планеты земной группы обладают небольшим количеством обращающихся вокруг них *спутников* (у Меркурия и Венеры спутников нет, у Земли — один, у Марса — два).

В группу планет-гигантов входят еще четыре планеты — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Это крупные (по сравнению с планетами земной группы) газовые шары невысокой плотности, состоящие преимущественно из водорода и гелия. У планет-гигантов обнаружено множество спутников разных размеров (всего более 160).

В 1930 г. американский астроном Клайд Томбо открыл планету Плутон, находящуюся еще дальше от Солнца, чем Нептун. Плутон оказался объектом, который трудно отнести к какой-либо из указанных групп. По размерам он невелик (меньше любой из планет земной группы), состоит из водяного льда с примесями. В конце XX — начале XXI в. за Нептуном началась серия открытий сходных с Плутоном объектов. Это привело астрономов к необходимости ввести строгое определение планеты. Необходимо было сделать выбор: либо относить вновь открываемые объекты к разряду планет (тогда общее количество планет Солнечной системы стало бы быстро нарастать по мере новых открытий), либо отнести Плутон и подобные ему объекты к новому, особому классу небесных тел.

В результате в августе 2006 г. XXVI Генеральная ассамблея Международного астрономического союза (МАС) приняла две резолюции, вводящие определение понятия *планеты*.

Согласно введенному определению, планета Солнечной системы — это небесное тело, которое:

- а) обращается вокруг Солнца;
- б) имеет форму, близкую к сферической;
- в) очистило окрестности своей орбиты.

Следует обратить внимание, что это определение относится только к планетам Солнечной системы и не касается планет, обращающихся вокруг других звезд.

Рассмотрим подробнее определение.

Требование а) введено для того, чтобы отличить планету от спутника планеты. В Солнечной системе есть спутники планет, которые по своим физическим характеристикам близки к планетам земной группы: обладают сходными размерами, массами и, возможно, сходным внутренним строением. Спутник Сатурна Титан даже обладает атмосферой. Тем не менее эти объекты не считаются планетами, поскольку сами движутся вокруг планет, а не вокруг Солнца.

Требование б), по сути, ставит нижний предел массе планеты, которой должно хватить для того, чтобы преодолеть предел пластичности горных пород. Самогравитация массивного небесного тела должна превосходить твердотельные силы, в результате тело должно принять гидростатически равновесную форму (близкую к сферической). Наблюдения показали, что для выполнения этого условия требуется масса не менее $5 \cdot 10^{20}$ кг, а соответствующий диаметр твердого тела — примерно 800 км. Это требование отделяет планеты от астероидов, чьи массы недостаточны, чтобы гравитация придала им сферическую форму. Известны астероиды самых разнообразных неправильных форм.

Требование в) указывает на условия формирования планеты, которая должна представлять собой доминирующую массу на своей орбите. Все сравнимые с ней массы на близких орбитах должны были либо упасть на планету, увеличив ее размеры, либо оказаться выброшенными из этой области пространства за счет гравитационных возмущений. Другими словами, планета должна обладать некоей минимальной достаточной массой, чтобы очистить окрестности своей орбиты от сходных по массе объектов.

В ходе обсуждения определения планеты предлагалось и четвертое требование: тело не должно быть звездой. Это ограничивало бы массу планеты сверху: при слишком большой массе плотность и температура вещества в ядре могут оказаться столь высокими, что могут запуститься реакции термоядерного синтеза. Поскольку термоядерные реакции суть признак звезды, а не планеты, это означает,

что масса планеты не должна быть настолько большой, чтобы там на каком-либо этапе эволюции могли вспыхнуть термоядерные реакции.

Это очевидное требование не включено в окончательное определение, поскольку является избыточным: как указано выше, рассматриваемые свойства планет относятся только к Солнечной системе, в которой существует единственная звезда — Солнце.

В результате, в соответствии с определением в Солнечной системе имеются 8 планет (их еще называют *классическими планетами*): это планеты земной группы — Меркурий, Венера, Земля и Марс, а также планеты-гиганты — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун.

Учитывая существование множества разнообразных планет в системах других звезд, очевидно, что в обозримом будущем МАС будет вынужден рассмотреть вопрос о более общем определении понятия «планета».

Карликовые планеты. Рассмотренное выше определение планеты привело к изменению статуса Плутона. С одной стороны, Плутон обладает почти сферической формой. Однако он движется вокруг Солнца не один: на близких орбитах присутствуют многочисленные тела так называемого *пояса Эджворта–Койпера* (или просто Койпера) сходных размеров и масс, и это означает, что Плутон не смог своим гравитационным влиянием «очистить» окрестности своей орбиты.

Для таких объектов, обладающих массой, достаточной, чтобы приобрести сферическую форму, но недостаточной, чтобы освободить окрестности орбиты от других тел, введено новое понятие «карликовая планета» (dwarf planet). Этот статус приобрели Плутон, транснептунный (находящийся за орбитой Нептуна) объект Эрида, близкий к Плутону по размерам, а также сферическая Церера — самый крупный объект в поясе астероидов между Марсом и Юпитером (диаметр Цереры превышает 900 км). Позже к этому списку добавились транснептунные объекты Хаумея и Макемаке. Некоторые астрономы считают, что карликовой планетой следует называть и Харон — самый крупный из трех спутников Плутона. Дело в том, что

Харон несущественно меньше Плутона (всего вдвое по размеру), в результате чего оба они обращаются вокруг общего центра масс системы Плутон–Харон, при этом указанная точка находится за пределами Плутона. Поэтому, строго говоря, нельзя утверждать, что Харон обращается вокруг Плутона. Оба объекта в определенном смысле равноправны. Можно сказать, что Плутон и Харон — это система из двух карликовых планет. Но пока эта точка зрения не получила официального признания.

Не исключено, что статус карликовой планеты может быть присвоен в будущем и некоторым другим астероидам, помимо Цереры. Это произойдет в случае, если выяснится, что они обладают сферической формой. Так, астероиды Паллада, Веста и Гигея прямо перечисляются в примечаниях к резолюции № 5 XXVI Генеральной ассамблеи МАС как претенденты на статус карликовых планет — если окажется, что эти объекты находятся в состоянии гидростатического равновесия (имеют форму шара). Нет сомнений, что будущие открытия новых транснептуновых объектов пополнят список карликовых планет в Солнечной системе.

Астероиды. Первый астероид был обнаружен итальянским астрономом Джузеппе Пиацци в ночь на 1 января 1801 г. Поскольку даже в телескоп диск объекта не был виден (объект выглядел, подобно звездам, как светящаяся точка), был предложен термин «астероид» (звездopodobный, похожий на звезду). Этот термин можно признать неудачным, поскольку по физическим свойствам астероиды близки к планетам (поэтому в прошлом их нередко называли «малыми планетами»), но совершенно не похожи на звезды. По-видимому, более адекватным был бы термин «планетоид». Тем не менее термин «астероид» сохранился и в соответствии с рекомендациями Международного астрономического союза используется как основной.

Открытый Пиацци самый крупный из астероидов Церера размерами более 900 км переведен в 2006 г. в разряд карликовых планет. Что же касается остальных астероидов, то в пространстве между орбитами Марса и Юпитера их обнаружено более пятисот тысяч, и число известных

объектов ежегодно увеличивается. Крупные размеры (порядка сотен километров) всего у нескольких из них, большинство астероидов имеет размеры в десятки и единицы километров. По некоторым оценкам, Главный пояс астероидов между Марсом и Юпитером насчитывает порядка миллиона объектов, и это означает, что большинство из них пока не открыто. Астероиды имеют самые разнообразные формы и разделяются на несколько типов по своим физическим свойствам. Подробнее о них будет рассказано ниже.

Метеороиды. Термин «метеороид» появился относительно недавно и предназначен для обозначения космических тел, обычно служащих причиной вспышек метеоров и болидов в атмосфере Земли. Строгого определения метеороидов, имея в виду их размер и массу, пока нет. Но специалисты, говоря о метеороидах, обычно имеют в виду диапазон от микроскопических частиц размером в доли миллиметра до камней размером вплоть до 10 метров («от пылинок до булыжников»).

Объекты пояса Койпера. Во второй половине XX в. начались открытия крупных ледяных объектов за орбитой Нептуна. Их совокупность называется поясом Эдварта–Койпера или поясом Койпера (в память об американском астрофизике Джерарде Койпере, одним из первых обсуждавшем существование такого пояса). В настоящее время известны более тысячи объектов пояса Койпера, и число известных объектов быстро растет. Среди них есть объекты с характерным размером в несколько сотен и даже первых тысяч километров.

Среди наиболее крупных объектов пояса Койпера можно упомянуть Эриду, Плутон, Кварвар и Седну. Все они состоят из водяного льда с примесями и существуют на больших удалениях от Солнца при крайне низких температурах. Очевидно, что открытия новых, ранее не известных объектов пояса Койпера будут продолжаться.

Кометы. Кометами называют небесные тела, состоящие из водяного льда с вкраплениями пыли. Размеры кометного ядра обычно составляют порядка 10 км. Кометы движутся вокруг Солнца, как правило, по вытянутым

орбитам. Периодически приближаясь к Солнцу, ядро кометы начинает нагреваться. Из трещин и пор в теле ядра кометы начинают бить струи газа, увлекающие за собой пылевую компоненту. Газопылевое облако, окружающее ядро кометы, под давлением солнечного света и *солнечного ветра* (потока частиц, испускаемого Солнцем) вытягивается в протяженный *хвост*, чья длина иногда достигает многих десятков миллионов километров. Удаляясь по своей орбите от Солнца, комета со временем теряет свой хвост, рассеивающийся в космическом пространстве. При очередном сближении с Солнцем процесс повторяется. В результате ядра комет поставляют в околосолнечное пространство частицы пыли и газа, в то время как сами они уменьшаются в размерах, отдавая вещество при каждом проходе вблизи Солнца. Спустя некоторое время (несколько сотен или тысяч проходов вблизи Солнца) ядра комет разрушаются окончательно, а по кометной орбите продолжает двигаться рой обособленных частиц, образуя так называемые метеорные потоки.

Пылевые частицы. В Солнечной системе присутствует большое число микроскопических частиц (пылинок) разного происхождения — как фрагментов разрушенных астероидов, так и остатков кометных ядер. Не исключено, что в числе пылевых частиц есть и древние пылинки, сохранившиеся со времен существования первичного газопылевого облака, породившего Солнечную систему. Пылевые частицы могут быть также названы микрометеороидами.

Возраст и размеры Солнечной системы. Возраст Солнечной системы определен достаточно точно — около 4,6 млрд лет. Данные радиоизотопного анализа многочисленных образцов метеоритов (упавших на поверхность Земли фрагментов астероидов) показывают, что все они образовались приблизительно одновременно 4,6 млрд лет назад. По-видимому, таков же возраст Солнца и всех малых тел Солнечной системы (исключая часть пылевой компоненты, которая может оказаться старше).

Что касается размеров Солнечной системы, то это более сложный вопрос. Расстояния в Солнечной системе тра-

диционно измеряются в так называемых астрономических единицах длины, или просто астрономических единицах, сокращенно а. е. Одна а. е. — это среднее расстояние от Солнца до Земли, равное 149,6 млн км. Долгое время границей Солнечной системы условно считалась орбита Плутона (примерно 40 а. е. от Солнца), поскольку предполагалось, что Плутон — наиболее удаленная от Солнца планета. В то же время известны кометы, дальняя точка орбит которых оказывается значительно дальше орбиты Плутона (до сотни и более а. е.). Кроме того, в настоящее время известно большое количество объектов пояса Койпера. Они движутся по разнообразным орбитам, включая довольно вытянутые, удаляясь от Солнца на многие десятки а. е. Очевидно, что это огромное пространство тоже должно быть отнесено к Солнечной системе.

Еще один подход, предлагающий определить условную границу Солнечной системы, заключается в следующем. В качестве основного параметра можно взять отношение плотностей потока частиц, истекающих от Солнца, и частиц, приходящих от других звезд. Объем пространства, окружающий Солнце, в котором плотность потока частиц от Солнца больше плотности встречного потока частиц, летящих от других звезд, принято называть *гелиосферой*. Граница гелиосферы также может рассматриваться как граница Солнечной системы. Ее положение пока не определено экспериментально (с помощью космических аппаратов, летящих в настоящее время от Солнца на расстояниях более 80 а. е.). По некоторым данным, в настоящее время эти аппараты приближаются к границе гелиосферы, однако ее еще не достигли. Есть основания считать, что гелиосфера несимметрична, ее форма существенно отличается от сферической. Кроме того, размеры гелиосферы меняются со временем в зависимости от уровня солнечной активности (об этом в лекции о Солнце). Ожидается, что прямые измерения подтвердят гипотезу о том, что средний радиус гелиосферы составляет 100...150 а. е.

Тем не менее, по-видимому, логично считать относящимся к Солнечной системе весь объем пространства, в котором находятся на замкнутых орбитах гравитационно

связанные с Солнцем объекты. Максимальное расстояние, в пределах которого простирается гравитационное влияние Солнца, ограничено так называемой *сферой Хилла*. Радиус этой сферы — это расстояние, на котором может двигаться тело малой массы, оставаясь спутником Солнца, в предположении, что все остальные звезды нашей Галактики сосредоточены в галактическом центре. Такое расстояние для Солнца согласно расчетам составляет 230000 а. е. Эту величину можно рассматривать как теоретическую границу Солнечной системы. Чтобы ее достигнуть, солнечному свету требуется 3,65 года (т. е. это расстояние равно 3,65 светового года. Один *световой год* — это расстояние, которое свет проходит за год. Оно равно 63000 а. е., или $9,46 \cdot 10^{12}$ км).

Заметим, что расстояние от Солнца до ближайшей к Солнечной системе звезды (Проксимы в созвездии Кентавра) составляет около 4,2 светового года, а радиус собственной сферы Хилла для кратной звезды Альфа Кентавра, в которую входит Проксима, должен превышать размер сферы Хилла для Солнца (поскольку суммарная масса трех звезд этой системы вдвое больше массы Солнца). Отсюда неизбежен вывод о том, что сферы Хилла соседних звезд могут пересекаться. При определенных условиях в зоне пересечения сфер Хилла соседних звезд может, по-видимому, происходить обмен веществом. В результате теоретически допустим переход на замкнутые орбиты вокруг Солнца объектов, ранее принадлежавших соседней планетной системе, и наоборот.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определения типов небесных тел, входящих в состав Солнечной системы.
2. Почему Харон, ранее считавшийся спутником Плутона, относится к разряду карликовых планет, а спутник Юпитера Каллисто, имеющий размеры, сопоставимые с размерами планеты Меркурий, продолжает считаться спутником?
3. Сколько километров и сколько астрономических единиц входит в один световой год?
4. Рассчитать в световых минутах максимальное расстояние от Земли до Меркурия (около 1,4 а. е.) и до Плутона (около 50 а. е.).



ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ И ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

На сегодняшний день известны 4 типа физических сил, действующих в природе. Два из них называются силами ядерного взаимодействия (сильного и слабого) и работают только на расстояниях, сравнимых с размерами атомного ядра. Другие два можно назвать дальнедействующими, поскольку сфера их действия распространяется, строго говоря, на бесконечное расстояние, асимптотически стремясь к нулю. Это *электромагнитная* и *гравитационная* силы. Кроме того, на рубеже XX–XXI вв. обнаружены признаки существования пятой — *антигравитационной* силы, ускоряющей расширение Вселенной на расстояниях, превышающих размер Галактики. В масштабах Солнечной системы ее влиянием можно пренебречь.

Как известно, электромагнитная сила действует между телами, несущими электрический заряд. Однако подавляющее большинство объектов во Вселенной электрически нейтральны. В результате получается, что единственная известная сила, действующая на массивные небесные тела в пределах рассматриваемой нами Солнечной системы, — это гравитационная *сила*, или сила тяготения (тяжести). Эта фундаментальная сила не может быть сведена к совокупности действий иных сил.

Закон тяготения был открыт и сформулирован Исааком Ньютоном. Вывод выражения для закона тяготения основан на наблюдениях движений пробных тел вблизи поверхности Земли и вдали от нее. В качестве удаленного

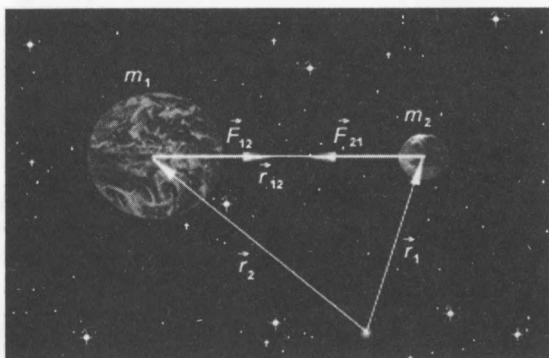


Рис. 2.1
Закон
всемирного
тяготения

от Земли тела Ньютон использовал Луну (рис. 2.1). Его рассуждения выглядели так.

На поверхности Земли (т. е. на расстоянии в один радиус Земли от ее центра) ускорение падающего свободно тела равно $9,81 \text{ м/с}^2$. Рассчитаем центростремительное ускорение Луны при ее движении вокруг Земли, предположив для простоты, что Луна движется по окружности радиусом $R = 384000 \text{ км}$ (это около 60 радиусов орбиты Луны) с периодом $T = 27,3 \text{ сут.}$ Тогда центростремительное ускорение Луны составит

$$a_1 = \frac{v^2}{R} = \frac{(2\pi R)^2}{T^2} \cdot \frac{1}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = 0,27 \frac{\text{см}}{\text{с}^2}.$$

Ньютон обратил внимание на то, что Луна, находящаяся от центра Земли в 60 раз дальше, чем некое тело (например, яблоко) вблизи поверхности Земли, испытывает ускорение в $60 \times 60 = 60^2$ раз меньше, чем такое яблоко:

$$g' = 0,27 \text{ см/с}^2 = \frac{981}{3600} \text{ см/с}^2 = \frac{g}{60^2}.$$

Ученый счел, что такая закономерность не случайна. Он предположил, что сила притяжения меняется обратно пропорционально квадрату расстояния до центра Земли. Это предположение означало, что силу, которая удерживает Луну на ее орбите, можно рассматривать как силу притяжения Земли, ослабленную пропорционально отношению квадратов расстояний от центра Земли до Луны и от центра Земли до поверхности Земли.

Рассуждение оказалось верным. Это позволило сформулировать закон тяготения: любые две частицы материи взаимно притягивают друг друга, или тяготеют друг к другу, с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Математически закон записывается так:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}.$$

Коэффициент G называется постоянной тяготения или гравитационной постоянной. Многократные *прецизионные* (очень точные) измерения ее значения дают в системе СИ

$$G = 6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}.$$

Можно заметить, что гравитационная постоянная — чрезвычайно малая величина. Поэтому сила тяготения, или гравитации, оказывается чрезвычайно слабой. В результате практически невозможно обнаружить силу притяжения двух пробных тел друг к другу на поверхности Земли (например, двух студентов, сидящих рядом). Однако небесные тела (планеты, звезды, галактики) обладают гигантскими массами, по порядку величины многократно превышающими численное значение G . Поэтому оказывается, что, несмотря на свою слабость, именно сила тяготения является главной, ведущей, управляющей движениями всех небесных тел. Выяснилось, что траектории движений планет и их спутников, равно как и звезд, великолепно описываются законом тяготения. Поскольку оказалось, что закон работает на огромных расстояниях от Земли (миллиарды световых лет), а значит, работал и миллиарды лет тому назад (свет от удаленных небесных тел только сейчас дошел до нас с этих расстояний), закон тяготения принято называть законом всемирного тяготения, подчеркивая его всеобщность и фундаментальность в нашей Вселенной.

Некоторые космологические модели предусматривают возможность медленного изменения гравитационной постоянной со временем. На сегодняшний день экспериментально такое изменение достоверно не обнаружено, что позволяет считать G константой.

С помощью закона всемирного тяготения удалось объяснить ряд наблюдаемых особенностей в движении Луны, явление прецессии, приливы, сжатие планет-гигантов у полюсов, движения в системах двойных звезд, «взвесить» Землю и другие планеты. Опираясь на закон тяготения Ньютона, французский математик и механик Пьер Лаплас еще в 1798 г. утверждал, что свет от достаточно массивной звезды не сможет от нее уходить, предвосхитив тем самым наши представления о «черных дырах».

Раздел астрономии, изучающий движение небесных тел под действием гравитационного поля (поля тяготения), называется *небесной механикой*. Среди задач небесной механики принято различать прямые и обратные. Задачи первого типа заключаются в определении действующих на тело сил по заданному характеру движения небесного тела. Обратные задачи, которые обычно рассматриваются в небесной механике как основные, заключаются в выяснении закона движения тела, если действующие на него силы известны.

Если применить закон всемирного тяготения к рассмотрению параметров движения планеты в поле тяготения Солнца, можно получить так называемые *законы Кеплера*. С этой точки зрения законы Кеплера являются прямыми следствиями фундаментального закона физики — закона тяготения и могут быть выведены аналитически.

Исторически же сложилось так, что полученные Кеплером в начале XVII в. эмпирически (при анализе наблюдений действительного движения планет, в основном Марса) законы, наоборот, были использованы Ньютоном для выведения математической формы записи закона тяготения. Законы Кеплера, не будучи самостоятельными фундаментальными природными закономерностями, полезны при описании конкретных особенностей движений планет в гравитационном поле Солнца.

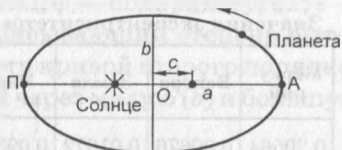
Первый закон Кеплера утверждает, что *все планеты движутся по эллиптическим орбитам, в общем фокусе которых находится Солнце*.

Эллипсом называется плоская фигура, обладающая следующим свойством. Эллипс — это совокупность точек,

Рис. 2.2

Эллиптическая орбита планеты

Солнце находится в одном из фокусов, равноудаленных от центра эллипса O . Большая полуось a равна полусумме максимального и минимального расстояний от планеты до Солнца, что обычно принимается за среднее расстояние между ними.



сумма расстояний от каждой из которых до двух точек, называемых *фокусами*, есть постоянная величина. Согласно первому закону Кеплера в одном из фокусов находится Солнце, во втором фокусе ничего нет. Фокусы расположены на *большой оси* эллипса на одинаковых расстояниях от центра эллипса — точки пересечения большой (АП) и *малой осей* эллипса.

Большая ось эллиптической орбиты называется в астрономии *линией апсид* (рис. 2.2).

Все планеты движутся по эллиптическим орбитам, то приближаясь к Солнцу, то удаляясь от него. Если расстояние между Солнцем и планетой является минимальным, мы говорим, что планета находится в *перигелии* своей орбиты (эта точка обозначена П на рис. 2.2, греческая приставка «пери» означает «вблизи», корень «гелий» — от греческого «гелиос» (Солнце). Наиболее удаленную от Солнца точку орбиты принято называть *афелием* (обозначение А на рис. 2.2, греческая приставка «апо» означает «вдали»).

Форма эллипса описывается степенью его вытянутости, или мерой отличия от окружности. Выразить вытянутость эллипса можно отношением малой и большой осей эллипса либо с помощью величины, называемой *эксцентриситетом*. Эксцентриситет эллипса — это отношение расстояния от центра эллипса до одного из фокусов к большой полуоси орбиты ($e = c/a$). Если фокусы эллипса сдвигать друг к другу, эксцентриситет будет уменьшаться. Когда фокусы сольются в центре симметрии эллипса, последний превратится в окружность, а эксцентриситет обратится в ноль. Таким образом, можно утверждать, что круговые орбиты также допускаются первым законом Кеплера, поскольку являются его частным случаем.

Таблица 2.1

Значения эксцентриситетов орбит планет Солнечной системы

Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
0,20564	0,00676	0,01672	0,09344	0,04890	0,05689	0,04634	0,01129

Расстояние планеты от Солнца в перигелии равно

$$q = a(1 - e),$$

в афелии —

$$Q = a(1 + e).$$

Большая полуось орбиты

$$a = \frac{(q + Q)}{2}$$

принимается за среднее расстояние планеты от Солнца.

Орбиты планет Солнечной системы отличаются небольшими эксцентриситетами (табл. 2.1).

Как видно из таблицы, наиболее отличаются от окружностей орбиты Меркурия и Марса, ближе всего к круговой — орбита Венеры. При среднем расстоянии от Солнца до Земли 149,6 млн км, за счет ненулевого эксцентриситета ее орбиты, расстояние до Солнца то уменьшается примерно на 2,5 млн км в перигелии, который наша планета проходит в начале января, то увеличивается на 2,5 млн км по сравнению со средним значением спустя полгода, в начале июля, во время прохождения точки афелия.

Первый закон Кеплера позволил существенно улучшить точность расчетов положений планет на небе по сравнению с первым вариантом системы Коперника, в рамках которой все орбиты планет полагались круговыми.

Первому закону Кеплера можно придать аналитическое выражение в виде уравнения кривой второго порядка, если в плоскости орбиты планеты ввести полярные координаты с полюсом в центре Солнца:

$$r = \frac{P}{1 + e \cos \varphi}. \quad (2.1)$$

Здесь r — радиус-вектор планеты; φ — полярный угол; e — эксцентриситет (параметр, описывающий степень вытянутости эллипса); P — параметр кривой второго порядка, выражаемый в случае эллипса через малую (b) и большую (a) полуоси эллипса:

$$P = \frac{b^2}{a}.$$

Ньютон показал, что первый закон Кеплера может быть обобщен. Выяснилось, что тело в поле тяготения Солнца может двигаться не только по эллипсу. В зависимости от скорости в числе возможных траекторий могут быть окружность (которая, как указано выше, представляет собой частный случай эллипса с нулевым эксцентриситетом), эллипсы с разными значениями эксцентриситета, парабола и гипербола. Поскольку парабола и гипербола — это незамкнутые кривые, то движение по ветви параболы или гиперболы означает преодоление силы тяготения Солнца и возможность ухода из Солнечной системы. Вид кривой определяется скоростью движения.

Рассмотрим простейший случай движения планеты с массой m со скоростью V по окружности на расстоянии R от Солнца. Массу Солнца обозначим M . На планету действует сила тяготения Солнца

$$F = G \frac{Mm}{R^2}. \quad (2.2)$$

Если планета по условию движется по круговой орбите, то центростремительное ускорение запишется в виде

$$a = \frac{V^2}{R}.$$

Согласно третьему закону Ньютона всегда можно записать, что сила, действующая на тело, равна произведению его массы на ускорение:

$$F = ma.$$

Поскольку единственная сила, которая действует на планету, это и есть сила тяготения, а ее ускорение — это центростремительное ускорение, можно записать

$$\frac{mV^2}{R} = \frac{GMm}{R^2}.$$

Отсюда можно вывести выражение для величины круговой скорости движения планеты:

$$V = \sqrt{\frac{GM}{R}}. \quad (2.3)$$

Как видно, круговая скорость для планеты зависит только от расстояния до Солнца R . Масса Солнца $M = 1,989 \cdot 10^{30}$ кг и гравитационная постоянная G — константы. Для $R = 1$ а. е. круговая скорость $V = 29,8$ км/с. Это и есть средняя скорость движения Земли по орбите.

Из формулы видно, что скорость планеты зависит от расстояния до Солнца. Нетрудно догадаться, что наибольшая средняя скорость движения планеты — у Меркурия (47,9 км/с), наименьшая — у Нептуна (всего 5,4 км/с). Удаленные объекты пояса Койпера движутся с еще более низкими скоростями.

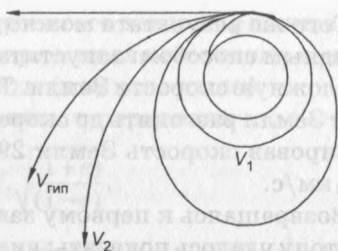
Нетрудно понять, что аналогичные рассуждения можно применить не только к Солнцу, но и собственно к планетам Солнечной системы. *Круговая*, или *первая космическая*, скорость искусственного спутника Земли V_1 при значении R , равном радиусу Земли (округленно 6378 км), и массе M Земли (равной $5,9742 \cdot 10^{24}$ кг) будет равна 7,91 км/с. Эта скорость позволяет спутнику вблизи поверхности Земли двигаться вокруг планеты и не падать на ее поверхность. На самом деле вблизи поверхности Земли создать спутник не получится: из-за трения об атмосферный воздух спутник быстро потеряет энергию и упадет. Поэтому спутники запускаются на высотах за пределами атмосферы.

Если увеличить R , например, до радиуса орбиты Луны (среднее значение равно 384400 км), круговая скорость существенно уменьшится и будет равна примерно 1 км/с. С такой скоростью, позволяющей ей не падать на Землю и двигаться по слабоэллиптической орбите, Луна обращается вокруг нашей планеты.

Что будет с телом, если его скорость будет постепенно увеличиваться по сравнению с первой космической? Круговая орбита превратится в эллипс, причем с изменением скорости будет меняться эксцентриситет орбиты. Меняя

Рис. 2.3
Форма траектории
снаряда (космического
аппарата) в поле тяготе-
ния Земли зависит
от скорости:

V_1 — первая космическая (кру-
говая) скорость. V_2 — вторая
космическая (параболическая)
скорость. Промежуточные ско-
рости дают набор эллиптиче-
ских траекторий.



скорость, мы получим целое семейство разных эллипсов, все более вытянутых. Наконец, при значении скорости $V_2 = \sqrt{2} \cdot V_1 = \sqrt{2} \cdot 7,91 \text{ км/с} = 11,2 \text{ км/с}$ вблизи поверхности Земли вытянутый эллипс «порвется» и превратится в разомкнутую кривую — параболу. Эксцентриситет e при этом будет равен 1. Это означает, что тело (например, космический аппарат) уже не будет двигаться по эллипсу вокруг Земли, а преодолеет ее притяжение и покинет окрестности нашей планеты навсегда. Вторая космическая скорость V_2 — минимальная скорость вблизи поверхности Земли, которая позволит космическому аппарату отправиться в межпланетное путешествие и уйти от Земли к другим планетам. При дальнейшем увеличении скорости парабола превратится в гиперболу ($e > 1$). При этом ветви гиперболы будут все больше раскрываться, в пределе приближаясь к прямой (рис. 2.3).

Любопытно, что космический аппарат, «убежав» от Земли, останется в поле тяготения тела большей массы — Солнца. Достигнув второй скорости относительно Земли, стартовав в направлении движения Земли, он не преодолеет второй космической скорости относительно Солнца на расстоянии $R = 1 \text{ а. е.}$, равной $\sqrt{2} \cdot 29,8 \text{ км/с} = 42,1 \text{ км/с}$. Можно достичь второй космической скорости относительно Солнца и добиться преодоления его тяготения, если к средней скорости движения Земли добавить дополнительную скорость космического аппарата $12,3 \text{ км/с}$ в направлении движения Земли и на таком удалении от нее, чтобы можно было пренебречь ее притяжением. Тогда суммарная скорость аппарата относительно Солнца составит $29,8 \text{ км/с} + 12,3 \text{ км/с} = 42,1 \text{ км/с}$.

Того же результата можно достичь энергетически невыгодным способом: запустить аппарат в сторону, противоположную скорости Земли. Тогда аппарат придется вдаля от Земли разгонять до скорости 71,9 км/с, чтобы, компенсируя скорость Земли 29,8 км/с, достичь скорости 42,1 км/с.

Возвращаясь к первому закону Кеплера, укажем, что Ньютону удалось показать: вид траектории тела в поле тяготения другого тела может представлять собой один из типов так называемых конических сечений: орбита может быть окружностью, эллипсом, параболой и гиперболой. Конкретные параметры орбиты тела зависят от скорости его движения.

Второй закон Кеплера характеризует скорость орбитального движения планеты: *радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади*. Этот закон может быть выражен либо в дифференциальной

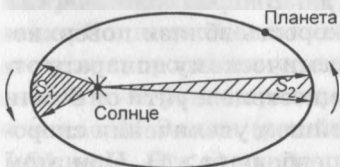


Рис. 2.4
Иллюстрация
второго закона Кеплера

$$\frac{dS}{dt} = \text{const} = \frac{c}{2}, \quad (2.4),$$

либо в интегральной форме

$$S = \frac{c}{2}t + S_0.$$

Здесь S — «ометаемая» радиусом-вектором площадь за рассматриваемый промежуток времени; c — константа, которая называется постоянной площадью (рис. 2.4), dS/dt — секториальная скорость.

Дифференциальная форма этого закона в полярных координатах имеет простой вид:

$$r^2 \frac{d\varphi}{dt} = c. \quad (2.5)$$

Смысл этого закона заключается в том, что планета движется вокруг Солнца неравномерно: вблизи перигелия быстрее, вблизи афелия — медленнее. Это хорошо видно из формулы (2.5): время, за которое планета преодолевает определенный полярный угол, прямо пропорционально квадрату расстояния до Солнца (радиус-вектора планеты).

Так, например, Земля быстрее всего движется вблизи точки перигелия (в начале января), медленнее всего — вблизи точки афелия своей орбиты (в начале июля).

Скорость движения планеты в перигелии

$$V_q = V_c \sqrt{\frac{(1+e)}{(1-e)}}, \quad (2.6)$$

в афелии —

$$V_Q = V_c \sqrt{\frac{(1-e)}{(1+e)}}. \quad (2.7)$$

$V_c = \sqrt{V_q \cdot V_Q}$ — средняя, или круговая, скорость планеты при расстоянии до Солнца, равном большой полуоси орбиты a .

Нетрудно видеть, что при движении по круговой орбите скорость движения постоянна. Различие в скоростях в точках перигелия П и афелия А нарастает по мере увеличения эксцентриситета. Соответственно наиболее велика эта разница для планеты с самой вытянутой орбитой — Меркурия: при средней скорости $V_c = 48$ км/с в перигелии орбиты эта планета движется со скоростью $V_q = 54$ км/с, что почти вдвое превышает среднюю скорость движения Земли.

Третий закон Кеплера связывает характеристики движения различных планет: *квадраты периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит*:

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{const.} \quad (2.8)$$

Оказывается, на данном расстоянии a от Солнца период обращения планеты T вокруг Солнца может быть не каким угодно, а лишь вполне определенным.

Большие полуоси орбит планет принято выражать в а. е., другими словами, в единицах среднего расстояния от Солнца до Земли, а периоды обращения планет — в земных годах, т. е. для Земли $a = 1$ и $T = 1$. В таких единицах измерения для любой планеты выражение 2.8 принимает простую форму:

$$T = \sqrt{a^3}. \quad (2.9)$$

Исследования, выполненные Ньютоном, уже на базе полученного им выражения для закона всемирного тяготения показали, что приведенная выше запись третьего закона Кеплера является упрощением. Строгая математическая формулировка этого закона выглядит таким образом:

$$\frac{T^2}{a^3} (M + m) = \frac{4\pi^2}{G}. \quad (2.10)$$

Здесь M — масса Солнца, m — масса планеты.

Еще раз следует подчеркнуть, что законы Кеплера, будучи следствиями закона тяготения, получены Кеплером эмпирически как обобщения наблюдательных данных.

Набор приведенных в этой лекции соотношений позволяет определять основные параметры траекторий небесных тел в Солнечной системе (и, конечно, не только в ней). Подчиняясь закону всемирного тяготения и его следствиям — законам Кеплера, движутся планеты, их спутники, астероиды и все остальные тела, входящие в Солнечную систему. Поскольку все тела гравитационно влияют друг на друга, реальные траектории движения оказываются значительно более сложными, чем описанные выше конические сечения. На параметры орбиты каждой планеты влияет (возмущает их) тяготение всех других планет. Так, например, возмущения орбиты Урана, порожденные тяготением неизвестной восьмой планеты, были зафиксированы в начале XIX в. Учет этих возмущений позволил французскому астроному Урбену Леверье рассчитать положение этой планеты, что и привело к открытию Нептуна в 1824 г. Иоганном Галле.

Астероиды могут существенно изменять параметры своих орбит из-за возмущений со стороны близкого к ним и очень массивного Юпитера, а порой и со стороны других астероидов. Двигающиеся в Главном поясе астероидов объекты нередко сближаются друг с другом, и учесть возмущения от многих объектов сходных масс достаточно сложно. Известны случаи, когда параметры орбиты астероида существенно изменялись на протяжении одного оборота вокруг Солнца. Расчеты возмущений орбит достаточно сложны и трудоемки. В настоящее время такие расчеты успешно реализуются на мощных компьютерах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему двое студентов, находящихся рядом, не ощущают гравитационного притяжения друг к другу?
2. Какие у нас есть основания считать закон тяготения всемирным (действующим во всей Вселенной)?
3. Дать словесные формулировки трех законов Кеплера.
4. Почему Луна не падает на Землю под влиянием закона всемирного тяготения?
5. Есть сведения, что скорости отдельных метеороидов, входящих в атмосферу Земли, превышают 72 км/с. Что можно сказать об их природе?
6. Известно, что средние скорости движения планет тем меньше, чем дальше планета находится от Солнца. Почему?
7. Эксцентриситет орбиты Земли составляет примерно 0,017. Используя материал из лекции, определите разность скоростей Земли в перигелии и афелии ее орбиты. Какова максимальная скорость движения Земли вокруг Солнца и когда в течение года это происходит?
8. Во сколько раз средняя скорость движения Земли превосходит среднюю скорость движения Плутона (большая полуось орбиты Плутона примерно равна 40 а. е.). Считать орбиты близкими к круговым.
9. С какой минимальной скоростью надо стартовать с Марса, чтобы получить возможность долететь до Земли? Большая полуось орбиты Марса равна 1,52 а. е.



ФОРМА НЕБЕСНЫХ ТЕЛ И ПРИЛИВНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Форма небесных тел. Сила тяготения не только определяет траектории движения небесных тел в пространстве, но и влияет на форму самих небесных тел. Во втором случае, поскольку величина гравитационной постоянной очень мала, воздействие силы тяготения становится заметным лишь тогда, когда ее источником служат либо очень близкие, либо очень массивные тела.

Наблюдения с космических аппаратов небесных тел малой массы (кометных ядер и астероидов) показывают, что форма этих объектов может быть неправильной. Известны, например, сильно вытянутые и совершенно несимметричные астероиды (например, Эрос), кометные ядра (например, ядра кометы Боррелли и кометы Галлея). Как указано выше, для твердых тел минимальная масса, которая может обеспечить гидростатическое равновесие и соответствующую сферическую форму, составляет $5 \cdot 10^{20}$ кг, а диаметр — 800 км. Все астероиды и кометные ядра существенно меньше указанных пределов как по массе, так и по размерам, поэтому слабая сила тяготения не в состоянии «сгладить» возможные неровности. Астероид Церера диаметром более 900 км оказался сферичным, и на основании этого переведен в статус карликовой планеты.

При больших массах существенные отклонения от гидростатического равновесия реализоваться не могут. Это связано с характеристиками прочности грунта. На Земле предел текучести типичных горных пород соответствует высоте каменного столба высотой около 10 км, поэтому

никакие тектонические процессы не могут создать на нашей планете горы большей высоты: породы начинают расползаться под действием собственной тяжести. В результате отклонения высот от среднего уровня поверхности Земли не превышают 10 км (высочайшая вершина Джомолунгма, или Эверест, несколько ниже 9 км над уровнем моря), поэтому наша планета почти сферична. На Марсе сила тяжести существенно меньше, соответственно максимальная высота марсианских гор может быть почти втрое больше, чем на Земле, что и наблюдается на практике. Глубокие каньоны и другие пониженные формы рельефа со временем сглаживаются за счет оползней, скатывания и сползания материала с краев под действием силы тяжести.

Приливы на Земле. Рассмотрим величины сил притяжения, действующих на разные точки Земли со стороны внешних небесных тел. Притяжение планет Солнечной системы оказалось чрезвычайно малым из-за огромных расстояний между планетами. Заметными являются силы притяжения, действующие на Землю со стороны Луны (как наиболее близкого небесного тела) и Солнца (как удаленного, но очень массивного небесного тела). Поскольку Земля — довольно крупное небесное тело, получается, что сила притяжения, действующая на Землю со стороны, например, Луны, оказывается различной для разных ее точек. Это естественно: ведь разные точки Земли находятся на разных расстояниях от Луны, а сила тяготения, как указано в предыдущей лекции, зависит от расстояния между тяготеющими телами. Если бы размеры Земли были невелики, различия в силах влияния Луны для разных точек нашей планеты были бы существенно меньше. Но для крупных небесных тел эти различия приводят к появлению ряда важных феноменов.

Рассмотрим простейший случай: Земля имеет форму шара и вся покрыта океаном (ровным слоем воды). Каждая частица твердого тела Земли, а также каждая капля воды в океане притягиваются Луной с некоей силой. Согласно второму закону Ньютона любую силу всегда можно представить в виде

$$F = m \cdot w, \quad (3.1)$$

где F — сила, m — масса частицы или капли, w — сообщаемое частице ускорение. Поскольку возникающая сила — это сила тяготения, ее можно представить в виде

$$F = Gm \frac{M_{\text{Л}}}{r^2}, \quad (3.2)$$

где G — гравитационная постоянная, $M_{\text{Л}}$ — масса Луны, r — расстояние от центра масс Луны до частицы.

Рассмотрим, какая сила прикладывается со стороны Луны к частице, находящейся в центре Земли (рис. 3.1). Если считать, что r_0 — это расстояние от центра Земли до центра масс Луны, то рассматриваемая сила F_O выразится как

$$F_O = \frac{GmM_{\text{Л}}}{r_0^2}.$$

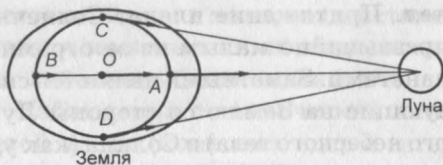


Рис. 3.1
Приливное
взаимодействие

Силы притяжения Луны, приложенные к другим точкам Земли, будут иными. Так, например, в точке A в океане прямо напротив Луны сила, действующая со стороны Луны F_A , будет больше, чем F_O , поскольку эта точка ближе к Луне, чем точка O , на величину радиуса Земли R , и знаменатель будет меньше:

$$F_A = \frac{GmM_{\text{Л}}}{(r - R)^2}.$$

Разность между силами притяжения к Луне одинаковых частиц массы m , находящихся в точках A и O , равна $F_A - F_O$:

$$\begin{aligned} F_A - F_O &= \frac{GmM_{\text{Л}}}{(r - R)^2} - \frac{GmM_{\text{Л}}}{r_0^2} = \\ &= GmM_{\text{Л}} \left[\frac{1}{(r - R)^2} - \frac{1}{r^2} \right] = \frac{GmM_{\text{Л}}(2rR - R^2)}{(r - R)^2 r^2}. \end{aligned}$$

Поскольку радиус Земли R существенно меньше расстояния до Луны r , можно пренебречь малыми членами — в числителе не учитывать R^2 , а в знаменателе вместо $(r - R)^2$ оставить только r^2 . Тогда

$$F_A - F_O = \frac{2GmM_{\text{Л}}R}{r^3}.$$

Подставив в формулу конкретные значения входящих в нее величин, получим разность сил, равную примерно $0,000001 \cdot m$ м/с². Это небольшая величина, но существенно, что она все-таки не равна нулю. Если считать, что мы рассчитываем разность сил, приложенных со стороны Луны к частицам единичной массы (например, $m = 1$ кг), окажется, что эта разность равна $0,000001$ кг·м/с², или одной миллионной ньютона. Таким образом, в точке A притяжение Луны ослабляет силу тяжести на земной поверхности, так как разность сил положительна по знаку и направлена к Луне (от центра Земли), $F_A > F_O$. Это равнозначно тому, что к частице m , расположенной в точке A , приложена небольшая дополнительная сила, направленная к Луне.

В точках C и D силы притяжения Луны, действующие на частицы единичной массы, практически равны силе притяжения Луны, действующей на частицу в центре Земли O — из рисунка видно, что расстояния от этих трех точек до Луны практически одинаковы. Это значит, что силы F_C и F_O практически равны по модулю, но немного различаются по направлению. Векторная разность этих сил (ее легко найти по правилу параллелограмма) направлена почти к центру Земли. Получается, что в точке C сила земной тяжести благодаря действию Луны слегка увеличивается. Аналогичная ситуация характерна и для точки D .

Рассмотрим ситуацию на поверхности Земли в промежуточных точках между точками A и C (рис. 3.1). Здесь направление равнодействующей силы отклоняется от направления к центру Земли. Если равнодействующую разложить на составляющие, направленные по радиусу Земли и по касательной к ее поверхности, то мы увидим силу, направленную вдоль поверхности Земли к точке A . Кроме

того, слегка изменяется сила притяжения к центру Земли. Если, как показано выше, в точке C сила тяжести немного увеличивается, а в точке A немного уменьшается, значит, в промежуточных точках при перемещении от C к A по поверхности Земли сила тяжести уменьшается (до значения собственной силы тяжести Земли без воздействия Луны) и продолжает уменьшаться до значения в точке A .

Итак, в результате на обращенном к Луне полушарии Земли в разных его точках наблюдается небольшое усиление (вблизи точек C и D) или ослабление (вблизи точки A) силы земной тяжести и, что самое главное, возникает сила, направленная по касательной к Земле в направлении к подлунной точке A . Благодаря появлению этой горизонтальной силы вода перемещается от точек C и D к точке A . Возникает так называемый *приливной горб (выступ)*, направленный к Луне.

Водная оболочка в рассматриваемом «подлунном» полушарии приобретает вызванную лунным притяжением несферическую форму, соответствующую результирующему распределению силы тяжести по поверхности данного полушария Земли под влиянием суммарного тяготения и Земли, и Луны.

Существенно, что аналогичная картина возникает и на противоположном по отношению к Луне полушарии Земли. В точке Земли, наиболее удаленной от Луны (точка B , рис. 3.1), Луна притягивает находящуюся здесь частицу с силой

$$F_B = \frac{GmM_{\text{Л}}}{(r + R)^2}.$$

Эта сила меньше, чем в точках O , C и D , поскольку указанные точки ближе к Луне, чем точка B . Рассмотрев разность сил $F_B - F_O$, можно убедиться, что по величине она примерно такая же, что и в случае для разности сил $F_A - F_O$, но отрицательна по знаку, а значит, направлена от Луны (от центра Земли наружу), поскольку $F_B < F_O$. Это означает, что в точке B земная сила тяжести уменьшена на величину указанной разности сил $F_B - F_O$ по сравнению

с точкой O . Это равнозначно тому, что к этой точке Земли приложена небольшая сила, направленная наружу от центра Земли.

Рассмотрим ситуацию на поверхности Земли в промежуточных точках между точками B и C (рис. 3.1). Поскольку мы анализируем ситуацию в системе координат, связанной с центром Земли O , действие Луны будет проявляться в этой системе как появление дополнительных сил, направленных от Луны.

Тогда направление равнодействующих сил (возникающих как результат действия силы притяжения к центру Земли и дополнительной силы, направленной от Луны) также отклоняется от направления к центру Земли. Если равнодействующую разложить на составляющие, направленные по радиусу Земли и по касательной к ней, возникает проекция силы, направленная вдоль поверхности Земли к точке B . При этом также дополнительно слегка изменяется сила притяжения к центру Земли.

Можно констатировать, что на отвернутом от Луны полушарии Земли в разных его точках, так же как и на обращенном к Луне полушарии, наблюдается небольшое усиление или ослабление силы земной тяжести. Таким же образом возникает и сила, направленная к точке B по касательной к Земле. Благодаря появлению этой горизонтальной силы вода смещается к точке B от точек C и D . Формируется второй приливной горб (выступ), направленный на этот раз от Луны.

В двух полушариях образуется одинаковая симметричная картина распределения сил. Поэтому под действием притяжения Луны сферическая водная оболочка Земли деформируется, приобретая форму эллипсоида, большая ось которого вытянута по направлению к Луне. Выступы, или горбы, возникают у Земли с двух сторон вдоль направления большой оси эллипсоида. Говорят, что в точках A и B наблюдается *прилив*, а в точках C и D — *отлив*. Поверхность эллипсоида определяется условиями гидростатического равновесия и представляет собой поверхность одинаковой силы тяжести, отличающуюся от сферической под влиянием Луны.

Земля вращается вокруг своей оси с периодом 23 ч 56 мин. Кроме того, Луна движется вокруг Земли, совершая один оборот за 27,3 суток. Из-за этого движения Луна смещается по небу среди звезд в среднем на $13,2^\circ$ в сутки. В результате оказывается, что относительно постоянно смещающейся на небе Луны Земля совершает полный оборот в среднем за 24 ч 50 мин 28,2 с. Луна каждый день пересекает небесный меридиан (проекцию на небо меридиана, на котором находится земной наблюдатель) на 50 мин позже, чем вчера. Это легко заметить: каждый день Луна восходит над горизонтом со сдвигом на 50 мин по сравнению со вчерашним днем.

В результате постоянного смещения Луны в небе Земли с периодом 24 ч 50 мин приливной эллипсоид с той же скоростью поворачивается так, чтобы его большая ось была всегда нацелена на Луну. По поверхности Земли все время перемещаются два приливных горба, двигаясь вслед за Луной. Поэтому вода находится в непрерывном движении, перетекая в горизонтальном направлении так, чтобы один из приливных горбов находился все время «под Луной», а второй — на противоположной стороне Земли. За период, в среднем равный 24 ч 50 мин, оба приливных выступа обходят весь земной шар. В результате в каждой точке за этот период происходят два прилива и два отлива. Вода вздымается и опускается, перемещаясь вслед за Луной.

Солнце тоже вызывает приливы и отливы. Масса Солнца значительно больше массы Луны, но Солнце гораздо дальше. В результате солнечные приливы оказываются в 2,2 раза меньше лунных. Солнечные приливы сами по себе отдельно не наблюдаются, они только изменяют амплитуду и продолжительность лунных приливов.

Нетрудно понять, что максимальные приливы на Земле получают во время новолуний и полнолуний (или *сизигий*), когда Солнце, Земля и Луна оказываются на одной прямой. Тогда лунные и солнечные приливы складываются, в результате наблюдается самый большой прилив. Такие приливы называют *сизигийными*. Когда угол между направлениями на Луну и на Солнце при наблюдениях

с Земли оказывается равным 90° (Луна находится в *фазах первой или последней четверти*), в момент лунного прилива происходит солнечный отлив, действие Солнца вычитается из действия Луны, и прилив оказывается минимальным. В промежуточные моменты несовпадения максимумов и минимумов солнечных и лунных приливов несколько меняется (уменьшается) амплитуда и несколько увеличивается продолжительность этих явлений.

В действительности явление приливов и отливов намного сложнее описанного. Выше изложена элементарная теория происходящих процессов в приближении абсолютно гладкого сферического дна океана и отсутствия материков. На практике изначальная форма Земли несферична, на ее эллипсоидную форму влияют не только приливные деформации, но и центробежная сила, возникающая из-за вращения вокруг своей оси. Кроме того, приливной выступ, перемещаясь по поверхности планеты, встречает на своем пути сложную береговую линию материков и островов, различную форму морского дна. Часть энергии приливов неизбежно тратится на трение воды о морское дно. В результате момент максимального прилива, как правило, не совпадает с моментом кульминации Луны (пересечением Луной небесного меридиана). Промежуток времени от момента кульминации Луны до максимального прилива в данном морском порту называется *прикладной час*. Величина прикладного часа (запаздывание максимума прилива относительно кульминации Луны) различна для различных точек береговой линии и в отдельных местах может достигать шести часов.

Высота прилива по указанным причинам также неодинакова в разных местах земного шара. В океане, вдали от берегов, высота приливного выступа обычно не превышает 1...2 м. Во внутренних морях и озерах (например, в Черном море, озере Байкал) высота прилива ничтожна — от одного до нескольких сантиметров и практически незаметна. В некоторых проливах и узких заливах высота приливов бывает значительной. Так, в Пенжинской губе (Охотское море) высота прилива может достигать 12,9 м, в заливе Фробишера (южное побережье острова Баффинова

Земля) — 15,6 м. Максимальные приливы обычно связывают с условиями в заливе Фанди, атлантическое побережье Канады — до 18,6 м.

Приливы наблюдаются также и в воздушной оболочке Земли — атмосфере. Перетекание воздушных масс вслед за Луной приводит к регулярным колебаниям атмосферного давления с амплитудой в несколько миллиметров ртутного столба.

Поскольку тело Земли не абсолютно твердое, под воздействием сил, возникающих в земных породах, также проявляются приливы и отливы. Максимальная амплитуда приливных колебаний наблюдается в экваториальной зоне Земли и не превышает 43 см. На широте Москвы расстояние от поверхности Земли до центра планеты может изменяться в пределах 25 см — вся Земля «дышит» под влиянием притяжения Луны и Солнца.

Следствия феномена приливов. Есть основания полагать, что приливные явления происходят не только в поверхностных слоях гидросферы и литосферы, но и глубже — в мантии и, возможно, даже ядре Земли. Это должно приводить к смещениям значительных масс вещества в глубине планеты и выделению тепла за счет трения. Особенно сильными такие эффекты могут быть в случае существования неоднородностей плотности в недрах — плотных вкраплениях, несферической формы ядра и т. д. Перемещения в литосфере благодаря приливам должны приводить к усилению сейсмической активности в недрах Земли. Поскольку точных данных о распределении масс в глубинных недрах Земли нет, пока трудно достоверно оценить величину этих эффектов.

Потеря энергии приливов на трение океанской воды о дно, воздушных масс о твердую поверхность, перераспределения масс в недрах Земли приводит к постепенному замедлению вращения Земли. В результате продолжительность суток (периода вращения) нашей планеты непрерывно увеличивается. За последние 100 лет, когда параметры вращения Земли постоянно фиксировались с помощью высокоточных астрономических наблюдений, продолжительность суток увеличилась на 0,0014 с. Отсюда следует,

что в прошлом сутки были значительно короче, чем сегодня. В годичных кольцах древних окаменевших кораллов найдено подтверждение этому: количество суточных микрослоев в годичном кольце изменилось: 370 млн лет назад их было 400, а теперь 365.

Дальнейшие изменения должны привести к дальнейшему удлинению суток на Земле. Процесс остановится, когда земные сутки станут равными периоду вращения Луны вокруг Земли. Тогда потери энергии на приливы будут минимальны: приливные выступы будут находиться всегда на одном и том же месте, большая ось эллипсоида, нацеленная на Луну, не будет перемещаться по телу планеты, в результате чего горизонтальные перемещения масс прекратятся. Луна будет видна только из одного полушария планеты, поскольку она будет, подобно стационарному спутнику, находиться всегда над одной и той же точкой Земли, двигаясь вокруг Земли с той же скоростью, с какой сама Земля будет обращаться вокруг своей оси. Такой режим вращения системы «планета–спутник», называемый *синхронным*, является самым выгодным с точки зрения расходования механической энергии, поскольку минимизирует приливные процессы. Поэтому в Солнечной системе есть целый ряд примеров синхронных режимов вращения. Они сформировались за миллиарды лет существования Солнечной системы в тех случаях, когда приливные эффекты были особенно сильны.

Один из примеров синхронного вращения — движение Луны вокруг Земли. Понятно, что силы приливного воздействия Земли на Луну должны быть значительно больше, чем влияния Луны на Землю из-за существенного различия в массах. И если приливы, порождаемые Луной на Земле, плавно замедляют вращение Земли, то мощные приливы, порождаемые массивной Землей на Луне, уже давно синхронизировали вращение Луны вокруг своей оси с ее вращением вокруг Земли. В настоящее время Луна не поворачивается относительно линии, соединяющей центры масс Земли и Луны, и лунный эллипсоид всегда направлен своей большой осью на Землю. Поэтому некогда возникшие приливные выступы почти не смещаются в теле Луны.

Небольшие смещения возникают за счет неравномерности скорости вращения Луны вокруг Земли (второй закон Кеплера), в итоге возникают незначительные «покачивания» тела Луны относительно направления на Землю (*либрации*). Возможно, из-за слабых либрационных приливных напряжений в теле Луны происходят слабые глубокофокусные «лунотрясения» в мантии нашего спутника. Их общая энергия примерно в 1 млрд раз меньше, чем на Земле.

Поскольку расходование механической энергии через выделение тепла в приливных деформациях у Луны практически прекращено из-за синхронного вращения, Луна реализует другой способ расходования энергии: она постепенно удаляется от Земли примерно на 3,5 см/год, при этом медленно падает скорость ее движения по орбите. Расчеты будущей эволюции системы Земля–Луна приводят к следующим результатам. За счет приливных явлений Земля продолжит замедление вращения вокруг своей оси, а Луна будет продолжать удаляться от Земли, увеличивая период обращения вокруг Земли при сохранении режима синхронного вращения. Система полностью синхронизируется при расчетном будущем равенстве периодов, когда оба будут близки к 50 нынешним земным суткам. Очевидно, что эволюция системы еще далека от завершения.

Приливные эффекты в Солнечной системе. Приливные взаимодействия привели к появлению синхронных режимов вращения не только в случае Луны. Синхронным вращением обладают Плутон и крупнейший из трех его спутников — Харон. Мощные приливы заставили спутник Ио синхронно вращаться вокруг Юпитера: Ио всегда повернута одной и той же стороной к планете-гиганту. Большой приливный выступ всегда повернут к Юпитеру, но из-за слегка эксцентричной орбиты Ио испытывает либрации, что приводит к очень сильным приливным деформациям литосферы из-за огромного притяжения близкого Юпитера. В результате в недрах Ио выделяется много тепла, приводящего к сильной вулканической активности. Приливный эффект Юпитера вызывает выделение

тепла и в недрах более далекого спутника — Европы, чем, вероятно, и вызвано существование у этого спутника грандиозного подледного океана.

Приливные эффекты, судя по всему, являются основным механизмом, приводящим к возникновению так называемых резонансных соотношений между периодами вращения и движения разных тел Солнечной системы. Крайний случай резонанса — соотношение периодов 1:1 (синхронное вращение), общий случай — соотношение в виде $n:t$, где n и t — небольшие целые числа. Так, например, известен резонанс Меркурия и Венеры: солнечные сутки Венеры равны удвоенным звездным суткам Меркурия. Это один из фактов, который позволяет предположить, что Меркурий в прошлом был спутником Венеры, и в этой системе из двух довольно массивных тел действовали мощнейшие приливные силы. Не исключено, что приливы, создававшиеся Меркурием, замедлили вращение Венеры и даже слегка раскрутили ее в обратном направлении — факт медленного обратного вращения этой планеты трудно объяснить иным образом. Известны и резонансы орбитального движения: например, они присутствуют в периодах обращения вокруг Солнца у Юпитера и Сатурна (5:2), Сатурна и Урана (3:1), Нептуна и Урана (2:1), и это не полный список. Примеры других резонансов будут приведены в следующих разделах.

Резонансы в движениях соседних планет крайне сложно объяснить приливами, поскольку расстояния между планетами очень велики, и величина приливных воздействий оказывается исчезающе малой. Для примера можно привести величину амплитуды суммарного приливного эффекта, который все планеты Солнечной системы, выстроившись с одной стороны от Солнца, могли бы вызвать в теле Солнца. Этот эффект не превышает 2 мм! Тем не менее версия, что состоящая из многих элементов Солнечная система за 4,6 млрд лет своего существования могла войти в коллективный (резонансный) режим колебаний благодаря слабым, но систематическим и действующим очень длительное время приливному эффектам, не имеет на сегодня обоснованных альтернатив.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему массивные небесные тела обладают сферической формой?
2. Есть ли приливы и отливы на Луне? Обоснуйте свой ответ.
3. Пусть на рис. 3.1 вместо Луны находится планета Юпитер (расстояние от Земли до Юпитера в противостоянии — 4,2 а. е.). Чему будет равна разность сил притяжения к Юпитеру для точек C , D и точки A ? Во сколько раз уменьшится эта разность по сравнению со случаем с Луной? Насколько существенно на Земле приливное воздействие Юпитера?
4. Почему в озерах приливные взаимодействия незаметны?
5. Существует мнение, что приливные воздействия Луны оказывают влияние на процессы внутри растений, животных и человека. Обоснуйте свое мнение на этот счет (используйте рассуждения по предыдущему вопросу).
6. Подвергается ли атмосфера приливному влиянию со стороны Луны? Ответ обоснуйте.
7. Опишите эффект синхронного вращения планеты и ее спутника.
8. Что такое резонансное вращение планет?



ПЛАНЕТА МЕРКУРИЙ

Движение и вращение. Меркурий — самая маленькая из крупных (классических) планет Солнечной системы и самая близкая к Солнцу (см. рис. 4.1). Названа в честь римского бога торговли и путешествий. Поскольку, как указано выше, круговая скорость планеты тем выше, чем она (планета) ближе к Солнцу, понятно, что Меркурий движется с наибольшей среди всех планет средней скоростью — 47,9 км/с. Поскольку орбита планеты обладает, кроме того, самым значительным эксцентриситетом, Меркурий то приближается к Солнцу на 0,31 а. е., то удаляется до 0,47 а. е. при среднем расстоянии от светила в 0,387 а. е. (около 58 млн км). Скорость планеты в перигелии согласно второму закону Кеплера нарастает до 54 км/с.

Сидерический период обращения Меркурия вокруг Солнца (во внешней системе координат, связанной с удаленными звездами) составляет 87,97 земных суток. Эту величину можно назвать годом Меркурия. Планета медленно вращается вокруг своей оси в том же направлении, в котором движется вокруг Солнца, совершая один оборот за 58,65 земных суток, что составляет ровно $2/3$ года планеты (сидерические, или звездные, сутки Меркурия). Другими словами, Меркурий делает ровно три полных оборота вокруг своей оси относительно удаленных звезд за два своих года. Солнечные сутки планеты (период времени, за который планета совершает полный оборот относительно Солнца) оказались равными 176 земным суткам. Таким образом, солнечные сутки Меркурия равны ровно

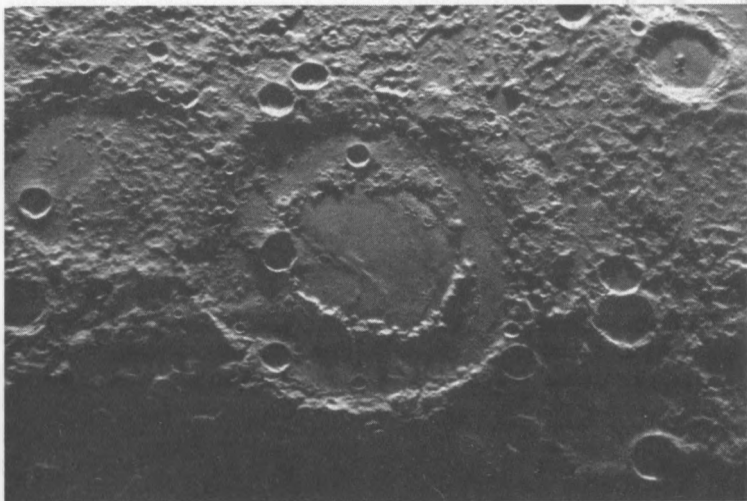


Рис. 4.1

Кратер с двойным кольцевым валом на Меркурии
(космический аппарат «Мессенджер», НАСА)

двум меркурианским годам. Эта ситуация уникальна в Солнечной системе, но и она имеет свое объяснение. Приливные возмущения со стороны близкого Солнца привели к формированию таких «резонансных» соотношений параметров движения и вращения Меркурия: отношение периодов равно отношению двух небольших целых чисел:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{n}{m}.$$

Механизмы формирования таких резонансов не всегда ясны. Одна из версий, принадлежащая отечественному математику А. М. Молчанову, исследовавшему этот вопрос, заключается в том, что со временем система, в которой происходят различные колебательные процессы (вращения и движения по замкнутым траекториям можно отнести к их числу), неизбежно становится резонансной. Вероятнее всего, происходит «перекачка» энергии между различными типами колебаний, как в системе связанных маятников, в результате чего устанавливаются коллективные, связанные друг с другом режимы колебаний (в случае Солнечной системы — параметры движений

и вращений планет и их спутников). Такая перекачка энергии, скорее всего, осуществляется приливными эффектами за длительные промежутки времени.

Внутреннее строение и магнитное поле. Анализируя движение планет, можно определить их массы. Это было сделано уже давно. Масса Меркурия составляет $0,33022 \cdot 10^{24}$ кг, что составляет 0,055274 массы Земли (5,5%). Диаметр планеты определен на сегодняшний день с точностью до долей километра и составляет 4879,4 км. Отклонений от шарообразной формы Меркурия не обнаружено. В результате можно вычислить среднюю плотность планеты, разделив массу на объем шара Меркурия:

$$\rho = \frac{M}{(4\pi R^3/3)}.$$

Средняя плотность планеты оказалась одной из самых высоких среди всех планет Солнечной системы — $5,43 \text{ г/см}^3$. Это означает, что Меркурий должен обладать большим металлическим ядром.

Проанализировав влияние гравитационного поля Меркурия на траекторию полета запущенного в 1973 г. американского космического зонда «Маринер-10», который в 1974–1975 гг., двигаясь по гелиоцентрической орбите, трижды сближался с планетой, специалисты создали модель внутреннего строения Меркурия. Для этого привлекались теоретические и экспериментальные данные о поведении вещества при высоких давлениях и температурах. Судя по всему, радиус железоникелевого ядра Меркурия составляет примерно 75...80% радиуса планеты. Согласно модели масса ядра составляет около 62% массы всей планеты, а его объем занимает около половины объема. Над ядром расположена силикатная оболочка (мантия) толщиной около 600 км. Большая ее часть находится в расплавленном состоянии. Над ней лежит сравнительно тонкая кора планеты.

Такое распределение вещества внутри планет объясняется процессом *дифференциации* под влиянием силы тяжести. Согласно стандартной теории формирования планет в начальном конгломерате, составляющем протопланету,

присутствовали различные частицы — тяжелые (железо и никель) и более легкие (силикаты). Сила тяготения приводит к постепенному просачиванию тяжелых частиц к центру масс будущей планеты и вытеснению к поверхности легких частиц. В результате процесса дифференциации, а также нарастающего к центру давления плотность планеты оказывается неоднородной: в недрах концентрируется плотное металлическое ядро, а наиболее легкие породы, подобно пене, формируют наружные слои. Поскольку по многим параметрам поверхностные породы Меркурия похожи на таковые на Луне, а их плотность хорошо известна и составляет $3,0...3,3 \text{ г/см}^3$, чтобы получить среднюю плотность в $5,43 \text{ г/см}^3$, огромное железоникелевое ядро Меркурия должно обязательно существовать, и сомнений в его существовании на сегодняшний день нет.

«Маринер-10» зафиксировал магнитное поле Меркурия напряженностью менее 1% земного — $35 \cdot 10^{-4} \text{ Гс}$ у экватора и $70 \cdot 10^{-4} \text{ Гс}$ у полюсов с обратной (по отношению к ситуации на Земле) полярностью. Согласно классической теории магнитное поле планет порождается электрическими токами в расплавленном металлическом ядре. Однако расчеты показывают, что в небольшой планете потери тепла могли привести к остыванию и застыванию ядра уже 2...3 млрд лет назад. Если это так, то существование нынешнего магнитного поля Меркурия выглядит загадочным.

Впрочем, существуют гипотезы, которые могут объяснить эту загадку. Одна из гипотез предполагает присутствие серы в железоникелевом ядре Меркурия, которая могла снизить температуру затвердевания сплава и надолго сохранить его в жидком состоянии. Есть версия, допускающая увеличенное количество радиоактивных элементов, выделяющих тепло, в недрах планеты. Однако эти гипотезы требуют специального объяснения того обстоятельства, почему именно на Меркурии оказалось повышенное по сравнению с другими планетами содержание серы либо радиоактивных элементов. Еще одна гипотеза допускает периодическое подплавление внешней части ядра и внутренней части мантии на определенных участках ор-

биты планеты (например, вблизи перигелия) за счет разогрева, который может создаваться приливным влиянием со стороны Солнца.

Вторая космическая станция «Мессенджер», отправленная к Меркурию спустя 30 лет после «Маринера-10», во время первого пролета мимо планеты в январе 2008 г. подтвердила существование магнитного поля Меркурия. Второй пролет в октябре того же года показал, что параметры слабой магнитосферы планеты существенно изменились за прошедшие 10 месяцев, что указывает на большую динамичность магнитной оболочки, видимо, под влиянием близкого Солнца. В 2008 г. обработка данных, полученных системой наземных американских радаров, подтвердила версию о существовании расплавленного ядра.

Есть еще одна проблема, связанная с образованием планеты. Дело в том, что согласно классической модели планеты земной группы сформировались из сгустков пылевой материи в огромном газопылевом облаке. Остатки вещества этих сгустков, судя по всему, сохранились в виде каменных метеоритов. Однако в процессе гравитационной дифференциации вещества таких метеоритов, объединившихся в теле будущей планеты, не могло образоваться столь крупное железоникелевое ядро Меркурия — в метеоритах для этого недостаточна концентрация железа! Для объяснения непропорционально (по отношению к известному составу метеоритов) высокого содержания железа на Меркурии по сравнению с небольшим содержанием силикатов в тонкой коре планеты была предложена популярная ныне гипотеза о том, что уже сформировавшаяся в ходе дифференциации каменная кора Меркурия была сброшена в космос касательным ударом крупного астероида. Другая гипотеза говорит о том, что вблизи Солнца, где формировался Меркурий, соотношение железных и каменных частиц было сдвинуто в сторону первых, и избыток железа отразился на строении планеты. Заметим, что эта гипотеза противоречит идее о том, что Меркурий раньше был существенно дальше от Солнца, являясь в прошлом спутником Венеры.

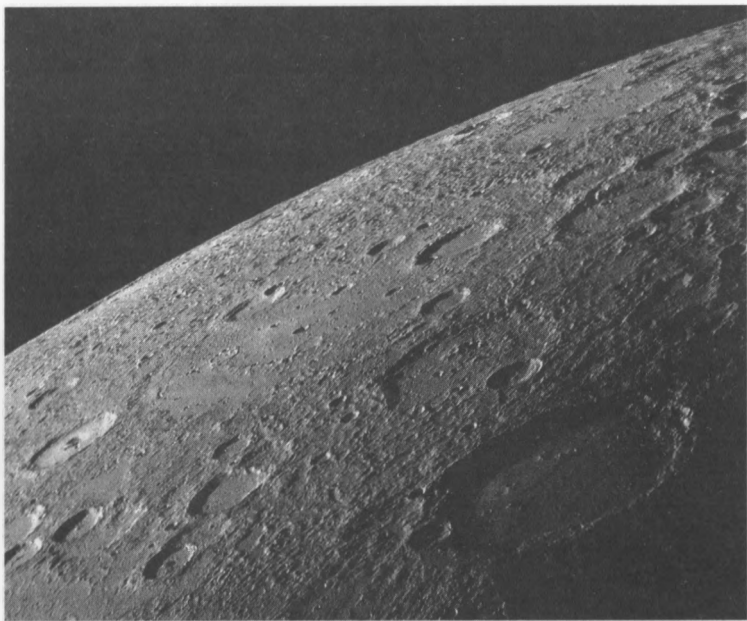


Рис. 4.2

Кратерированная поверхность Меркурия
(космический аппарат «Мессенджер», НАСА)

Поверхность Меркурия. Меркурий не имеет собственной атмосферы, что во многом определяет условия на поверхности планеты. Основной элемент рельефа — *ударные кратеры* — следы столкновений с метеороидами и астероидами за всю историю существования планеты. Поскольку на безатмосферных планетах нет процессов эрозии, связанных с действием воды и ветра, все следы столкновений (*импактов*) за 4,5 млрд лет сохранились до настоящего времени практически без изменений (исключая изменения от более поздних импактов). Основные элементы поверхности сформировались скорее всего примерно 3,9 млрд лет назад. В этот период согласно современным данным происходил максимум метеороидных бомбардировок в Солнечной системе (рис. 4.2).

Размеры кратеров на Меркурии самые разнообразные, от миллиметров до десятков километров. Плотность круп-

ных кратеров (с диаметрами более 10 км) составляет 360 единиц на миллион квадратных километров (по данным «Маринера-10», сфотографировавшего примерно 30% поверхности планеты). Крупнейший *ударный бассейн* — Caloris Planitia, в русскоязычной литературе обычно называемый Равниной жары, или Равниной зноя, или Морем зноя, имеет форму почти правильного круга диаметром 1300 км. Бассейн окружают 4...5 концентрических кольцевых вала высотой до 2 км. Судя по всему, астероид пробил кору молодой планеты. Сквозь разрывы и трещины в коре на поверхность Меркурия прорвались потоки лавы, разлившейся и затем застывшей в пределах бассейна. В области планеты, диаметрально противоположащей ударному бассейну Caloris, наблюдается зона необычного рельефа: похоже, что сейсмические волны от удара, пробежав по поверхности всей планеты, сфокусировались здесь, породив растрескивание коры и вспучивание отдельных ее блоков на высоту до 2 км. Самые же высокие горы на Меркурии (высота определена по длине теней) достигают 4-километровой отметки.

Отдельные кратеры окружены длинными светлыми радиальными лучами, состоящими из вещества, выброшенного во время удара. Съёмки ранее никогда не наблюдавшейся части поверхности планеты, проведенные аппаратом «Мессенджер» в октябре 2008 г., позволили увидеть лучи, протянувшиеся на тысячи километров от одного сравнительно молодого ударного кратера (см. рис. 4.3). Аналогичные структуры обнаружены на Луне, поверхность которой очень похожа на поверхность Меркурия. Некоторые крупные кратеры, как и на Луне, имеют центральные горки.

На поверхности Меркурия обнаружены интересные элементы рельефа, не имеющие прямых аналогов на других планетах. Речь идет о так называемых *эскарпах* — уступах высотой 2...3 км, тянущихся на сотни, а в некоторых случаях тысячи километров. Эскарпы объясняют процессами растрескивания, сдвигов и наплзаний участков коры друг на друга в процессе гравитационного сжатия планеты.

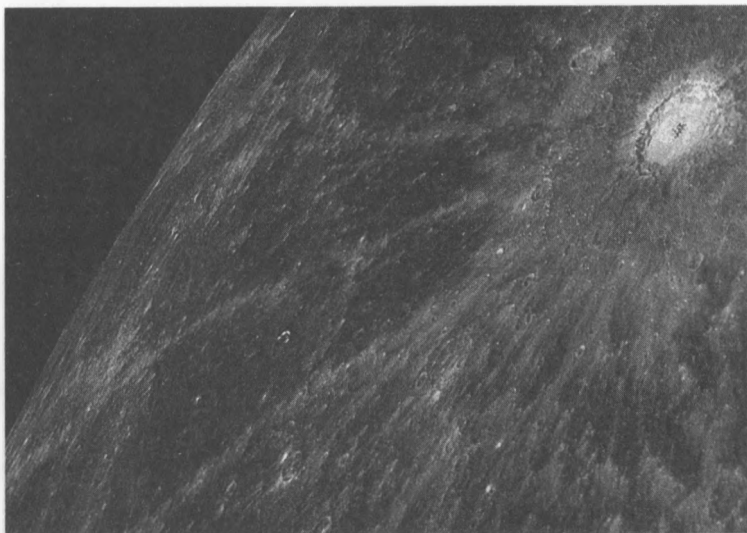


Рис. 4.3

Крупный ударный кратер на Меркурии
(космический аппарат «Мессенджер», НАСА)

В 1973 г. на XV Генеральной ассамблее Международного астрономического союза были утверждены основные правила, которыми ныне руководствуются при подборе названий деталей рельефа на планетах и их спутниках. Кратеры Меркурия называют в честь деятелей гуманитарных направлений (поэтов, писателей, художников, музыкантов). На карте планеты есть кратеры, названные в честь Толстого, Баха, Шекспира, Бетховена, Бальзака, Пушкина, Лермонтова, Репина, Ван-Гога, Рембрандта и т. д. Исключение из правил — крупный кратер с лучами, названный в честь американского астрофизика Джерарда Койпера, одного из авторов проекта «Маринер-10». Отдельные уступы (эскарпы), горные цепи и каньоны получают названия кораблей знаменитых мореплавателей (например, «Бигль», «Фрам», «Кон-Тики», «Санта-Мария») и научных станций («Мирный», «Восток» и т. д.). Обнаруженные «Мессенджером» в 2008 г. борозды будут называться именами великих архитектурных сооружений (например, борозды Пантеон в бассейне Калорис). Названия крупных

астрономических обсерваторий и имена богов торговли, принятые в разных религиях, также используются для обозначения деталей на карте Меркурия.

Верхний слой грунта Меркурия очень похож по фотометрическим и поляризационным свойствам на соответствующий слой на Луне. Это дает основания предполагать, что результаты изучения характеристик лунных пород можно распространить и на Меркурий и считать, что это преимущественно *анортозиты*.

Характеристики поверхностных слоев грунта во многом определяются важным обстоятельством, характерным для всех безатмосферных тел. На протяжении многих сотен миллионов лет множество метеороидов различных размеров сталкивалось с планетой. В результате поверхность Меркурия подверглась интенсивной переработке (разрыхлению, перемешиванию) за счет ударов. Грунт разрыхлен, содержит в себе зерна расплавившегося во время ударов и затем застывшего материала. Здесь присутствуют как собственные породы самой планеты, так и привнесенное вещество метеороидов. В результате Меркурий покрыт специфическим слоем мелко раздробленного материала (*реголита*). На планетах земной группы с атмосферами реголита нет: атмосферы не пропускают к поверхности многочисленные мелкие метеороиды.

Еще одна важная деталь рельефа Меркурия — следы потоков лавы. В большинстве случаев лава извергалась из недр в результате мощных импактов, проламывавших кору. На всей исследованной части планеты присутствуют следы многочисленных локальных извержений (см. рис. 4.4). Тем не менее признаков того, что вся поверхность Меркурия когда-то была покрыта расплавленным веществом, нет.

Температурный режим на поверхности Меркурия обусловлен тремя основными причинами: близостью Солнца, отсутствием атмосферы и медленным вращением вокруг своей оси. Как указано выше, *солнечные сутки* планеты продолжаются 176 земных суток. Это значит, что день продолжается ровно один меркурианский год (88 земных суток). Столько же времени длится ночь. Поскольку ось вращения Меркурия практически перпендикулярна

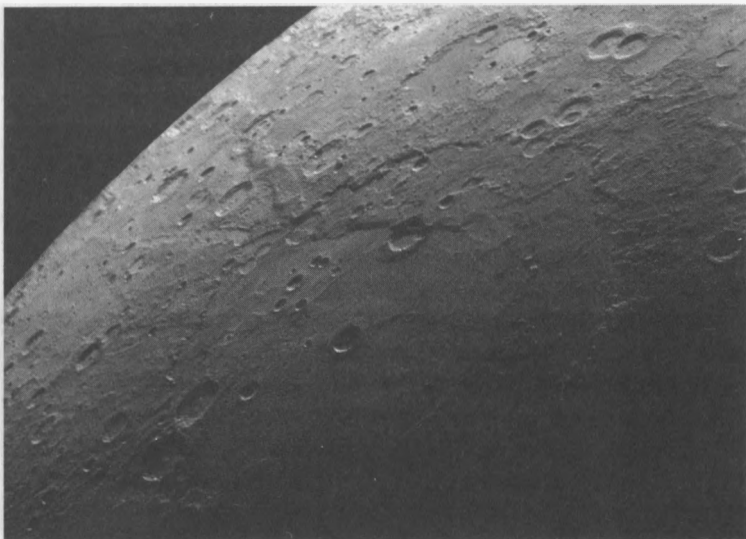


Рис. 4.4

Следы застывшей лавы в районе кратера Рембрандт
(космический аппарат «Мессенджер», НАСА)

плоскости его орбиты, на планете отсутствуют времена года: продолжительность дня всегда равна продолжительности ночи на всех широтах. За длинный день (который длится почти три месяца) грунт планеты нагревается до очень высоких температур ($+350^{\circ}\text{C}$). В перигелии, когда планета подходит ближе всего к Солнцу, температура может подняться до $+420^{\circ}\text{C}$, в афелии опускается до $+290^{\circ}\text{C}$. Отдельные участки темных пород, обращенные в сторону Солнца, могут нагреваться до $+600^{\circ}\text{C}$. Ночью температура быстро падает до -180°C .

Существенно, что указанные огромные перепады температуры (более 700 градусов) характерны для самого верхнего слоя грунта. Как указано выше, реголит сильно измельчен и поэтому отличается низкой теплопроводностью. Радиоастрономические исследования показывают, что уже на глубине в несколько десятков сантиметров температура пород практически постоянна ($70\ldots 90^{\circ}\text{C}$) и не меняется в зависимости от времени меркурианских солнечных суток.

Отсутствие атмосферы, которая могла бы сглаживать перепады температуры, помимо прочего, приводит к беспрепятственному попаданию на поверхность Меркурия интенсивных потоков солнечного и галактического коротковолнового (ультрафиолетового, рентгеновского, иногда гамма-) излучения. Есть основания полагать, что это облучение приводит к своеобразному «загару» (потемнению) поверхностных пород планеты (рис. 4.5).

Существует гипотеза о присутствии в высокоширотных областях планеты значительных количеств водяного льда, который защищен от солнечного тепла слоем реголита. В околополярных областях, где солнечные лучи всегда падают почти по касательной к поверхности планеты,

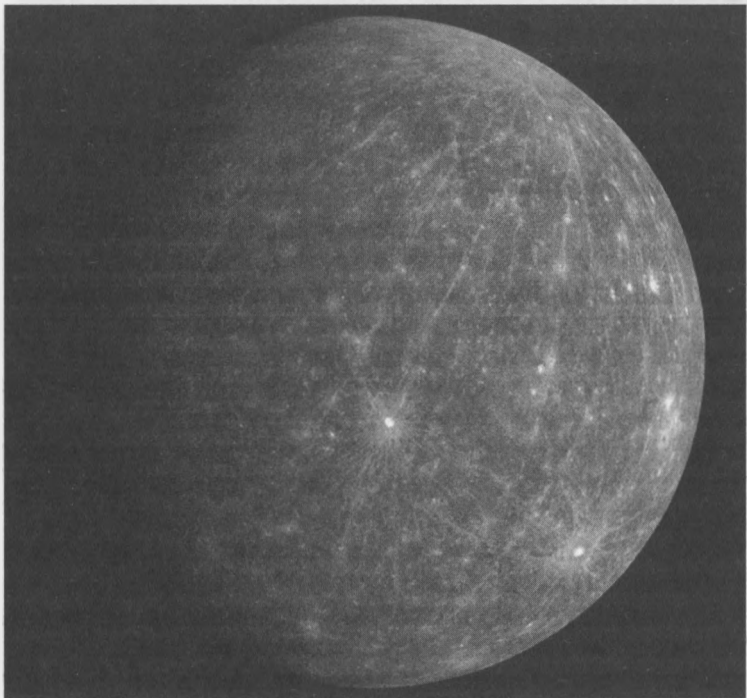


Рис. 4.5

Каменная поверхность Меркурия оказалась довольно темной, светлые детали связаны с импактными событиями (космический аппарат «Мессенджер», НАСА)

лед может сохраняться на дне кратеров, куда солнечный свет не попадает никогда и температура не поднимается выше -210°C . Результаты радиозондирования планеты в начале 1990-х гг. показывают, что вблизи северного и южного полюсов Меркурия наблюдаются многочисленные участки размерами от 50 до 150 км, откуда радиоизлучение отражалось деполяризованным. Это типично для водяного льда. Тем не менее пока нельзя считать открытие льда на Меркурии совершившимся.

Меркурий не имеет спутников. Впрочем, расчеты показывают, что идея о потере Венерой крупного спутника, который впоследствии стал самостоятельной планетой (Меркурием), не противоречит законам физики и в принципе могла реализоваться на практике.

Меркурий продолжает привлекать интерес ученых. На 2014 г. запланирован запуск европейско-японской межпланетной автоматической станции «BepiColombo», которая в 2020 г. должна стать искусственным спутником планеты. В комплект научной аппаратуры войдут, в частности, приборы, разработанные в России.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие экспериментальные данные позволяют считать, что Меркурий обладает массивным железным ядром?
2. Перечислите основные формы рельефа Меркурия.
3. Почему звездные сутки Меркурия не равны его солнечным суткам?
4. Меркурий близок к Солнцу и его дневные температуры очень высоки. Тем не менее считается, что на Меркурии существуют запасы водяного льда. Какие факты делают возможной эту гипотезу?
5. Что известно о магнитном поле Меркурия?
6. На Меркурии нет атмосферы, а на спутнике Сатурна Титане, который значительно меньше Меркурия по массе, атмосфера есть. Обоснуйте гипотезу, объясняющую этот феномен.
7. Что такое реголит? Есть ли реголит на Земле? Обоснуйте ответ.
8. Изложите гипотезы, которые могли бы объяснить дефицит каменных пород на Меркурии по сравнению с железом и никелем, содержащимися в его ядре.



ПЛАНЕТА ВЕНЕРА

Венера — вторая от Солнца планета, названная в честь римской богини любви и красоты (см. рис. 5.1). Это, по-видимому, не случайно: Венера — одно из самых красивых небесных тел на небе Земли, третий по яркости после Солнца и Луны естественный объект (в последние годы Венеру потеснила по яркости Международная космическая станция). Венера — самая близкая к Земле планета. Когда Солнце, Венера и Земля оказываются на одной прямой (в нижнем соединении), расстояние между Землей и Венерой уменьшается до минимального — чуть менее 41 млн км. Среднее расстояние от Солнца до Венеры составляет 0,72333 а. е. (108,2 млн км). Эксцентриситет планетной орбиты — самый малый в Солнечной системе и равен 0,00676 (орбита практически круговая).

Венера совершает один оборот вокруг Солнца за 224,7 земных суток. Средняя скорость ее движения по орбите около 35,0 км/с. Что касается вращения вокруг своей оси, то здесь Венера уникальна. Она медленно вращается в обратном (по отношению к вращению вокруг Солнца) направлении, совершая один оборот относительно удаленных звезд за 243,0185 земных суток (сидерический период). Обратное вращение Венеры вызывает вопросы: почти все прочие крупные тела Солнечной системы вращаются в одном и том же направлении, совпадающем с направлением вращения самого Солнца вокруг своей оси. Основная версия по этому поводу — приливное воздействие в далеком прошлом массивного спутника, которое не только

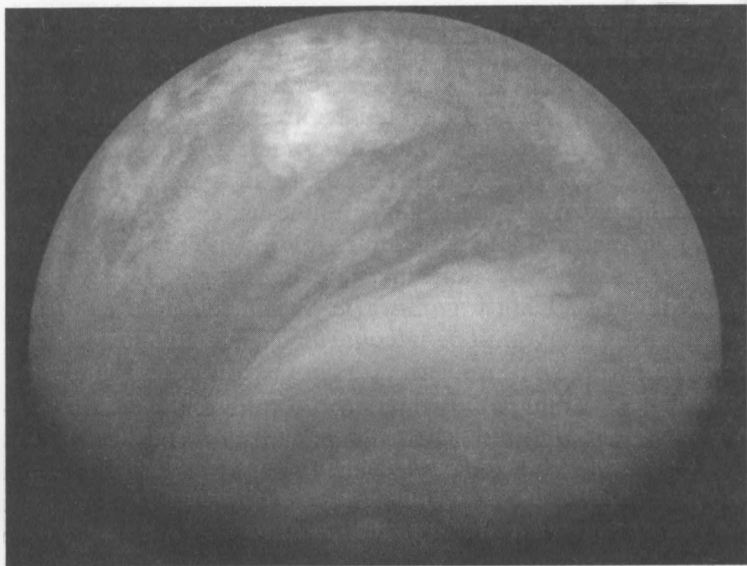


Рис. 5.1
Облачный покров Венеры
(космический аппарат «Венера-экспресс», ЕКА)

затормозило вращение планеты, но даже слегка «раскрутило» ее в обратном направлении. В качестве такого спутника рассматривается Меркурий. Вторая версия — сравнительно недавний встречный касательный удар крупного небесного тела (размерами не менее 200 км) — маловероятна, поскольку ось вращения планеты в этом случае скорее всего изменила бы свое положение (перпендикулярное к плоскости орбиты). Кроме того, такое гипотетическое тело-ударник (импактор) скорее всего не принадлежало Солнечной системе, поскольку должно было двигаться во встречном направлении. Окончательно проблема обратного вращения Венеры не решена.

Солнечные сутки Венеры равны 116,8 земным суткам. Ось вращения почти перпендикулярна плоскости орбиты ($87,64^\circ$), и это означает, что на Венере, как и на Меркурии, нет смены времен года: продолжительность дня (59 земных суток) одинакова на всех широтах, равна продолжительности ночи и не меняется в течение года. Солн-

це здесь восходит на западе. Интересно, что солнечные сутки Венеры равны удвоенным звездным суткам Меркурия, и этот факт пока не получил исчерпывающего объяснения.

В движении Венеры просматриваются и иные резонансные соотношения. Через каждые 584 земных суток повторяются нижние соединения Земли и Венеры — максимальные сближения планет, когда они оказываются на прямой, соединяющей Солнце, Венеру и Землю. Этот период равен пяти солнечным суткам Венеры. Это означает, что во время нижних соединений Венера всегда повернута к Земле одной и той же стороной. По-видимому, это еще одно проявление резонансов в Солнечной системе: в течение длительного времени происходила постепенная «подгонка» периодов различных колебаний тел, связанных между собой гравитационным взаимодействием.

Внутреннее строение. Масса Венеры с наибольшей точностью определена с помощью космических аппаратов, двигавшихся в гравитационном поле планеты: она составляет $4,8690 \cdot 10^{24}$ кг, что несколько меньше массы Земли (81,5%). Диаметр планеты составляет 12103,6 км (0,9488 экваториального диаметра Земли). Отклонений от сферической формы у Венеры, как и у Меркурия, не обнаружено. Ускорение свободного падения на поверхности Венеры составляет $8,87 \text{ м/с}^2$. Средняя плотность вещества планеты составляет $5,24 \text{ г/см}^3$, что близко к соответствующему значению у Земли ($5,52 \text{ г/см}^3$) и позволяет предположить, что внутреннее строение Венеры похоже на строение Земли. По-видимому, Венера имеет железоникелевое ядро, мантию и кору. Современная модель внутреннего строения планеты предусматривает, что на ядро Венеры приходится около 12% общей массы (ядро Земли — 16%). Однако есть существенное различие между двумя планетами: у Венеры не удалось обнаружить магнитного поля. Причина этого обстоятельства остается не вполне понятной. Значит ли это, что характеристики ядра Венеры отличаются от земных (например, оно не расплавлено или вращается недостаточно быстро), не ясно.

Атмосфера Венеры была открыта М. В. Ломоносовым во время наблюдений редчайшего астрономического события — прохождения Венеры по диску Солнца 26 мая (ст. с.) 1761 г. Опасаясь того, что петербургская погода сможет помешать наблюдениям, Ломоносов настоял на организации наблюдений в Восточной Сибири. Экспедиции, руководимые русскими астрономами Н. И. Поповым и С. Я. Румовским, работали в Иркутске и Селенгинске. Если Н. И. Попову в Иркутске не удалось из-за погоды наблюдать прохождение Венеры, то С. Я. Румовский в Селенгинске успешно выполнил программу и даже наблюдал явление, позднее названное эффектом Ломоносова (правда, не смог его интерпретировать).

Сам Ломоносов наблюдал явление в своей квартире в Санкт-Петербурге. Он отметил, что в момент контакта с диском Солнца около края планеты, которая выглядела в телескоп как маленький черный кружок, вспыхнул яркий ободок. Аналогичная картина повторилась, когда Венера сходила с солнечного диска. Ломоносов писал по этому поводу: «Появился на краю Солнца пупырь, который тем явственнее учинился, чем ближе Венера к выступлению приходила». В отличие от Румовского, Ломоносов догадался, что ободок, или «пупырь», возникает, когда солнечные лучи просвечивают насквозь атмосферу Венеры, заставляя ее светиться. «Сие ничто иное показывает, как преломление лучей солнечных в Венериной атмосфере», — сделал вывод ученый.

Наблюдения в телескоп показывают, что атмосфера планеты чрезвычайно плотна, при этом поверхность Венеры всегда закрыта плотным слоем облаков, просветов в которых не бывает (рис. 5.2). Прямые измерения химического состава, давления, скорости ветра и температуры были выполнены серией автоматических межпланетных станций в 1960–1980-е гг. Впервые в истории парашютный спуск в атмосфере Венеры осуществил спускаемый аппарат советской автоматической станции «Венера-4» 18 октября 1967 г.

Согласно имеющимся данным, параметры атмосферы Венеры таковы. Главный компонент — это углекислый газ

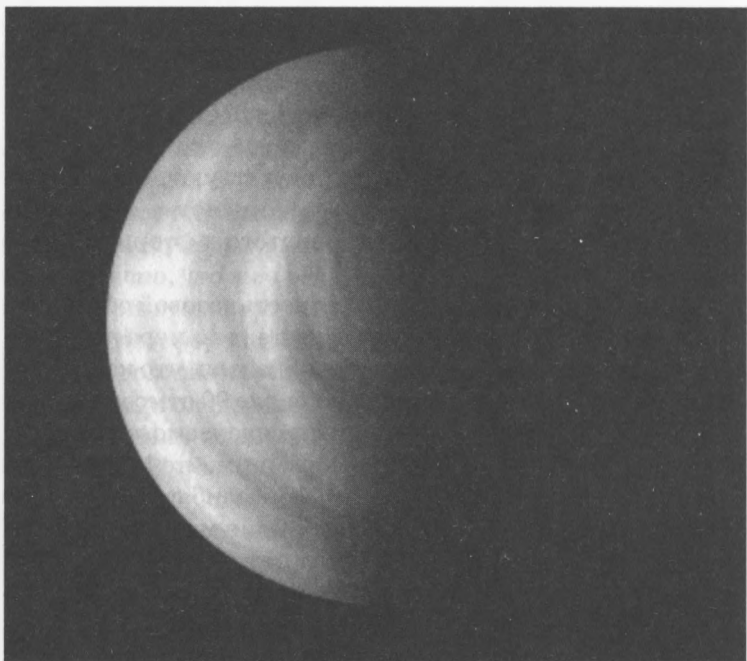


Рис. 5.2

В облаках Венеры не бывает просветов. Южный полюс планеты (космический аппарат «Венера-экспресс», ЕКА)

CO_2 , его здесь 96,5%. На втором месте — азот (чуть менее 3,5%). Остальное — малые составляющие, в сумме дающие не более 0,1% состава. В их числе следы кислорода, водяного пара, инертных газов, угарного газа CO , сернистые и некоторые другие соединения.

Строение атмосферы планеты существенно отличается от земного. На высоте от 49 до 75 км находится облачный слой, напоминающий плотную дымку. Диаметр планеты на уровне верхней кромки облаков составляет 12240 км. Высокая отражающая способность облаков приводит к тому, что большая часть (до 75...78%) падающего на планету солнечного излучения отражается от облаков обратно в космос. В результате, несмотря на то что Венера существенно ближе к Солнцу, чем Земля, она получает от Солнца тепла меньше, чем наша планета.

Температура на верхней поверхности облачного слоя составляет -40°C . Верхний ярус этих облаков (выше 57 км) представляет собой туман из мельчайших капелек 80-процентной серной кислоты. Согласно существующим оценкам в каждом кубическом сантиметре около 300 таких частиц. Над облаками Венеры присутствуют, кроме того, в небольших количествах сильные кислоты — соляная HCl и плавиковая HF в виде хлористого и фтористого водорода.

Ниже 49 км облаков нет. Плотность газовой оболочки, как и ее температура, быстро возрастает по мере погружения в ее нижние слои. Измерения показали, что на поверхности Венеры давление составляет около 90 атмосфер с точностью до 1,5 атмосфер (по данным спускаемого аппарата «Венера-8» в 1972 г. — 93 бар). Напомним, что 1 бар — единица давления, равная 10^5 Н/м^2 , 1 миллибар (мб) — одна тысячная бара, равная 10^3 дин/см^2 . Один миллиметр ртутного столба равен $133,322 \text{ Н/м}^2$, 1 атм — нормальное атмосферное давление на поверхности Земли, или физическая атмосфера (760 мм рт. ст.) = $1,01325 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Температура на поверхности Венеры составляет $+470...+477^{\circ}\text{C}$, причем как на ночной, так и на дневной сторонах планеты. Плотность раскаленного газа у поверхности планеты составляет 65 кг/м^3 , что в 50 раз больше, чем на поверхности Земли. Общая масса атмосферы оценивается в 0,01% от всей массы планеты, что примерно в 100 раз больше, чем у Земли.

Для Венеры характерен эффект так называемой *суперротации* атмосферы: здесь постоянно дует мощный ветер в западном направлении, существенно обгоняя вращение самой планеты. Если планета совершает полный оборот вокруг своей оси за 243,1 земных суток, то облачный слой полностью поворачивается всего за 4 суток! Это хорошо видно при съемках облаков Венеры в ультрафиолетовых лучах, где можно обнаружить детали и неоднородности. Высокие скорости ветра были подтверждены прямыми измерениями с аэростатов, введенных в атмосферу Венеры советскими автоматическими станциями «Вега-1» и «Вега-2» в 1985 г.

Аэростаты дрейфовали на высоте 53...54 км, при этом средняя скорость горизонтального движения составила 66...69 м/с. Вертикальная составляющая ветра оказалась в пределах от 2 до 15 м/с. Измерения скорости ветра у поверхности планеты с посадочных аппаратов дали величину менее 1 м/с. С учетом огромной плотности газа напор такого ветра эквивалентен действию мощного урагана.

Эффект суперротации атмосферы остается необъясненным: не ясно, что же «раскрутило» газовую оболочку планеты. При этом за счет трения между быстро вращающейся атмосферой и твердой поверхностью планеты атмосфера должна передавать планете часть своего момента вращения, и следовало бы ожидать постепенного ускорения вращения планеты и замедления вращения газовой оболочки. В этом случае можно было бы предположить, что нынешнее значение периода является «текущим» и отличается от соответствующих значений как в прошлом, так и в будущем. Однако нынешний период вращения планеты, как было сказано выше, очень близок к резонансному относительно Земли, и это выглядит неслучайным.

Не исключено, что такой режим вращения также является результатом эволюционной «подгонки» периодов. Таким образом, вопросы о том, почему атмосфера не ускоряет вращение планеты (если это действительно так), и о причинах суперротации атмосферы Венеры остаются открытыми. В частности, можно предположить, что суперротация — это сравнительно недавнее приобретение Венеры, не успевшее изменить скорость вращения планеты.

Характеристики верхних, «надоблачных» слоев атмосферы Венеры исследовались с помощью европейского искусственного спутника планеты «Venus-Express». Съемки ночной стороны планеты с близкого расстояния в инфракрасном диапазоне в 2006–2007 гг. позволили обнаружить существенные неоднородности и вихревые структуры в облаках на ночной стороне планеты. Уменьшение высоты орбиты аппарата и неоднократное погружение его в верхние слои атмосферы в 2010 г. до высот 165...175 км над поверхностью привело к пониманию, что плотность верхней атмосферы Венеры значительно меньше (быстрее

спадает с высотой), чем предполагалось ранее. В частности, плотность атмосферы на указанных высотах оказалась на 60% меньше, чем прогнозировалось в ходе подготовки эксперимента.

Кроме того, по изменениям в сопротивлении среды во время таких «нырков» удалось выяснить, что плотность атмосферы на одной и той же высоте существенно различается для дневного и ночного полушарий планеты. Этот эффект также требует объяснений.

Парниковый эффект. Высокая температура на Венере традиционно объясняется действием парникового эффекта. Суть его состоит в следующем. Поверхность Венеры и ее атмосфера прогреваются солнечными лучами (прямые измерения на поверхности планеты показали, что, несмотря на многокилометровый облачный слой, освещенность там, как на Земле в пасмурный зимний день: не очень светло, но все видно). Нагретая солнечной радиацией поверхность Венеры также излучает энергию, но прежде всего в тепловом (инфракрасном) диапазоне длин электромагнитных волн. Присутствующий в атмосфере плотный углекислый газ с примесью водяных паров непрозрачен для инфракрасного излучения, и тепло не уходит в окружающее пространство. Согласно законам термодинамики сохраняется баланс между получаемой и излучаемой энергиями, в результате температура поверхности и нижних слоев атмосферы оказывается одинаковой и достаточно высокой.

Рассмотрим эффект более подробно. На планету падает поток солнечной энергии Φ_0 . Часть этого потока (обозначим ее Φ) отражается от планеты (преимущественно от облаков) обратно в космическое пространство во все стороны. Отношение отраженного и падающего потоков называется *сферическим альбедо* планеты $A_{\text{сф}}$:

$$A_{\text{сф}} = \frac{\Phi}{\Phi_0}. \quad (5.1)$$

Термин «альбедо» буквально переводится на русский язык как «белизна». Венера обладает самым высоким сферическим альбедо среди всех планет Солнечной системы ($A_{\text{сф Венеры}} = 0,75 - 0,78$) — более 75% падающего на планету солнечного излучения отражается от внешней поверх-

ности облаков обратно в космос. Остающаяся часть падающего на планету потока солнечного излучения поглощается планетой и нагревает ее. Эта величина равна

$$\Phi_0 - \Phi = \Phi_0 - A_{\text{сф}} \Phi_0 = (1 - A_{\text{сф}}) \cdot \Phi_0.$$

Любое нагретое тело излучает само. В результате нагретая поглощенным солнечным излучением планета излучает сама, причем в инфракрасном (тепловом) диапазоне. Наблюдаемое снаружи от планеты ее уходящее тепловое излучение характеризуется так называемой *эффективной температурой* T_e . При этом сферическое альбедо и эффективная температура связаны между собой уравнением теплового баланса:

$$4\sigma T_e^4 = (1 - A_{\text{сф}}) \cdot \Phi_0 + 4\varepsilon. \quad (5.2)$$

Здесь $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2/\text{К}^4$ — постоянная Стефана–Больцмана. Левая часть уравнения описывает уходящее от планеты тепловое излучение согласно *закону Стефана–Больцмана*: энергия, излучаемая в единицу времени с единицы поверхности, пропорциональна четвертой степени температуры. Правая часть уравнения описывает поглощенное планетой излучение. Небольшая добавка ε учитывает поток внутреннего тепла из недр планеты, приходящийся на единицу ее площади. У Венеры и других планет земной группы этот поток пренебрежимо мал по сравнению с потоком приходящей от Солнца энергии, и его в рассматриваемом случае можно не учитывать.

Коэффициент 4 в уравнении (5.2) появляется в связи с тем, что падающий на планету поток распределяется по площади видимого с Солнца диска планеты πR^2 (R — радиус планеты), а уходящий и внутренний потоки тепла распределены по общей площади сферической поверхности планеты $4\pi R^2$. Тогда эффективная температура выразится как

$$T_e^4 = \frac{(1 - A_{\text{сф}}) \cdot E_0}{4\sigma}. \quad (5.3)$$

Эффективная температура может быть рассчитана указанным образом, а также определена непосредственно из измерений по излучению планеты.

Парниковым эффектом ΔT называется разность между средней температурой поверхности планеты T_c и ее эффективной температурой T_e :

$$\Delta T = T_c - T_e.$$

Для Венеры средняя температура T_c оценивается в 735 К (465°C), эффективная температура T_e примерно 229 К (–44°C). В результате парниковый эффект Венеры характеризуется громадной величиной

$$\Delta T = 735 - 229 = 506 \text{ К}.$$

Другими словами, для внешнего наблюдателя Венера излучает как тело, нагретое всего до 229 К, тогда как на самом деле температура поверхности планеты гораздо выше (735 К).

Важно, что степень непрозрачности газа для уходящего теплового излучения существенно зависит от концентрации водяных паров. Водяного пара в атмосфере Венеры очень мало (около 0,002%), тем не менее результирующая температура поверхности достаточно высока — почти +500°C, что полностью соответствует теоретическим расчетам величины парникового эффекта. Интересно, что увеличение концентрации водяного пара могло бы привести к дальнейшему росту температуры поверхности планеты.

Отсюда может быть сделан вывод, что основная причина неожиданно высокой температуры Венеры заключается не столько в присутствии большого количества углекислого газа, который традиционно считается основным виновником парникового эффекта, сколько в высокой плотности ее атмосферы. Еще раз подчеркнем, что на степень «парниковости» атмосферы существенное воздействие оказывает концентрация водяных паров.

Тем не менее воды на Венере практически нет, и это еще одно существенное отличие от Земли: две соседние и практически одинаковые по размерам и массе планеты отличаются по запасам воды в $10^4 \dots 10^5$ раз. Это очередная проблема, требующая объяснений. По этому поводу также существует ряд гипотез. Согласно одной из них из-

начально на Венере было не меньше воды, чем на Земле. Более высокая температура (из-за близости к Солнцу) могла привести к интенсивному испарению воды и насыщению атмосферы ее парами. Благодаря росту концентрации водяного пара во все более плотной атмосфере должен был усиливаться парниковый эффект, что приводило к дальнейшему росту температуры. На больших высотах молекулы воды распадались на водород и кислород под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца, а легкий водород беспрепятственно улетучивался из горячей атмосферы в космическое пространство. Таким образом, вода быстро исчезла из атмосферы планеты, а ее остатки оказались связанными серной кислотой в высоких облаках.

Альтернативная гипотеза предполагает, что на том расстоянии от Солнца, где происходил процесс формирования Венеры в газопылевом облаке, изначально было недостаточно воды.

Еще одна версия предусматривает удар гигантского космического тела размерами не менее сотен километров, который мог сорвать насыщенную водяными парами атмосферу.

Поверхность Венеры. Наблюдать поверхность Венеры в телескопы либо с космических аппаратов в видимом диапазоне невозможно — она закрыта от нас многокилометровым слоем облаков, в которых никогда не бывает просветов. Информация о поверхности планеты получена с помощью космических аппаратов, осуществлявших посадку на Венеру, а также проводивших радиопросвечивание ее атмосферы.

Всего имеются четыре круговые панорамы поверхности Венеры, полученные в точках посадки спускаемых аппаратов советских автоматических межпланетных станций (АМС) «Венера-9» и «Венера-10» (1975, черно-белые) и станций «Венера-13» и «Венера-14» (1982, цветные).

Спускаемый аппарат АМС «Венера-9» совершил посадку на крутом склоне с уклоном в 30° . На снимке были видны камни — от мелких до метровых глыб, между камнями — рыхлый грунт. Содержание некоторых элементов ($0,3\%$ калия, $0,6 \cdot 10^{-4}\%$ урана, $3,6 \cdot 10^{-4}$ тория) типично для



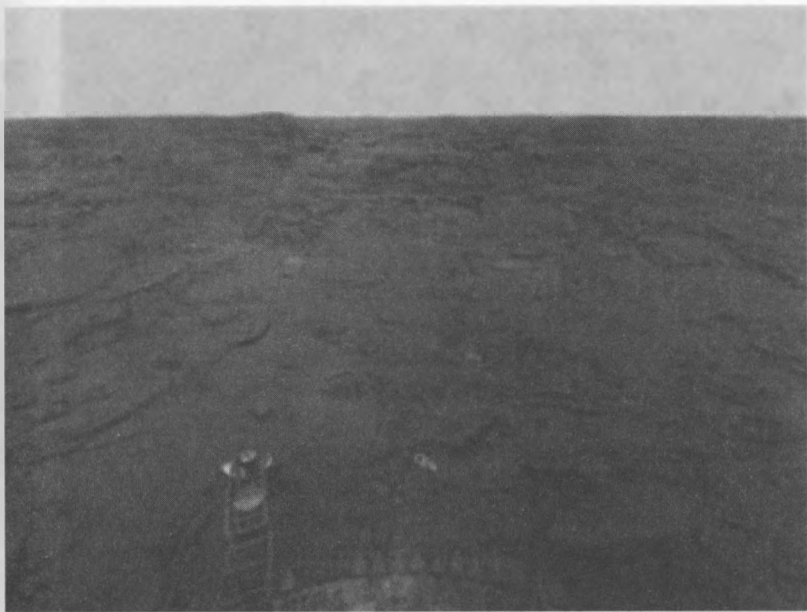
Рис. 5.3
Поверхность Венеры (космические аппараты «Венера-13»

вулканических пород (базальтов). Близкие значения этих элементов обнаружены и в других точках посадки.

Панорамы, полученные «Венерой-10», демонстрируют плоские каменные плиты на равнине. На каменных плитах видны трещины, впадины заполнены мелким щебнем.

Панорамы, переданные спускаемым аппаратом АМС «Венера-13» с холмистой долины, похожи на предыдущую картину. Здесь видны каменные плиты (0,5...2 м), камешки и мелкие частицы (3...50 мм). Состав грунта оказался близким к так называемым толеитовым базальтам, типичным для Гавайских островов на Земле. Что касается снимков «Венеры-14», то здесь просматриваются плоские многослойные каменные плиты различных размеров, местами растрескавшиеся. Эти плиты могут быть как осадочными породами, так и слоями затвердевшей лавы (рис. 5.3).

Богатая информация о рельефе Венеры получена с помощью радиолокации планеты. В 1970-е гг. мощными на-



и «Венера-14». Снимки переобработаны: Don P. Mitchell)

земными радаром осуществлялось облучение Венеры, и анализ отраженного сигнала позволил выделить некоторые детали. Естественно, разрешение первых радиокарт было очень низким. Тем не менее были выделены по крайней мере две крупные детали поверхности Венеры, получившие названия Альфа и Бета, которые резко отличались от фона на радиоизображениях.

В 1978–1989 гг. картирование рельефа поверхности было осуществлено с борта американского искусственного спутника Венеры «Пионер-Венера». Разрешающая способность использовавшегося метода альтиметрии была невысокой — в среднем порядка 100 км.

В 1983 г. на полярные эллиптические орбиты около Венеры были выведены две советских АМС «Венера-15» и «Венера-16», оснащенные бортовыми радиолокаторами бокового обзора. С помощью длительного «радиосканирования» поверхности удалось построить карты около $2/3$ поверхно-



Рис. 5.4

Поверхность Венеры по результатам радиосъемок
(космический аппарат «Магеллан», НАСА):
светлые области — возвышенности, темные — низины

сти северного полушария планеты с разрешением до 1 км. С 1990 по 1994 гг. локатор бокового обзора с улучшенными характеристиками работал на борту американского искусственного спутника Венеры «Магеллан», в результате получена карта поверхности с разрешением до 120 м (рис. 5.4).

Оказалось, что основная часть поверхности планеты покрыта плоскими равнинами и низменностями с невысокими холмами. Незначительная часть площади (8%) занята гористыми районами. Эти горные районы условно названы *континентами* или *материками*. Таких материков на Венере обнаружено три. Один из них — Земля Иштар вблизи северного полюса планеты с чрезвычайно сложным горным рельефом (рис. 5.5). Здесь находятся

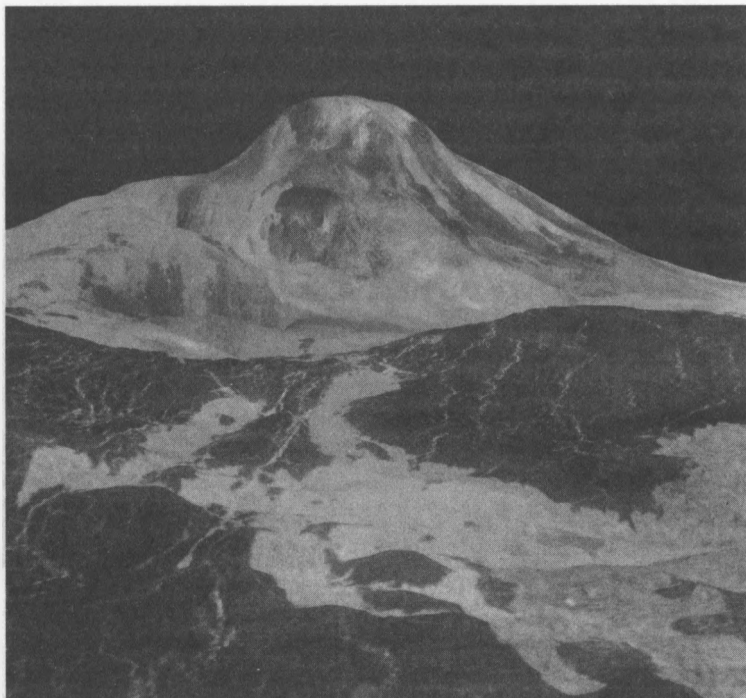


Рис. 5.5
Гора Маат на Венере
(компьютерная реконструкция по результатам съемок
с космического аппарата «Магеллан», НАСА)

самые высокие горы Венеры — в частности, гора Максвелла, возвышающаяся более чем на 11 км над неким условно принятым средним (нулевым) уровнем. Горные цепи Земли Иштар огибают плато Лакшми высотой 3...4 км, по многим признакам вулканического происхождения. Здесь есть огромные вулканические *кальдеры* (плоскодонные впадины на вершинах) размерами до 160 км.

Самый крупный «материк» Венеры называется Земля Афродиты, протянувшийся в южном полушарии планеты вдоль 10-й параллели и занимающий около 40 млн кв. км. Третий материк, в северном полушарии, сохранил название «область Бета». Около 27% площади поверхности планеты занимают низменности.

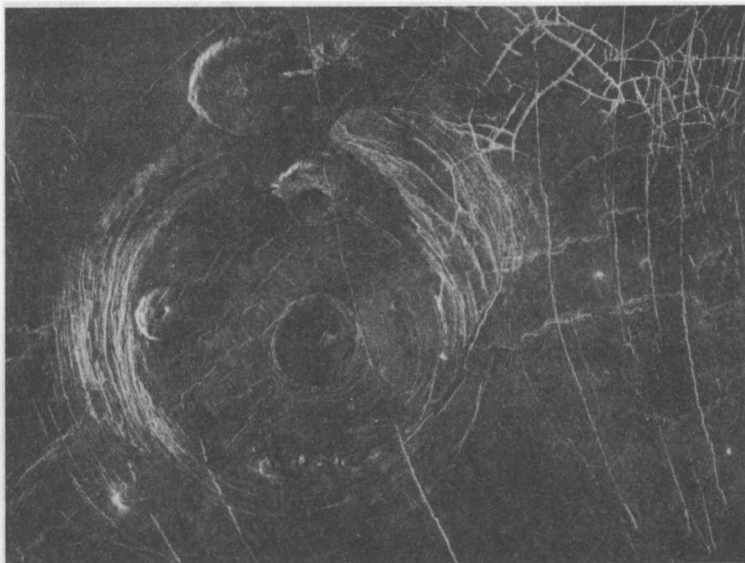


Рис. 5.6
Кольцевые структуры на Венере
(космический аппарат «Магеллан», НАСА)

Похоже, что кора у Венеры более стабильна, чем у Земли. Признаков тектоники крупномасштабных плит на планете не обнаружено. В то же время локальные проявления тектонических процессов на Венере заметны (например, в Земле Иштар).

На Венере сохранилось множество кратеров ударного происхождения диаметром от 10 до 300 км. Средняя плотность ударных кратеров диаметром более 10 км составляет 2 объекта на 1 млн кв. км (рис. 5.6).

Яркий пример — импактный кратер «*патера* Клеопатры» с диаметром внешнего вала 100 км, находящийся в 300 км от самой высокой вершины гор Максвелла. Многие удары падающих космических тел явно сопровождались обильными излияниями лавы. Наличие большого количества древних ударных кратеров, не разрушенных эрозией, а также другие данные позволяют утверждать, что поверхность планеты в основном мало изменилась за последние 300...500 млн лет. Есть основания полагать, что тогда вул-

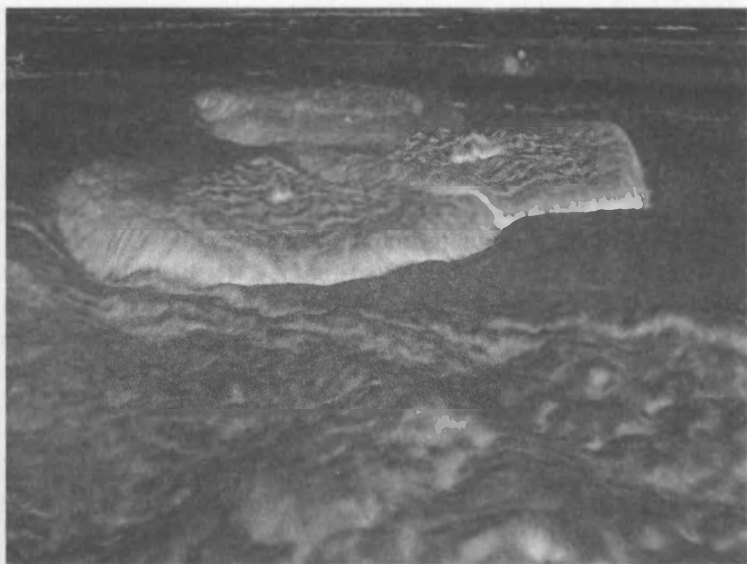


Рис. 5.7

Холмы, образованные, по-видимому, сгустками застывшей лавы (реконструкция съемок с космического аппарата «Магеллан», НАСА)

каническая активность планеты была наиболее сильной, потом снизилась, но не прекратилась до настоящего времени. Общее число вулканических объектов превышает 1600.

Размеры более 150 таких объектов превышают 100 км. Введена специальная классификация для этих объектов, во многом не похожих на земные вулканы. В числе вулканических объектов Венеры — так называемые *венцы*, или *короны* (концентрические валы), *арахноиды* (паутинные сети, включающие в себя радиальные структуры и концентрические валы, от слова «арахнос» — паук), извилистые лавовые каналы протяженностью до 1000 км и другие. Больше всего на Венере вулканов в форме конусов и куполов. Так, возле области Альфа обнаружены совершенно круглые образования с плоской или проваленной верхушкой и очень крутыми склонами, диаметром до 65 км. Предполагается, что такие «блины» сформировались при излияниях вязкой лавы, которая медленно растекалась и застывала (рис. 5.7).

Считается, что область Бета представляет собой гигантский *щитовой вулкан* высотой 4...5 км с характерным размером основания около 1000 км. Радиальные лучи, расходящиеся от центра этой области, — это, видимо, следы грандиозных лавовых потоков, стекавших по пологим склонам вулкана.

Все это указывает на наличие гигантских резервуаров жидкой лавы под поверхностью планеты. Если на Земле вулканизм развит в основном вдоль границ плит, то на Венере он распространен практически повсеместно. Тем не менее, по некоторым оценкам, в настоящее время общий объем извергаемого в вулканических процессах материала сопоставим с таковым для Земли.

Еще одна интересная деталь, касающаяся Венеры, — обнаруженные космическими аппаратами *электрические разряды* в атмосфере Венеры. Оказалось, что молнии очень неравномерно распределены по поверхности планеты и тяготеют к районам усиленного вулканизма. По-видимому, электрические разряды сопровождают вулканические извержения в плотной атмосфере планеты.

Названия деталей поверхности планеты первоначально связывались с именами деятелей в области радиотехники и электротехники (например, Максвелл, Эдисон, Гальвани, Попов и др.). Так была подчеркнута определяющая роль радиометодов в исследованиях поверхности Венеры. В дальнейшем кратерам, вулканам, горам и другим объектам на Венере, как единственной планете с женским именем, присваивались исключительно женские имена (богини народов мира, известные женщины, просто женские имена).

Как и у Меркурия, у Венеры нет спутников. Тем не менее существует версия, что спутник у Венеры в прошлом был. Это Меркурий. Его большая масса (7% массы Венеры) должна была привести к потере скорости вращения под воздействием мощных приливных сил. Не исключено, что именно сильные приливы со стороны Меркурия в прошлом затормозили вращение планеты, если предположить, что все планеты изначально имели близкие периоды вращения вокруг своих осей (*принцип изохронизма*).

Помимо этого, приливы должны были сильно разогревать недра обоих небесных тел, приводить к мощному выделению тепла в недрах Венеры и их сильной дегазации. В результате должна была возникнуть плотная атмосфера, что и наблюдается на практике. Некоторые резонансные соотношения в периодах вращения и обращения Венеры и Меркурия также проще объясняются в рамках этой гипотезы.

Компьютерные расчеты, выполненные в 1976 г. в США, показали, что такой сценарий вполне возможен, и крупный спутник типа Меркурия действительно мог «убежать» от Венеры, став самостоятельной планетой. Но эта версия пока не может считаться окончательно доказанной.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Венера находится существенно дальше от Солнца, чем Меркурий, но средняя температура ее поверхности заметно выше. С чем это связано?
2. Дайте описание атмосферы Венеры (химический состав, плотность, температура, параметры вращения, ветровой режим, эффект суперротации).
3. Какие факты говорят в пользу гипотезы о современном вулканизме Венеры?
4. Дайте определение парникового эффекта.
5. Какие существуют доводы в пользу гипотезы о том, что Меркурий когда-то был спутником Венеры?
6. Какие способы применяются для исследования рельефа Венеры?
7. Дайте описание основных форм рельефа Венеры.
8. На Венере обнаружено существенно меньше ударных кратеров, чем на Меркурии. Объясните, с чем это может быть связано.



ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ

Поскольку изучение Земли составляет основное содержание обучения на географических факультетах университетов, многие характеристики, особенности рельефа, климата, свойств атмосферы и т. д. детально изучаются в других курсах. Данная лекция посвящена прежде всего астрономическим (общим) характеристикам планеты Земля (рис. 6.1).

Планета Земля совершает один оборот вокруг Солнца за 365,25636 суток (365 суток 6 ч 9 мин 10 с). Это так называемый звездный, или сидерический, год нашей планеты. Средний промежуток времени между двумя последовательными весенними равноденствиями составляет 365,2422 суток (365 суток 5 ч 48 мин 45 с) и называется *тропический год*.

Строго говоря, вокруг Солнца движется не Земля, а *барицентр* (центр масс) системы Земля–Луна. Вокруг барицентра обращаются и Земля, и Луна. Барицентр находится на расстоянии 4672 км от центра Земли в направлении к Луне, т. е. примерно на глубине 1700 км под поверхностью Земли. Поскольку Луна совершает оборот вокруг барицентра примерно за месяц, Земля также поворачивается относительно него за тот же период.

Среднее расстояние от Земли до Солнца составляет $149,6 \cdot 10^6$ км, что принято за единицу измерения расстояний в Солнечной системе (1 астрономическая единица, или 1 а. е.). Земля движется по эллиптической орбите с небольшим эксцентриситетом $e = 0,01672$. В результате

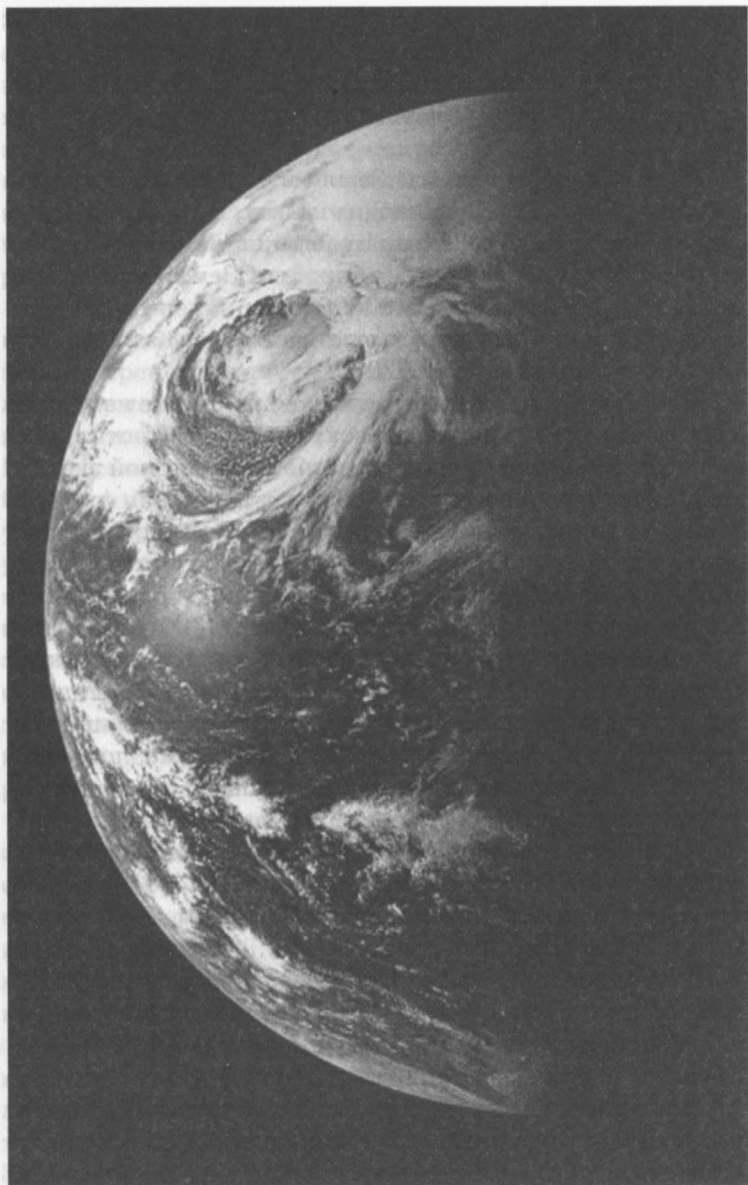


Рис. 6.1
Планета Земля

расстояние от Земли до Солнца периодически изменяется от 147117000 км (в перигелии, 2–5 января) до 152083000 км (в афелии, 1–5 июля). Точки перигелия и афелия соединяет линия *апсид*, совпадающая с большой осью эллипса орбиты Земли.

Эллиптичность орбиты Земли в соответствии со вторым законом Кеплера приводит к тому, что скорость движения Земли вокруг Солнца различна в разных точках орбиты. Средняя скорость движения Земли составляет 29,79 км/с, что близко к 100000 км/ч. В перигелии скорость движения Земли увеличивается до 30,29 км/с, в афелии — уменьшается до 29,29 км/с.

Земля вращается вокруг своей оси в том же направлении, в котором она движется вокруг Солнца (против часовой стрелки, если смотреть со стороны Полярной звезды, или северного полюса мира). Период вращения (сидерический) составляет 23 ч 56 мин 4,1 с. Поскольку Земля движется вокруг Солнца, нам кажется, что это Солнце движется по небу среди звезд в обратном направлении, смещаясь на небе примерно на 1° в сутки ($360^\circ/365,26$ суток $\approx 1^\circ/\text{сутки}$). В результате в среднем один оборот вокруг своей оси относительно слегка смещающегося Солнца не равен сидерическому периоду, а несколько больше его. Этот период называется *средними солнечными сутками*.

Земля, в отличие от Меркурия и Венеры, имеет несферическую форму. Отклонение от формы шара незначительно, но заметно. Экваториальный диаметр нашей планеты составляет 12756,320 км, полярный — 12713,548 км. Разница в этих значениях составляет 42,772 км. Таким образом, сплюснутость Земли составляет 0,3%. Несферичность Земли приводит к появлению целого ряда эффектов. Поскольку на экваториальные выступы Земли действует притяжение Солнца и Луны, ось вращения Земли выписывает очень сложное движение в пространстве.

Во-первых, ось вращения Земли медленно описывает конус вокруг оси эклиптики — линии, перпендикулярной плоскости орбиты Земли. При этом наклон оси вращения Земли к оси эклиптики остается постоянным и равным $66^\circ 33'$. Это явление называется *прецессией*. Ось вращения

Земли описывает полный конус с периодом 26000 лет. Это означает, что если сейчас ось вращения Земли направлена приблизительно в сторону Полярной звезды, то это направление очень медленно меняется. 4000 лет назад ближе всего к северному полюсу мира была звезда альфа Дракона, через 12000 лет северный полюс мира приблизится к звезде альфа Лиры (Вега). Северный полюс мира совершит на небе круг радиусом около $23^{\circ}27'$ за указанный период и вернется к Полярной звезде через 26000 лет.

Во-вторых, из-за периодического изменения силы и направления притяжения со стороны Солнца и Луны на эффект прецессии накладывается еще один эффект — *нута́ция земной оси*, которая проявляется в мелких колебаниях оси вращения около своего среднего положения. Прецессионные силы Солнца и Луны равны нулю, когда Солнце и Луна находятся в плоскости экватора Земли, и увеличиваются до максимума при наибольшем удалении указанных светил от этой плоскости. В результате истинное положение оси вращения Земли описывает эллипсы вокруг среднего положения, определяемого нутацией. Эти эллипсы невелики ($18,42'' \times 13,72''$), но, тем не менее, они существуют. Период главного нутационного колебания земной оси (а их несколько) составляет 18,6 года. Детальный анализ нутационных колебаний позволяет уточнять распределение масс (внутреннее строение) Земли.

В-третьих, благодаря слабому притяжению планет незначительно меняется положение в пространстве плоскости земной орбиты (плоскости эклиптики). Эти изменения с трудом обнаружимы, однако достоверно существуют. Они проявляются в смещении точки весеннего равноденствия на небе к востоку на $0,114''$ в год. Эффект получил название *планетная прецессия*.

Небольшая асимметрия формы Земли, а также вероятная асимметрия распределения масс в теле Земли приводят к тому, что тело Земли немного смещается относительно оси ее вращения. Точки пересечения поверхности Земли и оси ее вращения называются *географическими полюсами*. Если тело планеты смещается относительно оси вращения, то полюсы вместе со связанной с ними системой

географических координат должны также смещаться (блуждать) по поверхности Земли. Этот эффект был обнаружен: широта отдельных географических пунктов периодически изменяется примерно на $0,3''$. Причем если широта увеличивается, то в другом пункте на противоположном географическом меридиане она уменьшается. Эти *смещения географических полюсов* и связанной с ними системы географических координат невелики (полюсы движутся по поверхности Земли в пределах квадрата со стороной около 25 м) и периодичны. Основными периодами является годичный период (12 месяцев) и так называемый период Чандлера (14 месяцев). Период Чандлера — естественный период колебаний Земли, теоретически предсказанный Леонардом Эйлером еще в XVIII в. С этим периодом полюс движется по кругу со средним диаметром около 9 м. Если бы Земля была абсолютно твердым телом, этот период равнялся бы 10 месяцам. Но Земля пластична, подвержена упругим деформациям, и период Чандлера оказался продолжительнее. Что касается годичного периода, с которым полюс перемещается по вытянутому эллипсу с средней большей осью около 14 м, то он связан с сезонными изменениями на Земле: перераспределением масс на поверхности Земли в связи с выпадением и таянием снегов, сезонными ветрами, океаническими течениями и т. д.

Все указанные эффекты приводят к тому, что положение Земли в пространстве сложным образом меняется. Земля участвует одновременно в целом наборе движений (вращений) с разными параметрами и периодами. В результате непрерывно меняются координаты всех светил на небе в принятой в астрономии экваториальной системе координат, которая связана с положением экватора Земли в пространстве.

Помимо изменений в пространственном положении Земли и оси ее вращения, наблюдаются изменения в скорости вращения Земли вокруг своей оси. Оказалось, что Земля вращается существенно неравномерно.

Вековые изменения скорости вращения Земли связаны с тормозящим влиянием лунных и солнечных приливов. В результате в течение последних 250 лет фиксирует-

ся систематическое замедление вращения Земли примерно на 0,0014 с (1,4 мс) за 100 лет.

Сезонные изменения скорости вращения Земли приводят к увеличениям и уменьшениям продолжительности суток на величину до 0,001 с в течение года. Самые короткие сутки наблюдаются в июле–августе (Земля вблизи афелия орбиты), самые длинные сутки — в марте (вскоре после перигелия). Наиболее вероятными причинами этих изменений являются сезонные перераспределения воздушных и водных масс на поверхности Земли.

Нерегулярные изменения скорости вращения Земли проявляются в виде неожиданных скачкообразных вариаций продолжительности суток на тысячные доли секунды за характерное время порядка нескольких месяцев. Причина этих изменений достоверно не известна. Помимо гипотетических перемещений вещества в недрах (ядре) Земли, рассматриваются и циркуляция атмосферных и водных масс, и даже взаимодействие выбросов вещества из Солнца с магнитосферой Земли.

Высокоточные (прецизионные) наземные астрономические наблюдения, в последнее время подкрепляемые наблюдениями с космических аппаратов, позволили обнаружить и определить параметры перечисленных движений, в которых участвует Земля. Несомненно, аналогичные эффекты характерны и для других планет, но пока они не измерены из-за отсутствия необходимых средств наблюдений на планетах.

Заметный наклон оси вращения Земли к плоскости орбиты ($66^{\circ}34'$) приводит к эффекту *сезонов*, или *смены времен года*, который отсутствует на Меркурии и Венере. Поскольку положение оси вращения Земли в пространстве постоянно (если исключить эффекты прецессии и нутации), получается, что в течение года, в процессе движения Земли по орбите вокруг Солнца, меняется положение оси по отношению к Солнцу. В результате меняются условия освещения солнечными лучами северного и южного полушарий.

Когда северное полушарие наклоняется в сторону Солнца, здесь (в северном полушарии) солнечные лучи падают

все более отвесно на земную поверхность и, следовательно, нагревают ее все больше. Для наблюдателя на Земле в северном полушарии это выглядит следующим образом: с каждым днем Солнце, двигаясь по небу, поднимается все выше над горизонтом. Выше всего Солнце оказывается в полдень над горизонтом 21–22 июня, когда проекция оси вращения Земли на плоскость орбиты Земли направлена прямо на Солнце.

По мере того как северное полушарие наклоняется в сторону Солнца, все большая часть северного полушария оказывается освещенной солнечными лучами. Это означает, что продолжительность дня увеличивается, а продолжительность ночи сокращается. Самый длинный день в северном полушарии приходится на 22 июня, когда Солнце выше всего (день летнего солнцестояния).

В это же время в южном полушарии все происходит наоборот: солнечные лучи падают все более полого к земной поверхности, нагревая ее все меньше. Для наблюдателя в южном полушарии Солнце, ежедневно двигаясь по небу, опускается все ниже над горизонтом. Соответственно 21–22 июня оно оказывается в полдень на минимальной высоте.

Южное полушарие при этом «отворачивается» от Солнца, и все меньшая часть поверхности Земли в этом полушарии оказывается освещенной солнечными лучами. Продолжительность ночи нарастает, продолжительность дня уменьшается. Процесс достигает своего максимума 22 июня.

После 22 июня ось вращения Земли начинает медленно поворачиваться, северное и южное полушария меняются местами: теперь северное медленно отворачивается от Солнца, а южное поворачивается к нему. Выше всего над горизонтом в южном полушарии Солнце оказывается 21–22 декабря, в это же время в северном полушарии оно оказывается ниже всего (день зимнего солнцестояния). Соответственно меняется продолжительность дня и ночи.

В моменты, когда ось вращения Земли перпендикулярна солнечным лучам, условия освещения южного и северного полушарий одинаковы, а продолжительность дня равна продолжительности ночи на всей Земле. Эти момен-

ты соответствуют дням весеннего и осеннего равноденствия, соответственно 21 марта и 23 сентября. В период с 21 марта по 23 сентября северное полушарие получает больше тепла, чем южное, с 23 сентября по 21 марта — наоборот.

На высоких широтах (выше $66^{\circ}34'$) наблюдаются эффекты полярного дня и полярной ночи, когда Солнце совсем не заходит либо совсем не восходит. На полюсах полярный день и полярная ночь продолжаются по полгода, по мере перемещения к более низким широтам их продолжительность уменьшается.

Если бы орбита Земли представляла собой окружность, то изменения в условиях освещения со стороны Солнца для северного и южного полушарий были бы абсолютно симметричными. Но эллиптичность земной орбиты приводит к тому, что когда в северном полушарии зима, Земля находится близко к перигелию орбиты, в результате чего количество тепловой энергии, поступающей от Солнца, оказывается на 7% больше, чем во время нахождения в афелии. Кроме того, в перигелии Земля движется быстрее, чем в афелии. Этим объясняется менее суровая зима и более прохладное лето в северном полушарии по сравнению с более контрастными сезонами в южном полушарии. На практике различия в количествах поступающего тепла в перигелии и афелии не равны 7%, поскольку дополнительное влияние оказывают такие переменные величины, как облачность, определяющая долю отражаемого от планеты излучения. Дополнительный перенос тепла между полушариями осуществляется циркуляцией атмосферы и океаническими течениями.

Средняя температура поверхности Земли составляет 288 К, или $+15^{\circ}\text{C}$. Амплитуда колебаний температуры приземного воздуха в отдельных точках поверхности планеты может быть значительной: от зарегистрированной величины -88°C в зимней Антарктиде до $+60^{\circ}\text{C}$ в каменных каньонах на юге США.

Внутреннее строение и магнитное поле Земли. Общая масса нашей планеты, включая атмосферу, составляет $5,9742 \cdot 10^{24}$ кг. Средняя плотность — $5,515 \text{ г/см}^3$ — самая

высокая среди всех планет Солнечной системы и близка к средней плотности Меркурия.

Детальные исследования внутреннего строения Земли достаточно сложны. Существующие скважины не превышают 11 км (сверхглубокая скважина на Кольском полуострове, предварительно рассчитанная на глубину 14 км). Скважины, пробуренные на дне океана, проникают вглубь не более чем на 1,5 км.

Для изучения глубинных свойств земного шара используется анализ параметров распространения колебаний и волн в недрах Земли (сейсмических волн). Скорость распространения волн зависит от плотности и упругих свойств пород. Волны отражаются от границ между пластами пород разного типа и преломляются на этих границах. Анализ приходящих волн, регистрируемых с помощью сети сейсмодатчиков, может дать информацию о распределении плотности в недрах планеты и свойствах пород. В роли причин сейсмических колебаний могут выступать землетрясения, ядерные и другие взрывы. В результате на сегодняшний день имеются следующие данные о внутреннем строении Земли.

Поверхностные слои Земли составляют так называемую *кору*. Кора сложена из осадочных пород (верхний слой), гранитов (средний слой) и базальтов (нижний слой). Средняя плотность коры составляет $2,7...2,8 \text{ г/см}^3$. Толщина коры разнообразна: от 5...10 км под дном океанов до 70 км под горными районами, в среднем 30...35 км. Толщина нижнего базальтового слоя, по разным оценкам, колеблется от 5 (под океаном) до 15 км. По мере удаления от земной поверхности нарастают плотность вещества и температура. Погружение в недра Земли на 33 м приводит к росту температуры в среднем на 1°C . Эта величина (геотермический градиент) различна для разных мест на Земле — от 20 м на о-ве Калимантан до 45 м в Северной Америке. Считается, что повышение температуры происходит только в земной коре и верхней мантии (не глубже 100 км), где находятся радиоактивные вещества, излучающие тепло. О присутствии радиоактивных веществ в более глубоких слоях мало известно.

Гранитный и базальтовый слои разделяет так называемая поверхность Конрада. Нижняя граница земной коры называется *разделом Мохоровичича (МОХО)*. Нижняя граница коры представляет собой резкую границу сред. Здесь происходит резкое изменение скорости распространения продольных сейсмических волн от 6,7...7,1 км/с до 8,3 км/с. Этот факт указывает на быстрое значительное увеличение плотности слоев ниже этого уровня.

Ниже раздела Мохоровичича начинается *мантия* Земли. Верхняя часть мантии — горячая, твердая и плотная. Кора вместе с верхней частью мантии образует *литосферу* планеты. Литосфера — это жесткая, твердая среда, расколота на 10 крупномасштабных плит. Под литосферой находится вязкий, частично расплавленный пограничный слой верхней мантии, который называется *астеносфера* (глубина 70...250 км). Вещество астеносферы обладает повышенной текучестью. Основания материков погружены в астеносферу и поддерживаются в равновесии силой Архимеда. Такое равновесие называется изостатическим. Прецизионные измерения показывают, что материки как бы плавают в астеносфере, перемещаясь друг относительно друга. Такие относительные смещения крупномасштабных плит со скоростями порядка сантиметров в год вызываются конвекцией в мантии. Столкновение и наплзание плит приводят к формированию горных цепей, раздвигание приводит к возникновению глубоких впадин, заполняемых водой (морей).

Согласно основной гипотезе восходящие конвективные движения мантии в астеносфере выносят ее вещество вверх под дном океанов. Здесь все время формируется новая кора, давление которой приводит к раздвижению материков. Плиты океанической коры вклиниваются под материковую кору на границе материков и океанов. Кора собирается здесь в складки, в результате чего образуются горные цепи. Эти процессы приводят к формированию основных форм рельефа на Земле.

Мантия простирается до глубины 2900 км и имеет сложную многослойную структуру. Нижняя граница мантии отмечена резким уменьшением скорости распространения

сейсмических волн от 13 до 8 км/с. Если все вещество мантии считается твердым (кроме верхнего слоя астеносферы), то переходный слой в основании мантии (глубина 2700...2900 км) проявляет свойства жидкого вещества.

На глубине 2900 км начинается внешнее ядро. Анализ распространения сейсмических волн указывает на наличие здесь отчетливой границы, от которой отражаются продольные и поперечные волны. Ниже границы скорость продольных волн резко падает, а плотность вещества возрастает скачком от 5,6 до 10 г/см³. Поперечные волны ниже границы не проходят. Физическая интерпретация этого явления — ядро расплавлено (жидкое).

Ядро Земли неоднородно. На глубине 5000 км обнаружен очередной резкий скачок плотности — от 11 до 13 г/см³. Он соответствует переходному слою, ниже которого находится твердое внутреннее ядро. Радиус внутреннего ядра (от переходного слоя до центра Земли) составляет 1100 км (по другим данным, более 1200). Температура в центре Земли оценивается в 6000 К (как на поверхности Солнца), давление здесь — около 3600 кбар, плотность вещества — около 13 г/см³.

Химический состав Земли включает в себя все элементы таблицы Менделеева. Наиболее распространены на Земле железо (34,6%), кислород (29,5%), кремний (15,2%) и магний (12,7%). Наиболее распространенные соединения в коре — оксиды кремния и алюминия. Ядро, судя по всему, состоит преимущественно из железа с добавками никеля.

Земля обладает заметным магнитным полем — в среднем, около 0,5 Гс у поверхности. Наибольшая индукция поля без учета местных аномалий отмечена в Антарктиде (0,68 Гс), наименьшая — в Бразилии (0,24 Гс). Общая конфигурация магнитного поля планеты близка к форме поля, создаваемого воображаемым магнитным диполем (намагниченным стержнем). Кроме этого (общего) поля, есть локальные неоднородности, связанные с присутствием в земной коре намагниченных пород. Например, в районе Курской магнитной аномалии индукция магнитного поля достигает 2 Гс.

Воображаемый магнитный диполь, поле которого примерно соответствует истинному (измеренному на практике), называется *эквивалентным магнитным диполем*. Точки пересечения оси этого диполя с поверхностью Земли (геомагнитные полюсы) не совпадают с географическими полюсами. Координаты северной точки (северного геомагнитного полюса, или полюса эквивалентного диполя) $\varphi = 80^\circ$ с. ш., $\lambda = 72^\circ$ з. д. (в Северной Гренландии). Этот воображаемый диполь называют *геоцентричным* — его ось проходит через центр Земли.

Истинному полю более точно соответствует так называемый *эксцентричный* диполь, ось которого смещена относительно центра Земли. Его северный полюс находится в точке с координатами $\varphi = 84^\circ$ с. ш., $\lambda = 95^\circ$ з. д. на севере Канады.

Истинные магнитные полюсы (места на Земле, где силовые линии вертикально «входят» в тело планеты) не совпадают с геомагнитными полюсами. Это означает, что описание магнитного поля Земли с помощью диполя можно рассматривать лишь как приближенное, реальное поле сложнее по структуре. Интересно, что истинные магнитные полюсы непрерывно движутся по поверхности Земли. Измерения координат северного истинного магнитного полюса показали, что в течение большей части XX в. он перемещался по поверхности Земли со средней скоростью около 9 км/год. В 1970-е гг. его движение стало ускоряться, и в начале XXI в. он двигался уже со скоростью 40 км/год. В последнее время появились признаки его замедления. Причина происходящего окончательно не выяснена.

Исследования остаточной намагниченности горных пород с известным возрастом их образования показали, что направление магнитного поля Земли неоднократно изменялось на обратное. Такие изменения называются *инверсиями магнитного поля*. За последний миллион лет инверсии происходили 16 раз. В настоящее время наблюдается почти линейное уменьшение *общего дипольного магнитного момента* Земли, который за 450 лет уменьшился на 20%. Если процесс будет продолжаться аналогичным образом и дальше, дипольный магнитный момент

планеты станет равным нулю примерно через 1300 лет. Не исключено, что в настоящее время приближается очередная инверсия магнитного поля Земли. Причины подобных процессов активно обсуждаются, но достоверно не известны.

Происхождение магнитного поля Земли и других планет предположительно связано с так называемым *динамомеханизмом*. Суть его состоит в следующем. В жидком ядре Земли температура очень высока, вещество расплавлено и имеет высокую электрическую проводимость, поскольку здесь много металла (железа и никеля). Начальное магнитное поле, которое обязательно возникает в подобной среде, порождает электрический ток при наличии движения проводящего вещества. Такое движение должно порождаться конвекцией. Возникающий электрический ток сам создает собственное магнитное поле, которое добавляется к начальному полю, усиливая его, что, в свою очередь, усиливает ток. Такой процесс должен привести к постепенному нарастанию и магнитного поля, и тока. Этому нарастанию препятствуют растущие вместе с током потери на выделение джоулева тепла, поэтому процесс не может «разгоняться» до бесконечности, стабилизируясь на некоем уровне.

Таким образом, в рамках этой теории оказывается, что магнитное поле порождается движениями в жидком расплавленном металлическом ядре планеты. Отсутствие же магнитного поля у планеты еще не означает, что у нее нет жидкого ядра. Теория указывает, что для формирования сильного магнитного поля необходимы дополнительные факторы, например вращение небесного тела, создающее кориолисовы силы, которые служат источником крупномасштабных движений электропроводящей среды в недрах тела. Иначе сложно объяснить отсутствие магнитного поля у Венеры, которая по внутреннему строению близка Земле, но при этом практически не вращается. Следует подчеркнуть, что изложенная модель является современной парадигмой (основной теорией, которую поддерживает большинство ученых), однако это не означает, что она является истиной в последней инстанции. Многие элементы этой концепции остаются неясными.

Поверхность Земли. Внешняя поверхность земной коры чрезвычайно разнообразна. Тектонические процессы в коре, вулканизм, а также эрозионные явления, связанные с действием воды, ветра, приводят к гигантскому разнообразию форм рельефа. Максимальные перепады высот относительно некоего среднего уровня (уровня моря) составляют от +8850,67 м (вершина Джомолунгма в Гималаях, данные GPS-измерений 2000 г.) до -11033 м (Марианская впадина в Тихом океане). Средняя глубина океана на Земле оценивается в -3800 м, средняя высота континентов над уровнем моря +840 м.

Общая поверхность океана составляет примерно 71,3% от общей площади поверхности планеты. Здесь содержится 97% всей воды на Земле. Водная оболочка (гидросфера) представляет собой уникальное явление, которому нет аналогов на других планетах Солнечной системы. 11% суши составляют ледники, около 3% — зона вечной мерзлоты. Пресная вода составляет около 1% всех водных ресурсов Земли. Поверхность Земли подвергается постоянным изменениям под влиянием сочетания множества факторов — тектонических процессов, вулканизма, выветривания, действия воды, изменений температуры, влияния биосферы и т. д. В современную эпоху наряду с этими факторами появился новый специфический *антропогенный фактор* — влияние деятельности человека.

Атмосфера Земли. Многие свойства поверхности Земли связаны с наличием атмосферы. Ее масса составляет $5,16 \cdot 10^{18}$ кг. Состав атмосферы уникален. 78,084% объемного содержания сухого воздуха занимает азот (75,523% по массе), 20,948% — кислород (23,142% по массе), 0,934% — аргон (1,28% по массе). Переменная часть состава атмосферы — вода в разных состояниях: водяной пар, вода и кристаллики льда — от 0,05 до 4%, в среднем 0,3%. Таковы основные компоненты земной атмосферы. Незначительные примеси в количествах порядка $10^{-3} \dots 10^{-6}\%$ представлены углекислым газом, неоном, гелием, метаном, угарным газом, криптоном, водородом, ксеноном, озоном, следами окислов азота, соединениями хлора и фтора. В частности, на углекислый газ приходится около

0,0320% (0,045% по массе). Средняя молекулярная масса атмосферного воздуха (смеси указанных газов в указанной пропорции) составляет 28,8. Восходящие потоки воздуха интенсивно перемешивают его, в результате состав атмосферы (соотношение компонентов) практически не меняется до высот 100...150 км.

Высокое содержание свободного кислорода связано с наличием биосферы: кислород непрерывно поступает в атмосферу благодаря процессу фотосинтеза в зеленых растениях и фитопланктоне. При исчезновении жизни на Земле кислород, как мощный окислитель, сможет быстро образовать оксиды и исчезнуть из атмосферы. Таким образом, наличие жизни на Земле привело к глобальным изменениям (в частности, радикальному изменению состава атмосферы). Давление атмосферы у поверхности на уровне моря составляет 1 бар, или 760 мм рт. ст. Это примерно в 90 раз меньше атмосферного давления на поверхности Венеры.

В атмосфере Земли традиционно выделяют четыре основных слоя (рис. 6.2). Приземный слой называется *тропосфера*. Верхняя граница тропосферы в средних широтах зимой лежит на высоте 9...10 км, летом — 10...12 км, вблизи экватора она выше (17 км). Здесь содержится около 80% массы всей атмосферы планеты и основная доля воды во всех состояниях. В тропосфере температура падает с высотой (около 6°C на 1 км высоты). Тепло в тропосфере переносится инфракрасным излучением от нагретой поверхности Земли и конвективными движениями воздуха.

В диапазоне высот от 15 до 55 км лежит *стратосфера*. В стратосфере до высоты примерно 25...30 км температура почти не меняется — здесь она близка к -55°C. Выше, вплоть до верхней границы стратосферы, она постепенно поднимается до 0°C. Из стратосферы и более высоких слоев атмосферы тепловая энергия в виде инфракрасного излучения свободно уходит в космическое пространство, поскольку эти слои прозрачны для данного излучения.

Тонкие промежуточные граничные слои, отделяющие стратосферу от соседних с ней слоев, называются тропо-

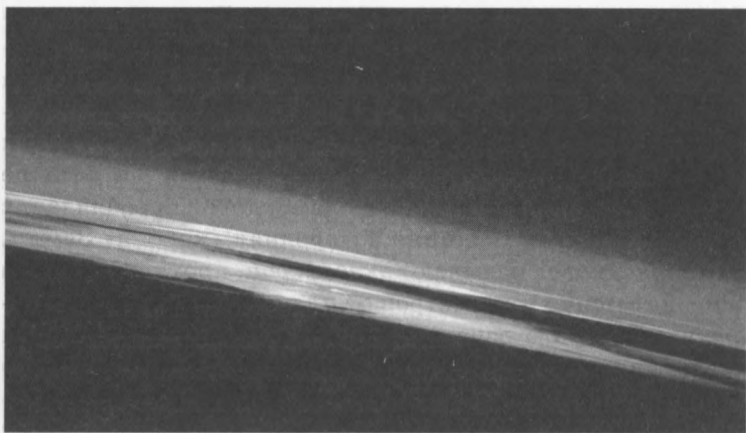


Рис. 6.2
Атмосфера Земли
(Международная космическая станция, 23-й экипаж, НАСА)

пауза (внизу) и стратопauза (вверху). Выше стратопauзы находится *мезосфера* (высота, 55...80 км). В мезосфере температура сначала поднимается до $+8^{\circ}\text{C}$ (температурный максимум), затем падает до -68°C (минимальная температура) на высоте 80 км, где находится мезопauза. Начиная с мезопauзы, температура снова быстро возрастает с высотой.

Захватывая часть мезосферы, начиная с высоты 60 км простирается существенно неоднородная многослойная *ионосфера*. Здесь преобладают заряженные частицы — ионизованные атомы с потерянными электронами и свободные электроны. Ионизация нейтральных атомов осуществляется коротковолновым излучением Солнца и потоком заряженных частиц, летящих от Солнца (солнечным ветром). Поскольку эти факторы существенно меняются в зависимости от времени суток, времени года и уровня солнечной активности, ионосфера сильно меняет свои свойства в пространстве и во времени. Ионосфера простирается на огромную высоту — до 25000 км (в годы повышенной солнечной активности — до 100000 км, что составляет примерно четверть расстояния до Луны). Ионосфера — наиболее динамичный слой земной атмосферы,

хотя плотность ее чрезвычайно мала. Температура этого разреженного слоя ионизованного воздуха быстро нарастает с высотой вплоть до 700°C в эпоху минимума солнечной активности и даже 1500°C в эпоху максимума солнечной активности. С ростом высоты становится все меньше тяжелых компонент, остается все больше легких газов — гелия и водорода. Водород преобладает с высоты 1600 км. Внешняя водородная «корона» Земли, которую иногда называют *экзосферой*, протягивается на многие тысячи километров от планеты. Высокая температура водорода означает высокую скорость движения молекулярного и атомарного водорода. В случае превышения второй космической скорости частицы верхней атмосферы (прежде всего самые легкие) навсегда покидают окрестности Земли. Этот процесс называется диссипацией атмосферы. Благодаря ему наша планета ежедневно теряет несколько тысяч тонн водорода, который улетучивается в космос.

Атмосферная циркуляция. Экваториальные области планеты получают гораздо большее количество тепла от Солнца, чем полярные. В результате атмосферные массы вблизи экватора нагреваются, расширяются, поднимаются вверх, смещаются в сторону полюсов и замещаются более холодными воздушными массами, приходящими с высоких широт. Сила Кориолиса, порождаемая вращением Земли, приводит к отклонению потока от меридионального направления. Поэтому, помимо меридионального смещения, наблюдается общее смещение в направлении с запада на восток. Система этих глобальных движений воздушных масс называется *атмосферной циркуляцией*. Большие перепады температуры и давления приводят к возникновению волновых (вихревых) структур в атмосфере. В результате на Земле господствует так называемый *волновой режим атмосферной циркуляции*.

Роль озона в атмосфере Земли. На высотах от 18 до 50 км в стратосфере присутствует озон. Максимальная концентрация этого газа, молекула которого состоит из трех атомов кислорода, наблюдается на высоте около 25 км. Именно озон, разлагаясь на молекулярный двух-

атомный кислород и атомарный кислород под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца, является источником тепла, которое выделяется в ходе этой реакции разложения озона. Благодаря ей в атмосфере наблюдается упомянутый выше температурный максимум (до $+8^{\circ}\text{C}$) на высотах около 50 км. Поглощение озоном солнечного ультрафиолетового излучения, помимо нагрева верхней стратосферы, приводит к чрезвычайно важному эффекту: это излучение не может проникнуть в нижнюю атмосферу. Озоновый слой выступает в роли своеобразного щита, не допускающего губительные для живых организмов ультрафиолетовые лучи к поверхности Земли. В этом смысле озон является необходимым условием для существования части биосферы, находящейся на поверхности суши.

Следует обратить внимание на тот факт, что для образования озона необходимо присутствие в атмосфере свободного молекулярного кислорода, порождаемого биосферой. Молекула двухатомного кислорода под воздействием коротковолнового (ультрафиолетового) излучения Солнца разлагается на два атома кислорода, а затем другая двухатомная молекула кислорода, сталкиваясь с образовавшимся отдельным атомом кислорода и какой-нибудь третьей молекулой как катализатором, образует молекулу озона. Биосфера сама производит продукт, защищающий ее от космических излучений. Интересно, что в процессе формирования озона участвует само космическое излучение, которое впоследствии им (озоном) поглощается.

В 1985 г. была обнаружена зона пониженной концентрации озона над Антарктидой (*озоновая дыра*). Позднее выяснилось, что озоновая дыра может возникать и над Арктикой, кроме того, возникают локальные относительно короткоживущие озоновые дыры над умеренными широтами. Концентрация стратосферного озона в дырах оказывается пониженной на 20...30% относительно среднего уровня, характерного для данной широты. Первоначальная основная версия, объясняющая возникновение озоновых дыр химическими реакциями в атмосфере с участием

антропогенных, в первую очередь хлорсодержащих газов, используемых в холодильной промышленности, привела к важным политическим и экономическим решениям (Монреальский протокол, в соответствии с которым ряд государств взяли на себя обязательства сократить производство фреонов).

В настоящее время получает дополнительные подтверждения гипотеза о том, что озоновые дыры — естественные образования, не связанные или мало связанные с антропогенным фактором. Возможно, озоновые дыры существовали на Земле всегда, но только в конце XX в. новые инструментальные возможности человека позволили обнаружить этот феномен.

Понятие о парниковом эффекте. Как уже указывалось на примере Венеры, парниковым эффектом ΔT называется разность между средней температурой поверхности планеты T_c и ее эффективной температурой T_e , определяемой из космоса по излучению планеты E при помощи закона Стефана–Больцмана

$$E = \sigma T_e^4.$$

Здесь $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2/\text{К}^4$ — постоянная Стефана–Больцмана. Определенная с помощью внеатмосферных средств эффективная температура Земли составляет $247 \dots 249 \text{ К}$ ($-26 \dots -24^\circ\text{C}$). В то же время температура воздуха вблизи земной поверхности, измеренная по всей планете и усредненная за год, дает величину около 288 К ($+15^\circ\text{C}$). Таким образом, парниковый эффект на Земле будет $\Delta T = 39^\circ\text{C}$.

Есть и другие методики определения величины парникового эффекта, связанные с разными подходами при определении эффективной температуры. Часть наблюдаемого снаружи излучения Земли представляет собой отраженное от облаков излучение Солнца, которое не достигло поверхности планеты и поэтому, строго говоря, к излучению самой Земли отношения не имеет. Это значительная величина (сферическое альbedo Земли составляет $A = 0,3$). С учетом этого эффекта эффективная температура нашей планеты оказывается выше (255 К), или (-18°C), а парниковый эффект — меньше ($\Delta T = +33^\circ\text{C}$).

Следует учитывать и еще один фактор. Если бы ось вращения Земли была перпендикулярна плоскости ее орбиты, при усреднении в течение года суммарная продолжительность освещения солнечными лучами всех точек поверхности планеты оказалась бы одинаковой. Но, поскольку ось вращения Земли наклонена на $66^{\circ}34'$ к плоскости орбиты, есть участки поверхности, на которые солнечные лучи в течение определенных периодов времени совсем не попадают (зоны полярной ночи). Спустя полгода они оказываются непрерывно освещаемыми (зоны полярного дня). Кроме того, та часть земной поверхности, которая освещается солнечным излучением в течение суток, меняется в течение года. Разумеется, надо учитывать и угол падения солнечных лучей, от которого зависит количество падающей на поверхность планеты энергии. С учетом этих обстоятельств более детальный пересчет эффективной температуры дает еще большую величину (что естественно: измеряемое излучение остается постоянным, хотя нагрев единицы площади со стороны Солнца оказывается меньше). При такой методике эффективная температура оказывается равной $T_e = 263,5 \text{ К}$, или $-9,5^{\circ}\text{С}$. Тогда величина $\Delta T = 24,5^{\circ}\text{С}$, что уже заметно меньше обычно используемого значения. Таким образом, при обсуждении парникового эффекта следует учитывать, какая из методик определения эффективной температуры Земли использовалась.

Тем не менее при любой методике расчета видно, что парниковый эффект существует: средняя температура в приземном слое оказывается всегда выше эффективной температуры Земли. Классический механизм эффекта заключается в следующем. Атмосфера планеты оказывается более прозрачной для коротковолновой части солнечного излучения, чем для длинноволнового теплового излучения поверхности. Поэтому излучение Солнца, даже будучи рассеянным на молекулах газа в атмосфере, все-таки проникает к поверхности планеты и, передавая свою энергию, нагревает ее. Нагретая поверхность излучает в инфракрасном диапазоне, но это тепловое излучение сильно поглощается сложными молекулами в воздухе (водяной пар,

углекислый газ, окись серы и т. п.). Тепловой поток направлен вверх. Вблизи поверхности он сильно поглощается плотными газами, в результате нижние слои атмосферы нагреваются. С увеличением высоты в тропосфере температура падает: ослабляется поток, кроме того, падает плотность газа, а значит, уменьшается поглощение. Понятно, что температурный перепад оказывается тем больше, чем выше атмосферное давление (а значит, и плотность газа) у поверхности планеты и чем больше относительное содержание атмосферных газов, эффективно поглощающих инфракрасное излучение. В атмосфере Земли основным агентом, отвечающим за парниковый эффект, является водяной пар (его 0,1%). Свой вклад вносит и углекислый газ, которого существенно меньше (0,03%).

Парниковый эффект (в англоязычной литературе он называется *greenhouse effect*) получил свое название по аналогии с теплицами и парниками, закрытыми сверху стеклянными и полиэтиленовыми крышами. Стекло или полиэтилен в парнике (*green house*) тоже пропускают коротковолновое (видимое) излучение, но задерживают инфракрасное излучение. Тем не менее следует указать, что происходящее в парниках существенно отличается от происходящего в атмосфере. Нагрев влажного воздуха в теплицах осуществляется преимущественно из-за того, что крыша препятствует его конвективному перемешиванию с атмосферным воздухом. Если открыть окна в теплице, парниковый эффект исчезает.

Более детальное рассмотрение происходящего позволяет уточнить и развить классическую теорию парникового эффекта. Такое дополнение выполнено, в частности, О. Г. Сорохтиным. Согласно развитой им модели в атмосфере Земли инфракрасное излучение земной поверхности поглощается парниковыми газами (водяным паром и в меньшей степени углекислым газом). Энергия излучения передается этим газам, в результате чего воздух разогревается, как и в классической модели. Разогретый газ расширяется и, становясь легче, поднимается вверх (процесс конвекции). Поскольку, в отличие от теплицы, этому подъему не мешает стеклянная крыша, элемент на-

гретого газа быстро поднимается к стратосфере. На этих высотах тепло поднимающегося конвективного элемента газа теряется за счет радиационных потерь. Охлажденный газ опускается обратно к поверхности Земли, благодаря чему приповерхностная температура воздуха снова уменьшается.

Конденсация водяных паров в воздухе также приводит к дополнительному его нагреву, поскольку пар, превращаясь в капли жидкости, отдает свое тепло окружающему воздуху. Можно сказать, что в результате конденсации пар возвращает тепло атмосфере: ранее происходил обратный процесс, когда вода на поверхности Земли, поглощая тепло, превращалась в пар.

Заметим, что конденсация воды в тропосфере является мощным регулятором температуры на Земле. Пусть температура в приземном слое по какой-то причине повысилась. В результате должны усилиться процессы испарения влаги с земной поверхности, что, в свою очередь, усиливает процессы образования облаков. Нарастание облачности увеличивает альбедо Земли, наращивая способность планеты отражать обратно в космос солнечное излучение. В результате поступление солнечной энергии на Землю сокращается, и температура земной поверхности снова понижается. В атмосфере Земли работает, таким образом, мощный регулятор (*система с отрицательной обратной связью*), компенсирующий изменения температуры и обеспечивающий общую стабильность состояния всей климатической машины планеты. Точные расчеты оказываются затруднены в связи с тем, что альбедо Земли в целом и отдельных ее областей существенно меняется со временем. Так, например, альбедо снежной поверхности равно почти 0,7. Таким образом, не только облачность, но и земная поверхность отражает часть падающего солнечного излучения, причем в отдельных случаях значительную его часть.

Расчеты баланса переноса тепла, согласно модели О. Г. Сорохтина, приводят к следующим результатам. Только 8% приходится на перенос тепла за счет радиационного излучения. Основная доля передачи тепла от земной

поверхности воздушным массам падает на конвективные движения в тропосфере — 67%. 25% переноса тепла обеспечивается за счет нагрева при конденсации влаги в атмосфере.

Расчеты распределения температуры на разных высотах в тропосфере, выполненные в рамках построенной теории, хорошо совпадают с реально измеренными значениями. В частности, показано, что для сухой и влажной атмосферы различаются скорости падения температуры в тропосфере с высотой: для влажной атмосферы градиент составляет $6,5^\circ/\text{км}$, для сухого воздуха — $8,1^\circ/\text{км}$.

Интересно, что модель О. Г. Сорохтина дает несколько неожиданные результаты при воображаемой замене азотно-кислородной атмосферы Земли на углекислотную (как на Венере). Расчеты показывают, что при таком мысленном эксперименте приземная температура окажется равной 281,6 К, т. е. более чем на 6°C ниже, чем сейчас. Причина заключается в том, что вес моля углекислого газа в 1,5 раза больше, чем у азотно-кислородной смеси, зато теплоемкость CO_2 в 1,2 раза меньше, чем у атмосферного воздуха. Отсюда делается неожиданный для ортодоксальной экологии вывод: накопление большого количества углекислого газа в атмосфере приводит не к потеплению, как обычно считается, а к похолоданию, а небольшие изменения парциального давления углекислого газа практически не влияют на изменения температуры земной поверхности.

Заметим, что теория Сорохтина не является общепризнанной, его выводы активно дискутируются и критикуются.

В последние годы много говорят о так называемом *глобальном потеплении* — процессе постепенного роста средней температуры Земли по крайней мере на $0,8^\circ\text{C}$ за последние 120 лет. Основная существующая версия причины этого процесса — антропогенный фактор (выброс в атмосферу углекислого газа в результате сжигания углеводородных топлив). По разным оценкам, в настоящее время в атмосферу ежегодно поступает до 5...7 млрд т углекислого газа, или 1,4...1,9 млрд т чистого углерода. Считается, что CO_2 ,

как «парниковый» газ, увеличивает парниковый эффект на Земле.

При более тщательном анализе ситуации можно отметить следующее.

Во-первых, изучение по косвенным данным прошлого Земли показывает, что периоды относительно высокой температуры неоднократно бывали и ранее. Так, например, в XIII в. северные моря и северные территории были свободны ото льдов, в Англии росли виноградники. Очевидно, что температурный оптимум тех времен невозможно связать с антропогенным фактором. В прошлом Земли это не единственный теплый период. Это означает, что возможны и явно существуют иные причины периодов общего потепления климата, кроме влияния человека.

Во-вторых, неясно, связаны ли между собой потепление и увеличение содержания углекислого газа в атмосфере, а если связаны, то какое из этих явлений является причиной, а какое следствием. Большая часть углекислого газа на Земле находится в растворенном состоянии в водах Мирового океана, где его в 60...100 раз больше, чем в атмосфере. Постоянный обмен углекислым газом между океаном и атмосферой сглаживает изменения его концентрации в воздухе. Небольшое повышение средней температуры океана может привести к повышению парциального давления углекислого газа в атмосфере из-за изменения его растворимости в воде.

Расчеты в рамках модели О. Г. Сорохтина показывают, что наблюдаемый рост температуры должен был привести к повышению *парциального давления* CO_2 на 6,9 ppm. Выбросы антропогенных газов добавили к этому росту еще 53 ppm, так что суммарное (наблюдаемое) повышение парциального давления CO_2 достигло приблизительно 60 ppm. Однако, по имеющимся данным, колебания концентрации CO_2 при смене ледниковых эпох достигали 150 ppm при отсутствии в ту эпоху антропогенного фактора. Это означает, что в истории нашей планеты наблюдались значительно более заметные, чем сейчас, вариации как концентрации углекислого газа, так и температуры, никак не связанные с деятельностью земной цивилизации.

Если это так, следует искать иные причины глобального потепления, помимо влияния человека. В качестве одной из таких причин называется влияние Солнца. Среди возможных вариантов механизма этого влияния обычно рассматривается воздействие солнечной активности на приход в земную атмосферу энергичных частиц галактического происхождения — *космических лучей*. Исследования показывают, что интенсивность космических лучей зависит от уровня солнечной активности: рост солнечной активности препятствует приходу к Земле космических лучей галактического происхождения. Если считать, что космические лучи, ионизуя воздух, порождают многочисленные ядра конденсации в воздухе, это должно вызывать усиление облачности и рост альбедо Земли. В итоге общий поток солнечного тепла, попадающего на нашу планету, отражаясь от облаков, уменьшается, и температура должны падать.

Экспериментальные данные, относящиеся к этой проблеме, противоречивы. Есть исследования, в которых подтверждается действие описанного механизма. В то же время выполнен ряд работ, где данный эффект обнаружить не удается. Отмечается, в частности, что в атмосфере, помимо космических лучей, постоянно присутствуют ядра конденсации, порождаемые другими (земными) причинами, и с этой точки зрения вклад космических лучей не должен быть заметным.

Кроме того, существует гипотеза о том, что общий (обычно практически постоянный, судя по прямым измерениям на протяжении последних десятилетий) уровень потока солнечной энергии может медленно и незначительно, но все же меняться с характерными периодами порядка 100, 200 и даже 1200 лет. Но роль этого гипотетического фактора в изменении глобальной температуры Земли пока тоже остается неизвестной.

По-видимому, свой вклад в эффект глобального изменения климата вносят все факторы — разнопериодные природные ритмы, присутствующие в океане и атмосфере, внешние воздействия, включая солнечное, а также влияние человека. Относительный вклад этих факторов

пока неясен. К сожалению, надо отметить, что в последние годы вопрос об изменениях климата оказался чрезмерно политизирован, что мешает объективному изучению этого процесса. Очевидно, здесь нужны дальнейшие комплексные исследования.

Внутреннее тепло Земли. Следует отметить, что тепло привносится на поверхность Земли не только сверху (с солнечным излучением), но и снизу, из недр планеты, правда, поток тепла из глубин значительно меньше. Происхождение глубинного тепла, по-видимому, связано с распадом радиоактивных элементов, содержащихся в коре. Тем не менее измерения показывают, что полностью объяснить наблюдаемый поток тепла этой причиной не удастся. По-видимому, часть потока тепла приходит сквозь литосферную плиту из мантии. Вещество мантии все время движется. Холодный, более плотный компонент тонет, горячее вещество всплывает. В мантийных слоях действует тепловая конвекция.

Откуда берется тепло в мантии? Одна из версий — оно сохранилось со времен формирования планеты 4,6...4,4 млрд лет назад. Столкновения крупных космических тел (планетезималей) размерами в десятки, сотни и даже тысячи километров должны были приводить к огромным выделениям тепла, прогреву и частичному плавлению вещества. Расчеты показывают, что тепла должно хватить на много миллиардов лет. Возможны и другие источники тепла: распад радиоактивных элементов в ядре и мантии (но их концентрация там практически неизвестна), кристаллизация вещества и его гравитационная дифференциация.

Биосфера Земли. Планета Земля отличается от других тел Солнечной системы наличием биосферы. Согласно имеющимся данным, самые древние свидетельства существования примитивных микроорганизмов датируются рубежом в 3,8 млрд лет назад. Другими словами, уже через 1,3 млрд лет после образования планеты Земля на ней присутствовала жизнь. За все время существования жизни на нашей планете на ней находились более 10 млрд различных видов живых организмов. Данные генетики

и палеонтологии показывают, что на Земле шел процесс эволюции. Мутациями порождались новые наследственные признаки, а естественный отбор приводил к сохранению полезных изменений и вытеснению вредных. В результате 99% всех видов, живших в разное время на Земле, уже не существуют сегодня.

Современные исследования показывают, что некоторые формы жизни на Земле существуют в условиях, о которых ранее не было известно, в частности на больших глубинах в недрах земной коры. Так, например, в кольцевой структуре озера Сильян в Швеции в 1986–1991 гг. были заложены две скважины глубиной 6,5 и 6,7 км. По всей глубине обнаружен метан, на глубине 5,2...5,5 км обнаружена нефть того же состава, что и в приповерхностных слоях. Исследования показали, что нефть подвергалась воздействию микроорганизмов. В нефти были обнаружены теплолюбивые *анаэробные* бактерии.

В 1990-е гг. микроорганизмы были обнаружены в земной коре на глубине 750 м под толщей воды в 3,5 км в Атлантике во время глубоководного бурения, осуществленного британскими специалистами. Они (микроорганизмы) существуют в полном отрыве от всего остального живого мира на поверхности планеты при давлениях 400 атмосфер и температурах 170°C. Следует заметить, что нужно учитывать потенциальную возможность существования микроорганизмов и в недрах других небесных тел, даже если условия не позволяют жизни существовать на их поверхности.

Биосфера Земли существенно изменила многие параметры оболочек планеты, включая состав ее атмосферы, радикальные изменения поверхности, присутствие в коре новых включений типа залежей биогенного каменного угля и т. д. Существенное влияние на свойства геосистемы оказывает своей деятельностью человечество.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните эффект смены времен года на Земле. Почему этот эффект не наблюдается на Меркурии и Венере?
2. Что такое прецессия? Как объясняется этот эффект?
3. Что такое нутация? Как объясняется этот эффект?

4. У Меркурия и Венеры нутация и прецессия не обнаружены. С чем это связано?
5. Изложите сущность феномена неравномерности вращения Земли. Укажите и поясните причины этого феномена.
6. Что такое озоновый слой и озоновые дыры? Изложите существующие гипотезы о происхождении озоновых дыр и трудности этих гипотез.
7. Какие существуют версии, объясняющие эффект глобального потепления на Земле?
8. Дайте краткое описание атмосферы Земли (химический состав, основные слои). Каково происхождение свободного кислорода в атмосфере Земли?
9. Каковы современные представления о внутреннем строении Земли?
10. Изложите гипотезы о причинах разительных различий между соседними планетами (Венерой и Землей) по общему количеству воды.
11. Количество крупных ударных кратеров на Луне значительно превышает их число на Земле. С чем это может быть связано?
12. Опишите факты, отражающие динамику магнитного поля Земли.



СПУТНИК ЗЕМЛИ — ЛУНА

Луна — единственный естественный спутник нашей планеты (рис. 7.1). Кроме того, Луна — единственное небесное тело, где, помимо автоматических космических аппаратов, побывали люди: 12 астронавтов — участников американской космической программы «Аполлон», развернутой в 1961–1972 гг., в 1969–1972 гг. 6 раз успешно высаживались на Луну. В связи с этим Луна является наиболее изученным космическим объектом. На Земле имеется более 350 кг образцов лунного грунта, доставленного шестью пилотируемыми экспедициями США и тремя автоматическими лунными станциями СССР в период с 1969 по 1976 г. из девяти районов лунной поверхности.

Луна движется по эллипсу вокруг Земли (точнее, вокруг общего центра масс, находящегося на расстоянии 4672 км от центра Земли в направлении к Луне, т. е. примерно на глубине 1700 км под поверхностью Земли).

Среднее расстояние от Земли до Луны (большая полуось лунной орбиты) составляет $384400 \text{ км} = 0,00257 \text{ а. е.}$ (около 30 диаметров Земли). Средний эксцентриситет эллиптической лунной орбиты составляет 0,0549005. В ближайшей к Земле точке орбиты (перигее) Луна приближается к нашей планете на 356410 км, в самой дальней точке орбиты (апогее) она удаляется до 406700 км.

Средняя скорость движения Луны по орбите вокруг Земли составляет 1,023 км/с. Плоскость лунной орбиты наклонена в среднем на $5^{\circ}08'43,4''$ (наклон периодически меняется от $4^{\circ}59'$ до $5^{\circ}17'$).

Полный оборот вокруг Земли относительно удаленных звезд Луна совершает за 27,322 земных солнечных суток, или за сидерический (звездный) месяц. Период вращения Луны вокруг своей оси в точности равен периоду ее обращения вокруг Земли, т. е. сидерическому месяцу. Такое движение называется *синхронным*. В результате получается, что Луна всегда повернута к Земле одной и той же стороной. Причиной такого резонанса являются мощные приливные возмущения в системе Земля–Луна, действовавшие в течение по меньшей мере 4 млрд лет. Они привели к постепенному замедлению начальной скорости вращения Луны до синхронной.

Если бы Луна двигалась вокруг нашей планеты по окружности, мы бы могли видеть строго половину лунного шара. Из-за непостоянства скорости движения Луны по эллиптической орбите, а также из-за наклона экватора Луны к плоскости своей орбиты для наблюдателя с Земли Луна медленно покачивается, позволяя заглядывать за

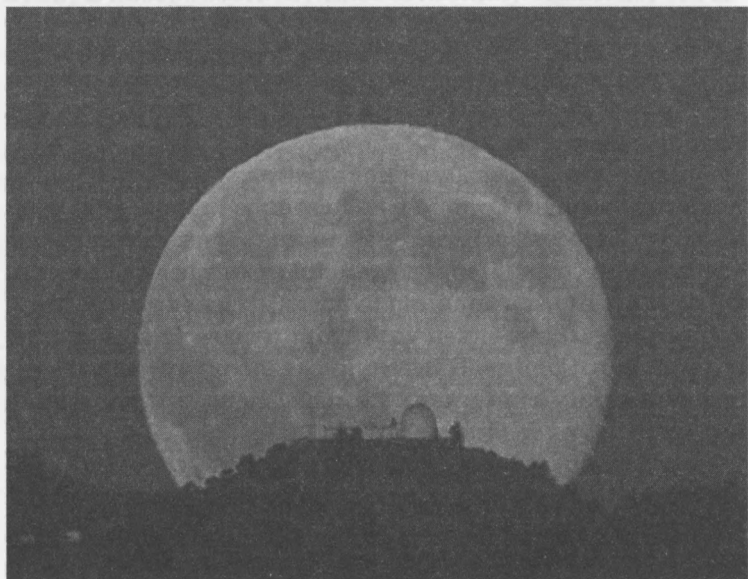


Рис. 7.1

Луна над Ликской обсерваторией, США (фото Rick Baldridge)

видимый край то с одной, то с другой стороны. Такие покачивания называются либрациями. В результате благодаря либрациям в разное время доступно 59% всей поверхности Луны. 41% поверхности не наблюдаются с Земли никогда, 18% поочередно то видимы, то невидимы.

Луна для наблюдателя на Земле постоянно меняет свой вид, поскольку она оказывается по-разному повернутой к Земле своей освещенной Солнцем стороной. Наблюдаемая с Земли форма освещенной части лунного диска называется *фазой Луны*.

Традиционно выделяют четыре основные фазы Луны. Новолунием называется фаза, в которой Луна с Земли не видна, поскольку она теряется в солнечных лучах, находясь на небе рядом с Солнцем. В это время Луна оказывается повернутой к Земле неосвещенной (ночной) стороной. В фазе «первая четверть» Луна находится на 90° к востоку от Солнца и выглядит как полукруг, обращенный выпуклостью в сторону Солнца (к западу). Фаза «полнолуние» наблюдается, когда Солнце и Луна находятся в противоположных сторонах неба, Луна в это время повернута к Земле освещенной стороной. Наконец, фаза «последняя четверть» симметрична первой четверти: Луна в виде полукруга в 90° к западу, выпуклость обращена к востоку.

После новолуния Луна появляется к востоку от заходящего вечернего Солнца в виде тонкого серпа, обращенного выпуклостью к Солнцу, толщина серпа увеличивается с каждым днем. Период времени между всеми соседними фазами Луны — примерно неделя. Перед новолунием тонкий серп Луны виден на востоке справа от восходящего утреннего Солнца. Полнолуние и новолуние называются специальным термином *сизигии*, первая и последняя четверти — *квадратурами*.

Возрастом Луны называют промежуток времени, выраженный в сутках и долях суток, прошедший от предыдущего новолуния до рассматриваемого момента времени. Период повторяемости фаз Луны составляет 29,531 средних солнечных земных суток и называется *синодическим месяцем*.

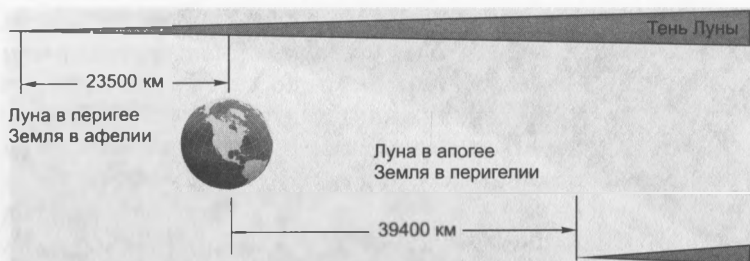


Рис. 7.2
Крайние положения конуса лунной тени:

в среднем длина конуса лунной тени составляет 374000 км. Когда Луна в перигее, а Земля в афелии, конус тени проходит на 23500 км дальше центра Земли. Он проектируется на поверхность Земли эллипсом размером 270 км или меньше. Когда Луна в апогее, а Земля в перигелии, конус тени на 39400 км не доходит до центра Земли. В такой ситуации полного затмения не будет — возможно только кольцеобразное.

Затмения. В ходе движения Луны вокруг Земли бывают ситуации, когда тень Луны падает на земную поверхность (солнечные затмения) либо тень Земли падает на лунную поверхность (лунные затмения). Понятно, что затмения реализуются, когда Солнце, Луна и Земля оказываются на одной прямой (рис. 7.2).

Причиной солнечного затмения является конусообразная тень Луны, которую наш спутник периодически отбрасывает на поверхность Земли. В зависимости от расстояния конус тени может не доходить до поверхности нашей планеты, и тогда возможно только кольцеобразное затмение (рис. 7.2). Наблюдатель увидит светящийся ободок Солнца, не закрытый Луной. Фаза кольцеобразного затмения (доля диаметра, закрытая тенью) всегда меньше 1, но больше 0,95. Ширина полосы, откуда видно кольцеобразное затмение, может достигать 380 км. Полутень, т. е. область, где солнечный диск закрыт частично, гораздо шире — до 7340 км в диаметре.

Если тень Луны достигает земной поверхности, в этом месте наступает *полное* солнечное затмение (см. рис. 7.3). Фаза полного затмения всегда больше и равна 1. В этом случае максимальная ширина полосы затмения составляет 270 км, ширина полутени — до 6750 км в диаметре. Как и в случае кольцеобразного затмения, полутень может

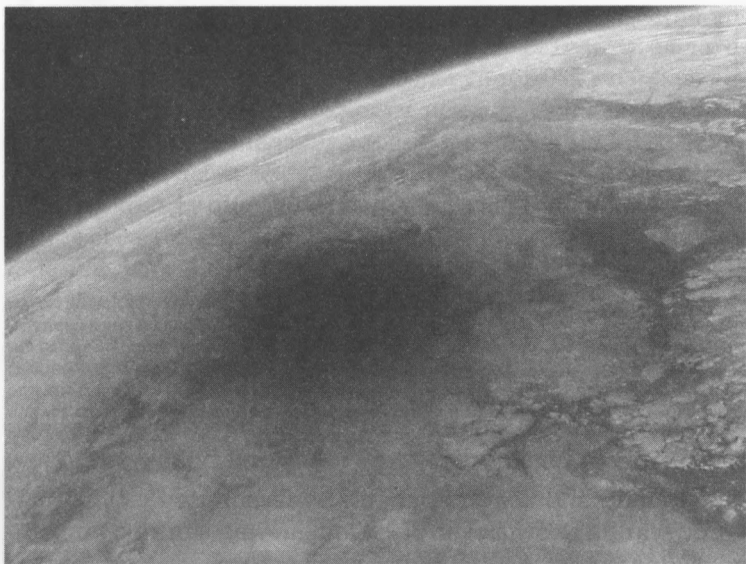


Рис. 7.3

Полное солнечное затмение 11 августа 1999 г.
(орбитальная станция «Мир»):

темное пятно в центре снимка — тень Луны.

закрывать больше половины земного шара. Во всех точках полутени наблюдатель видит *частное* солнечное затмение, при котором Луна закрывает часть солнечного диска (фаза затмения меньше 1).

Если бы орбита Луны лежала точно в плоскости *эклиптики* (плоскости земной орбиты), то каждый месяц в момент новолуния Луна бы заслоняла Солнце и происходило полное или кольцеобразное затмение, а в момент полнолуния — лунное затмение. Однако, как указано выше, орбита Луны наклонена к плоскости орбиты Земли на небольшой угол — на $5^{\circ}08'$, и это обстоятельство делает затмения не редкими, но и не частыми явлениями.

Точки пересечения лунной орбиты с эклиптикой называются *узлами*; восходящий узел — там, где Луна в своем движении переходит из южного полушария неба в северное, и нисходящий узел — в противоположной части орбиты. Если бы узлы были неподвижны, затмения про-

исходили бы два раза в год в одни и те же месяцы. Но линия узлов медленно смещается — примерно на 19° градусов в год навстречу Солнцу.

Поскольку видимые угловые диаметры Солнца и Луны на небе близки и составляют примерно $0,5^\circ$, затмение возможно только тогда, когда центр лунного диска будет не далее $0,5^\circ$ от эклиптики при наблюдениях из центра Земли. Наблюдатель на поверхности нашей планеты удален от ее центра на 6378 км — величину радиуса Земли, что приводит к видимому смещению Луны еще на целый градус. Получается, что затмения возможны даже тогда, когда расстояние центра Луны от эклиптики составляет $1,5^\circ$.

Из рис. 7.4 можно понять, что частные солнечные затмения возможны, если новолуния происходят ближе $16...18^\circ$ от одного из узлов в зависимости от соотношения угловых диаметров двух светил в этот момент. Полные же или кольцеобразные затмения происходят, если оба светила в момент новолуния оказались ближе чем в $11,5^\circ$ от эклиптики.

Солнце движется по эклиптике со средней скоростью около 1° в сутки. Расстояние в $16...18^\circ$ до и после узла Солнце преодолевает за 32...36 дней. Это период (эпоха) возможных затмений, правда из-за встречного движения узлов она сокращается до 30...34 дней. Луна за это время сделает один оборот вокруг Земли, в результате обязательно произойдет хотя бы одно новолуние, а иногда и два (вблизи краев зоны), так как они чередуются через синодический месяц (29,5 суток).

Получается, что одно полное затмение вблизи середины этого периода или два частных у краев зоны гарантированы. Во втором узле Солнце окажется через полгода,

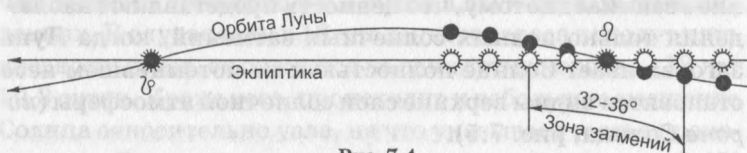


Рис. 7.4
Условия наступления солнечных затмений:

показаны положения Солнца и Луны при разных новолуниях вблизи восходящего узла (Ω) лунной орбиты.

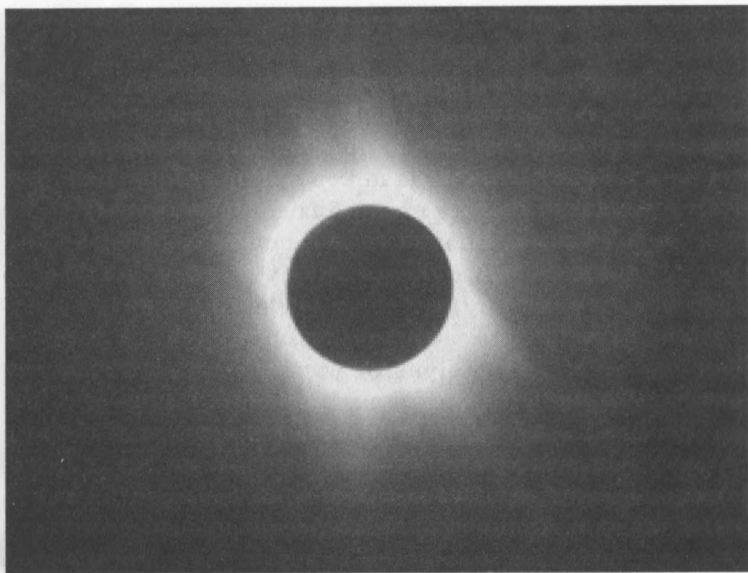


Рис. 7.5

Полное солнечное затмение 29 марта 2006 г.
(обсерватория Пик Терскол, Северный Кавказ,
экспедиция Института солнечно-земной физики СО РАН)

или — с учетом смещения узлов — через 178 суток. Это вторая эпоха затмений, где также может произойти одно или два затмения. Значит, ежегодно происходит минимум два солнечных затмения любого вида, а в очень редкие годы — до четырех–пяти частных затмений с небольшими фазами. В обозримом будущем по четыре затмения будут в 2011 и 2019 гг.

Несмотря на то что затмения происходят каждый год, принято считать, что это редкое явление. Такое ощущение возникает потому, что ценность представляют наблюдения только полных солнечных затмений, когда Луна загораживает Солнце полностью и на потемневшем небе становятся видны верхние слои солнечной атмосферы (*ко́рона* Солнца, рис. 7.5).

Более частые частные солнечные затмения малоинтересны для науки и даже для любительских наблюдений. Кроме того, ширина полосы полного затмения невелика,

она в лучшем случае покрывает не более 0,5% земной поверхности, а иногда и вовсе проходит по безлюдной океанской глади. В связи с этим в каждой точке земной поверхности полное солнечное затмение может повторяться один раз в 200...400 лет.

Промежуток времени, через который затмения повторяются в определенном порядке, составляет 6585,32 суток = 18 лет 11,3 дней и называется *сарос*. Через этот период времени практически точно повторяется взаимное положение Солнца и Луны относительно земного наблюдателя и, значит, повторяется последовательность солнечных и лунных затмений.

Сарос содержит целое число трех небесных циклов:

1) 223 синодических лунных месяца (период смены лунных фаз), $S = 29,5306$ суток;

2) 242 драконических месяца (период возвращения Луны к одному из лунных узлов), $M = 27,2122$ суток;

3) 19 драконических лет (период возвращения Солнца к тому же лунному узлу), $T = 346,6200$ суток.

Эти периоды с достаточно высокой точностью связаны между собой следующими соотношениями:

$$223 \cdot S = 6585,32 \text{ суток};$$

$$242 \cdot M = 6585,35 \text{ суток};$$

$$19 \cdot T = 6585,78 \text{ суток}.$$

Другими словами, сарос — это наименьшее общее кратное для трех указанных циклов.

Затмения, которые происходят через сарос, равный 6585,33 суток или 18 лет 11,3 суток, очень похожи друг на друга, но область их видимости сдвинута относительно земной поверхности примерно на 120° по долготе из-за наличия добавки примерно в 0,3 суток в двух первых произведениях. В случае если в 18 лет данного сароса попадут пять високосных лет, он окажется на одни сутки короче — 18 лет 10,3 суток. Кроме того, происходит и небольшое смещение Солнца относительно узла, на что указывает третье произведение. В результате повтор затмения случится на $0,47^\circ$ западнее по сравнению с предыдущим положением. Поскольку зона затмений лежит вблизи узла на интервале 36° ,

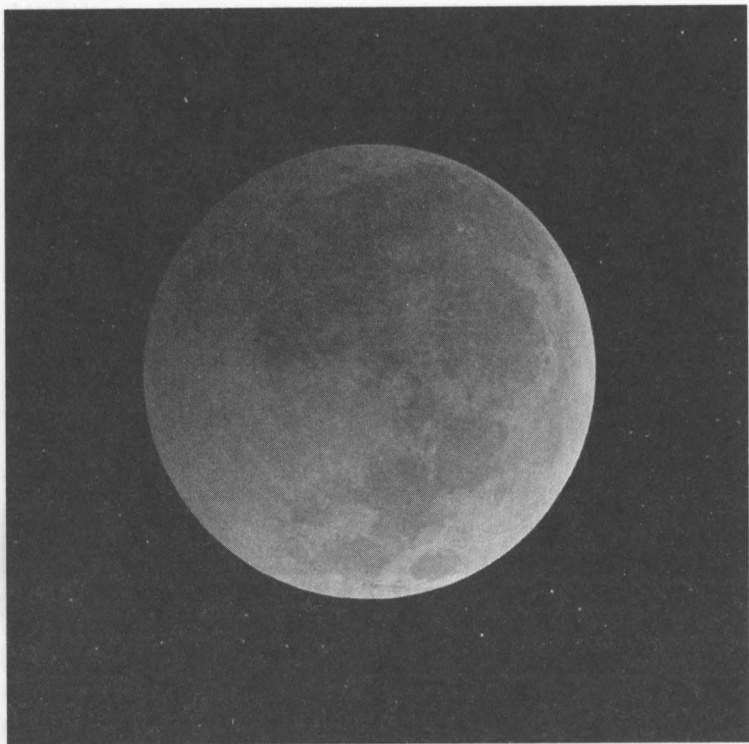


Рис. 7.6

Луна во время лунного затмения (фото Chris Hetlage)

то каждое последующее затмение, постепенно смещаясь каждый раз на $0,47^\circ$, пройдет всю эту зону в среднем за 70 саросов или в течение времени от 1190 до 1330 лет.

Обратная солнечным затмениям ситуация, когда тень Земли падает на Луну, называется *лунным затмением*. Лунные затмения бывают полными и частными. Особенность лунных затмений заключается в том, что даже во время полного затмения Луна остается видна на небе, хотя ее яркость существенно падает. Причина этого явления заключается в том, что на Луну во время лунного затмения падает свет Солнца, преломленный в земной атмосфере. Наблюдатель на Луне в этот момент должен увидеть черный диск Земли, полностью загораживающий Солн-

це, оконтуренный светящимся красноватым ободком земной атмосферы. Подсветка от этого «ободка» слабо освещает Луну и позволяет наблюдать ее во время полной фазы затмения (рис. 7.6).

Внутреннее строение и магнитное поле. Диаметр Луны составляет 3476 км. Это в 3,5 раза меньше экваториального диаметра Земли (12756,320 км). Масса Луны $7,353 \cdot 10^{22}$ кг, что составляет 1:81,30 массы Земли. В Солнечной системе Луна оказывается на первом месте среди спутников по соотношению масс планета-спутник (если не учитывать пару Плутон-Харон). Средняя плотность Луны составляет 3,340 г/см³. Это существенно меньше средней плотности Земли (5,5 г/см³), что указывает на значительные различия во внутреннем строении двух небесных тел. В частности, это указывает на незначительные размеры железоникелевого ядра либо даже полное его отсутствие.

Дополнительным доводом в пользу гипотезы о малых размерах ядра является отсутствие у Луны магнитного поля. Космические аппараты, работавшие на окололунных орбитах и пролетных траекториях, а также беспилотные и пилотируемые миссии на поверхности Луны привели к предварительному выводу о том, что Луна лишена магнитного поля, как минимум подобного земному.

Тем не менее только в первом приближении можно говорить об отсутствии на Луне магнетизма. С помощью магнитометров, доставленных на Луну экипажами космических кораблей «Аполлон-12» и «Аполлон-14», удалось обнаружить два типа магнитных полей: постоянные поля, порожденные намагниченностью пород вблизи точки измерения, и переменные поля, вызванные электрическими токами в недрах Луны.

Переменные поля наводятся в теле Луны в результате внешнего воздействия со стороны межпланетного магнитного поля, порождаемого Солнцем. Направление и напряженность этого поля могут сильно и быстро изменяться, что приводит к генерации слабых наведенных лунных полей. Отмечена четкая зависимость параметров этих полей от вариаций потока заряженных частиц, испускаемых Солнцем, — *солнечного ветра*.

Что касается происхождения постоянных магнитных полей, то оно остается неизвестным. Постоянные поля на Луне носят локальный характер (имеют вид изолированных пятен), их параметры сильно меняются от точки к точке. В целом эти поля не укладываются в картину глобального дипольного магнитного поля, подобного земному (компас был бы на Луне бесполезен). Напряженность постоянных полей составляет менее 1% от значения напряженности поля Земли (не превосходит 10^{-5} Гс).

В целом данные о постоянных магнитных полях на Луне можно считать отрывочными и неполными, поскольку непосредственные измерения на поверхности проводились недолго и всего в нескольких точках. Исследования лунного магнетизма, безусловно, должны быть продолжены.

Наиболее обоснована гипотеза о том, что источники постоянных полей на Луне некогда приобрели и сохранили до сих пор намагниченность в неких сильных внешних полях, которые в настоящее время на Луне не наблюдаются. Другая версия допускает существование у Луны в прошлом более сильного собственного магнитного поля (порядка 1 Гс), хотя имеющиеся данные о внутреннем строении Луны свидетельствуют против этой гипотезы.

Сейсмические эксперименты, проведенные на Луне, позволили оценить характер распространения колебаний в теле Луны и сделать вывод о ее внутреннем строении. Источниками колебаний являлись падения ступеней космических аппаратов, искусственные взрывы на поверхности и даже падения метеоритов во время работы сейсмографов. В результате сложились следующие представления о строении Луны.

Толщина лунной коры от около 60 (на видимой стороны Луны) до 100 км (на обратной стороне Луны). Верхний слой называется *реголит* (по разным оценкам, от 2...3 до 40 м) — измельченный метеоритами материал, шлаки. Это рыхлый, пористый мелкообломочный материал с очень низкой теплопроводностью и низкой плотностью порядка $0,5 \text{ г/см}^3$. По своим свойствам реголит похож на влажный песок или мелкий шлак: американские астронавты

оставляли следы глубиной в несколько сантиметров. Реголит покрывает скальные коренные породы.

В некоторых местах на глубинах в десятки и первые сотни метров залегают выбросы, образовавшиеся при формировании больших ударных кратеров. До глубины в 1 км наблюдаются слои из трещиноватого базальта (застывших, в прошлом расплавленных вулканических пород).

Ниже 60...100 км начинается *мантия*, которая делится на три составляющие — верхнюю, среднюю и нижнюю. До 400 км простирается верхняя мантия, здесь сейсмические скорости слабо убывают с глубиной. На глубинах 500...1000 км находится средняя мантия, сейсмические скорости здесь постоянны. Наконец, ниже 1000...1100 км залегают слои нижней мантии, сейсмические скорости здесь растут с глубиной.

Ниже, вероятно, находится небольшое *ядро*, о существовании которого достоверно неизвестно. Оценки радиуса ядра, выполненные на основе экспериментов с радиоизмерениями на борту американского космического аппарата «Лунар Проспектор» в 1999 г., лежат в пределах от 220 до 450 км. Магнитные данные соответствуют гравитационным и позволяют оценить радиус ядра величиной от 300 до 425 км. В любом случае ядро Луны невелико, и его масса составляет не больше 2...4% от общей массы Луны, в то время как ядро Земли содержит 30% массы нашей планеты.

Сейсмографы, доставленные американскими астронавтами на поверхность Луны в 1969–1972 гг., показали, что сейсмическая активность нашего спутника низка, суммарная энергия «лунотрясений» примерно в миллиард раз меньше, чем на Земле. Причинами лунотрясений, судя по всему, является растрескивание коры из-за больших перепадов температуры. Выделены лунотрясения в литосфере на глубинах до 100 км, вызываемые касательными напряжениями, и глубокофокусные лунотрясения (на мантийных глубинах 700...1000 км), причиной которых считаются приливы, вызываемые Землей. Особенности сейсмических колебаний позволили сделать вывод о том, что лунные породы совершенно сухи, воды там нет. В то же

время дистанционные исследования с борта американского искусственного спутника Луны с применением российского прибора LEND, созданного в Институте космических исследований РАН, показали, что в районе южного полюса Луны доля водяного льда в грунте может достигать 4%.

Уровень вулканизма на Луне считается крайне низким, по современным данным, вулканические извержения завершились как минимум 500 млн лет назад (ранее считалось, что эта эпоха закончилась существенно раньше). В то же время есть отдельные указания о современных истечениях вулканических газов. Спектральные наблюдения такого извержения в кратере Альфонс в 1958 г. провел астроном из Пулковской обсерватории Н. А. Козырев. В 1972 г. профессиональный геолог, участник последней (шестой) высадки на Луну, член экипажа космического корабля «Аполлон-17» Харрисон Шмитт обнаружил на лунной поверхности следы воздействия вулканических газов (фумарол) оранжевого цвета.

Поверхность Луны. Как и на Меркурии, чья поверхность очень похожа на лунную, на Луне нет атмосферы. Это связано с тем, что параболическая (вторая космическая) скорость, или скорость убегания вблизи лунной поверхности, равна 2,38 км/с, что в 4,6 раза меньше, чем на Земле. В итоге частицы атмосферы, если бы последняя появилась у Луны, легко бы преодолели ее притяжение.

Отсутствие атмосферы в совокупности с большой длительностью суток, как и на Меркурии, определяет условия на поверхности Луны. Не случайно детали поверхности этих двух небесных тел очень похожи, хотя есть и существенные отличия.

Даже невооруженным глазом можно различить на Луне два типа поверхности, отличающиеся друг от друга по яркости, — светлые *материки* и темные *моря*.

Основной тип лунной поверхности условно называется материковым (83% общей площади). Материки существенно более светлые, чем моря. Здесь наблюдаются значительные неровности, включая горные хребты высотой до 5,5 км (высота определяется лазерным дальномером с борта искусственных спутников Луны). Самые большие

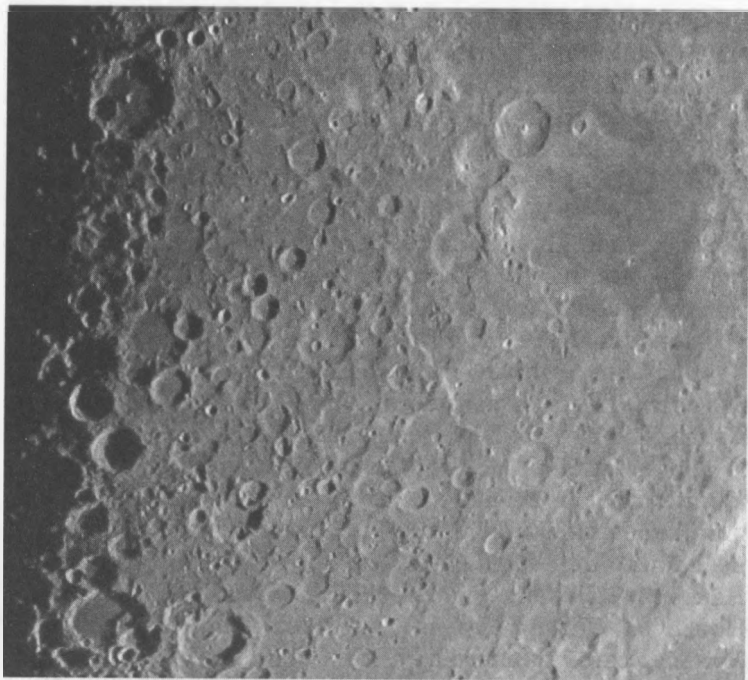


Рис. 7.7

Кратерированная поверхность Луны (фото Jerry Lodrigus)

высоты находятся к западу от моря Восточного. Перепад высот от гребня кольцевого вала кратера Гагарин диаметром 174 км до дна кратера составляет 6 км.

Кроме того, для материков характерно огромное множество ударных кратеров самых разных размеров — от десятков сантиметров до 300 км (кратер Байе). Плотность кратеров составляет 392 объекта диаметром более 10 км на 1 млн кв. км — самая высокая среди планет земной группы и их спутников (рис. 7.7).

Высота кольцевых валов, окаймляющих крупные кратеры, достигает нескольких километров. Кратеры различаются по сохранности валов: есть разрушенные (старые), есть четко выраженные (молодые). Для многих кратеров характерны центральные горки. Дно большинства кратеров выглядит не как воронкообразное, а как сравнительно

плоское и ровное. Названия кратеров традиционно выбираются из списка выдающихся ученых (в первую очередь астрономов) и философов всех народов и времен, например Анаксагор, Альфонс, Аристарх, Кеплер, Коперник, Ломоносов, Платон, Птолемей, Тихо (в честь Тихо Браге). Благодаря Яну Гевелию, издавшему карту Луны в 1646 г., сюда были перенесены названия земных горных хребтов: Альпы, Апеннины, Кавказ, Карпаты, Кордильеры.

Относительно более светлая материковая лунная кора содержит породы анортозитового состава, их средняя плотность — около $2,9 \text{ г/см}^3$.

Большие темные округлые пятна размерами во многие сотни километров традиционно называются морями, несмотря на то что они абсолютно сухи.

Основываясь на астрологических представлениях о влиянии фаз Луны на земную погоду, итальянский астроном Джованни Риччоли в 1651 г. предложил экзотические названия типа моря Спокойствия, Ясности, Изобилия, Нектара, Дождей, Облаков, Паров, Влажности, Холода, Кризисов, Океана Бурь и т. д., сохранившиеся на картах Луны до сегодняшнего дня. Единственное из лунных морей, названное в честь ученого, — море Гумбольдта. Уже в наше время море на обратной стороны Луны, открытое с помощью советских космических аппаратов, было названо морем Москвы.

Лунные моря представляют собой обширные равнины из темных базальтов. Когда-то эти пространства были заполнены разлившейся базальтовой лавой, впоследствии застывшей. Моря занимают около 17% всей поверхности Луны. Плотность базальтов несколько выше материковых пород — $3,3 \text{ г/см}^3$. Моря занимают 17% общей поверхности Луны, в том числе на видимом полушарии — 30% площади, на обратном полушарии — 3%. Таким образом, наблюдается глобальная асимметрия в распределении лавовых потоков на поверхности Луны. Если считать, что лунные моря образовались в результате столкновений Луны с крупными астероидами, проламывавшими кору, что приводило к массивным истечениям лавы через трещины, то приходится признать, что большинство уда-

ров происходило со стороны Земли — если в этот период параметры вращения Луны были близки к сегодняшним.

Дополнительный довод в пользу импактного образования лунных морей состоит в следующем. Анализ орбит искусственных спутников Луны показал, что под лунными морями залегают некие образования повышенной плотности. Это может быть как вещество астероидов, погрузившихся в недра лунной коры, так и плотный лавовый материал, заполнивший в свое время образовавшиеся в результате импактов пустоты. Такие зоны повышенной плотности получили название *масконы* (от словосочетания «концентрация массы»).

В лунных морях кратеров значительно меньше, чем на материках. Считается, что наиболее старые кратеры были погребены под лавовыми потоками, а в более поздние времена частота образования новых кратеров была значительно ниже. Возраст образования лунных морей оценивается в 3 млрд лет. К тому времени эпоха интенсивных метеоритных бомбардировок в Солнечной системе подходила к концу, соответственно число импактных событий значительно уменьшилось.

В пользу этой гипотезы свидетельствует существование так называемых кратеров-призраков, не отбрасывающих теней. Похоже речь идет о кольцевых светлых валах, просвечивающих сквозь некогда заливавшую их лаву, превратившуюся в базальты. Новых кратеров на поверхности застывших лавовых полей, поглотивших старые кратеры, образовалось уже немного (см. рис. 7.8).

С импактами связаны системы светлых лучей, радиально протягивающихся от некоторых ударных кратеров на гигантские расстояния (до 4000 км). По-видимому, лучи образованы ударными выбросами вещества, которые образовали цепочки вторичных кратеров и другие изменения на поверхности Луны.

На окраинах лунных морей обнаружены глубокие долины длиной в сотни и шириной в десятки километров. Есть на Луне и так называемые *борозды* — длинные, узкие и извилистые ложбины, характерные как для «морского», так и для «материкового» рельефа. Вероятно, они

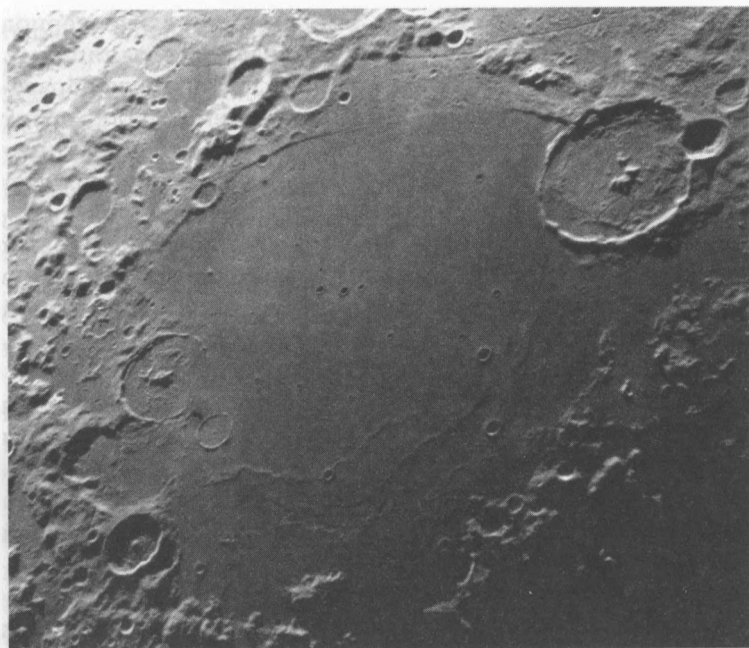


Рис. 7.8

Участок лунной поверхности, покрытый застывшей лавой. Лава затопила старые кратеры (Европейская южная обсерватория, комплекс телескопов VLT)

связаны с лавовыми трубками. Привлекают внимание сбросы: например, Прямая стена в море Облаков, представляющая собой грандиозный уступ длиной в 125 км и высотой около 300 м.

Возраст лунных пород оказался громадным. Едва ли не первому же камню, который подобрал первый человек, ступивший на Луну, — Нил Армстронг, оказалось около 3 млрд лет. Возраст других привезенных на Землю образцов достигает 4,55 млрд лет, как и у большинства метеоритов. Для определения возраста пород используется радиоизотопный (в данном случае урано-свинцовый) метод.

Как указано выше, сутки на Луне равны синодическому месяцу (29,53 суток). В результате лунный день и лунная ночь равны половине этого периода — по 14,7 земных суток. Отсутствие атмосферы приводит к тому, что поверх-

ность Луны длинным днем нагревается до $+130^{\circ}\text{C}$. Такие экстремальные температуры характерны для полудня на экваторе. Высокой температуре грунта способствует крайне низкое альbedo лунных пород: в среднем около 12% (для сравнения, альbedo чистого снега на Земле составляет 85%, песка — 30%, воды — 5%).

После наступления лунной ночи поверхность стремительно охлаждается, и ее температура может упасть до -170°C . Температуры на Луне были измерены как дистанционными методами, так и непосредственно с помощью аппаратуры, установленной на советских самоходных автоматических станциях «Луноход-1» (1970–1971, рис. 7.9) и «Луноход-2» (1973), проработавших на поверхности Луны соответственно 11 и 4 лунных дня (земных месяцев).

Верхний слой грунта, как указано выше, покрыт реголитом — раздробленным благодаря метеоритным бомбардировкам материалом с крайне низкой теплопроводностью,

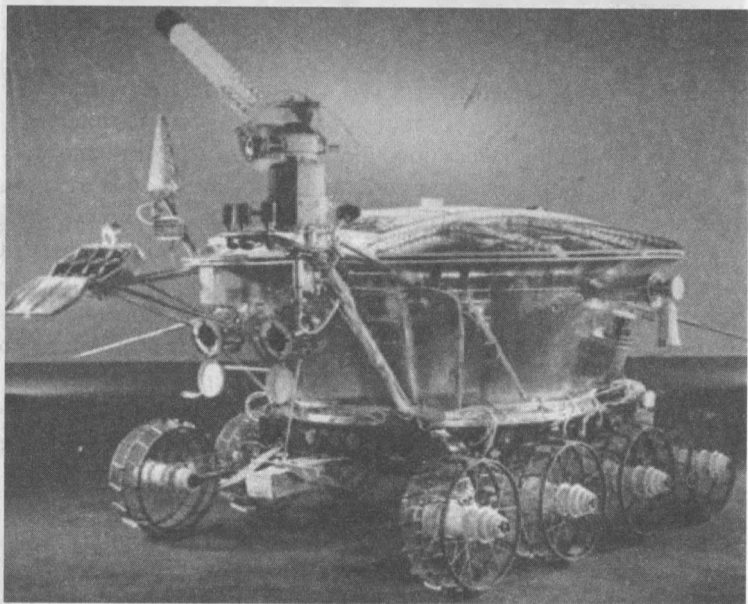


Рис. 7.9

Первый в мире автоматический самоходный аппарат
«Луноход-1» (СССР, 1970)

как у сухого песка в вакууме. За счет этого свойства грунта, уже на глубине в несколько десятков сантиметров температура ото дня к ночи практически не меняется. На глубине 20 м температура на 25°C выше, чем на глубине 1 м. Вероятно, это связано с присутствием в лунной коре радиоактивных элементов, выделяющих тепло.

Происхождение Луны. Проблема происхождения Луны поныне вызывает серьезные вопросы. Джордж Дарвин предложил в 1879 г. гипотезу образования Луны вследствие ее отрыва от Земли. Эта версия выглядит крайне маловероятной, поскольку сталкивается с массой физических трудностей.

Гарольд Юри в 1962 г. предложил гипотезу захвата земным тяготением уже «готовой» Луны во время сближения двух небесных тел. Эта версия также не рассматривается как основная, поскольку нужны специфические, в целом очень маловероятные, условия такого сближения, чтобы произошел захват массивной Луны на замкнутую околоземную орбиту и при этом не произошли бы ни столкновение, ни потеря Луны.

Отечественные исследователи О. Ю. Шмидт, а затем Е. Л. Рускол, а также многие зарубежные ученые рассматривали версию совместного формирования системы Земля–Луна из вещества газопылевого облака через стадию конгломерации относительно крупных промежуточных (по размерам) тел — *планетезималей*. Долгое время эта концепция представлялась наиболее правдоподобной. Однако существенные различия в химическом составе Земли и Луны, обнаруженные при анализе образцов лунного вещества (дефицит железа на Луне по сравнению с Землей) привели к тому, что долгое время казавшаяся наиболее убедительной теория совместного образования Земли и Луны перестала быть парадигмой. Эта теория оказалась не в состоянии объяснить, почему практически все железо в системе Земля–Луна оказалось на Земле в ее ядре, почему Луна получила столь маленькое ядро и почему в результате оказались так сильно отличающимися средние плотности планеты и ее естественного спутника ($5,5$ и $3,3$ г/см³ соответственно).

Сейчас активно обсуждается вопрос о формировании Луны вследствие выброса в космос фрагмента силикатной земной коры после катастрофического мегаимпакта (мощного касательного удара по молодой Земле телом размера-ми с Марс). Согласно этой версии столкновение произошло уже после дифференциации тела Земли, когда в недрах Земли уже произошло разделение на плотное железное ядро и облегченные силикатные оболочки (мантию и кору).

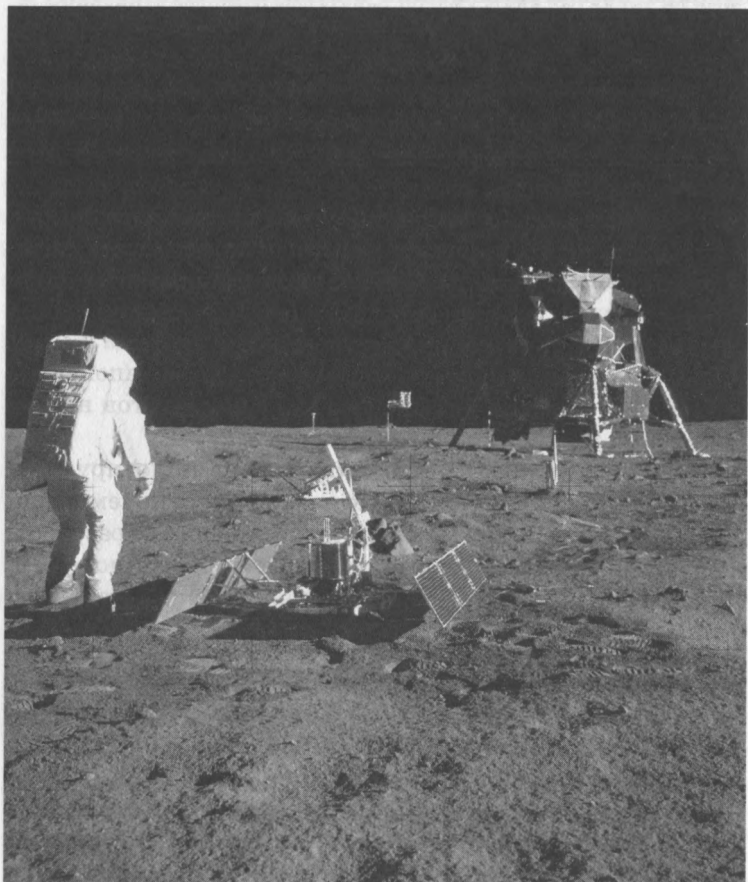


Рис. 7.10
Экипаж космического корабля «Аполлон-11» (США) на Луне
(фото НАСА)

В итоге импакт мог привести к срыву силикатной оболочки в околоземное пространство, после чего из выброшенного, обедненного железом материала под воздействием силы тяготения сформировалась силикатная Луна. Эта гипотеза стала парадигмой (основной теорией) на сегодняшний день. Российский исследователь А. В. Витязев предложил облегченный вариант «фейерверка»: Луну могла сформировать целая серия менее мощных импактов, неоднократно выбрасывавших в космос силикаты земной коры.

Таким образом, вопрос о происхождении Луны остается во многом открытым, хотя в пользу импактной теории говорит все большее количество доводов.

Исследования Луны. В период с 1958 по 1976 г. Луна подвергалась интенсивным исследованиям с помощью космических аппаратов. Луна оказалась единственным небесным телом, детально изученным с помощью самых разнообразных методов (см. рис. 7.10).

Начиная с 1994 г. начался новый этап в исследованиях Луны с помощью методов космонавтики, когда к Луне начались запуски американских, европейских, японских, китайских и индийских космических аппаратов нового поколения.

К 2020 г. планируется возобновление пилотируемых полетов к Луне в США, а также начало пилотируемых полетов в Китае и Индии. Россия также объявила о разработке своих планов исследования Луны, включая полеты к Луне российских автоматических зондов начиная с 2013 г. по проектам «Луна-Ресурс» и «Луна-Глоб» и космонавтов после 2020 г.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Масса Луны в 81 раз меньше, чем на Земле, а сила тяжести на лунной поверхности только в 6 раз меньше, чем на поверхности Земли. Почему?
2. Опишите основные формы рельефа Луны.
3. Что такое лунные моря? Каково их вероятное происхождение?
4. Что такое масконы и каковы гипотезы, объясняющие их природу?

5. Лучи лунных ударных кратеров, как правило, значительно длиннее, чем лучи кратеров на Меркурии. Почему?
6. Что собой представляет лунный реголит?
7. В рамках современной космогонии считается маловероятным одновременное совместное формирование Земли и Луны. Какова современная парадигма (основная теория) происхождения Луны?
8. Существует поддерживаемая некоторыми СМИ версия о том, что американские астронавты на самом деле не были на Луне. Какие факты говорят, что эта версия неверна?
9. Объясните феномен фаз Луны: почему Луна выглядит на небе то как яркий диск, то как месяц, то вообще не видна?
10. Изложите свое понимание феноменов солнечных и лунных затмений.
11. Что такое сарос?
12. Каково, по-вашему, влияние солнечных затмений на явления и события на Земле? Обоснуйте свое мнение.



ПЛАНЕТА МАРС

Планета Марс — четвертая планета, считая от Солнца, и последняя планета земной группы (рис. 8.1). Названа в честь римского бога войны за свой красновато-оранжевый цвет, ассоциировавшийся с цветом крови и пожаров, сопутствующих войне. Последние десятилетия Марс подвергался интенсивным исследованиям с помощью космических аппаратов, изучавшим планету с пролетных траекторий, с орбит искусственных спутников Марса и непосредственно на поверхности планеты. В связи с этим многие свойства Марса достаточно хорошо известны, хотя, конечно, остается ряд «белых пятен».

Среднее расстояние от Марса до Солнца составляет 1,52363 а. е., или 227,9 млн км. Эксцентриситет орбиты равен 0,09344, т. е. вытянутость орбиты довольно значительна: расстояние до Солнца меняется в широких пределах, то увеличиваясь на 21 млн км, то уменьшаясь на 21 млн км по сравнению со средним значением. Можно напомнить, что расстояние Земли от Солнца меняется на $\pm 2,5$ млн км. В результате в перигелии орбиты Марс получает в 1,45 раза больше энергии от Солнца, чем в афелии (Земля — только в 1,03 раза).

Марс вращается вокруг своей оси почти с такой же угловой скоростью, что и Земля: звездные (сидерические) сутки равны 24 ч 37 мин и 22,6 с. Солнечные сутки равны 24 ч 39,5 мин. Разница между звездными и солнечными сутками объясняется, как и для Земли, движением Марса по орбите вокруг Солнца. Эта разница меньше, чем у Зем-

ли, из-за меньшей скорости движения по орбите (24,1 км/с у Марса вместо 29,8 км/с для Земли). Марс совершает один оборот вокруг Солнца за 687 земных, или 669 марсианских суток.

Внутреннее строение Марса. Размеры Марса сравнительно невелики. Экваториальный диаметр планеты составляет 6794 км (0,5326 земного), полярный диаметр — 6752 км. Можно указать, что Земля вдвое (по диаметру) больше Марса, а Марс, в свою очередь, вдвое больше Луны. Масса Марса составляет $6,420 \cdot 10^{23}$ кг (0,10745, или $1/9$ массы Земли). Средняя плотность планеты равна $3,94 \text{ г/см}^3$. Заметное отличие от Земли по этому параметру (напомним, что средняя плотность Земли составляет $5,515 \text{ г/см}^3$) показывает, что по внутреннему строению две планеты также существенно отличаются. Судя по всем имеющимся данным, при столь низкой средней плотности Марс не может обладать значительным железным ядром. Масса ядра оценивается всего в 5...9% от общей массы планеты.

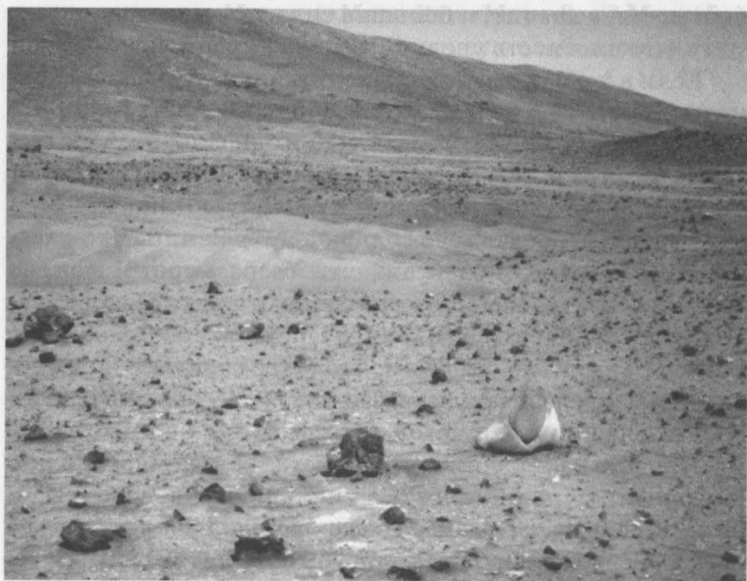


Рис. 8.1
Поверхность Марса (фото НАСА)

Существует эффективный способ анализа внутреннего строения небесных тел по значению так называемого *безразмерного момента инерции планеты* I . Безразмерный момент инерции представляет собой сумму моментов инерции всех элементов тела (момент инерции элемента с номером i равен произведению квадрата расстояния r этого элемента до центра масс на массу m данного элемента), отнесенную к величине MR^2 , где M — суммарная масса планеты, R — ее радиус.

$$I = \frac{\sum m_i r_i^2}{MR^2}. \quad (8.1)$$

Если тело полое внутри, безразмерный момент инерции значительно больше 0,4.

Если вещество тела равномерно распределено по всему объему шара, т. е. плотность не зависит от глубины, безразмерный момент инерции равен 0,4. Примерами являются Плутон ($I = 0,39$) и Луна ($I = 0,391$). Это означает, что у Плутона и Луны если и есть плотные ядра, то очень небольшие. У тел с размерами планеты так не бывает: большая масса, а значит, и большая сила тяжести приводят к тому, что плотность увеличивается с глубиной.

Если в недрах планеты находится плотное ядро, параметр $I < 0,4$. Так, у Земли $I = 0,3309$, у Венеры $I = 0,333$, у Меркурия $I = 0,324$. Эти значения однозначно указывают на то, что в недрах указанных планет присутствуют плотные железные ядра, причем у Меркурия оно, как указано выше, относительно больше, чем у Земли. Что касается Марса, то для этой планеты безразмерный момент инерции гораздо меньше отличается от критического значения 0,4: $I_{\text{Марса}} = 0,377$. Это дополнительный довод в пользу представления о том, что Марс обладает очень небольшим железным ядром. По-видимому, планета отличается еще и самой толстой литосферой.

Прямые измерения химического состава марсианского грунта, выполненные американскими посадочными аппаратами, указывают на высокое содержание железа в породах — 12...14%. Здесь много кремния (20%), присутствуют магний (5%), кальций (4%), алюминий (2...4%), сера (3%), титан. Высокое содержание железа и его окси-

дов (в частности, гидроокисей железа — гетитов) приводит к характерной красновато-оранжевой окраске марсианских пород. Мелкодисперсная оранжевая пыль также содержит железо: съемки показали, что некая магнитная деталь одного из американских марсоходов — автоматических управляемых с Земли шестиколесных аппаратов, передвигающихся по поверхности планеты, покрылась слоем «примагниченной» красной пыли. Судя по всему, процесс гравитационной дифференциации на Марсе выражен гораздо слабее, чем на Земле: разделение на железные и силикатные компоненты, которое приводит к образованию плотного металлического ядра и сравнительно легких каменных поверхностных оболочек, здесь не произошло либо далеко не завершено, железа на поверхности очень много.

Важный показатель, свидетельствующий о существовании железного ядра у планеты, — наличие у нее магнитного поля. Советские космические аппараты серии «Марс», работавшие в 1970-е гг. на орбитах искусственных спутников Марса («Марс-2», «Марс-3», «Марс-5»), получили данные о наличии у планеты слабого магнитного поля: на экваторе оно составляет около $3 - 6 \times 10^{-4}$ Гс, у полюсов — вдвое больше. Это примерно 0,1% от значения магнитного поля Земли. Геометрия магнитного поля планеты близка к дипольной, ось магнитного диполя Марса наклонена к оси вращения примерно на 15° . Северный полюс диполя расположен в южном полушарии (в этом смысле Марс подобен Земле) на долготе около 270° .

Помимо слабого глобального поля, в отдельных районах Марса присутствуют локальные поля, напоминая вытянутые полосы со слабой намагниченностью. Окончательной теории магнетизма Марса пока не существует.

Сравнение магнитных полей Луны и четырех планет земной группы с периодами их обращения и моделями внутреннего строения приводит к выводу, что для существования магнитного поля, по-видимому, требуется большое жидкое ядро и достаточно быстрое вращение. В отношении к Марсу эти соображения допускают следующие гипотезы, претендующие на объяснение неожиданно

слабого магнетизма этой планеты. Существует версия, что небольшое ядро Марса застыло, в результате чего планета утратила сильное магнитное поле, возможно, существовавшее в прошлом.

Другая гипотеза, которая, впрочем, считается маловероятной, допускает, что в настоящее время Марс находится на стадии инверсии магнитного поля, подобной тем, что неоднократно происходили на Земле, в связи с чем отсутствие у планеты сильного глобального дипольного поля — это временное явление. В любом случае магнетизм Марса оказывается существенно слабее, чем у Земли.

Заметим, что считать вопрос о наличии у Марса глобального поля окончательно решенным нельзя. Российский планетолог Л. В. Ксанфомалити, в частности, считает, что магнитная съемка, выполненная с борта искусственных спутников планеты, может быть отягощена ошибками, связанными с магнитным полем, наведенным солнечным ветром. Поэтому выполнение новых точных магнитных измерений на Марсе остается актуальной задачей.

Атмосфера и климат Марса. Плоскость экватора Марса вокруг своей оси наклонена на $25^{\circ}11'$, что близко к аналогичному параметру для Земли ($23^{\circ}26'$). Это означает, что на Марсе должна наблюдаться заметная смена сезонов (времен года), поскольку планета поочередно наклоняется то одним, то другим полюсом к Солнцу. Однако этот эффект многократно усиливается из-за большой вытянутости орбиты. Во-первых, продолжительность времен года оказывается разной для южного и северного полушарий планеты, поскольку скорость движения согласно законам Кеплера заметно меняется в течение марсианского года. Во-вторых, расстояние до Солнца тоже существенно меняется: более короткое лето в южном полушарии Марса оказывается примерно на 20°C теплее, чем продолжительное лето в северном полушарии. Асимметрия времен года на Марсе представлена в табл. 8.1.

Хотя альbedo Марса (0,15) значительно ниже, чем у Земли, тем не менее в среднем поверхность планеты получает около 43% солнечной энергии, падающей на Землю. В результате на северном тропике Марса даже в полдень

Таблица 8.1

**Продолжительность времен года на Марсе
в марсианских сидерических сутках**

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

во время летнего солнцестояния температура верхнего слоя грунта не превышает 0°C . Среднегодовая температура здесь составляет -43°C , минимальная — -90°C . На широте 55° зимняя температура может падать до -120°C . В районе полюсов планеты зимняя ночная температура может падать до -138°C , это самый низкий зарегистрированный уровень.

Столь низкие температуры вызывают ряд вопросов. Дело в том, что у Марса есть атмосфера. Она оказалась очень разреженной и прозрачной. Среднее давление на поверхности Марса составляет 6,1 мбар, что в 160 раз меньше, чем на уровне моря на Земле, и в 15000 раз ниже, чем на Венере. Близкое давление наблюдается на высоте 40 км в земной атмосфере. Состав атмосферы напоминает венерианский: 95% углекислого газа, 2,5% азота, 1,6% аргона, 0,1...0,4% кислорода, 0,06% угарного газа, а также неон, криптон и ксенон в крайне небольших количествах. Учитывая, что при температуре -125°C атмосферный углекислый газ должен конденсироваться и осаждаться на грунт в виде «сухого льда», в полярных областях планеты такая экстремально низкая температура (-138°C), по логике вещей, достигаться не может, поскольку в процессе конденсации углекислоты дальнейшее понижение температуры ниже критической точки происходить не должно. По-видимому, какие-то детали процесса не учитываются.

Суточные перепады температуры достигают 100°C . Прямые измерения, проведенные космическими аппаратами на поверхности Марса, показали, что температура разреженного воздуха днем может быть на десятки градусов ниже температуры грунта. В отдельных случаях наличия темных пород в экваториальной части планеты, видимо, достижимы положительные температуры поверхностных слоев грунта.

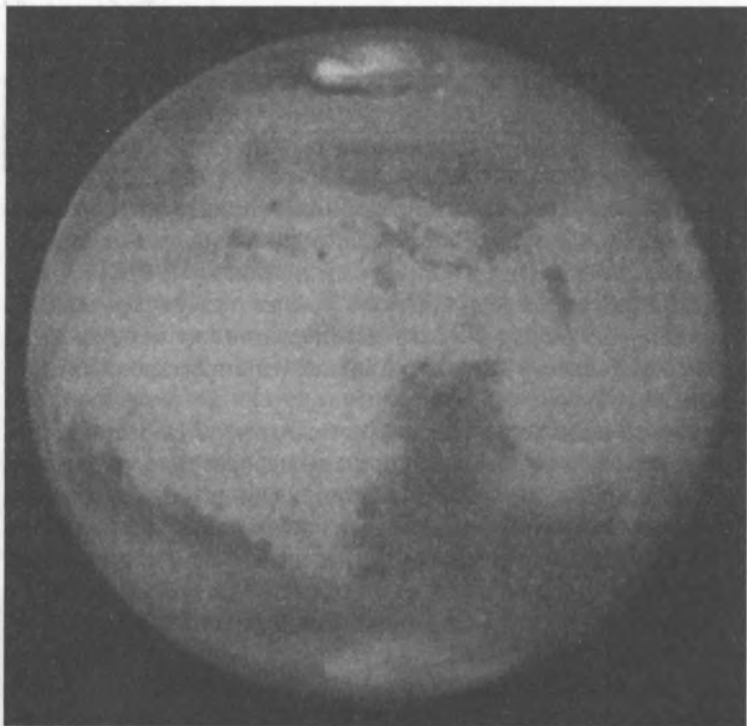


Рис. 8.2

Марс. Светлое пятно сверху — полярная шапка
(космический телескоп «Хаббл», НАСА)

Низкие температуры вблизи полюсов приводят к тому, что зимой большая часть атмосферной углекислоты замерзает и осаждается на поверхности планеты, образуя грандиозные *полярные шапки* (рис. 8.2). Это предположение подтверждается измерениями с космических аппаратов, которые показали, что температура зимних полярных шапок примерно соответствует температуре конденсации углекислого газа при данных значениях атмосферного давления.

Полярные шапки на Марсе очень велики (зимой их диаметр достигает 2...3 тыс. км), но они различны по своей природе. В обеих шапках содержится в огромных количествах никогда не тающий водяной лед, причем тол-

щина ледяных напластований достигает, по-видимому, нескольких километров. Однако если северная полярная шапка состоит из водяного льда, то южная содержит, помимо замерзшей воды, большую долю замерзшей углекислоты. Такая особенность связана с тем, что долгая зима в южном полушарии оказывается гораздо холоднее, чем в северном: южное полушарие «отвернуто» от Солнца в тот период, когда планета находится дальше всего от светила и движется медленнее всего.

В центральной области (*керне*) южной полярной шапки значительная часть углекислого газа в замороженном состоянии сохраняется всегда, в то время как углекислота на периферии полярной шапки, где температура выше, чем на полюсе, то переходит в газообразное состояние (весной), то снова конденсируется и осаждается на поверхности (осенью).

Северная зимняя полярная шапка достигает широты 55° : на Земле это соответствовало бы ситуации, когда север Байкала, Екатеринбург и Москва оказались бы на границе огромной полярной шапки, однако покровы состояли бы не из льда и снега, а значительно более холодной замерзшей углекислоты. Летом диаметр полярной шапки может уменьшиться вдвое-втрое. Основной, никогда не исчезающий керн северной полярной шапки, например, имеет диаметр 500...700 км. Он состоит преимущественно из водяного льда. Протяженные края зимней шапки, видимо, содержащие тонкий (в несколько сантиметров) углекислотный снег, весной исчезают: углекислота переходит в газообразное состояние и уходит в атмосферу.

Весенний переход огромных запасов углекислоты в атмосферу приводит к повышению локального атмосферного давления почти на 25...30% (до 2 мбар) от среднего давления в 6 мбар. Одновременно в другом (осеннем) полушарии большие массы атмосферного углекислого газа замерзают и осаждаются на керне полярной шапки и окружающих пространствах, при этом атмосферное давление в этом полушарии уменьшается в тех же пределах. Возникает значительный перепад давлений между южным и северным полушариями. При этом относительное

содержание азота и инертных газов в южном и северном полушариях меняется в противофазе из-за резких изменений в относительном содержании основного компонента — углекислого газа.

Очень быстрое (за счет стремительной сезонной конденсации углекислоты в зимнем полушарии) нарастание разности давлений приводит к возникновению мощных потоков атмосферного газа, направленных из летнего полушария в зимнее. Несмотря на низкую плотность марсианской атмосферы, поднимающиеся ветры оказываются чрезвычайно сильными. Если средняя скорость ветра у поверхности Марса обычно не превышает 10 м/с, то в период глобальных сезонных бурь скорость достигает 70...100 м/с. Мощные ураганные ветры поднимают на большую высоту (до 15...20 км) сотни миллионов тонн красноватой мелкодисперсной пыли. В период *пылевых бурь* атмосфера Марса становится практически непрозрачной, над сплошной пылевой завесой в телескопы либо с борта искусственных спутников планеты с трудом просматриваются только вершины самых высоких гор. При этом многокилометровая пылевая завеса преграждает путь солнечным лучам к поверхности, что приводит к выхолаживанию поверхности. Возникают дополнительные локальные перепады температуры, что еще в большей степени усиливает ветер. Наблюдения показали, что здесь могут возникать многочисленные смерчи, получившие название «*пылевые дьяволы*».

Пылевые бури вызывают своеобразный «*антипарниковый*» эффект. Марсианские пылевые тучи непрозрачны для приходящего солнечного излучения, но прозрачны для уходящего теплового излучения поверхности планеты. Поэтому во время пылевой бури температура на поверхности планеты падает, зато атмосфера разогревается. Описанные атмосферные процессы радикально отличаются от того, что происходит в уже рассмотренных выше атмосферах Венеры и Земли.

Наименования на карте Марса. Для обозначений объектов на поверхности Марса используются земные географические названия, имена ученых и некоторые традици-

онные названия, данные еще более 300 лет назад при первых телескопических наблюдениях планеты.

Самые крупные кратеры названы в честь ученых, внесших вклад в изучение Марса. Эта традиция была заложена еще в XIX в. Так, например, крупнейшие кратеры с диаметрами более 400 км названы в честь Гюйгенса, Кассини, Скиапарелли и Антониади — пионеров телескопических наблюдений Марса.

В районе, прилегающем к плато Большой Сирт (Syrtis Major Planum), кратеры названы в честь астрономов, делавших зарисовки деталей на поверхности планеты. Большой Сирт — крупномасштабная контрастная темная деталь, впервые обнаруженная на Марсе с помощью телескопа еще в XVII в. и названная в честь похожего по форме залива в Средиземном море вблизи Ливии.

Крупные детали были названы в XIX в. итальянским астрономом Джованни Скиапарелли с использованием древних географических названий на Земле и мифологических имен. Поэтому на карте Марса есть названия Эллада (Греция), Авзония (Италия), Фарсида (провинция Ирана), Земля Ноя, Земля Сирен и т. д. Согласно правилам, выработанным комиссией Международного астрономического союза, в Земле Аравия кратеры названы в честь французских ученых. Западнее, в районе Земли Темпе, кратеры названы в честь советских астрономов.

Кратеры вблизи экваториальной области вблизи нулевого меридиана названы именами астрономов, выполнявших измерения координат деталей поверхности Марса, периода вращения и размеров планеты. Центральный меридиан на карте Марса проходит через небольшой кратер Эри-0, находящийся на дне кратера больших размеров (Эри). Кратер назван в честь директора Гринвичской обсерватории, через которую проходит нулевой меридиан на Земле. Именами астрономов, делавших зарисовки полярных шапок Марса, названы кратеры южнее Земли Ноя, куда доходит зимой южная полярная шапка. Западнее равнины Аргир (легендарная страна серебра) кратеры названы в честь американских астрономов (см. рис. 8.3), восточнее этой равнины — в честь немецких ученых.

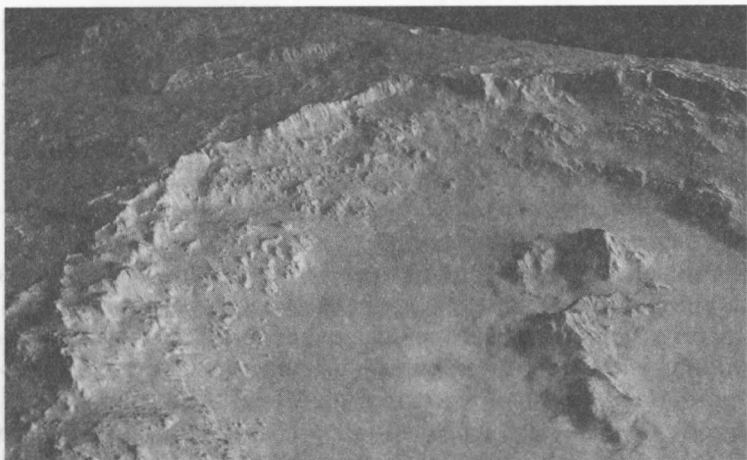


Рис. 8.3
Кратер Хэйл на равнине Аргир
(космический аппарат «Марс-экспресс», ЕКА)

К западу от меридиана 180° кратеры названы в честь мореплавателей, открывавших (на Земле) новые земли. В северной полярной области есть кратеры, названные в честь М. В. Ломоносова и конструктора ракетно-космических систем С. П. Королева. Кратеры небольших размеров названы в честь городов и деревень разных стран. При этом используется правило: в названиях кратеров диаметром 10...100 км 2...3 слога, в названиях меньших кратеров — один слог.

Протяженным долинам даны названия планеты Марс на разных языках народов мира, например Храт (Марс по-армянски). Исключение сделано для Долины Маринера, названной так в честь космического аппарата «Маринер-9» (впервые выполнившего успешные съемки долины). Меньшие долины названы именами земных рек.

Рельеф Марса. Поверхность Марса отличается разнообразием форм рельефа. Здесь можно найти высочайшие вершины вулканического происхождения (но нет горных хребтов), глубокие каньоны, равнины, зоны хаотического рельефа. Типичный элемент поверхности — многочисленные ударные кратеры различных размеров. В отличие

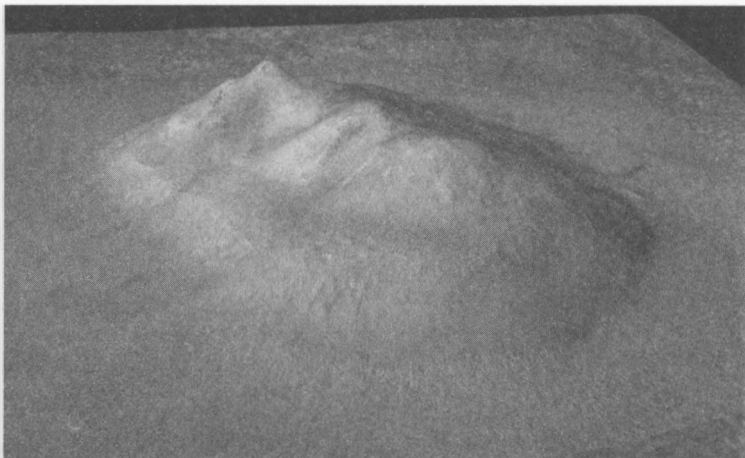


Рис. 8.4

Останцовая гора высотой около 500 м, известная как «лицо Марса» (космический аппарат «Марс-экспресс», ЕКА)

от Меркурия и Луны, важную роль в формировании и изменениях рельефа играют *эрозионные процессы*, в том числе *выветривание* и другие *эоловые явления*. В результате многие древние кратеры разрушены и изменены поздними процессами. На Марсе обнаружены гигантские *дюны* с характерным расстоянием между гребнями до 2 км, многочисленные *останцовые скалы* (рис. 8.4).

Участки хаотического рельефа (беспорядочно расположенные холмы и провалы), по-видимому, связаны с процессами, в которых участвовала вечная мерзлота, присутствующая на большей части поверхности планеты. Обнаружены множественные долины разнообразной морфологии. Есть долины, образованные движением ледников, лавы, жидкой воды. Особый интерес представляют следы событий, похожих, видимо, на катастрофические мощные селевые потоки, которые переносили огромные массы обломков породы и ледяных глыб. Такие потоки, видимо, связаны с кратковременными импульсными событиями типа крупных импактов или мощных вулканических извержений, которые могли на короткое время превращать в жидкую массу верхний слой грунта

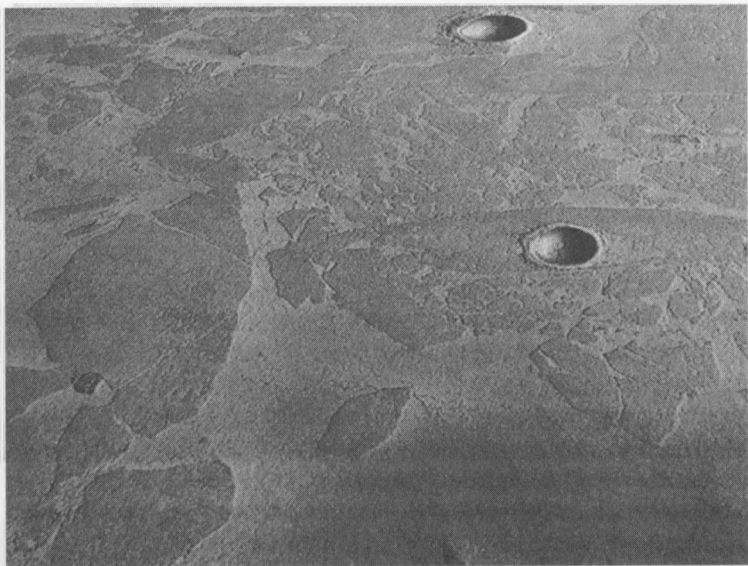


Рис. 8.5

«Ледяное море». Видны отдельные льдины, на фоне поверхности замерзшей воды (космический аппарат «Марс-экспресс», ЕКА)

планеты, на большей части поверхности состоящий на десятки процентов из водяного льда. Обнаружены, кроме того, ледники, припорошенные песком и пылью, и даже участки небольших «ледяных морей»: равнины, на которых ясно просматриваются крупные «льдины», видимо, вмерзавшие в окружающую ледяную жидкость (рис. 8.5). Подавляющая часть элементов рельефа несет на себе следы присутствия жидкой воды в далеком прошлом. Максимальные перепады высот на Марсе значительны, достигая почти 35 км от уровня глубоких каньонов до самых высоких вершин.

Общий взгляд на поверхность Марса позволяет выявить интересную особенность — так называемую *дихотомию*, т. е. резкое различие между северным и южным полушариями Марса. В южном полушарии хорошо сохранилось огромное количество древних ударных кратеров, включая гигантские ударные бассейны, например Planitia Hellas (равнина Эллады) в Восточном полушарии — глу-

бокое (до 7 км от среднего уровня поверхности) округлое понижение диаметром более 1500 км, или *Planitia Argyre* (равнина Аргир на юге Западного полушария), тоже, очевидно, ударный бассейн несколько меньших размеров. За нулевой (средний) уровень высот на Марсе выбран уровень, соответствующий атмосферному давлению 6,1 мбар.

В Западном полушарии к югу от экватора расположено гигантское поднятие, включающее в себя высокие связанные между собой плато — Сирия, Синай, Босфор, Икария, Дедалия, плато Солнца и другие. Высота этого поднятия достигает 5...7 км над средним уровнем поверхности. Западная часть этого поднятия (область Фарсида) служит фундаментом для трех крупнейших гор Марса — потухших вулканов, вздымающихся более чем на 20 км. Помимо описанного поднятия, все южное полушарие отличается множественными горными областями, включая высокогорное Южное плато (*Planum Australe*) на южном полюсе Марса.

В отличие от южного полушария, северное полушарие характеризуется пониженными формами рельефа: оно в среднем на 4 км ниже южного. Здесь почти нет высоких плато, практически не сохранились ударные кратеры. Гигантская депрессия северного полушария охватывает почти 35% всей поверхности Марса. Невысокое Северное плато (*Planum Borealis*) находится на северном полюсе Марса в центре гигантской Великой северной равнины (*Vastitas Borealis*). К ней примыкает глубокая и протяженная равнина Утопия (*Utopia Planitia*), переходящая в равнину Элизий (*Elizium Planitia*), достигающую и даже пересекающую экватор в Восточном полушарии. Утопия — название сказочного острова в произведении социалиста Томаса Мора, Элизий — мифическая страна блаженства.

В Западном полушарии, к западу от поднятия Фарсида, расположены грандиозные пониженные пространства равнины Амазония (*Amazonis Planitia*, мифическая страна амазонок) и равнина Аркадия (*Arkadia Planitia* — гористая часть Пелопонесса, в древности прославленная как счастливая страна). Резкая граница между бескратерными глубокими равнинами севера и мощными поднятиями

и сложным рельефом юга проходит под углом примерно 35° к экватору, разделяя планету на две резко не похожие друг на друга части.

Дихотомия марсианской поверхности не имеет окончательного объяснения. Основная парадигма предлагает версию о катастрофическом ударе астероида с диаметром порядка 300 км, который мог вызвать разломы коры и массивованные излияния лавы. Предполагается, что лава могла залить древние кратеры и после застывания образовать гигантские равнинные пространства. Эта модель вызывала возражения, поскольку согласно проведенным расчетам упавший астероид должен был расплавить огромное количество породы, в итоге жидкая лава могла бы покрыть всю планету слоем более нескольких километров. После этого не могли бы сохраниться никакие проявления древнего рельефа. Современные расчеты показывают, что в случае скользящего (касательного) удара под углом $15...30^\circ$ к поверхности могло получиться менее масштабное нарушение, расплавившее участок коры непосредственно в районе столкновения (в северном полушарии).

Анализ морфологии марсианской поверхности не позволяет обнаружить мощных проявлений тектонической активности литосферных плит. Вероятно, это связано с небольшими (по сравнению с Землей) размерами планеты. Уникальным исключением является грандиозный каньон, или *долина Маринера*, в докосмическую эпоху наблюдавшийся в сильные телескопы как прямолинейная деталь на диске Марса и открытый первым искусственным спутником планеты — американским космическим аппаратом «Маринер-9», в 1971–1972 гг. осуществившим первую глобальную фотосъемку Марса с близкого расстояния. Долина Маринера представляет собой огромный каньон глубиной в среднем 2...3 км, а в отдельных местах до 5...7 и даже 10 км, протянувшийся на 4500 км в Западном полушарии Марса к югу от экватора в широтном направлении. К каньону примыкают многочисленные «притоки» — глубокие и широкие овраги. Система связанных долин каньона Маринера очень велика, ширина отдель-

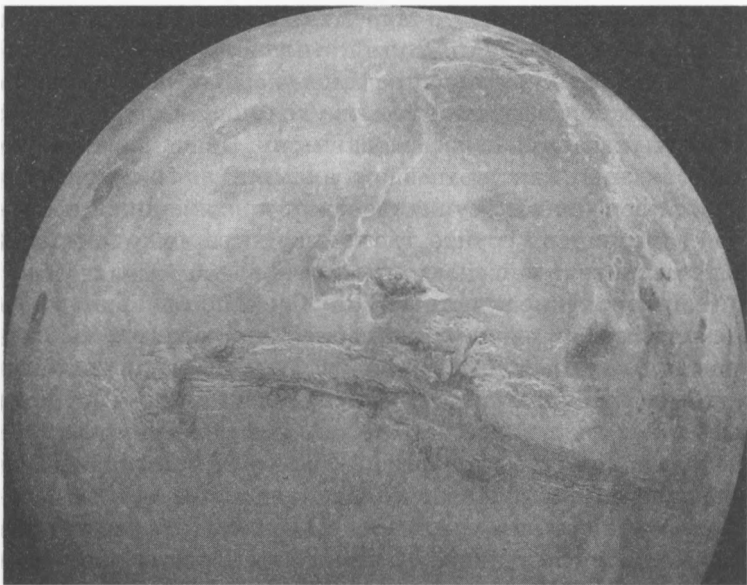


Рис. 8.6

Мозаичный снимок Марса (космический аппарат «Викинг», НАСА): в центре — каньоны долины Маринера; темные пятна слева — вулканы Фарсиды.

ных долин достигает 150 км, основной каньон имеет ширину более 100 км. Атмосферное давление на дне каньона оказывается вдвое больше, чем в среднем на поверхности Марса, — 12 мбар! Знаменитый Гранд Каньон в Аризоне мог бы уместиться в одном из примыкающих к долине Маринера второстепенных оврагов (рис. 8.6).

Западная оконечность каньона Маринера находится в так называемом *Лабиринте ночи*, примыкающем с востока к поднятию Фарсиды. Это протяженная система глубоких трещин и провалов в поверхности планеты, достигающих в ширину 30 км. По утрам дно трещин затянуто плотным туманом.

Формирование долины Маринера обычно связывается с древним и мощным проявлением тектоники примерно 3 млрд лет назад — катастрофическим разрывом в марсианской коре, когда кора «лопнула» под влиянием неких мощных внешних сил, о которых будет сказано ниже.

Съемки поверхности Марса с высоким разрешением с орбиты искусственного спутника планеты показали наличие глубоких округлых провалов (каверн, пещер), вероятно, на многие десятки метров уходящих в глубину. Эти объекты остаются неисследованными. Не исключено, что они связаны с карстовыми провалами. В любом случае остается вероятность существования протяженных полосей типа пещер в грунте, где температура может оказаться положительной.

Марсианские вулканы. В Западном полушарии, вблизи западной оконечности каньона Маринера, расположено поднятие Фарсида высотой 5...7 км. Фарсида протянулась на 3000 км в широтном направлении и на 4000 км в меридиональном. Здесь вдоль линии, направленной с юго-запада на северо-восток, расположены три гигантских вулкана (гора Аскрийская, гора Павлина и гора Арсия). К северо-западу от них, вне Фарсиды, находится четвертый, самый крупный вулкан — Олимп. Это самые высокие горы не только на Марсе, но и, по-видимому, в Солнечной системе. Оценки их высот существенно различаются. Это связано с различными точками отсчета: от нулевого (среднего) уровня, соответствующего атмосферному давлению 6,1 мбар, либо от уровня подножия горы. В последнее время система высот отсчитывается от эквипотенциальной поверхности трехосного эллипсоида вращения, описывающего фигуру планеты. В дальнейшем приводятся высоты в этой системе.

Крупнейшая гора Марса — Олимп, или Olympus Mons, названная в честь мифологического горного обиталища греческих богов. Диаметр основания горы — 550...600 км, максимальная высота — 21,2 км. Поскольку к западу от Олимпа находится протяженная равнина Амазония с «отрицательными» относительно нулевого уровня высотами, по сравнению с ее уровнем Олимп вздымается на 24 км. По периметру основания вулкана Олимп прослеживается крутой уступ высотой в несколько (до 7...8) км. Таким образом, только высота уступа в основании Олимпа сопоставима с высотами высочайших вершин на Земле. Олимп относится к типу *щитовых* вулканов. Подобные образо-

вания на Земле извергают лаву жидкой консистенции, которая растекается на огромные расстояния и застывает. В результате склоны щитовых вулканов обычно пологие. Это характерно и для склонов Олимпа (крутизна в среднем около 5°), на которых видны следы многочисленных извержений — лавовых потоков. Согласно первоначальным оценкам возраст гигантских вулканов невелик — 300...400 млн лет назад.

Недавние, более детальные исследования позволили определить эпоху последних извержений — всего 4...2 млн лет назад. Для сравнения, крупнейший щитовой вулкан на Земле — гора Мауна Лоа на Гавайских островах имеет диаметр основания на дне океана около 200 км и высоту 9 км. Его объем составляет около 10% от объема грандиозного марсианского вулкана.

Вершина Олимпа увенчана гигантской *кальдерой* — котлообразной впадиной с плоским дном, возникшей в результате провала в районе жерла вулкана. Диаметр сложной составной кальдеры Олимпа составляет 75...100 км, ее глубина — 3 км. На этой огромной высоте атмосферное давление не превышает 0,5 мбар. Вершина Олимпа оказывается всегда выше облаков: 1000-километровое кольцо облаков, охватывающее вулкан, наблюдалось значительно (на 8 км) ниже вершины (см. рис. 8.7).

Несколько меньше Олимпа — три вулканических конуса Фарсиды. Кальдера горы Арсия, самой южной из этих гор, — 110...130 км. Высота Арсии — 18,2 км. Такой же высоты (18 км) достигает гора Аскрийская (в честь города Аскры, родины Гесиода) — северная вершина этой «тройки». Глубина ее кальдеры составляет 3 км. Средняя из этих гор — гора Павлина (по названию созвездия) имеет высоту 14 км. Ее кальдера наиболее глубока — 4,5 км при диаметре 45 км. Расчеты вязкости лавы, выполненные для вулкана Арсия, показали, что ее плотность меньше, чем у лунных лав, и существенно меньше, чем у земных. В условиях невысокой силы тяжести на Марсе ($3,72 \text{ м/с}^2$) эти лавы растекались на очень большие расстояния (до 1500 км), изменяя рельеф и заливая древние ударные кратеры.



Рис. 8.7
Вулкан Олимп
(космический аппарат «Марс Глобал Сервейер», НАСА)

Рассматривая впечатляющие высоты вулканов, следует иметь в виду, что здесь они указаны относительно среднего уровня поверхности Марса, а над окружающей поверхностью они могут быть еще выше. Например, высота Олимпа от основания до вершины почти 27 км.

Примерно в 80° к западу от Олимпа, в Восточном полушарии, на той же широте посередине огромной равнины Элизиум находится возвышенность Элизиум с характерным размером около 1500 км, поднимающаяся на 4...5 км над уровнем равнины. Здесь расположены вулканы Купол Гекаты, Купол Альбор и гора Элизий. Размеры вулкана Элизий сопоставимы с габаритами конусов Фарсиды: диаметр основания 500 км, высота 14 км, диаметр кальдеры — 14 км. Таким образом, горы Олимп, Арсия, Павлина, Аскрийская и Элизий представляют собой самые высокие вершины в Солнечной системе.

Грандиозность размеров марсианских щитовых вулканов предположительно связана с тем, что мантийные *плюмы*, породившие вулканы, сотнями миллионов лет остаются фиксированными относительно поверхности. На Земле смещение литосферных плит относительно вулканических очагов не позволяет формироваться вулканам таких размеров. Земные вулканы существуют более короткое время.

Помимо щитовых вулканов, на Марсе существуют так называемые *купола* — вулканические конусы, не столь высокие, как горы, но более «выпуклые», с крутизной склонов 8° , по-видимому, вязкость лавы здесь была более высокой. Кроме того, обнаружены древние вулканические структуры — *патеры* (конусы с очень пологими склонами, разрушенными стенами кальдер и радиальными каналами лавовых потоков на склонах). Вероятнее всего, патеры сложены пористыми зольными отложениями из изверженных пород, обработанных последующей эрозией.

Признаков сегодняшнего активного вулканизма на Марсе не обнаружено, похоже, что вулканические извержения закончились миллионы лет назад. Рельефы Великой Северной равнины, судя по всему, были сформированы в древности массивными истечениями лав из



Рис. 8.8
Дно многих кратеров содержит лед
(космический аппарат «Марс-экспресс», ЕКА)

трещин в коре и из вулканов. Не исключено, что часть извержений была инициирована импактными событиями.

Проблема глобальной катастрофы. Низкое атмосферное давление и низкие температуры на Марсе не позволяют существовать здесь воде в жидком состоянии. При давлении 6,1 мбар вода кипит и быстро испаряется при любой температуре. В результате на планете невозможны водоемы — моря, озера, реки и т. д.

В то же время обнаружено огромное количество признаков существования на Марсе значительных количеств жидкой воды в прошлом. Сохранились сухие русла с потоками и долины, потеки на склонах кратеров и другие водно-эрозионные образования. Посадочные аппараты показали наличие минералов, которые образуются при обязательном участии воды. Многие плоскодонные древние кратеры, похоже, были когда-то заполнены водой (рис. 8.8). Расчеты показывают, что вся масса марсианского льда, будучи растопленной, могла бы образовать океан

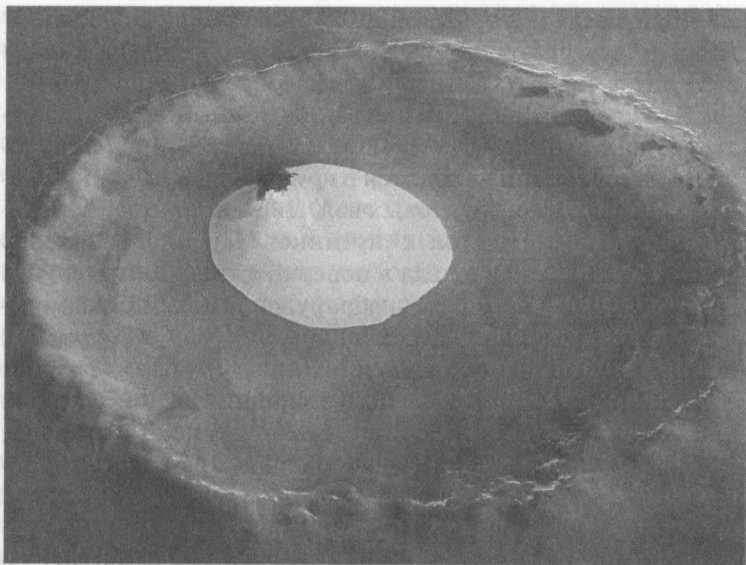


Рис. 8.9
Замерзшее озеро внутри кратера
(космический аппарат «Марс-экспресс», ЕКА)

равномерным слоем порядка десятков (по некоторым оценкам, сотен) метров на всей поверхности планеты. На Марсе налицо огромные запасы воды в виде льда, накопленные в полярных шапках, а также огромные (пока окончательно не оцененные) запасы льда в грунте в виде вечной мерзлоты. Вероятнее всего, единого океана на Марсе никогда не было, но многочисленные водоемы (моря, озера, реки, проливы), несомненно, существовали 3 млрд лет назад.

Итак, многочисленные факты говорят о том, что в далеком прошлом климатические условия на Марсе существенно отличались от современных. Очевидно, и атмосферное давление, и температура были значительно выше, чем сейчас. Следовательно, некая глобальная климатическая катастрофа существенно изменила условия на планете.

Куда делись вода и плотная атмосфера?

Большая часть углекислотной атмосферы в настоящее время находится в замороженном состоянии в полярных шапках Марса. Даже незначительные (по отношению

к общей массе полярных шапок) сезонные переходы части двуокиси углерода из атмосферы в полярные шапки и обратно заметно изменяют атмосферное давление.

Что касается воды, то она также по-прежнему присутствует на планете. Огромные количества воды в замороженном состоянии находятся в грунте в виде вечной мерзлоты и, возможно, грунтовых вод. Дистанционные измерения с борта искусственных спутников Марса показали, что содержание водяного льда в поверхностных слоях грунта достигает 50%. Кроме того, обнаружены ледники, замерзшие «озера» (ледяные линзы на дне кратеров, см. рис. 8.9) и даже небольшие остаточные ледяные «моря».

Большое количество льда сохраняется в полярных шапках, причем, в отличие от углекислоты, которая в ходе сублимации может частично переходить в атмосферу, водяной лед никогда не тает и не сублимирует (переходит в пар, минуя жидкое состояние).

Что могло изменить условия на Марсе? Окончательной версии на этот счет нет. Основные гипотезы связывают катастрофу с существенными изменениями параметров вращения планеты. Здесь рассматриваются три основные версии: изменение параметров орбиты Марса, изменение положения оси вращения Марса относительно самой планеты либо смещение всей коры Марса относительно нижележащих мантийных слоев.

Первая из гипотез рассматривает влияние так называемых *циклов Миланковича*. Сербский исследователь Милутин Миланкович в 1930-е гг. показал, что могут существовать периодические изменения эксцентриситета орбиты Земли под влиянием гравитационного воздействия Солнца и планет.

Период циклов Миланковича составляет десятки тысяч лет. Изменения, связанные с влиянием циклов Миланковича, согласно общепринятым представлениям вызывают долговременные климатические изменения на Земле с характерным периодом в десятки тысяч лет. Что касается Марса, то для него циклы Миланковича должны проявляться в значительно большей степени, чем для Земли: сильнее меняется эксцентриситет орбиты. В то же вре-

мя имеющиеся данные показывают, что климатическая катастрофа на Марсе произошла по крайней мере миллиарды лет назад, после чего климат радикально не менялся. Поэтому связь сравнительно высокочастотных изменений параметров орбиты и древнего единичного события выглядит неубедительной.

Согласно второй гипотезе гравитационные возмущения со стороны Солнца и других планет могут вызывать периодические изменения угла между осью вращения планеты и нормалью к плоскости орбиты (согласно некоторым данным для Земли — на 4°). Для Марса этот фактор должен быть существенно больше ввиду отсутствия стабилизирующего влияния крупного спутника.

В рамках описываемой концепции изменения наклона оси вращения планеты могут привести к существенно увеличению уровня солнечной радиации, падающей на полярные шапки. В результате как минимум одна из шапок (в летнем полушарии, обращенном к Солнцу) может полностью растаять. Атмосферное давление при этом существенно повысится, поскольку углекислота и водяной пар перейдут в атмосферу. Разность давлений между летним и зимним полушариями должна привести к перетеканию обогащенных паром атмосферных масс в сторону зимнего полушария. Ночами в экваториальных и умеренных широтах должны были происходить обильные снегопады. Днем отложения снега, льда и инея могли таять, порождая кратковременные, но бурные потоки воды. Одновременно на других участках поверхности с наихудшими условиями солнечного освещения должны были формироваться новые полярные шапки. Можно ожидать, что полярные шапки дрейфовали по поверхности планеты вслед за изменениями наклона оси вращения.

На снимках, полученных с искусственных спутников Марса, видно, что некоторые из сухих извилистых русел несут на себе явные следы длительных течений с намытыми отмелями. Кроме того, сильные ветры должны были покрывать снег слоями пыли и песка, что должно препятствовать быстрому таянию. В результате длительное существование незамерзающих рек свидетельствует о том,

что состояние атмосферы Марса в прошлом существенно отличалось от современного, и ночные температуры оставались довольно высокими. Не исключено, что этому способствовал парниковый эффект, когда в атмосфере было много парниковых газов (прежде всего водяного пара), а давление атмосферы было существенно выше. Кроме того, в период мощного вулканизма атмосфера могла быть насыщена и другими соединениями, способствовавшими росту давления и температуры.

Климатическая катастрофа могла быть связана с очередным изменением оси вращения Марса, в результате чего водоемы оказались в зоне высоких широт и начали замерзать. Уменьшение концентрации водяного пара в атмосфере должно было привести к лавинообразному похолоданию, формированию мощных полярных шапок, последующему вымерзанию атмосферного углекислого газа и дальнейшему уменьшению давления. Спусковым крючком могли быть непрозрачные тучи из выброшенных в атмосферу вулканических аэрозолей, перекрывавших путь солнечным лучам к поверхности планеты.

Свидетельством в пользу гипотезы изменений положения оси вращения Марса явилось исследование выхода на поверхность обнажившихся в результате выветривания пластов породы на внутреннем склоне кратера Беккерель. Толщина слоев отражает продолжительность климатических эпох на планете. Оказалось, что каждый десятый слой отличается по толщине от всех предыдущих. Факт может быть интерпретирован как следствие периодических изменений положения оси вращения по сложному закону, представляющему собой результат наложения нескольких циклов разной длительности. Каждый десятый период больше других по амплитуде величины отклонения оси вращения планеты от некоего среднего положения. Неустойчивость вращения Марса связана с отсутствием стабилизирующего влияния массивного спутника (у Марса нет крупного спутника, аналогичного Луне у Земли).

Другие варианты гипотезы рассматривают изменение положения оси вращения Марса в связи с перераспределением масс на поверхности — например, из-за высыха-

ния океана, занимавшего Великую Северную равнину 2...3 млрд лет назад (тогда это была область экватора). Расчеты показывают, что северный полюс планеты мог сместиться по поверхности Марса на 3000 км (ось сместилась на 30°). Вторичное смещение еще на 20° могло произойти еще позже.

Третья гипотеза предполагает катастрофические смещения полюсов планеты по следующему сценарию. Отсутствие плотного ядра и связанная с этим относительная однородность плотности Марса вдоль его радиуса могут привести к неустойчивости вращения в случае наличия даже сравнительно незначительных неоднородностей, удаленных от центра планеты. В частности, если плотные слои мантии окажутся далеко от экватора, кора Марса как единая плита под влиянием центробежной силы может сместиться так, чтобы несбалансированная масса оказалась на экваторе. Эта масса может находиться и в глубоких слоях недр, и на поверхности (например, заполненное плотной лавой глубокое кратерное море). Такие неоднородности плотности могут возникнуть довольно быстро, например в случае катастрофического удара крупного астероида. Другая возможная причина перераспределения масс может быть связана с мощными извержениями огромного количества жидкой лавы, например в районе вулканов Фарсиды и горы Олимп.

Механизм таких смещений, когда вся кора планеты проворачивается по мантийным слоям так, чтобы наиболее массивная часть оказалась на экваторе, детально не проработан. Очевидно, что таким процессам должно мешать огромное трение. Тем не менее не исключено, что долина Маринера возникла в результате подобного катастрофического смещения как грандиозный разрыв в коре.

В пользу гипотезы смещения коры как единого целого свидетельствует и наличие в экваториальной области Марса двух диаметрально противоположных по долготе структур, напоминающих следы растаявших слоистых полярных отложений. Смещение полюсов (полярных шапок) до экватора невозможно объяснить сравнительно небольшими изменениями наклона оси вращения планеты,

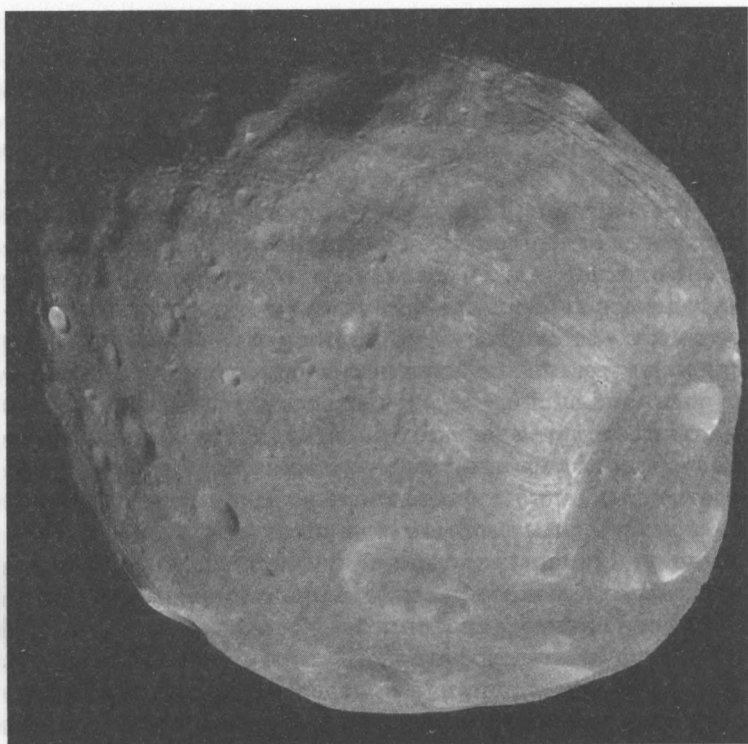


Рис. 8.10

Фобос (космический аппарат «Марс Реконейсэнс Орбитер», НАСА):
справа — крупный кратер Стикни.

связанными с циклами Миланковича. По-видимому, дрейф полюсов действительно имел место.

Если такое смещение могло произойти в давнюю «теплую» эпоху существования Марса, теплые низкоширотные зоны водоемов могли неожиданно и быстро сместиться к полюсам и быстро замерзнуть, начав лавинообразный процесс выхолаживания, который закончился осаждением сконденсировавшейся углекислоты на полярные шапки.

Как уже сказано, окончательная причина глобальной климатической катастрофы не установлена. Вероятнее всего, действовали многие факторы: циклические изменения положения оси вращения и параметров орбиты Мар-

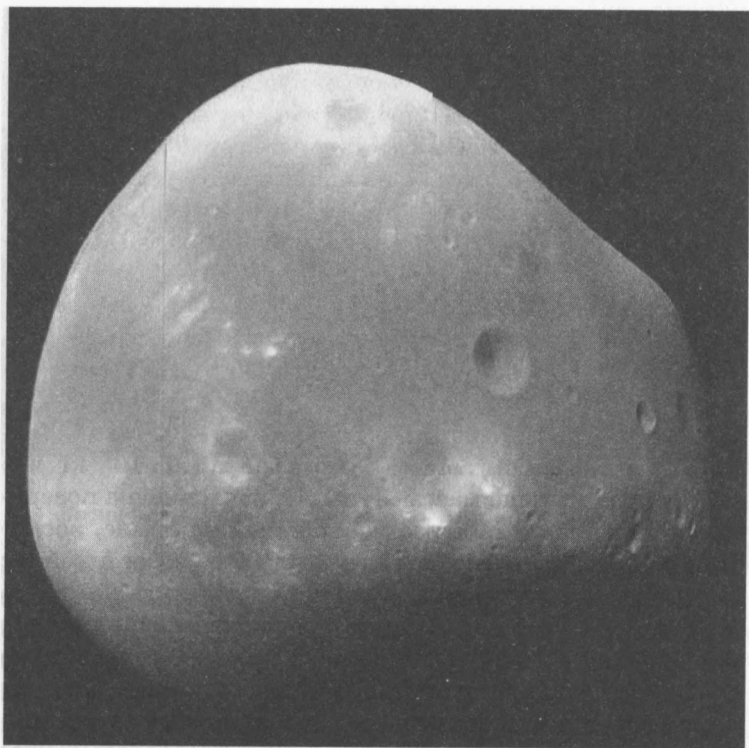


Рис. 8.11
Деймос (космический аппарат
«Марс Реконейсэнс Орбитер», НАСА)

са, перераспределения масс на поверхности и в недрах планеты за счет вулканизма и импактов, возможные смещения коры при отсутствии стабилизирующего влияния крупного спутника.

Спутники Марса. Марс имеет два спутника, открытых американским астрономом Асафом Холлом в 1877 г. Спутники получили названия Фобос и Деймос (Страх и Ужас — неизменные спутники бога войны Марса, рис. 8.10 и 8.11).

Фобос и Деймос очень малы и имеют неправильную форму. Фобос напоминает трехосный эллипсоид с осями 27, 21,4 и 19,8 км. Оси Деймоса равны 16 и 10 км. Большими осями оба спутника Марса всегда направлены к центру

планеты, т. е. они всегда обращены к планете одной и той же стороной, как Луна (синхронное вращение).

Фобос и Деймос движутся вокруг Марса по круговым орбитам практически в плоскости его экватора.

Радиус орбиты Фобоса составляет всего 9378 км (всего 6000 км над поверхностью планеты, что в 64 раза ближе, чем Луна удалена от Земли), радиус орбиты Деймоса составляет 23459 км (20130 км над поверхностью). Периоды обращения Фобоса 7 ч 39 мин, Деймоса — 30 ч 18 мин. Поскольку период обращения Фобоса значительно меньше периода вращения Марса вокруг своей оси, в небе Марса Фобос трижды за сутки восходит на западе и заходит на востоке.

Средняя плотность Фобоса составляет $1,95 \text{ г/см}^3$, Деймоса — около 2 г/см^3 . Масса Фобоса равна $1,08 \cdot 10^{16} \text{ кг}$, что в 7 млн раз меньше массы Луны. Притяжение на поверхности спутника в 1400 раз меньше, чем на Земле, космонавт в скафандре весил бы там около 100 г. Фобос и Деймос покрыты следами ударов, причем самый большой кратер на Фобосе (Стикни, названный в честь жены открывателя спутника А. Холла) имеет диаметр 8 км, что сопоставимо с радиусом спутника, рис. 8.9. На поверхности Фобоса обнаружены ряды параллельных борозд (вероятно, трещины, возникшие при мощном импакте, образовавшем кратер Стикни). Другая гипотеза — трещины возникли в результате длительных приливных напряжений со стороны Марса. Оба спутника покрыты толстым слоем черной как сажа пыли. Толщина слоя реголита на Фобосе оценена в сотни метров. На поверхности спутников, помимо кратеров всевозможных размеров, обнаружены крупные глыбы, на Деймосе их больше.

Анализ параметров орбиты Фобоса привел к выводу, что высота спутника медленно уменьшается (на 9 м за 100 лет). Ориентировочно через 40 млн лет Фобос должен разрушиться, и его фрагменты упадут на Марс. В отличие от Луны, происхождение которой в настоящее время связывают с результатом мощного импакта, выбросившего в околоземное пространство значительную часть силикатной земной коры, спутники Марса скорее всего представ-

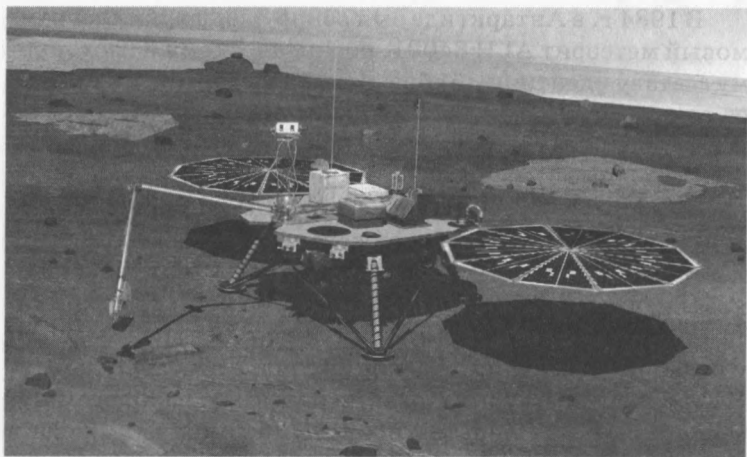


Рис. 8.12

Космический аппарат «Феникс» на Марсе (рисунок НАСА)

ляют собой древние небесные тела, сформировавшиеся, как и вся Солнечная система, 4,6 млрд лет назад. Судя по внешнему виду, Фобос и Деймос — типичные малые планеты (астероиды), захваченные гравитационным полем Марса. При этом круговые орбиты спутников и их расположение практически точно в экваториальной плоскости Марса остаются необъясненными: при гравитационном захвате форма и наклонение орбит могли оказаться, строго говоря, какими угодно. Не исключено, что в прошлом Марс обладал и другими спутниками, ранее упавшими на его поверхность: следы некоторых импактных событий в виде удлиненных кратеров не исключают такую возможность. Такие кратеры могли возникнуть при касательных траекториях падающих тел — вероятных спутников Марса.

Поиски биосферы. Специальная аппаратура на американских посадочных аппаратах «Викинг-1» и «Викинг-2» в 1976–1978 гг. и «Феникс» (рис. 8.12) в 2008 г. была настроена на поиск микроорганизмов Марса. Результаты многомесячных исследований не дали подтверждений существования жизни на планете. Исследования с помощью других аппаратов и других методик будут продолжены.

В 1984 г. в Антарктиде был обнаружен двухкилограммовый метеорит ALH 84001, по химическому и изотопному составу идентичный образцам, исследованным на Марсе автоматическими посадочными аппаратами. Судя по всему, фрагмент марсианской коры был выброшен в космос упавшим астероидом, после чего спустя миллионы лет он упал в виде метеорита на Землю. В 1996 г. было объявлено, что в метеорите обнаружены следы древних окаменелых микроорганизмов. Последующие исследования показали, что микровключения можно объяснить результатами специфических химических реакций в грунте Марса, и их биогенное происхождение выглядит необязательным. В итоге вопрос о существовании биосферы на Марсе остается открытым. Открытие провалов (возможных входов в пещеры) на Марсе оставляет возможность поисков проявлений жизни в глубоких горизонтах в недрах планеты.

Некоторый оптимизм внушает обнаружение дистанционными методами с борта искусственных спутников Марса микроскопических количеств метана в атмосфере Марса, который в принципе (хотя и не обязательно) может иметь биогенное происхождение. Очевидно, что наличие метана отражает существование каких-то «сегодняшних» процессов на планете, поскольку ультрафиолетовое излучение Солнца в отсутствие озонового слоя должно разрушать его за несколько месяцев. Распределение метана над поверхностью планеты оказалось существенно неоднородным, усматривается тенденция к росту его концентрации вблизи вулканических образований. Связь существования метана с гипотетическим влиянием марсианской биоты пока остается неподтвержденной гипотезой.

Предварительные планы предусматривают продолжение автоматических миссий к Марсу в ближайшие десятилетия. Обсуждается вопрос о подготовке в 2030-е гг. пилотируемого полета к Марсу. Независимые планы на этот счет разрабатываются в Национальном управлении по авиации и космонавтике (НАСА) США, Европейском космическом агентстве (ЕКА) и Российском космическом агентстве (Роскосмосе). Одна из основных целей — продолжение поисков жизни на Марсе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите основные формы рельефа Марса.
2. Выполните сравнительный анализ атмосфер трех планет — Венеры, Земли и Марса.
3. Почему крупнейшие вулканы на Марсе значительно больше земных?
4. В чем суть феномена дихотомии марсианской поверхности? Какие существуют версии объяснения этого феномена?
5. Изложите теорию сезонных изменений в атмосфере Марса (изменения давления и температуры, сезонные ветры и пылевые бури, динамика полярных шапок).
6. В чем различие между южной и северной полярными шапками Марса? Как оно объясняется?
7. Дайте краткое описание каньона Маринера.
8. Каковы факты, свидетельствующие в пользу древней климатической катастрофы на Марсе? Каковы гипотезы о ее причинах?
9. Сформулируйте и обоснуйте свое мнение о возможности климатической катастрофы на Земле, аналогичной марсианской.
10. Выполните сравнение основных свойств спутников Земли и Марса.
11. Сформулируйте и обоснуйте свое мнение о возможности существования биосферы на Марсе.



9

ГЛАВНЫЙ ПОЯС
АСТЕРОИДОВ

В пространстве между орбитами Марса и Юпитера расположен так называемый Главный пояс астероидов (рис. 9.1). Он состоит из множества двигающихся по замкнутым орбитам вокруг Солнца небесных тел (астероидов) размерами от десятков метров до сотен километров. Общее количество обнаруженных объектов, принадлежащих Главному поясу, быстро увеличивается и превышает 500000. Существующие оценки позволяют предположить, что общее количество астероидов в Главном поясе достигает миллиона.

Следует подчеркнуть, что у многих астероидов, обнаруженных в последние годы, до сих пор окончательно не определены орбиты: для точного определения элементов орбиты обычно требуется наблюдать астероид в течение

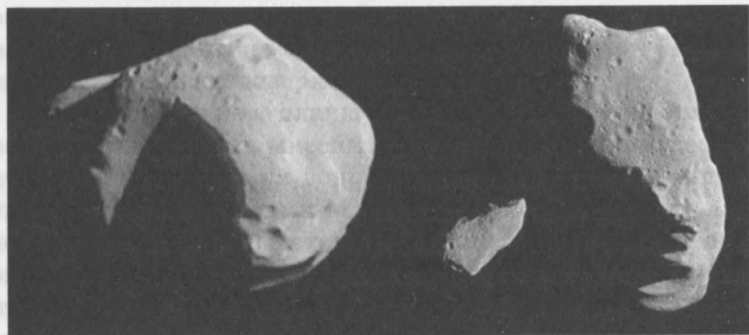


Рис. 9.1
Астероиды

нескольких лет. Таким астероидам присвоены пока не постоянные имена, а лишь временные обозначения.

Открытия и названия малых планет. Первый из астероидов был случайно открыт профессором университета в Палермо Джузеппе Пиацци вечером новогоднего дня 1 января 1801 г. Звездоподобный (точечный), но медленно движущийся, подобно планете, объект получил название Церера в честь древнеримской богини плодородия и покровительницы Сицилии. Как указано выше, в 2006 г. Церера переведена в разряд карликовых планет. Церера была потеряна на небе, но снова найдена ровно через год, 1 января 1802 г. Ольберсом благодаря вычислениям великого математика Карла Гаусса. Спустя три месяца Ольберс обнаружил еще один астероид — Палладу. С его же участием в 1804 г. была открыта Юнона, в 1807 г. — Веста. К началу XX в. — 1 января 1901 г. было открыто 463 астероида, спустя полвека — к 1 января 1951 г. — 2153.

В начале XXI в. (по состоянию на 2 октября 2001 г.) было обнаружено 146677 малых планет, включая 30176 нумерованных (порядковый номер присваивается астероиду после того, как его орбита уверенно определена, т. е. проведены его надежные наблюдения на интервале времени, превышающем период его обращения вокруг Солнца). 8914 астероидов были наделены собственными именами. Уже к началу 2004 г. число пронумерованных астероидов увеличилось почти до 66000 (увеличилось вдвое за два с небольшим года), общее число обнаруженных объектов превышало 230000 (выросло за то же время на 56%). Темпы открытия астероидов нарастают по мере совершенствования используемых средств наблюдений в геометрической прогрессии, удваиваясь каждые два года, присвоение же новых названий идет с постоянной скоростью — примерно 1200 названий в год.

По состоянию на 2004 г., 62% всех зарегистрированных астероидов были открыты за последние 10 лет. К началу 2009 г. число занумерованных астероидов выросло до 202885. На конец октября 2010 г. общее количество открытых астероидов составило 538153 объекта и продолжает быстро увеличиваться.

Каждый новый обнаруженный объект получает предварительное обозначение, начинающееся с года открытия. Далее следует латинская буква, указывающая, в каком месяце оно было сделано. В этой системе учитываются каждые полмесяца, поэтому используются 24 из 26 букв латинского алфавита. Не используются буквы I и Z. Применяется следующее правило: A и B — это половины января (с 1 по 15 и с 16 по 31 числа соответственно), C и D — февраля, E и F — марта и т. д. За первой латинской буквой следует вторая (по алфавиту), которая определяет простой порядковый номер открытия в заданном временном интервале (A — первый открытый объект, B — второй, C — третий и т. д.). Буква I вновь пропускается, зато Z теперь используется. Такая система обозначений позволяет обозначить 25 астероидов от A до Z.

Если в течение года обнаружено большее количество объектов, для них применяются цифровые указатели. Так, первые 25 новых астероидов, обнаруженных во второй половине марта, например 2009 г., должны получить предварительные обозначения 2009 FA, 2009 FB, ..., 2009 FY, 2009 FZ.

Если открытия продолжатся, то очередные вновь открытые объекты (с 26 по 50) будут именоваться уже как 2009 FA1, ..., 2009 FZ1. Следующие 25 — как 2009 FA2, ..., 2009 FZ2 и т. д.

Сразу после открытия и присвоения предварительного номера начинаются попытки идентифицировать наблюдаемый объект со всеми когда-либо ранее наблюдававшимися по имеющейся базе данных. Если оказывается, что не произошло «переоткрытие» уже известного ранее объекта и заявленный астероид не идентифицируется ни с одним из ранее наблюдававшихся, и для него набирается достаточное количество наблюдений, чтобы определить орбиту и рассчитать его движение для наблюдений в будущем, то это временное обозначение закрепляется за ним до наступления следующих противостояний (максимальных сближений с Землей, соответствующих расположению вдоль одной прямой Солнца, Земли и исследуемого объекта). Если в очередных противостояниях астероид

удается наблюдать вновь, параметры его орбиты уточняются и ему присваивается порядковый номер.

Повторные наблюдения астероида по рассчитанным данным реализуются далеко не всегда, поскольку орбита астероида (особенно небольшого по массе) может быстро меняться, иногда даже в течение одного оборота вокруг Солнца из-за возмущений со стороны более массивных тел, вблизи которых проходит астероид. Этим объясняется тот факт, что только 10...20% обнаруженных астероидов имеют порядковый номер, и этот процент постепенно уменьшается: число открытий нарастает существенно быстрее, чем число присвоенных номеров.

Астероид, получивший номер, может получить собственное имя. Названиями малых планет занимается специальная комиссия № 20 Международного астрономического союза, избираемая на три года и включающая 11 профессиональных астрономов. Привилегия предложить названия согласно установленным правилам дается первооткрывателю, который обязан представить обоснование. Новое имя регистрируется Международным центром по малым планетам, находящимся в США, и публикуется в ежемесячно выходящих «Циркулярах МЦМП». Присвоенное название астероида считается официально принятым с момента публикации и не может быть изменено.

Согласно принятым правилам предлагаемое название должно заметно отличаться от уже существующих, быть достаточно легко читаемым и не слишком длинным (обычно не более 16 символов). Содержание его не должно задевать чьи-то интересы или быть проявлением дурного вкуса. Название не должно звучать непристойно на каком-либо языке. Неприемлемы названия коммерческого и рекламного характера. Имена политиков и военных могут присваиваться астероидам не ранее чем через 100 лет после их ухода из жизни. То же касается военных и политических событий. Имен ученых и деятелей искусства это ограничение не касается. Название принимается только в случае единодушного одобрения всеми членами комиссии.

Первоначально малым планетам давались имена богов. Однако имена богов всех народов и времен исчерпались,

после чего в качестве имен для малых планет стали использоваться географические названия, имена и фамилии реальных людей. Сначала присваивались женские имена, мужские имена использовались для обозначения только «выдающихся» по каким-то параметрам объектам. В настоящее время этим правилом не руководствуются.

Большой вклад в открытие малых планет в XIX в. внес астроном Макс Вольф, открывший 228 малых планет. Свообразными рекордсменами стали сотрудники Крымской астрофизической обсерватории, супруги Николай Степанович Черных (537 открытых астероидов) и Людмила Ивановна Черных (268 открытых астероидов). Поскольку супруги Черных в конце 1950-х гг. учились в Иркутском педагогическом институте, ряд названий астероидов связан с сибирскими именами. В их числе малые планеты 1957 Ангара, 2776 Байкал, 3224 Иркутск, 2036 Шерагул (поселок в Тулунском районе Иркутской области, где провел детство Н. С. Черных), 2585 Ирпедина (в честь Иркутского пединститута), 3158 Анга, 4189 Саяны, 2131 БАМ, 2593 Бурятия, 2610 Тува, 2656 Эвенкия, 2607 Якутия, 2120 Тюмения, 2232 Алтай, 2890 Вилюйск, 3049 Кузбасс, 3406 Омск, 7950 Березов, 9567 Сургут, 9848 Югра, 4271 Новосибирск. Ряд названий малых планет астрономы Черных предложили в честь сибиряков: 3702 Трубецкая и 3703 Волконская (в честь жен декабристов), 3128 Обручев, 3230 Вампилов, 4537 Валгрирасп (в честь писателя Валентина Распутина), 3493 Степанов (в честь иркутского астрофизика, директора Института солнечно-земной физики СО РАН), 6845 Мансурова (в честь директора астрономической обсерватории ИГУ, матери автора этой книги) и ряд других.

В настоящее время большинство новых малых планет открывается с помощью автоматизированных телескопов.

Орбиты астероидов. Большие полуоси орбит большинства астероидов заключены в пределах от 2,06 до 4,09 а. е., в среднем 2,77 а. е. Средний эксцентриситет орбит малых планет — 0,14, средний наклон плоскости орбиты к плоскости орбиты Земли — $9,5^\circ$. Средняя скорость движения астероида вокруг Солнца — около 20 км/с, средний пери-

од обращения вокруг Солнца — 4,7 года (от 3 до 9 лет), средний период вращения астероида вокруг своей оси составляет 7 ч.

Разброс значений, описывающих параметры орбит астероидов, достаточно велик. Тем не менее основная часть объектов обладает сходными характеристиками орбит. Для большинства (97%) астероидов эксцентриситеты орбит не превышают 0,3, наклонения орбит меньше 16° . Примерно половина известных астероидов движется по орбитам, мало наклоненным к эклиптике (до 8°). Другая половина имеет орбиты, наклоненные до 25° , а отдельные объекты — до 50° .

Есть малые планеты, орбиты которых выходят далеко за пределы Главного пояса. Так, например, астероид 944 Гидальго, обладая высоким эксцентриситетом орбиты, в афелии почти достигает орбиты Сатурна (9,4 а. е.), а в перигелии оказывается внутри орбиты Марса (меньше 1,5 а. е.). Наклонение орбиты Гидальго составляет 43° . Астероид 1566 Икар подходит к Солнцу ближе, чем Меркурий, эксцентриситет его орбиты равен 0,83. Существует большое количество астероидов, перигелии которых находятся в пределах орбиты Земли (например, малые планеты группы Аполлона). Есть отдельные астероиды, вся орбита которых лежит внутри орбиты Земли: например, 2062 Атон (большая полуось $a = 0,966$ а. е.), 2100 Ра-Шалом ($a = 0,832$), 2340 Хатор ($a = 0,844$ а. е.). Есть и чрезвычайно удаленные астероиды, например 2060 Хирон ($a = 13,688$ а. е.),двигающийся на орбите Сатурна.

Существуют отдельные группы астероидов, движущихся синхронно с планетой Юпитер. В 1772 г. французский математик Лагранж показал, что система из трех тел образует устойчивую в гравитационном смысле систему, если эти тела находятся в вершинах равностороннего треугольника (точках либрации). Позже были открыты две группы астероидов, первая из которых движется по орбите Юпитера на 60° впереди него (греки), вторая группа — на 60° позади (троянцы). В группе троянцев в начале XXI в. обнаружено более 1500 довольно крупных астероидов.

Распределение числа астероидов Главного пояса по их периодам обращения вокруг Солнца обнаруживает ряд глубоких минимумов. Указанные минимумы, получившие названия *пробелы*, или *люки Кирквуда*, соответствуют простым соотношениям $1/2$, $1/3$, $2/5$, $3/7$, $5/11$ и т. д. периодов обращения астероидов к периоду обращения Юпитера. Астероиды избегают орбит с периодами, которые находятся в таких соотношениях с периодом обращения Юпитера вокруг Солнца. Это очередное проявление резонансных явлений в Солнечной системе. Периодическое воздействие Юпитера приводит к тому, что астероиды, оказавшиеся в люках Кирквуда, удаляются отсюда, переходя на другие орбиты. Считается что эксцентриситет орбит астероидов, попадающих в люки Кирквуда, увеличивается настолько, что малая планета начинает пересекать орбиту Марса. При сближениях с Марсом меняется и большая полуось орбиты, в результате астероид покидает люк Кирквуда. Часть их уходит на орбиты, сближающиеся с Марсом, Землей и даже Венерой, часть уходит на более удаленные от Солнца орбиты.

Существует и обратное действие резонансов: на орбитах, характеризующихся, например, соотношением $2/3$, наблюдается увеличенное количество астероидов. Этот пример показывает, что за время существования Главного пояса астероидов характеристики орбит входящих в него малых планет должны были существенно измениться.

В целом орбиты астероидов, особенно небольших, подвергаются постоянным гравитационным возмущениям со стороны других астероидов и планет, в результате они непрерывно изменяются.

Размеры астероидов. Первый из открытых астероидов, Церера, имеет размеры 930...970 км, масса составляет $0,9 \cdot 10^{21}$ кг. Однако в связи с переводом Цереры в разряд карликовых планет этот объект перестал быть самым большим астероидом, и это «почетное звание» перешло к Палладе, чей диаметр составляет 550 км. Однако не исключено, что 2 Паллада также окажется карликовой планетой (в случае, если она обладает сферической формой, что на сегодняшний день неизвестно). Тогда самым крупным ас-

тероидом будет считаться 4 Веста с диаметром 530 км. Судя по фотографиям, Веста заметно отличается от сферы по форме, и, следовательно, изменение статуса ей не грозит. Астероид 3 Юнона имеет размер 247 км.

Всего в Главном поясе астероидов 14 объектов с размерами более 250 км, еще 14 с размерами от 200 до 250 км. Более 100 объектов имеют размеры более 100 км. С уменьшением размеров быстро нарастает количество астероидов соответствующей величины. Нижняя граница размеров астероидов порядка 10 м, объекты меньших габаритов именуются метеороидами, хотя принципиальных физических различий между астероидами и метеороидами нет. Как указано выше, предполагается, что всего в Главном поясе астероидов должно быть порядка миллиона объектов с размерами больше 1 км, на сегодняшний день обнаружено более 500000 объектов (хотя далеко не все из них пронумерованы). Несмотря на их огромное количество, общая масса всех астероидов, открытых и неоткрытых, по разным оценкам, не превышает величины от 0,01 до 0,1 массы Земли.

Природа астероидов. Первоначально из-за огромной удаленности малых планет физические параметры этих объектов было очень трудно определить. Отмечались лишь существенные различия по отражательной способности (альбедо) солнечного света, что позволило разбить астероиды на группы — *таксонометрические классы*, или *типы* (см. табл. 9.1).

Наиболее распространенными астероидами являются С, S и М. В Главном поясе астероидов их соотношение составляет 7:5:1 (есть и другие оценки). С-астероиды наиболее темные, по цвету близкие к саже. Так, например, альбедо малой планеты 52 Европа равно всего 3%.

S-астероиды, судя по всему, состоят из каменных пород, близких по свойствам глубинным породам Земли. Альбедо этих астероидов значительно выше, чем у углистых: альбедо астероида 44 Низа равно 38%. Это один из самых светлых астероидов.

Что касается М-астероидов, то, судя по свойствам отраженных радиосигналов, на поверхности этих небесных тел есть выходы никелистого железа.

Таблица 9.1

Основные типы астероидов

Тип	Альбедо	Минералогия	Метеоритный аналог
С Углистые	Низкое	Силикаты и непрозрачный материал (углерод)	Углистые хондриты
S Каменные	Умеренное	Силикаты и металл	Железо-каменные
M Металлические	Умеренное	Металл с примесями	Никележелезные экзиститовые хондриты
E	Высокое	Силикаты	Экзиститовые ахондриты
R и Q	От умеренного до высокого	Оливин, пироксен и металл	Обычные хондриты

Астероиды типа Q в Главном поясе не обнаружены, они наблюдаются только среди малых планет, сближающихся с Землей.

Отмечена четкая зависимость между типами астероидов и их расстоянием от Солнца. Астероиды типов M и S находятся ближе к внутренней границе Главного пояса, астероиды типа C — ближе к внешней (удаленной от Солнца) границе.

Внутреннее строение астероидов достоверно неизвестно, но может быть оценено, с одной стороны, по результатам компьютерного моделирования, с другой — по исследованиям упавших на Землю фрагментов астероидов — *метеоритов*. Моделирование строения Цереры на основе выполненных наблюдений показало, что этот самый крупный объект в Главном поясе может обладать внутренним ядром, мантией, обогащенной летучими компонентами, и тонкой корой, покрытой мелкодисперсной пылью. Почти сферическая форма этой карликовой планеты показывает, что при ее формировании превалировали гравитационные силы, а наличие либраций (покачиваний в процессе вращения) дает основание полагать, что в теле Цереры есть существенные неоднородности плотности. Средняя плотность Цереры невелика, по составу она близка к углистым хондритам. Это позволило выдвинуть предполо-

жение: в недрах Цереры присутствует большое количество водяного льда, причем запасы воды там могут быть близки к количеству воды в Мировом океане Земли. Вероятно, данные о строении Цереры могут быть распространены и на некоторые другие астероиды типа С.

В дальнейшем были получены экспериментальные данные о веществе астероидов по упавшим на Землю их фрагментам — *метеоритам*. Выяснилось, что каждому классу астероидов соответствуют метеориты с аналогичными оптическими свойствами. Это позволило связать каждый из таксонометрических классов малых планет с определенным типом метеоритов и тем самым определить химический состав и структуру астероидов исходя из данных о соответствующих метеоритах.

По своему составу метеориты бывают железные (6% массы всех собранных при падениях метеоритов), каменные (93%) и железокаменные (1%). По-видимому, это распределение в значительной мере отражает и распределение типов вещества в астероидах. Что касается метеоритов, найденных спустя много лет после их падения, то в их числе преобладают железные, что легко объясняется (они заметнее и лучше сохраняются).

Железные метеориты состоят в среднем на 91% из железа, на 8,4% из никеля, 0,6% составляют кобальт, сера, фосфор и т. д. (см. рис. 9.2). В микроскопических количествах могут присутствовать золото и платина (впервые обнаруженные в веществе упавшего в 1947 г. Сихотэ-Алиньском метеорите). В земных горных породах сплав железа с никелем не встречается. На полированной и протравленной кислотой поверхности железного метеорита видна характерная структура так называемых *видманштеттеновых фигур*, которая наблюдается исключительно в метеоритах. Видманштеттеновы фигуры отражают кристаллическую структуру застывшего расплава железа с никелем.

Каменные метеориты состоят преимущественно из оксидов кремния, магния, натрия, кальция, железа, алюминия и некоторых других элементов. В них содержится 36% кислорода, 26% железа, 18% кремния и 14% магния.

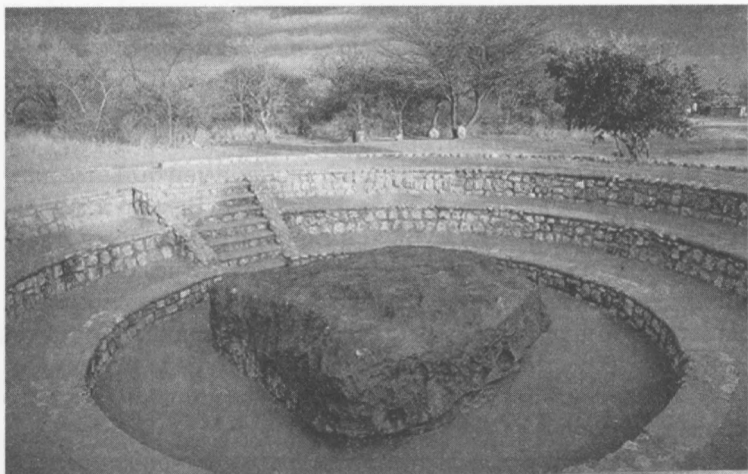


Рис. 9.2

Гоба — крупнейший из известных цельных железных метеоритов, 60 т (Намибия, Африка)

Каменные метеориты по содержанию кислорода и кремния близки к породам земной коры, но металлов (никелистого железа) в них существенно больше, поэтому космические камни тяжелее земных. Содержание радиоактивных элементов в метеоритах меньше, чем в земной коре, причем в железных меньше, чем в каменных.

Каменные метеориты подразделяются на *хондриты*, содержащие мелкие округлые силикатные зерна размерами около 1 мм — *хондры*, и *ахондриты*. Хондриты — основной тип каменных метеоритов. Хондры состоят из того же каменного вещества, что и остальная часть метеорита, отличаясь только структурой.

Считается, что хондриты образовались в результате соединения (слипания) мелких частиц, входивших в состав протопланетной туманности. Происхождение хондр окончательно неизвестно. Основное предположение заключается в том, что это капли вещества, сконденсировавшегося при охлаждении газовой среды с включениями пыли в протопланетной туманности. Судя по всему, хондриты никогда не подвергались плавлению и гравитационной дифференциации в составе крупных массивных тел.

Существует редкая разновидность хондритов — так называемые *углистые хондриты*. В этих метеоритах, состоящих в основном из темного вещества, содержащего много углерода, присутствуют небольшие светлые минеральные включения (хондры). Нелетучие элементы в углистых хондритах присутствуют в тех же пропорциях, что на Солнце. Этот факт позволяет считать, что углистые хондриты до настоящего времени сохранили состав протопланетной туманности, когда вещество в ней было перемешано (недифференцировано), а Солнце и планеты еще не существовали. Анализ углистых хондритов чрезвычайно важен для изучения условий, происходивших 4,6 млрд лет назад, в эпоху формирования Солнечной системы.

В ахондритах хондр нет, здесь представлено структурно однородное вещество.

Железокаменные метеориты — образцы никелистого железа (железная матрица) с вкраплениями зерен каменных минералов. Встречается обратная ситуация: металлические зерна вкраплены в каменную матрицу.

По структуре метеоритное вещество можно разделить на две группы — *хондриты* и *дифференцированные метеориты*. В отличие от описанных выше хондритов, дифференцированные метеориты представляют собой фрагменты крупных тел, явно проходивших через стадию гравитационной дифференциации, нагрева и плавления.

Таким образом, по свойствам метеоритов можно сделать выводы о характеристиках их родительских тел — астероидов.

Кентавры. Помимо астероидов Главного пояса, обнаружены объекты, чьи орбиты расположены дальше от Солнца — в пространстве между Юпитером и Нептуном. По состоянию на конец 2010 г. известно 287 кентавров. Судя по их альбедо, это объекты, объединяющие в себе свойства каменных астероидов и ледяных объектов пояса Койпера и комет. Эта двойственность отражена в названии (кентавры — человеко-лошади из греческой мифологии).

Первый из кентавров — Хирон (диаметр оценен в 137 км) открыт в 1977 г. Проходя перигелий своей довольно вытянутой орбиты, Хирон окутывается пылевой *комой*,

подобно ядру кометы, хотя существенно превосходит типичные ядра комет по размерам.

В числе кентавров можно упомянуть Фон (диаметр 185 км), Несс (58 км), Асбол (66 км) и Харикло (257 км), открытые в 1990-е гг. Названия соответствуют именам кентавров античной мифологии.

Исследования астероидов космическими аппаратами. На сегодня существует несколько астероидов, исследованных с близкого расстояния с помощью космических аппаратов.

В 1991 г. автоматический космический аппарат «Галилео», направлявшийся к Юпитеру, провел исследования астероида 951 Гаспра (названного в честь поселка в Крыму, вблизи обсерватории в Симеизе). Размеры Гаспры $19 \times 12 \times 11$ км близки к габаритам Деймоса. Это каменный астероид S-типа красноватого оттенка, поверхность сложена породами, содержащими оливин, пироксен и железо. Сделан вывод, что Гаспра является обломком более крупного (порядка 100 км) небесного тела. Поверхность покрыта ударными кратерами, имеются трещины и разломы.

В 1993 г. «Галилео» исследовал малую планету 243 Ида (размеры $56 \times 24 \times 21$ км). Ида обладает маленьким спутником Дактиль (размерами 1,5 км). Плотность ударных кратеров на единицу поверхности у Иды оказалась больше, чем у Гаспры, что позволяет сделать вывод о большем возрасте Иды.

В 1997 г. космический аппарат «NEAR» обследовал с близкого расстояния астероид 253 Матильда. Это крупная малая планета типа C с альбедо 4%. Размеры Матильды составляют $50 \times 50 \times 70$ км. Она обладает чрезвычайно медленным вращением с периодом 17,4 земных солнечных суток.

В 2000 г. «NEAR», получивший дополнительное имя «Шумейкер» в честь выдающегося американского астронома, впервые в истории стал искусственным спутником астероида 433 Эрос и выполнил съемки его поверхности с разрешением около 3 м. Подтвердились данные о том, что Эрос имеет форму груши с размерами 40×14 км. После

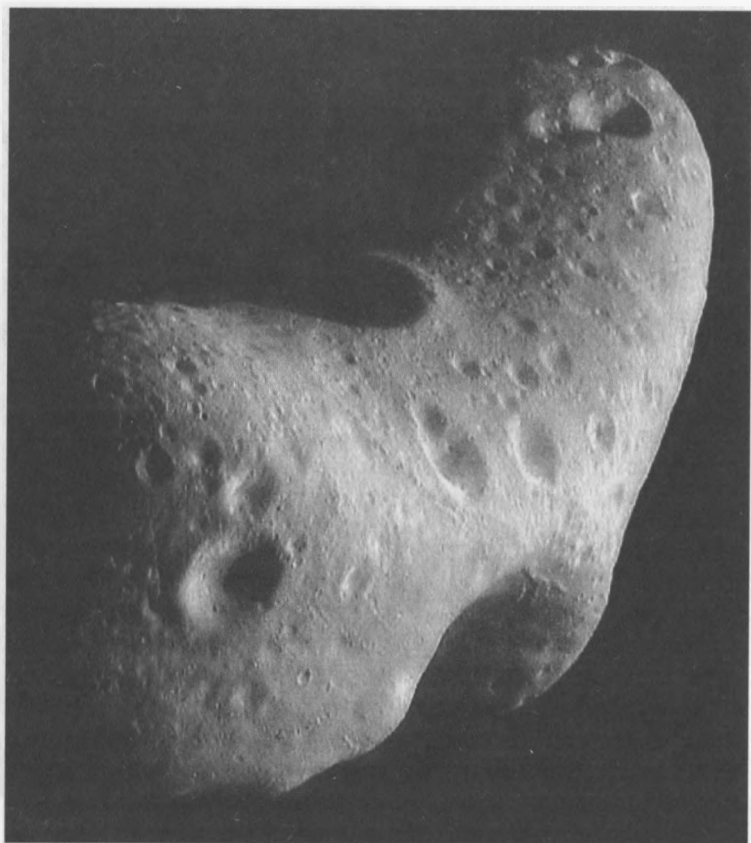


Рис. 9.3
Астероид Эрос (космический аппарат «NEAR», НАСА)

окончания работ аппарат «NEAR» предпринял ранее не планировавшуюся попытку совершить посадку на Эрос, однако при посадке были повреждены камеры аппарата и снимки с поверхности получены не были. Выяснилось, что Эрос близок по составу к хондритам с низким содержанием железа. Это сплошное тело, образовавшееся в результате распада более крупного объекта. Средняя плотность Эроса близка к плотности земной коры (рис. 9.3).

В 2005 г. была предпринята попытка с помощью японского космического аппарата «Хаябуса» взять образец

грунта с поверхности небольшого астероида 25143 Итокава размером $550 \times 300 \times 240$ м и доставить образец на Землю. Из-за серии неполадок возвращение космического аппарата задержалось на годы: капсулу с микроскопическими частицами вещества астероида он доставил на Землю только в 2010 г. Их состав позволяет идентифицировать их как частицы оливинов (30%), пироксенов (25%) и плагиоклазов. Относительное количество и элементный состав частиц соответствует параметрам примитивных метеоритов (углистых хондритов). Это соответствует данным дистанционного зондирования вещества астероида аппаратурой «Хаябусы».

Съемки Итокавы показали, что это небесное тело представляет собой не твердое тело из скальных пород, а скорее рыхлую грудю камней. На нем обнаружены два типа ландшафта: пересеченная местность с большим количеством камней и валунов и ровные реголитовые равнины из мелких частиц. Выдвинута гипотеза о том, что сотрясения метеороида под влиянием ударов метеоритов могли привести к разделению камней у поверхности по размерам, в итоге большие и тяжелые частицы оказались на поверхности, а мелкие — внизу. Предполагается, что этот открытый на Итокаве эффект в той или иной степени характерен и для других астероидов (рис. 9.4).

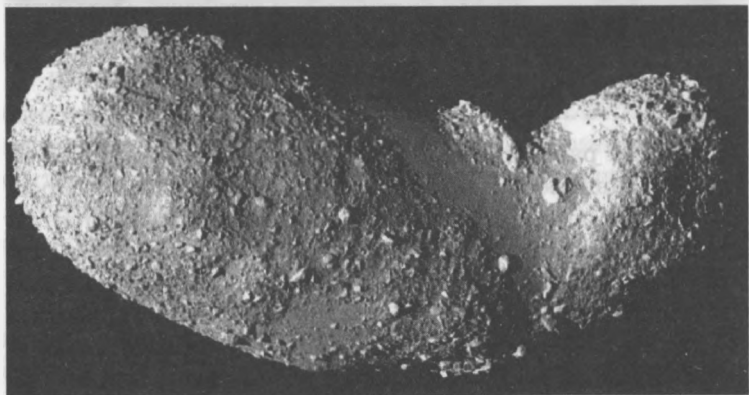


Рис. 9.4

Астероид Итокава (снимок КА «Хаябуса», Япония)

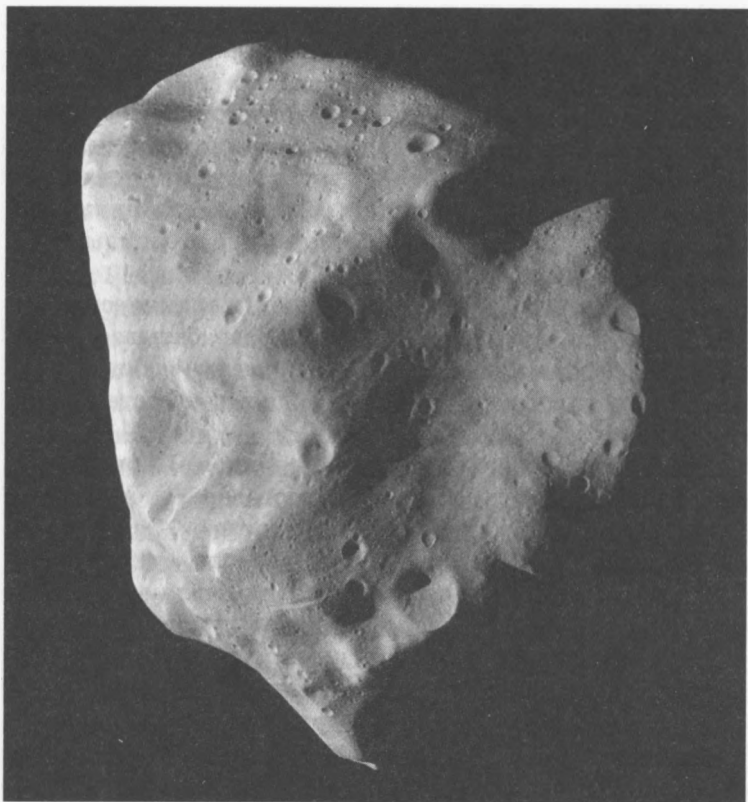


Рис. 9.5

Астероид 21 Лютеция (космический аппарат «Розетта», ЕКА)

В 2007 г. состоялся запуск американского космического аппарата «Dawn», направленного на изучение Весты и Цереры. Пройдя мимо Марса в феврале 2009 г., аппарат должен в августе 2011 г. достигнуть Весты и выйти на орбиту вокруг этого астероида.

Через 9 месяцев работы возле Весты планируется старт с орбиты и перелет к Церере, которая будет достигнута в 2015 г.

В июле 2010 г. космический аппарат «Розетта» (ЕКА) прошел вблизи крупного астероида 21 Лютеция (132×101×76 км) и получил серию качественных снимков (рис. 9.5).

Полученные разными методами данные позволяют сделать следующие выводы. Плотность астероидов варьируется в пределах от $1,3 \text{ г/см}^3$ (253 Матильда) до $3,4 \dots 3,5 \text{ г/см}^3$ (4 Веста). Для некоторых астероидов характерны значительная пористость, что говорит о наличии трещин и пустот в этих небесных телах. Судя по всему, многие из них представляют собой скопления обломков, связанных между собой силой тяготения. Некоторые астероиды обладают небольшими спутниками.

Исследования астероидов с помощью космических аппаратов будут продолжены. В США разрабатывается новая программа исследований, предусматривающая даже полет пилотируемого корабля к одному из астероидов, сближающихся с Землей.

Проблема происхождения астероидов. Происхождение Главного пояса астероидов достоверно неизвестно. Существуют следующие основные гипотезы. Основная на сегодняшний день версия утверждает, что, судя по свойствам метеоритного вещества, астероиды являются не простыми конгломератами из слипшихся пылинок, но телами со сложной историей, проходившими гравитационную дифференциацию, частичное расплавление и подвергавшимися сильным давлениям (исключая углистые хондриты). Стандартный сценарий эволюции Солнечной системы предполагает, что астероиды суть остатки блоков, из которых, сталкиваясь и объединяясь, в свое время формировались планеты. Если подобные тела на расстояниях меньше $2,5 \text{ а. е.}$ от Солнца сформировали планеты земной группы (Меркурий, Венеру, Землю и Марс), то здесь объединения не произошло. Причиной этому стало гравитационное влияние близкого Юпитера. Юпитер согласно этой концепции постоянно перемешивал малые планеты, внося возмущения в их орбиты. В Главном поясе астероидов шли (и идут) противоположные процессы: как объединение в тесные группы, так и столкновения и дробления.

В 1923 г. японский астроном Хираяма выполнил трудоемкие вычисления для 1000 астероидов, которые позволили ему утверждать, что астероиды по параметрам движения группируются в несколько семейств. Это позволило

предположить, что малые планеты образовались в результате распада 12...30 более крупных небесных тел. В то же время есть сомнения в правильности методики таких расчетов: не исключено, что схожие параметры орбит в группах связаны с тем, что астероиды накапливаются на нескольких наиболее устойчивых орбитах. Кроме того, постоянные изменения параметров орбит астероидов в главном поясе за 3...4 млрд лет могли уничтожить следы начальных параметров. Разброс в характеристиках орбит малых планет также затрудняет проблему их объединения в прошлом.

В результате базовая на сегодня версия сводится к тому, что здесь планета так и не сформировалась, а многочисленные астероиды в большинстве своем сохранились с древних времен, когда вся Солнечная система напоминала нынешний Главный пояс астероидов. Часть астероидов испытала дробления в результате множественных столкновений. Следы меньших столкновений до сих пор наблюдаются на поверхности астероидов, планет земной группы и их спутников.

Метеориты демонстрируют, что разрушенные астероиды прошли стадию гравитационной дифференциации. Тогда железные метеориты представляют собой осколки разрушенных центральных железных ядер, каменные метеориты суть осколки протяженных разрушенных силикатных оболочек (коры и мантий), железокаменные метеориты — фрагменты тонких граничных слоев между ядром и оболочкой. Что касается хондритов, то это древнее вещество, так и не объединившееся в конгломераты, породившие малые планеты. Соотношение чисел падающих метеоритов разных типов отражает относительное количество вещества, содержавшееся в разных оболочках некогда разрушившихся малых планет. Так называемый стандартный сценарий активно развивается, в том числе отечественными исследователями, в числе которых в первую очередь может быть назван А. В. Витязев.

Вторая гипотеза была выдвинута Ольберсом сразу после открытия им малой планеты Паллады. Он предположил, что в пространстве между Марсом и Юпитером движутся обломки погибшей планеты, для которой даже было

предложено название — Фазтон (персонаж древнегреческого мифа, не справившийся с управлением летающей колесницей бога Аполлона). До начала XX в. эта гипотеза была ведущей. Однако очевидные и существенные различия в параметрах орбит астероидов не позволяли предположить, что все они являются осколками одной планеты. Кроме того, вызывал затруднения механизм катастрофы. Столкновения близко расположенных небесных тел в поясе астероидов с небольшими различиями в относительных скоростях не могли разрушить крупную планету. Трудно было представить, откуда в Солнечной системе мог появиться импактор с достаточной для разрушения крупной планеты кинетической энергией. Кроме того, считается, что большие различия в химическом составе различных астероидов также не позволяют считать их осколками одного небесного тела.

В настоящее время идея Фазтона понемногу начинает приобретать новых приверженцев, поскольку некоторые, казавшиеся ранее непреодолимыми трудности гипотезы находят новые обоснования. В частности, открытия более 500 планетных систем за пределами Солнечной системы начиная с 1995 г. по состоянию на начало 2011 г. показали, что в этих системах существуют крупные планеты, движущиеся по орбитам с огромными эксцентриситетами. Это означает, что достаточно велика вероятность потери таких планет. Следовательно, практически наверняка в межзвездном пространстве существуют планеты-скитальцы, движущиеся с огромными скоростями. Такая планета-скиталец, войдя в Солнечную систему, безусловно, способна в результате катастрофического столкновения с планетой размером с Марс разрушить ее, наводнив окружающее пространство множеством осколков разных размеров и форм.

Согласно концепции, развиваемой А. В. Багровым, именно такое катастрофическое столкновение и привело в свое время к разрушению Фазтона и массированным ливням осколков, оставивших следы на поверхности практически всех твердых тел Солнечной системы. Что касается разброса в параметрах орбит, то за 3 млрд лет все они безвозвратно и невосстановимо изменились. Различия в типах метеоритов и астероидов согласно данной гипотезе

связаны с различиями между фрагментами разных оболочек погибшей планеты, прошедшей стадию гравитационной дифференциации. В то же время оценки показывают, что вероятность такого столкновения, на котором основана космогония А. В. Багрова, ничтожна.

Существуют и иные версии. В качестве примера можно привести концепцию академика А. А. Маракушева, считающего, что астероиды — это обломки нескольких крупных планет в пространстве между Марсом и Юпитером, имевшим, подобно планетам-гигантам, протяженные и массивные флюидные газовые водородно-гелиевые оболочки. Эти оболочки создавали огромное давление на внутренние плотные ядра планет. Утрата этих оболочек под влиянием солнечного ветра привела к последующим разрушениям (взрывам) освободившихся от газовых оболочек твердых планетных ядер, которые были разорваны огромным внутренним давлением содержащихся в их недрах сжатых газообразных флюидов. Наличие микроалмазов в некоторых метеоритах, по мысли автора концепции, говорит о былых огромных давлениях со стороны мощных реликтовых водородных атмосфер, впоследствии утерянных. В этой версии планета может взорваться сама, без привлечения скитальца-импактора, за счет собственного внутреннего давления. Следует заметить, что эта гипотеза автора-геолога не пользуется популярностью в среде астрономов.

В результате в настоящее время не существует единой общепризнанной концепции о формировании Главного пояса астероидов (хотя, конечно, есть основная на сегодняшний день парадигма). Вероятно, будущая теория будет учитывать в той или иной степени наработки всех перечисленных гипотез.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова процедура открытия, регистрации малых планет и присвоения им названий?
2. Изложите гипотезы происхождения астероидов с использованием фактов, говорящих за и против этих гипотез.
3. Укажите основные типы астероидов и связанные с ними типы метеоритов.



ПРОБЛЕМА АСТЕРОИДНОЙ ОПАСНОСТИ

Следы ударов астероидов, метеороидов и ядер комет наблюдаются на поверхности рассмотренных планет земной группы и их спутниках (рис. 10.1). Так, если рассматривать плотность кратеров диаметром более 10 км, приходящихся на 1 млн кв. км, то на Луне эта величина составляет 392 кратера, на Меркурии (по данным съемок «Маринера-10», отснявшего 30% поверхности планеты) — 360, на Марсе — 210. Луна, находящаяся в ближайшей окрестности Земли, испещрена ударными кратерами. На видимой половине Луны, обращенной к Земле, насчитывается около 300000 кратеров диаметром более 1 км, в том числе около 15000 кратеров диаметром более 10 км. Исследования с помощью космических аппаратов показали, что на Луне есть и кратеры меньших размеров (до нескольких сантиметров). На обратной стороне Луны количество молодых кратеров оказалось вдвое больше, чем на видимой. Здесь находятся огромные ударные бассейны — безымянный рядом с морем Восточным (1100 км), кратеры Герцшпрунг (645 км), Королев (525 км), Аполлон (485 км) (рис. 10.2).

Очевидно, что Земля в свое время испытала не меньшее количество импактных событий, в отличие от безатмосферных планет, почти не сохранивших следов ударов. Тем не менее на Земле известно около 230 крупных кратеров, для 160 из которых их импактное происхождение доказано. Возраст наиболее крупных из них (диаметр до 200 км) близок к 2 млрд лет. Более древние образования



Рис. 10.1
Вход в атмосферу небольшого астероида (рисунок)

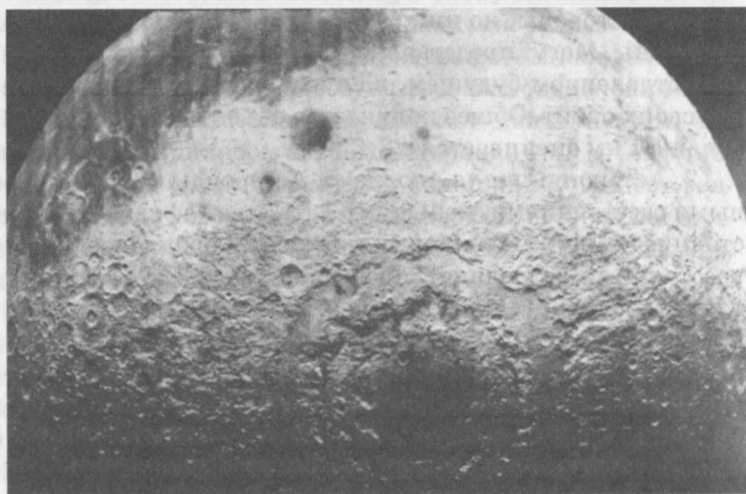


Рис. 10.2
Ударный бассейн рядом с морем Восточным на Луне
(космический аппарат «Лунар Орбитер-4», НАСА)

не сохранились. Тем не менее в современную эпоху столкновения иногда продолжают. В качестве примера можно указать падение небольшого астероида на планету Юпитер, наблюдавшееся 19 июля 2009 г. Выделившаяся при этом энергия соответствует энергии взрыва примерно пяти гигатонн тротила.

Астероидная опасность. В прошлом тела Солнечной системы претерпели огромное количество столкновений, которые во многом определяли процессы формирования и эволюции планет. Важным вопросом является проблема вероятности столкновений астероидов с Землей в настоящее время. Очевидно, что столкновение с Землей в принципе возможно только для объектов, чьи орбиты проходят вблизи орбиты Земли. Такие объекты принято подразделять на четыре группы астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Объекты этих четырех типов — Амура, Аполлона, Атона и Атиры — иногда называют АААА-астероидами.

1. Астероиды *типа Амура*. Астероиды, перигелии которых приближаются, но не достигают афелия орбиты Земли. В перигелии они приближаются к земной орбите с внешней стороны, но никогда ее не пересекают, поэтому безопасны. Могут представлять опасность для Земли только в отдаленном будущем, в случае изменения параметров своих орбит. Общее количество объектов с размерами больше 1 км оценивается в 2...3 тыс.

2. Астероиды *типа Аполлона*. Астероиды с перигелийными расстояниями, меньшими 1,017 а. е. (афелийное расстояние Земли), и большими полуосями орбит (средними расстояниями до Солнца), превышающими 1 а. е. К этому типу относятся 2/3 всех известных малых планет, сближающихся с Землей. Поскольку орбиты таких объектов проникают внутрь орбиты Земли, столкновение их с Землей возможно. Из-за того, что плоскости орбит этих астероидов в большинстве случаев наклонены к плоскости орбиты Земли, в пространстве орбиты не пересекаются, а лишь скрещиваются, и пересечение орбит наблюдается только в проекции на плоскость эклиптики. Последнее замечание касается и следующего класса астероидов — типа Атона.

3. Астероиды *типа Атона*. Астероиды с большими полуосями, меньшими, чем 1 а. е., но афелийными расстояниями большими, чем 0,983 а. е. (перигелийное расстояние Земли). Эти малые планеты движутся внутри орбиты Земли и только в афелии могут пересекать ее с внутренней стороны. Столкновение их с Землей также возможно. Астероидов этого типа менее 1/10 от общего числа известных опасных астероидов. Общее количество астероидов типа Аполлона и Атона с размерами больше 1 км оценивается в 1500.

4. Астероиды *типа Атиры*. Астероиды, которые движутся полностью внутри орбиты Земли. В ближайшем будущем они так же безопасны, как астероиды группы Амура. В 1998 г. открыт первый объект типа Атиры. Общее количество неизвестно. Наблюдения таких астероидов крайне затруднены, поскольку они должны преимущественно наблюдаться с дневной стороны Земли.

Среди астероидов четырех указанных типов отдельно выделяют потенциально опасные астероиды — ПОА (Potentially Hazardous Asteroids). К ним относят все объекты, орбиты которых в настоящую эпоху сближаются с орбитой Земли до расстояний, меньших или равных 0,05 а. е. (около 7,5 млн км), и чья абсолютная звездная величина (показатель яркости на небе) не превышает значения 22^m . Ограничение по абсолютной величине связано с тем, что при условно принятом альбедо астероида 0,13 объект с абсолютной звездной величиной, большей 22^m , имеет размеры меньше 150 м. Столкновение такого астероида с Землей не очень опасно: в худшем случае оно может вызвать локальную катастрофу.

Таким образом, потенциально способны столкнуться с Землей только астероиды типов Аполлона и Атона. Для столкновения необходимо (но, к счастью, недостаточно), чтобы точка пересечения орбит астероида и Земли лежала в пределах от перигелия Земли (0,983 а. е.) до ее афелия (1,017 а. е.). Данные об АСЗ по состоянию на 1 июня 2010 г. приведены в табл. 10.1.

Орбиты астероидов, сближающихся с Землей, стохастически меняются на интервалах времени порядка десятков

Таблица 10.1

Астероиды, сближающиеся с Землей (на 1 июня 2010 г.)

Группа	Всего открыто	Из них занумеровано	Потенциально опасные	Из них занумеровано
Типа Амура	2802	412	98	24
Типа Аполлона	3355	492	876	225
Типа Атона	551	75	113	26
Типа Атиры	10	2	2	0
Всего	6718	895	1089	275

тысяч лет из-за гравитационного воздействия крупных планет, вблизи которых периодически проходят астероиды. Близкие (тесные) прохождения могут изменять орбиты достаточно быстро и существенно. Поэтому опасные сегодня астероиды со временем могут стать безопасными и наоборот. Кроме того, расчеты показали, что существуют такие типы гравитационных возмущений со стороны крупных планет, которые «перебрасывают» некоторые астероиды из внешних областей Главного пояса во внутренние с большими эксцентриситетами, в результате семейство опасных астероидов типа Аполлона регулярно пополняется.

Пока все известные астероиды остаются безопасными для Земли на протяжении, по крайней мере, ближайших 100 лет. Наиболее опасным считается прохождение объекта типа Атона — астероида 99942 Апофис, который должен пройти всего в 36000–38000 км от поверхности Земли 13 апреля 2029 г (рис. 10.3). Размеры Апофиса оценены в пределах 270...340 м. Ожидается возможное разрушение нескольких спутников связи, находящихся на так называемых *стационарных орбитах* на указанной высоте над экватором Земли. Однако основная опасность заключается в том, что близкое прохождение Апофиса в 2029 г. вызовет очередное изменение его орбиты, в результате чего астероид станет объектом типа Аполлона с большой полуосью, превышающей 1 а. е. Величина возмущения критически зависит от минимального расстояния во

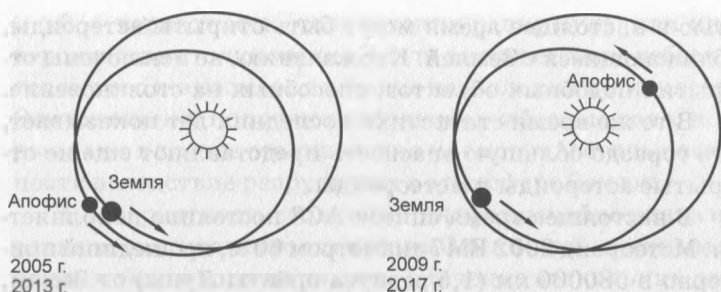


Рис. 10.3

Орбиты Земли и астероида 99942 Апофис

время прохождения вблизи Земли в 2029 г. и в настоящее время не может быть точно рассчитана. Среди возможных изменений траектории, к сожалению, есть такие, которые приведут к новым последующим опасным сближениям с Землей и даже маловероятному, но возможному столкновению начиная с 2036 г. Остальные известные астероиды безопасны: наиболее тесное сближение (астероид 2340 Хатор, размеры 350 м) состоится 21 октября 2086 г. на расстоянии 833 тыс. км.

Современные возможности наблюдений позволяют обнаруживать астероиды и метеороиды вблизи Земли в большем количестве, чем ранее. Так, в качестве примера можно привести ситуацию 2008 г., в течение которого ожидалось сближение с Землей 25 ранее открытых объектов с минимальным расстоянием до Земли 550000 км (1,4 радиуса орбиты Луны) для астероида 2007 TU24 размерами порядка 300 м (рис. 10.4). Из числа этих сближавшихся с Землей объектов три были открыты в 2007 г., два — в 2006 г., шесть — в 2005 г. Существенно, что от момента открытия объекта 2007 TU24 до его минимального сближения с нашей планетой прошло всего 4 месяца. Это означает, что именно с такой характерной заблаговременно-

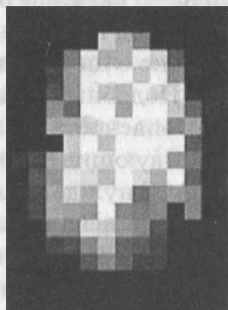


Рис. 10.4

Радиоизображение астероида 2007 TU24 (обсерватория Грин Бэнк)

стью в настоящее время могут быть открыты астероиды, сближающиеся с Землей. К сожалению, не исключены открытия подобных объектов, способных на столкновение.

В то же время статистика последних лет показывает, что гораздо большую опасность представляют еще не открытые астероиды и метеороиды.

В настоящее время список АСЗ постоянно пополняется. Метеороид 2002 ЕМ7 диаметром 60 м, прошедший примерно в 580000 км (1,5 радиуса орбиты Луны) от Земли, был открыт в 2002 г. только тогда, когда он уже начал удаляться, пройдя вблизи планеты. В том же 2002 г. метеороид 2002 МN диаметром около 100 м прошел вблизи Земли втрое ближе Луны — на расстоянии 115 тыс. км, будучи обнаруженным за три дня до максимального сближения с Землей. Метеороид 1991 ВА диаметром в 9 м прошел 17 января 1991 г. на расстоянии всего в 170 тыс. км от Земли.

Достаточно показательна ситуация, характеризующая 2010 г. Всего на 4 октября 2010 г. открыто и каталогизировано 7325 АСЗ, из них 818 имеют размеры больше 1 км. Только за неполный 2010 г. открыто 588 ранее неизвестных АСЗ, 12 из них превышают по размерам 1 км.

Современные средства наблюдений позволили только в январе–сентябре 2010 г. зарегистрировать 142 сближения астероидов на расстоянии в пределах 10 радиусов лунной орбиты, при этом 13 АСЗ пролетели внутри лунной орбиты (меньше одного радиуса орбиты Луны). Особо следует подчеркнуть, что заранее (в 2009 г.) было известно только о шести из них!

Подобные примеры указывают на то, что: а) астероидная опасность реальна и ранее явно недооценивалась; б) существующие средства и методы обнаружения и мониторинга АСЗ нуждаются в значительном совершенствовании.

Туринская шкала астероидной опасности. Летом 1999 г. на конференции по астероидной опасности в г. Турине Международный астрономический союз (МАС) официально принял шкалу астероидной опасности, разработанную профессором Бинзелом. Согласно этой шкале вероятность столкновения Земли с астероидом оценивается в рамках нижеприведенной десятибалльной шкалы.

0 — вероятность столкновения равна нулю или ниже вероятности столкновения Земли с неизвестным небесным телом того же размера в течение нескольких десятилетий. Эту же оценку получают небольшие небесные тела, которые даже в случае столкновения не смогут достичь поверхности вследствие разрушения в атмосфере Земли;

1 — вероятность столкновения чрезвычайно низка или равна вероятности столкновения Земли с неизвестным небесным телом того же размера в течение нескольких десятилетий;

2 — небесное тело совершит сближение с Землей, однако столкновение при этом маловероятно;

3 — тесное сближение с Землей с вероятностью столкновения 1% и более. В случае столкновения возможны локальные разрушения;

4 — тесное сближение с Землей с вероятностью столкновения 1% и более. В случае столкновения возможны региональные разрушения;

5 — тесное сближение с Землей с серьезной вероятностью столкновения, которое может вызвать региональные разрушения;

6 — тесное сближение с Землей с серьезной вероятностью столкновения, которое может вызвать глобальную катастрофу;

7 — тесное сближение с Землей с очень высокой вероятностью столкновения, которое может вызвать глобальную катастрофу;

8 — столкновение, способное вызвать местные разрушения (подобные события происходят раз в 1000 лет);

9 — столкновение, способное вызвать глобальные разрушения (подобные события происходят раз в 1000... 100000 лет);

10 — столкновение, способное вызвать глобальную катастрофу (подобные события происходят раз в 100000 лет и более).

На сегодняшний день астероиды, которые имели бы по Туринской шкале оценку выше 0 баллов, неизвестны, включая Апофис. Тем не менее, как указано выше, открытие таких, ныне неизвестных объектов не исключено в будущем.

Последствия импактных событий. На поверхности планет земной группы и их спутников обнаружены следы большого количества импактных событий (столкновений) с астероидами, метеороидами и ядрами комет. Земля не является исключением. Несмотря на действие эффективных механизмов уничтожения импактных кратеров (тектонические процессы, действие воды, ветра, биосферы), на Земле обнаружено не менее 230 ударных кратеров различного возраста и различных размеров. В их числе 5 крупнейших кратеров с размерами более 100 км и 32 кратера с размерами в пределах от 20 до 100 км. Данные о наиболее крупных кратерах приведены ниже.

Попигайский кратер (Россия, вблизи северной границы Анабарского щита, широта $71^{\circ}39'$ с. ш., долгота $111^{\circ}11'$ в. д.) имеет диаметр 100 км, возраст ударного бассейна — 35,7 млн лет. Импактор представлял собой каменный астероид диаметром 5...8 км, падавший со скоростью 15...24 км/с (рис. 10.5).

Кратер Маникуаган (Квебек, Канада, широта $51^{\circ}23'$ с. ш., долгота $68^{\circ}42'$ з. д.) имеет диаметр 100 км, возраст 214 млн лет.

Кратер Чиксулуб (северное побережье полуострова Юкатан, Мексика, широта $21^{\circ}20'$ с. ш., долгота $89^{\circ}30'$ з. д.) имеет диаметр 170...180 км, возраст 65 млн лет. Импактор представлял собой астероид диаметром 10...14 км, падавший со скоростью 12...15 км/с.

Кратер Садбери (Онтарио, Канада, широта $46^{\circ}38'$ с. ш., долгота $81^{\circ}11'$ з. д.) имеет диаметр 250 км, возраст 1850 млн лет. Импактор обладал характеристиками, предположительно сходными с импактором Вредефорт.

Кратер Вредефорт (Южная Африка, широта $27^{\circ}00'$ ю. ш., долгота $27^{\circ}30'$ в. д.) имеет диаметр 300 км, возраст 2023 млн лет. Импактор представлял собой астероид диаметром 14 км при скорости 15 км/с.

Нет сомнений, что на дне Мирового океана скрыты под осадочными породами другие крупные кратеры.

Рассмотрим последствия крупного импактного события, породившего кратер Чиксулуб. Расчеты показали, что падение десятикилометрового астероида могло при-



Рис. 10.5
Попигаийский кратер (спутник «Ландсат-7», НАСА)

вести к глобальной катастрофе. Энергия удара оценивается величиной порядка $10^{22} \dots 10^{24}$ Дж. При падении в океан происходит мощнейшее землетрясение, возникает волна *цунами* высотой до 4 км, в районе столкновения *султан* раскаленного пара, воды и грунта со дна океана поднимается в стратосферу на высоту порядка 35 км. Начальное давление в основании развивающегося султана достигает десятков тысяч атмосфер, что вызывает возникновение ударной волны. Гигантские цунами могут проникать на сотни километров от океанского побережья в глубину континентов. Фрагменты материала ударника и «мишени» (участка земного грунта) могут быть выброшены в окружающее пространство со скоростями в несколько

километров в секунду за пределы и в пределах атмосферы, подвергнув бомбардировке огромную территорию. Мощная ударная волна и катастрофическое землетрясение вызывают грандиозные механические разрушения, а световой импульс от взрыва — пожары на территории в миллионы квадратных километров (вплоть до целого континента). Громадное количество мелкодисперсной пыли, значительно превышающее по массе вес самого импактора, должно быть вынесено в атмосферу. В результате согласно расчетам возникает глобальный эффект «*ядерной зимы*», когда плотные пылевые тучи на многие месяцы прекращают доступ солнечных лучей к поверхности Земли, что вызывает существенное ослабление освещенности и резкое похолодание в приземных слоях на десять и более градусов. Эффект, который может быть назван «*астероидной зимой*», во многом аналогичен следствиям глобальной ядерной войны («*ядерная зима*»), параметры которой были рассчитаны в начале 1980-х гг. Это вызывает почти полное прекращение процессов фотосинтеза и развития у зеленых растений. Животные должны гибнуть как от похолодания, так и от бескормицы.

За время «астероидной зимы» происходит накопление углекислого газа и водяного пара в атмосфере. После оседания пылевой компоненты создаются условия для быстрого повышения температуры на несколько градусов из-за усиленного парникового эффекта. Такие резкие температурные колебания должны привести к гибели значительной части биосферы Земли.

Еще одним поражающим фактором мощного импакта является массовое образование оксидов азота в земной атмосфере из-за реакции между атмосферным азотом и кислородом под влиянием ударного сжатия воздуха за фронтом ударной волны. Последующая реакция с водой вызывает массированные кислотные дожди. Так, например, при падении Тунгусского космического тела образовалось, по некоторым оценкам, до 30 млн т оксида азота. Кроме того, серные месторождения в районе Чиксулубского импакта привели к выносу в атмосферу огромного количества сернистых соединений, что привело к усилению серноокислот-

ных дождей. Внесение в атмосферу новых химических соединений приводит, кроме того, к разрушению озонового слоя, что после очищения атмосферы от пыли должно вызывать поступление повышенных доз солнечного ультрафиолетового излучения к поверхности Земли, влияющих на биосферу. Суммарное воздействие всех перечисленных факторов, включая массовый стресс, понижающий репродуктивную способность теплокровных животных, могло привести к полному вымиранию всех наземных организмов с массой тела более 10 кг, исчезновению половины видов наземных существ и усилению мутагенных факторов, воздействующих на оставшиеся виды биоты.

В результате видно, что кажущееся «локальным» импактное событие (столкновение Земли с астероидом размером в несколько километров) на самом деле приводит к глобальным последствиям. Палеонтологические исследования показывают, что в период *фанерозоя* (возраст менее 570 млн лет) на Земле происходили неоднократные массовые вымирания *биоты*, или *биотические кризисы* (биотой принято называть все живое в данной области распространения). В частности, в течение последних 250 млн лет выявлено по крайней мере 9 массовых вымираний живых организмов. Один из наиболее тяжелых биотических кризисов, который произошел на рубеже конца мезозоя (меловой период) — начала кайнозоя (третичный период), 65 млн лет назад, принято называть К/Т-событием (от термина Cretaceous-Tertiary boundary — граница мелового и третичного периодов). По разным оценкам, тогда вымерло от 60 до 90% всех видов живых организмов, населявших Землю, включая полное исчезновение динозавров.

Открыватель и исследователь кратера Чиксулуб Луис Альварес и его коллеги предположили, что К/Т-событие связано с падением астероида размерами порядка 10 км. Первоначальным свидетельством падения астероида явилось обнаружение в земной коре слоя с повышенным содержанием иридия, возраст которого совпал с возрастом К/Т-события (содержание иридия в хондритах почти на три порядка — в 785 раз — превышает его среднюю концентрацию содержания в земной коре). Позднее был обнаружен

кратер того же возраста. На сегодняшний день существуют серьезные основания считать, что причиной К/Т-события явилось падение астероида у берегов современной Мексики 64,98 млн лет назад, которое привело к образованию кратера Чиксулуб.

В конце эпохи эоцена 35 млн лет назад произошло массовое вымирание морских организмов и похолодание климата. Выдвинуто и разрабатывается предположение о связи этого биотического кризиса с падением астероида, породившего Попигайский кратер. Есть и гипотезы, связывающие и другие кризисы с падениями астероидов и кометных ядер.

Таким образом, современная парадигма позволяет связывать многочисленные кризисы в прошлом биосферы Земли с крупными импактными событиями. Расчеты и оценки показывают, что падение астероида с размерами до сотни метров может привести к *локальной катастрофе* (разрушением на территории в десятки-сотни квадратных километров). Падение астероида с размерами от нескольких сотен метров до полутора километров приводит к *региональной катастрофе* (в масштабах материка). Удар астероида размером более 1,5 км может привести к *глобальной катастрофе*, разрушающей всю инфраструктуру цивилизации и уничтожающей порядка половины населения земного шара. При этом долговременные климатические и экологические последствия импакта могут действовать на протяжении десятков лет, продолжая процессы уменьшения численности и деградации цивилизации. Понятно, что попадание астероида или метеороида в элементы технической инфраструктуры человечества (атомные электростанции, гидротехнические сооружения, газовые и нефтяные хранилища, крупные населенные пункты, пожароопасные и взрывоопасные объекты) может существенно увеличить ущерб, принесенный импактом.

Согласно современным оценкам столкновения Земли с объектами, способными вызвать глобальную катастрофу, происходят в среднем один раз в 100000 лет. Эти оценки, разумеется (и к сожалению), не делают невероятным такой импакт в обозримом будущем.

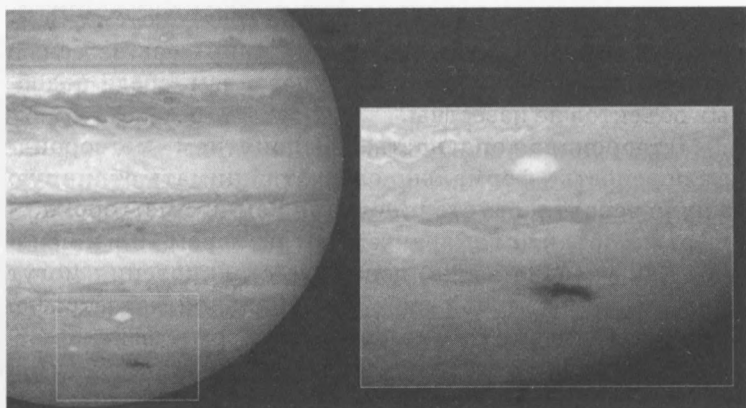


Рис. 10.6

Темный след падения астероида на Юпитер
(космический телескоп «Хаббл», НАСА)

Свидетельством тому, что проблема столкновения астероидов с планетами остается актуальной, является падение астероида 19 июля 2009 г. на Юпитер. Темный след падения в атмосфере планеты-гиганта случайно обнаружил астроном-любитель из Австралии Энтони Уэзли. Факт был подтвержден наблюдениями на крупных профессиональных телескопах (рис. 10.6).

Анализ состава выброшенных газов, а также цвета и динамики образовавшегося пятна позволяет предположить, что тело-импактор представляло собой небольшой каменный астероид. Ворвавшееся в атмосферу планеты тело нагрело ее нижние слои (стратосферу) на 3...4 градуса на большой площади. Согласно построенной модели за астероидом сформировался след из перегретых газов. Каменное тело взорвалось уже под облаками, при этом количество выделившейся энергии соответствовало энергии, которая выделилась бы при взрыве пяти гигатонн тротила. Огромное количество материала из нижних слоев атмосферы было выброшено вверх.

Современные средства астрономических наблюдений и мониторинга космического пространства, видимо, позволят уже в ближайшие годы обнаружить и отслеживать все существующие астероиды с размерами более 1,5 км,

как минимум из числа тех, которые сближаются с Землей. Как указано выше, на сегодняшний день небесные тела, реально угрожающие столкновением, среди подобных объектов не известны.

Метеороидная опасность. Под понятием «метеороидная опасность» формально следует понимать отличную от нуля вероятность столкновения Земли с метеороидом (твердым объектом с характерным размером 10 м и меньше). Как указано выше, подобные столкновения могут привести к локальной либо региональной катастрофе. Падения объектов с характерным размером в десятки метров представляют собой относительно редкие события и фактически анализируются в рамках проблемы астероидной опасности, поэтому сосредоточимся на относительно частых событиях, связанных с падениями небольших метеороидов (размером до 10 м). Именно вероятность таких событий будем рассматривать в рамках проблемы метеороидной опасности. Очевидно, что такие столкновения могут, в крайнем случае, привести только к локальной (не к региональной) катастрофе.

Теория физических процессов, происходящих с метеороидом, входящим в атмосферу Земли, на сегодняшний день разработана и в целом неплохо подкрепляется наблюдениями. Большой вклад в создание этой теории внесли отечественные специалисты из Института астрономии и Института динамики геосфер РАН.

Опуская математическое изложение теории, отметим следующее. Высокая скорость входа метеороида в атмосферу (не менее второй космической, или 11,2 км/с), на практике, как правило, достигающая 15...20 км/с, приводит к значительным динамическим и температурным нагрузкам со стороны набегающего воздушного потока с соответствующей скоростью. Аэродинамическое напряжение в летящем теле возрастает от 100 атмосфер при скорости 20 км/с на высоте 30 км до 1000 атмосфер на высоте 15 км. Такое давление способно разрушить практически любое тело с размерами в первые метры. В большинстве случаев это приводит к лавинообразному разрушению (фрагментации) большинства каменных метеороидов на

высотах в десятки километров над поверхностью Земли. Метеороид растрескивается, разваливается на фрагменты, которые, в свою очередь, также разрушаются на все более мелкие фракции.

Перед летящим в атмосфере телом (или облаком фрагментирующихся тел) формируется ударная волна. Атмосферный газ между передней поверхностью тела и фронтом ударной волны сильно сжимается и нагревается до температуры, превышающей 1500°C . В результате поверхность тела интенсивно плавится и испаряется. Набегающий поток воздуха уносит с внешней поверхности тела расплавленный (в виде капель) либо твердый (в виде пылинок и мелких фрагментов) материал. Этот процесс называется *абляция* (разбрызгивание). В результате в атмосфере вдоль траектории падения формируется абляционный *дымно-пылевой след*, содержащий значительную часть вещества падающего метеороида преимущественно в виде мелкодисперсной пыли, которая может оседать в течение многих часов и даже суток. Большая часть вещества сгорает в атмосфере. До поверхности Земли долетают лишь отдельные мелкие каменные фрагменты (если метеороид каменный) с размерами от миллиметров до десятков сантиметров, а также частицы дымно-пылевого следа микронных размеров. Их падение эффективно тормозится атмосферой, и большого ущерба такие фрагменты нанести не могут.

Таким образом, земная атмосфера является мощным защитным фактором, делающим столкновение с небольшими метеороидами практически безопасным. Огромная кинетическая энергия падающего метеороида тратится на световое излучение раскаленного вещества (около 9%), а также на нагрев и динамические процессы при трении о воздух. Эта энергия сопоставима с энерговыделением во время взрыва тактического ядерного боеприпаса (эквивалентная мощность порядка нескольких тысяч тонн тринитротолуола). Однако энергия выделяется не мгновенно, а в течение нескольких секунд, за которые падающий метеороид успевает пролететь десятки километров. В результате энерговыделение оказывается распределенным в пространстве и во времени, причем на высоте в десятки

километров, что снижает воздействие на земную поверхность до практически безопасных значений. Внешне процесс падения каменного метеороида размерами в первые метры выглядит как появление на небе *болида* — яркого огненного шара, быстро летящего по небу, с угловыми размерами, сопоставимыми с диском Луны (порядка $0,5^\circ$). Лучше всего болид наблюдается в ночное время, однако яркий болид может быть виден и днем. Для болида характерен яркий «хвост» — след, остающийся за огненным шаром и представляющий собой участок нагретого и поэтому светящегося ионизованного воздуха, трассирующий траекторию полета падающего метеороида. Хвост болида может светиться, плавно угасая, на протяжении нескольких секунд (первых десятков секунд). Темный дымно-пылевой след, напоминающий инверсионный след от самолета, деформируемый ветром, может наблюдаться часами.

Витимский болид. Примером хорошо исследованного падения каменного метеороида может служить так называемый Витимский болид, наблюдавшийся в ночь на 25 сентября 2002 г. на северо-востоке Иркутской области (Мамско-Чуйский и Бодайбинский районы, бассейн р. Витим). Яркий болид сопровождался акустическими эффектами и мощной воздушной волной, вызвавшей сотрясения на больших расстояниях. Болид был зарегистрирован спутником ВВС США. Яркое свечение было обнаружено на высоте около 62 км в точке с координатами $57,91^\circ$ с. ш. и $112,90^\circ$ в. д. Болид прослежен до высоты приблизительно 30 км, где его координаты были $58,21^\circ$ с. ш. и $113,46^\circ$ в. д. Реконструкция траектории падения по этим данным позволила оценить угол ее наклона к горизонту (примерно 34°). Общая длина проекции траектории от точки обнаружения до точки вероятного падения (пересечения прямой траектории с землей) составила около 90 км. Координаты этой точки — около $114,06^\circ$ в. д., $58,60^\circ$ с. ш. Согласно спутниковым данным в видимом диапазоне пик интенсивности излучения болида равнялся $2,4 \cdot 10^{11}$ Вт/стерад. Общая излученная энергия оценена в $8,6 \cdot 10^{11}$ Дж, что соответствовало температуре черного тела 6000 К и эквивалентно взрыву 200 т тротила. Согласно современной тео-

рии на излучение уходит около 9% кинетической энергии падающего метеороида, таким образом, общее энерговыделение Витимского болида оценено в 10^{13} Дж или 2,4 тыс. т тротила.

Хотя условия для наблюдений болида были крайне неблагоприятными (местное время около двух часов ночи, температура около нуля, дождь со снегом, нижняя кромка сплошной облачности вдоль трассы полета находилась на высотах 1100...1200 м, что соответствует высотам господствующих здесь горных вершин), жители районного центра Мама (около 45 км на северо-северо-запад от проекции трассы полета) отмечали яркий свет, заливший все небо и пробивавшийся сквозь облака. Освещение сравнивалось с дневным. Отдельные очевидцы говорили, что «было больно смотреть». Некоторые свидетели события в окрестностях Мамы видели летящий огненный шар с хвостом, от которого «сыпались искры» сквозь редкие просветы в облаках: большинство очевидцев указывают лишь на яркое («как днем») освещение. Световые эффекты наблюдались на большой территории с характерным размером во многие десятки километров, включая г. Бодайбо и населенные пункты к северу от него.

Спустя 2...3 мин в район Мамы пришла ударная волна. Сотрясались стены, звенела посуда. Громкий раскатистый удар сравнивался очевидцами с мощным взрывом. Сильный удар, сотрясение строений, дрожание стекол и т. п. наблюдались в радиусе не менее 30...50 км от трассы падения. Экспедиция Иркутского научного центра СО РАН и ИГУ, работавшая весной 2003 г., обнаружила в снеговых покровах мелкодисперсное космогенное вещество, видимо, выпавшее из дымно-пылевого следа болида. Крупных фрагментов найти не удалось, что не говорит о том, что их не было. Общая масса Витимского метеороида оценена в 50 т (при скорости входа в атмосферу 20 км/с), 90 т (при скорости 17 км/с) или 30 т при скорости 25 км/с. Это соответствует размерам начального тела 2...3 м. В период с 1990 по 2004 г. явления с сопоставимым энерговыделением отмечены 10 раз. Эта оценка дает возможность наглядно представить себе частоту подобных событий: по

крайней мере, раз в полтора года Земля сталкивается с метеороидами размерами порядка 2...3 м и с гораздо большим количеством более мелких небесных тел.

Сихотэ-Алиньский метеорит. Как указано выше, железные метеороиды сталкиваются с Землей гораздо реже (их меньше). В случае падения железного тела, возможно падение крупных фрагментов. Наиболее показательным является падение Сихотэ-Алиньского метеорита 12 февраля 1947 г. в Хабаровском крае (рис. 10.7), в отрогах хребта Сихотэ-Алинь вблизи г. Дальнегорска. Болид был виден в радиусе 400 км, был слышен грохот и гул, пылевой след не рассеивался два часа. На месте падения обнаружено 24 кратера с диаметрами более 9 м (самый крупный достигал 27 м в диаметре), а также множество воронок на площади в 3,5 кв. км. Найдено несколько тысяч обломков железоникелевого метеорита, разрушившегося еще в воздухе. Общая масса собранных обломков составила 27 т, самый крупный фрагмент весил 1745 кг. Предполагается, что метеороид имел массу около 70 т и размер около 2,5 м, т. е. был близок по своим параметрам к Витимскому метеороиду. Разница заключается в составе: каменное Витимское тело было разрушено в атмосфере набегающим потоком воздуха до состояния мелкодисперсной пыли и, возможно, мелких (ненайденных) фрагментов, Сихотэ-Алиньский метеороид, состоявший из железа, распался на фрагменты разных размеров, включая крупные. Несомненно, в случае падения на населенный пункт метеорит мог явиться причиной значительного ущерба, включая человеческие жертвы. Поскольку еще в начале XXI в. продолжались поиски и обнаружение многочисленных обломков метеорита, есть основания полагать, что классические оценки массы и размеров Сихотэ-Алиньского метеорита занижены.

Суданский болид. Современные средства контроля околоземного космического пространства не позволяют заблаговременно обнаруживать и определять траекторию движения метеороидов метровых размеров. До конца 2010 г. удалось лишь однажды за несколько десятков часов до столкновения с Землей обнаружить метеороид

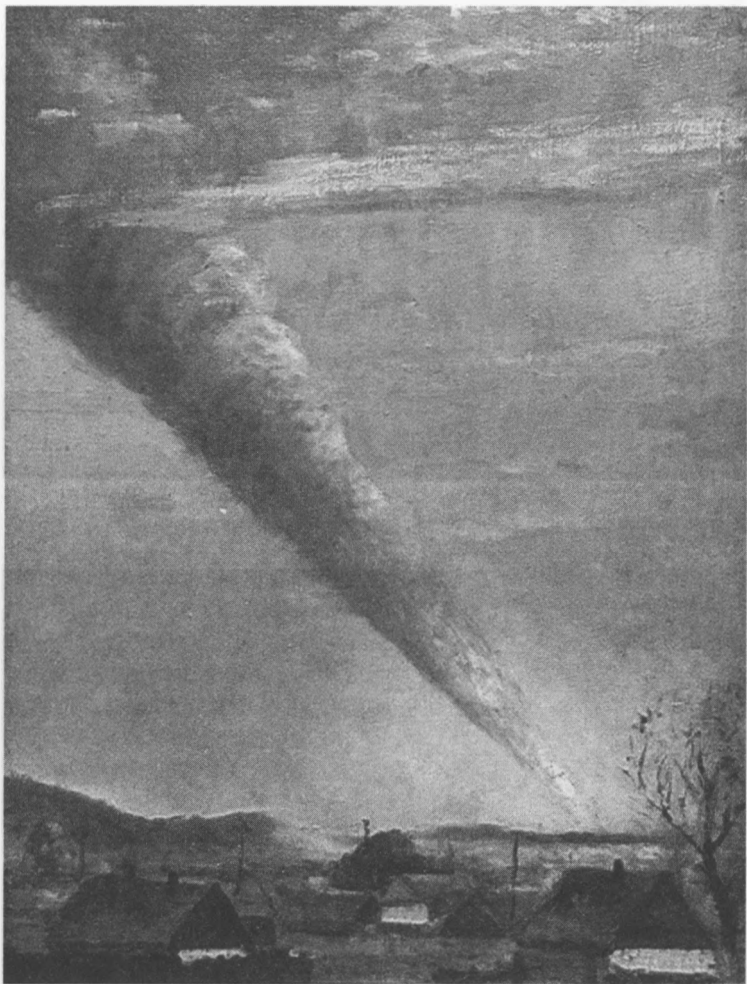


Рис. 10.7
Падение Сихотэ-Алиньского метеорита
(картина очевидца события, художника П. И. Медведева)

2008 ТСЗ размером около 3 м. Он вошел в атмосферу 7 октября 2008 г. над пустынной областью на севере Судана. Болид был зарегистрирован на высоте 65,4 км. На высоте около 37 км объект взорвался. Выделившаяся энергия (в модели абсолютно черного тела с температурой 6000°C)



Рис. 10.8

След Суданского болида (астероид 2008 TC3) в атмосфере (NASA)

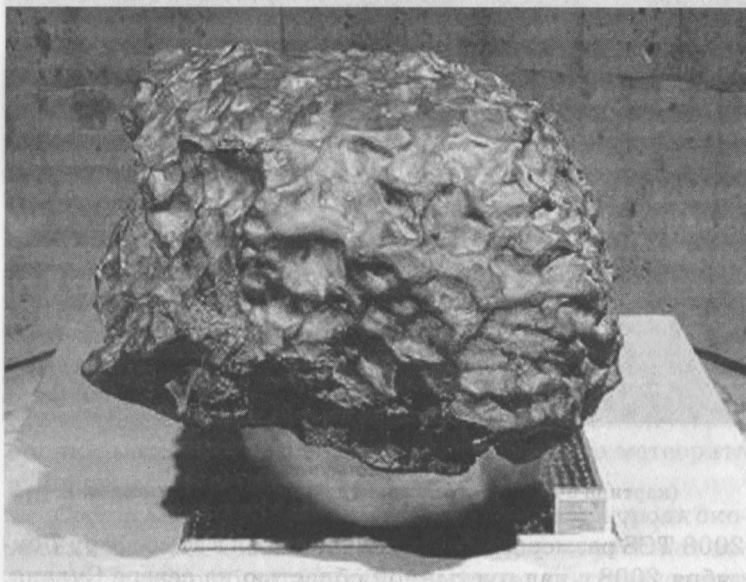


Рис. 10.9

Железный метеорит Стерлитамак:

поверхность метеорита покрыта вдавливами — регмалиптами, образующимися под влиянием давления набегающего потока воздуха во время падения.

оценена в $4 \cdot 10^{11}$ Дж, что эквивалентно взрыву около 100 т тротила (рис. 10.8). Спустя месяц в пустыне были найдены сотни осколков метеорита общей массой около 5 кг.

Таким образом, подавляющее большинство метеороидов метровых размеров, с которыми Земля сталкивается регулярно (практически ежегодно), разрушаются при прохождении атмосферных слоев. Тем не менее нередки случаи, когда крупные фрагменты достигают поверхности, образуя воронки и кратеры. Например, вблизи хутора Царев в 1922 г. упал крупный каменный метеорит, обнаруженный только спустя полвека. В 1990 г. упал метеорит Стерлитамак весом 315 кг, названный, как принято, именем ближайшего к месту падения населенного пункта (рис. 10.9).

В 1998 г. большой каменный метеорит упал среди дня в Туркменистане, прямо на хлопковом поле, где велись работы. Случаев падений метеоритов меньших размеров в XX в. насчитывается несколько десятков. Очевидно, что в подавляющем большинстве упавшие метеориты остаются найденными, падая в акватории Мирового океана либо в малонаселенных местах, занимающих большую часть поверхности Земли. Тем не менее по мере развития технологии цивилизации ее повреждения вследствие метеороидной опасности становятся все более вероятными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите возможные последствия падения на Землю крупного астероида.
2. Назовите примеры крупных астроблем на Земле. Почему их существенно меньше, чем на соседнем небесном теле — Луне?
3. Изложите типичный сценарий столкновения метеороида с размерами порядка 3...5 м с Землей.
4. Оцените степень опасности последствий для земной цивилизации столкновений с Землей железных метеороидов с размерами порядка 10 м на примере Сихотэ-Алиньского метеорита (считается, что такие столкновения происходят в среднем один раз в 100 лет).



ПЛАНЕТА ЮПИТЕР

Планета Юпитер является самой крупной планетой Солнечной системы (рис. 11.1). В числе классических планет, если считать от Солнца, она является пятой планетой. От ближайшей из планет земной группы — Марса — Юпитер отделен Главным поясом астероидов.

Движение и вращение. Юпитер движется вокруг Солнца по почти круговой орбите (эксцентриситет орбиты равен 0,048, что вдвое меньше, чем у Марса) в том же направлении, что и все остальные планеты Солнечной системы, — против часовой стрелки, если смотреть от северного полюса мира (вблизи Полярной звезды). Среднее расстояние от Солнца составляет 5,203 а. е. (778 млн км). Полный оборот вокруг Солнца планета совершает за 11,86 земных лет (иногда говорят о 12-летнем периоде, что является слишком грубым приближением). Плоскость орбиты Юпитера практически совпадает с плоскостью орбиты Земли (плоскостью эклиптики) — упомянутые плоскости наклонены друг к другу на $1,3^\circ$.

Характеристики вращения Юпитера вокруг своей оси выявлены достаточно давно, поскольку из-за больших размеров планеты уже в телескопы XVII–XVIII вв. (а в наше время даже в небольшие любительские телескопы) можно разглядеть отдельные детали на диске планеты. Анализируя перемещение некоторых деталей, удалось установить важные свойства вращения Юпитера.

Во-первых, Юпитер вращается *дифференциально*. Это означает, что точка на экваторе вращается быстрее, чем

точка на средних широтах или вблизи полюса. Очевидно, что твердое тело так вращаться не может, и уже давно стало ясно, что мы наблюдаем вращение верхнего (непрозрачного) слоя облаков, причем для каждой широты угловая скорость вращения своя, уменьшающаяся от экватора к полюсам.

Во-вторых, оказалось, что период вращения Юпитера очень короткий, несмотря на большой размер планеты. Точка на экваторе совершает полный оборот за $T_1 = 9 \text{ ч } 50 \text{ мин } 30 \text{ с}$, точка на высоких широтах — за $T_2 = 9 \text{ ч } 55 \text{ мин } 40 \text{ с}$. В связи с этим для определения координат точек на видимой поверхности (верхней кромке облаков) Юпитера применяются две системы долгот с периодом вращения T_1 для экваториальной области и периодом вращения T_2 для средних и высоких широт.

С учетом огромного экваториального радиуса планеты (71 392 км), благодаря стремительному вращению, точка на экваторе Юпитера имеет линейную скорость около 45 тыс. км/ч, т. е. около 12,5 км/с (!). Можно напомнить,



Рис. 11.1

Юпитер (космический аппарат «Кассини», НАСА)

что это значение превышает вторую космическую скорость для Земли (11,2 км/с).

Ось вращения Юпитера практически перпендикулярна плоскости его орбиты (87°), в результате чего здесь отсутствует смена времен года, а продолжительность дня всегда равна продолжительности ночи для любой широты.

Сильные центробежные силы, связанные с высокой угловой скоростью вращения Юпитера, приводят к тому, что форма планеты отличается от сферической. Это можно заметить даже при наблюдениях в бинокль: экваториальный диаметр на 7% больше полярного.

Исследования Юпитера с помощью межпланетных зондов. Огромное удаление планеты от Земли существенно затрудняет возможности исследования Юпитера с помощью наземных телескопов. Большой объем информации получен с помощью космических аппаратов, отправленных в сторону планеты.

В 1972 и 1973 гг. к Юпитеру были направлены первые в истории межпланетные автоматические станции (АМС) «Пионер-10» и «Пионер-11» (США), вторая впоследствии переименована в «Пионер-Сатурн». Спустя два года полета оба аппарата прошли вблизи Юпитера (соответственно в 130 тыс. км и 43 тыс. км от планеты), выполнив цикл исследований с относительно близкого расстояния.

В 1977 г. к Юпитеру отправились две АМС нового поколения — «Вояджер-1» и «Вояджер-2» (США). В 1979 г. аппараты также прошли мимо Юпитера, осуществив серию важных научных измерений вблизи планеты.

В 1995 г. АМС «Галилео» (США) с большим набором научной аппаратуры впервые в истории вышла на орбиту искусственного спутника Юпитера. За 5 месяцев до этого от АМС был отделен спускаемый аппарат, который достиг планеты и со скоростью 60 км/с вошел в ее атмосферу, после чего начал парашютный спуск. Вплоть до глубины 156 км он передавал данные о химическом составе и физических условиях за бортом. Искусственный спутник Юпитера — основная станция «Галилео» — работала на протяжении 8 лет возле планеты, а в 2003 г. была сведена с орбиты и направлена прямо в Юпитер.

В конце 2000 г. вблизи Юпитера прошла АМС «Кассини», двигавшаяся к Сатурну, которая выполнила ряд экспериментов в окрестностях Юпитера.

Съемки Юпитера также были выполнены с АМС «Новые горизонты», запущенной к Плутону в январе 2006 г.

Подавляющее большинство данных о Юпитере и его спутниках были получены с помощью космических аппаратов, в первую очередь АМС «Вояджер» и «Галилео». В настоящее время в НАСА (США) и Европейском космическом агентстве (ЕКА) готовятся проекты новых запусков космических зондов в сторону Юпитера. В их числе — американский аппарат «Юнона», который должен в 2016 г. начать исследования Юпитера и его спутников с вытянутой полярной орбиты.

В следующих проектах, намеченных на 2020-е гг., будет принимать участие Российское космическое агентство.

Внутреннее строение. Юпитер — самая большая планета Солнечной системы. Ее размеры колоссальны. Экваториальный диаметр составляет 142784 км, полярный несколько меньше — 139788 км. Размеры взяты на уровне, где атмосферное давление равняется 1 бар, что близко к уровню, где газ становится непрозрачным (верхняя кромка облаков). Общий объем близок к 1300 объемам Земли, в то время как масса Юпитера составляет $1,9 \cdot 10^{27}$ кг (1/1050 массы Солнца, или 318 масс Земли). Различие в соотношениях объемов и масс Юпитера и Земли указывает на существенные различия в средней плотности и, следовательно, во внутреннем строении названных планет. И действительно, средняя плотность Юпитера составляет $1,33 \text{ г/см}^3$, тогда как средняя плотность Земли — $5,52 \text{ г/см}^3$.

Современная модель внутреннего строения Юпитера такова: основные составляющие планеты — водород и гелий в соотношении 89 и 11% по объему, или 80 и 20% по массе.

Атмосфера, состоящая на 75% из водорода и на 24% из гелия, имеет толщину около 1500 км. Средняя эффективная температура планеты составляет около 134 К, или -139°C . Именно такова температура на уровне вблизи

верхней кромки непрозрачных облаков. Помимо водорода и гелия, при такой температуре в газообразном состоянии находятся синильная кислота (HCN), GeH_4 (эти соединения являются сильными ядами), метан (CH_4), этан (C_2H_6), ацетилен (C_2H_2), а также взвешенные кристаллики воды (H_2O), аммиака (NH_3) и гидросульфида аммония (NH_4SH).

Все указанные соединения присутствуют в атмосфере Юпитера (обнаружены дистанционно спектральными методами, наличие некоторых подтверждено прямыми измерениями с борта спускаемого аппарата «Галилео»), но их суммарная концентрация не превышает 1%.

Структура слоев Юпитера оценивается по-разному для различных расчетных моделей. Качественно эти модели сходны, однако есть разночтения по поводу глубины границ отдельных слоев.

Плотность, давление и температура атмосферного газа быстро растут с глубиной. Согласно современным моделям начиная с глубины около 1500 км давление становится таким высоким, что водород начинает постепенно переходить в жидкое состояние. Толщина слоя газожидкого водорода оценивается примерно в 7000 км, причем температура, давление и плотность продолжают нарастать по мере погружения в недра Юпитера, при этом постепенно увеличивается доля жидкости и уменьшается доля газа. И водород, и гелий находятся здесь в так называемом *сверхкритическом состоянии*, когда свойства газа и жидкости оказываются одинаковыми.

Начиная с глубины 7000 км, где давление достигает значения 700000 бар, а температура — 6500 К (что несколько превышает температуру на поверхности Солнца или в центре Земли), водород переходит в жидкомолекулярное состояние. Толщина слоя жидкого молекулярного водорода составляет 8000 км. Ниже (согласно разным моделям, начиная с глубин 17000...25000 км) начинается слой *вырожденного* водорода. Смысл этого понятия состоит в следующем. При огромных температурах и давлениях электроны в атомах водорода отрываются от ядер (протонов), теряя индивидуальную принадлежность к конкрет-

ным атомам. Подобная ситуация наблюдается в металлах, где электроны свободно движутся во всем объеме образца. Поэтому водород в таком состоянии называют *металлическим*.

В центре Юпитера, вероятно (достоверно не известно), существует твердое металлосиликатное ядро. Согласно некоторым моделям ядро может быть окружено гидридной оболочкой из раскаленных воды, метана и аммиака в газожидком состоянии под огромным давлением около 38 млн бар, при этом диаметр ядра с оболочкой составляет 25000 км (вдвое больше Земли). Температура в центре ядра планеты оценивается в 23000...30000 К, давление — 50 млн бар, плотность вещества — около 11 г/см³.

Еще раз отметим, что внутреннее строение Юпитера описано в рамках расчетных моделей, где, несмотря на различия, основные качественные элементы сходны. Таким образом, можно рассматривать Юпитер как твердое металлосиликатное ядро, окруженное протяженной *флюидной* (газожидкой и газообразной) водородно-гелиевой оболочкой, верхнюю (газообразную) часть которой условно можно назвать атмосферой планеты. Юпитер не имеет твердой поверхности: нарастание свойств от газа к жидкости и от жидкости к твердому состоянию происходит постепенно на протяжении гигантского радиуса планеты, превышающего 70000 км.

Тепловой баланс. В лекции 5 настоящего пособия, посвященной Венере, введено понятие *сферического альбеда* планеты. Напомним суть этого термина. На планету падает поток солнечной энергии Φ_0 . Часть этого потока (Φ) отражается от облаков планеты обратно в космическое пространство. Отношение отраженного и падающего потоков называется сферическим альбедо планеты $A_{сф}$:

$$A_{сф} = \frac{\Phi}{\Phi_0}. \quad (11.1)$$

Сферическое альбедо Юпитера составляет 0,50. Это означает, что половина падающего на планету солнечного излучения отражается от внешней поверхности облаков планеты обратно в космос. Остающаяся часть падающего

потока солнечного излучения поглощается планетой и нагревает ее. Эта величина составляет

$$\Phi_0 - \Phi = \Phi_0 - A_{\text{сф}}\Phi_0 = (1 - A_{\text{сф}})\Phi_0.$$

Поскольку любое нагретое тело излучает электромагнитные волны, то нагретый поглощенным солнечным излучением Юпитер также излучает сам, причем в инфракрасном (тепловом) диапазоне. В лекции 5 было указано, что уходящее тепловое излучение планеты характеризуется так называемой *эффективной температурой* T_e , которая в случае Юпитера близка к 130 К. Сферическое альbedo и эффективная температура связаны между собой уравнением теплового баланса:

$$4\sigma T_e^4 = (1 - A_{\text{сф}})\Phi_0 + 4\varepsilon, \quad (11.2)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2/\text{К}^4$ — постоянная Стефана–Больцмана. Левая часть уравнения описывает уходящее от планеты тепловое излучение согласно *закону Стефана–Больцмана*: энергия, излучаемая в единицу времени с единицы поверхности, пропорциональна четвертой степени температуры. Правая часть уравнения относится к поглощенному планетой излучению. Добавка ε учитывает поток внутреннего тепла из недр планеты, приходящийся на единицу ее площади. У планет земной группы этот поток пренебрежимо мал по сравнению с потоком приходящей от Солнца энергии. В случае Юпитера ситуация выглядит иначе. Если подставить значения эффективной температуры (130 К) и сферического альbedo (0,50) в формулу (11.2), то для выполнения равенства левой и правой частей уравнения надо принять величину

$$\varepsilon \sim \frac{1}{4}(1 - A_{\text{сф}})\Phi_0. \quad (11.3)$$

Другими словами, оказывается, что поток внутреннего тепла, поступающего из глубин планеты, примерно равен потоку, приходящему от Солнца. Уточненные оценки давали даже большие величины: оказалось, что Юпитер излучает примерно вдвое больше, чем получает от Солнца. Причина феномена мощного потока тепла из недр пла-

неты ($4 \cdot 10^{17}$ Вт) окончательно не известна. Тем не менее есть ряд в разной степени обоснованных гипотез.

Большой поток тепла из недр характерен для звезд. Расчеты показывают, что для осуществления протекающих на звездах термоядерных реакций превращения водорода в гелий и сопутствующего выделения тепла в ядре Юпитера недостаточно высоки значения давления и температуры. Согласно существующей теории масса Юпитера в 13 раз меньше предела, при котором условия в ядре планеты могли бы привести к запуску термоядерных реакций, в результате которых Юпитер превратился бы в небольшую звезду. Поэтому гипотеза, связывающая поток тепла из недр этой планеты с возможным протеканием термоядерных реакций в ее ядре, выглядит неубедительной.

Основная версия (парадигма), принятая на сегодняшний день большинством исследователей, сводится к тому, что Юпитер продолжает расходовать тепловую энергию, накопленную в прошлом во время гравитационного сжатия планеты. Судя по всему, в ходе формирования планеты из протопланетного облака, включавшего в себя и легкие, и тяжелые компоненты, гравитационная энергия пыли и газа переходила в кинетическую, а затем — в тепловую энергию, которую Юпитер постепенно растрчивает (излучает) до сих пор.

Еще один возможный механизм, претендующий на объяснения теплового излучения планеты — *планетохимическая дифференциация*. Речь идет о погружении к центру планеты тяжелых веществ и всплывании легких. При этом должна выделяться энергия, которая способна объяснить наблюдаемый поток тепла из недр. Однако эта версия должна рассматриваться вместе с оценками характерного времени, которое требуется для окончания этого процесса. Не исключено, что дифференциация Юпитера давно завершилась, но тепловая энергия, полученная его недрами, еще не растрчена.

Можно указать еще один возможный источник собственной энергии Юпитера. Он связан с привнесением дополнительной энергии метеоритным веществом. В окрестностях Юпитера плотность потока метеорных тел примерно

в 170 раз больше, чем вблизи Земли. При этом суммарная площадь поверхности Юпитера в 118 раз превышает площадь поверхности Земли, а сфера гравитационного притяжения, воздействующая на метеорные тела, также существенно превышает таковую для Земли. В результате планета-гигант получает дополнительное тепло за счет кинетической энергии падающего вещества, обильно приходящего из космоса.

Не следует забывать о возможности присутствия в ядре Юпитера некоторого количества радиоактивных веществ, выделяющих тепло. Достоверных данных о вкладе этого фактора нет.

Кроме того, Юпитер, благодаря своему положению в Солнечной системе и указанным выше факторам, гораздо чаще, чем Земля, испытывает столкновения с крупными телами. Так, летом 1994 г. 22 ледяных фрагмента ядра кометы Шумейкеров–Леви-9 (каждый фрагмент имел габариты в пределах от одного до двух километров) упали на Юпитер. Заметим, что подобное столкновение с Землей привело бы к уничтожению большей части биосферы и всей земной цивилизации.

Летом 2009 г. в атмосфере Юпитера наблюдалось расплывающееся темное пятно, чрезвычайно походившее на аналогичные пятна, возникавшие 15 лет назад после падения фрагментов ядра кометы Шумейкеров–Леви-9. Судя по всему, на Юпитер снова упало крупное космическое тело. Подобные бомбардировки, если они происходят столь часто, могут вносить дополнительный вклад в тепловой баланс Юпитера.

Магнитное поле. Океан из металлического водорода в недрах планеты представляет собой электропроводящую среду и занимает гигантский объем (сферу с радиусом в 0,77 радиуса Юпитера). Быстрое вращение Юпитера в сочетании с присутствием большой массы раскаленного электропроводящего вещества приводит к генерации сильного магнитного поля. На уровне облаков его напряженность составляет около 4...5 Гс, а в районах магнитных полюсов Юпитера — 11...14 Гс (на Земле — 0,5 Гс). Ось магнитного поля наклонена на 11° к оси вращения планеты (прак-

тически как у Земли), но расположение магнитных полярностей обратное. Общая конфигурация магнитного поля Юпитера значительно сложнее земной: здесь наблюдаются, помимо дипольного, квадрупольное (4 магнитных полюса) и октупольное (8 магнитных полюсов) поля. Общий объем окружающей Юпитер магнитной оболочки (магнитосферы) в тысячи раз превышает земную. Измерения АМС показали, что шлейф магнитосферы Юпитера заметен даже за орбитой Сатурна, который находится вдвое дальше от Солнца, чем Юпитер.

Заряженные частицы высоких энергий (электроны и протоны, движущиеся с большими скоростями), приходящие в окрестности Юпитера от Солнца и других звезд, захватываются магнитным полем Юпитера и формируют в его окрестностях радиационные пояса. По конфигурации они напоминают земные, но значительно превышают их по размерам. АМС «Пионер-10» в декабре 1973 г. прошла через радиационный пояс Юпитера, зафиксировав дозу в $5 \cdot 10^8$ рад, что превышает смертельный уровень практически для всех высших форм земной жизни.

Магнитосфера Юпитера является мощным источником радиоизлучения. Его происхождение связано с потерями кинетической энергии электронов в магнитном поле, которая переходит в форму электромагнитного излучения в радиодиапазоне (так называемого *магнитотормозного* излучения).

Кроме того, магнитосфера Юпитера работает как гигантский природный ускоритель заряженных частиц. Часть потока электронов, которая регистрируется вблизи Земли, имеет 10-часовую периодичность, связанную с периодом вращения Юпитера вокруг своей оси. Это значит, что указанная часть потока космических частиц формируется в магнитосфере Юпитера.

Атмосфера. Верхние слои атмосферы Юпитера — единственные слои, которые могут регулярно и непосредственно наблюдаться с помощью наземных и околоземных телескопов. Благодаря огромным размерам планеты, некоторые детали облачного покрова Юпитера могут быть обнаружены даже в небольшие телескопы.

Наблюдения с помощью телескопов, а также с борта космических аппаратов с близкого расстояния демонстрируют «полосатую» структуру облачного слоя Юпитера. Наблюдаются темные красноватые *полосы*, или *пояса*, вытянутые параллельно экватору. Светлые промежутки между ними называются *зоны*. Пояса и зоны простираются к северу и югу от экватора вплоть до параллелей 40° северной и южной широты. Плотные облака в полосах и зонах содержат детали коричневых, красных и голубоватых оттенков.

Скорость вращения деталей вокруг оси Юпитера для разных широт различна (проявление эффекта *дифференциального вращения*). Экваториальная зона шириной 15000...25000 км вращается со средним периодом 9 ч 50 мин 30 с, две высокоширотные зоны в северном и южном полушариях — со средним периодом 9 ч 55 мин 41 с. Отдельные полосы и зоны имеют свои скорости вращения, разница в скоростях вращения для двух деталей, находящихся в соседних зонах, может достигать 300 км/ч. Установлено, что скорость вращения газообразной оболочки Юпитера увеличивается с глубиной.

Пояса и зоны представляют собой области нисходящих и восходящих потоков газа в атмосфере, причем видимая поверхность зон примерно на 20 км выше видимой поверхности поясов. Пояса и зоны носят свои названия в зависимости от их широты. Так, выделяются *экваториальные*, *северные* и *южные тропические*, *умеренные* и *полярные* пояса и зоны. Полосатая структура видимой поверхности облачного слоя Юпитера связана с зональным направлением ветров в атмосфере.

Полярные области всех планет, чьи оси вращения почти перпендикулярны плоскости орбиты, получают меньше тепла от Солнца, чем экваториальные области, за счет чего возникает разность температур. Более нагретые атмосферные массы в области экватора поднимаются вверх, смещаются в стороны полюсов и замещаются более холодными массами, которые приходят с высоких широт (меридиональный перенос). Этот механизм работает в различных вариантах на Земле и на Венере. Однако в случае

Юпитера не обнаружено существенных различий температуры между экваториальными и полярными областями. Это означает, что внутренняя энергия планеты играет более важную роль в динамике атмосферы, чем приходящий поток солнечной энергии.

Эти факторы — мощный поток тепла из недр планеты и высокая скорость вращения — во многом определяют специфичную динамику атмосферы Юпитера.

Благодаря большой скорости вращения возникают мощные *кориолисовы силы*, которые отклоняют в зональном направлении потоки газа, практически уничтожая меридиональные течения. Направление потоков становится параллельным экватору.

Поднимающиеся из недр планеты нагретые массы газа под действием сил Кориолиса вытягиваются в зональном (вдоль параллелей) направлении. При этом противоположные края зон движутся навстречу друг другу, а также вдоль параллелей. Севернее экватора потоки газа, направленные к северу, отклоняются кориолисовой силой к востоку, направленные к югу — отклоняются к западу. В южном полушарии отклонения обратные. Такая структура движения аналогична земным пассатам, где также действуют кориолисовы силы, но гораздо меньшие по сравнению с Юпитером из-за меньшей скорости вращения нашей планеты.

Конвективные движения наиболее сильны на границах между гидродинамическими потоками, имеющими разную скорость. На границах поясов и зон проявляется сильная *турбулентность* — здесь возникают вихри в виде округлых пятен. Характерные скорости в этих областях огромны — порядка 100 м/с, вблизи экватора даже 150 м/с.

Таким образом, под воздействием кориолисовых сил на Юпитере сформировалась и существует устойчивая зональная структура потоков газа в атмосфере. Конвективный подъем газа осуществляется в *зонах*, здесь наблюдается повышенное давление. Светлая окраска зон объясняется повышенным содержанием ярко-белых кристаллов аммиака, выносимых вверх из недр Юпитера в колоннах восходящего газа.

Остывший газ опускается в *поясах*. Пояса выглядят темнее, поскольку здесь наблюдаются обедненные светлым аммиаком нисходящие потоки. В поясах видны ярко окрашенные детали облаков коричневых и красноватых тонов. Эти цвета связаны с присутствием кристаллов гидросульфида аммония (NH_4SH) и фосфина PH_3 (токсичный газ с запахом тухлой рыбы). При температуре выше 290 К (+23°C) фосфин распадается, образуя аллотропическую модификацию фосфора — красный фосфор. Такая температура достигается уже на уровне около 60 км ниже верхней кромки облаков. При низких температурах фосфор (на больших высотах) снова соединяется с водородом.

При наблюдениях с близкого расстояния видно, что зоны и пояса расчленяются на отдельные пятна различных форм и размеров. По-видимому, мы наблюдаем только самые верхние проявления мощных динамических процессов в толще атмосферы, скрытых от нас непрозрачными плотными облаками. Тем не менее в облаках периодически наблюдаются вихри с характерным размером в тысячи километров. Такие ураганы могут существовать от суток (самые маленькие) до сотен и даже тысяч лет.

Наиболее эффектным образованием такого рода является гигантский вихрь под названием *Большое красное пятно* (БКП) — мощный *антициклон* в южной тропической зоне Юпитера. БКП выглядит как овальное образование изменяющихся размеров и яркости. В настоящее время габариты БКП составляют 15000×30000 км (на нем могли бы расположиться два земных шара). Впервые БКП было описано в 1878 г. Анализ зарисовок диска Юпитера, сделанных в прошлом, показывает, что БКП существовало уже по крайней мере 300 лет назад, причем 100 лет назад его размеры были вдвое больше. Съемки с космических аппаратов показали, что БКП поворачивается, совершая полный оборот вокруг своего центра примерно за 6 земных суток. Наблюдения в инфракрасном диапазоне с помощью крупнейшего комплекса телескопов VLT Европейской южной обсерватории в Чили показали, что красно-оранжевая «сердцевина» БКП на 3...4 градуса теплее окружающей области при средней температуре БКП –160°C.



Рис. 11.2

Большое красное пятно — гигантский антициклон в атмосфере Юпитера размерами в два земных шара (фото НАСА)

Согласно современным представлениям БКП — это свободно мигрирующий в атмосфере вихрь типа антициклона. В центре вихря газ поднимается, на краях — опускается в глубины Юпитера. Происхождение и долгое существование БКП остается необъясненным (рис. 11.2).

В окрестностях БКП на снимках с АМС «Галилео» обнаружены светлые образования, по ряду свойств напоминающие земные кучевые облака, что может являться свидетельством присутствия в атмосфере Юпитера водяных паров.

Прямые исследования атмосферы. Верхняя часть атмосферы подверглась прямому зондированию с помощью спускаемого аппарата автоматической межпланетной станции «Галилео» (США) в декабре 1995 г. Аппарат в течение 58 мин передавал данные, опускаясь на парашюте вплоть до глубины 156 км от верхней кромки облаков, используя основную станцию «Галилео», оставшуюся на околоюпитерианской орбите, как ретранслятор. Когда

температура газа за бортом достигла $+147^{\circ}\text{C}$, а давление 24 бар, водородно-гелиевая газовая смесь проникла внутрь аппарата и радиосвязь с ним прекратилась.

Состав газовой смеси в атмосфере оказался следующим. Водород и гелий составляли соответственно 75 и 24% по массе. Эти данные отличаются от модельных представлений (80:20) о соотношении концентраций водорода и гелия на Юпитере в целом (включая его глубинные слои). На долю остальных элементов приходится 1%, причем содержание углерода и серы оказалось в 2...3 раза больше, чем на Солнце. Количество органических молекул оказалось ничтожно малым. Атмосфера оказалась очень сухой (практически без присутствия водяного пара).

Зональная скорость ветра в направлении с востока на запад была очень большой на всем протяжении спуска — 640 км/ч, или 180 м/с.

На борту спускаемого аппарата был установлен прибор для регистрации молний в атмосфере Юпитера. Вспышки обнаружены не были, но радиоизлучение удаленных молний принималось постоянно. Сделан вывод о том, что мощность молний в 10 раз превышает таковую для Земли, но на единицу площади их оказывается в 10 раз меньше. Отметим, что ранее вспышки молний на ночной стороне Юпитера наблюдались с борта АМС серии «Вояджер». В 2010 г. вспышки молний на Юпитере наблюдались несколькими наземными телескопами. О грозовых разрядах свидетельствуют и особенности радиоизлучения Юпитера, регистрируемого наземными радиотелескопами. Съемки с космических аппаратов продемонстрировали и мощные полярные сияния на Юпитере.

Спутники. Первые 4 спутника Юпитера были независимо открыты во время первых телескопических наблюдений в начале XVII в. Галилео Галилеем и Симоном Мариусом. Галилей первым оповестил мир об открытии спутников, Мариус первым составил таблицы их движения. По предложению Галилея, эти четыре спутника были первоначально названы Медичейскими звездами в честь своего покровителя великого герцога Тосканского Козимо Медичи. По предложению Мариуса четыре спутника, ко-

которые теперь принято называть галилеевыми спутниками Юпитера, получили собственные названия — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. Имена связаны с верховным греческим богом — громовержцем Зевсом (римский аналог — Юпитер). Согласно мифологии Ио, Европа и нимфа Каллисто были возлюбленными Зевса, а прекрасный царевич Ганимед был его виночерпием. Термин «сателлиты планет» был введен Иоганном Кеплером в 1618 г. Этот термин переведен на русский язык в начале XVIII в. соратником Петра I Яковом Брюсом, который предложил слово «сопутник». Позже была принята привычная форма «спутник».

На сегодняшний день известны 63 спутника, обращающихся вокруг Юпитера. Принято делить их на две группы — внутреннюю (регулярную) и внешнюю (иррегулярную). Внутренняя группа спутников включает в себя 8 объектов, внешняя — 55 объектов.

Орбиты внутренней группы почти круговые, их плоскости практически совпадают с плоскостью экватора Юпитера. Четыре небольших ближайших к Юпитеру спутников внутренней группы (Метида, Адрастея, Амальтея и Теба) имеют размеры от 40 до 270 км и находятся очень близко к планете — от 1 до 2 радиусов над поверхностью Юпитера. Все эти спутники обладают синхронным вращением (всегда повернуты к Юпитеру одной и той же стороной) и совершают полный оборот вокруг планеты меньше чем за сутки (например, Метида — всего за 7 ч). Форма этих небесных тел отличается от правильной.

Дальше находятся еще 4 спутника внутренней группы на расстояниях от 5 до 25 радиусов Юпитера над его поверхностью. Это и есть галилеевы спутники — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. Они являются достаточно крупными небесными телами (размеры сопоставимы с габаритами Луны и Меркурия), имеют сферическую форму. Рассмотрим их более детально.

Ио. Диаметр спутника 3640 км (несколько больше Луны — 3474 км), средняя плотность — $3,55 \text{ г/см}^3$, масса — $8,92 \cdot 10^{22} \text{ кг}$ (на 20% больше массы Луны). Ио совершает один оборот вокруг Юпитера за 1,77 земных суток, для

спутника характерно синхронное вращение: Ио всегда повернута в Юпитеру одним и тем же полушарием. Большая полуось орбиты Ио составляет 422 тыс. км. С учетом огромного радиуса Юпитера Ио движется над верхней кромкой облаков планеты на высоте примерно 350 тыс. км, что несколько меньше расстояния от Земли до Луны (384 тыс. км).

Рельеф Ио в основном равнинный, но имеются отдельные высокие вершины. Например, у южного полюса спутника находится гора Хемус высотой 10 км и с основанием 150×80 км. Поверхность спутника имеет желто-оранжевый цвет, что объясняется большим количеством сернистых соединений в грунте. Предполагается, что толщина отложений серы, сернистого газа (в виде инея) и других материалов может достигать 20 км. Эти особенности связаны с мощной вулканической деятельностью Ио. Здесь обнаружено несколько сотен вулканов разных размеров, в том числе интенсивно извергающихся. По поверхности спутника растекаются потоки лавы, кроме того, мощные выбросы вулканических газов достигают высот 300...500 км. АМС «Галилео», находящаяся на орбите искусственного спутника Юпитера, прошла сквозь газовый султан вулкана Тор. В составе выброса были обнаружены микроскопические хлопья, состоящие из 15...20 молекул оксида серы SO_2 . Этот материал выбрасывается в открытый космос (атмосферы у Ио в земном понимании нет) со скоростью около 1 км/с. Крупнейшим из вулканов Ио является Пеле, названный в честь гавайской богини вулканов. Вулканические выбросы Пеле покрывают гигантскую территорию площадью более 1 млн кв. км. В центре комплекса Пеле расположены горные массивы. Несмотря на то что на поверхности удаленной от Солнца и лишенной атмосферы Ио типичная температура $-130^\circ\text{C} \dots -140^\circ\text{C}$, обнаружены горячие области с температурами около 0°C , $+100^\circ\text{C}$ и даже более $+300^\circ\text{C}$. Всего таких областей более 10, они занимают около 2% поверхности спутника.

Вулканы Ио можно разделить на несколько типов. Первая группа вулканов отличается температурой $+80 \dots +130^\circ\text{C}$ и скоростью выброса газовых продуктов около 500 м/с.

Высота выбросов достигает 100 км (выпадающий материал — белесого цвета). Таких на Ио большинство.

Вторая группа вулканов отличается очень высокой температурой *кальдеры* (котлообразные впадины с плоским дном, иногда заполненные жидкой лавой), высокой скоростью выброса (1 км/с) и высотой султанов до 300 км и более. Так, обнаружены лавовые озера с температурой более 1000°C). Их типичная особенность — темная кольцевая «окантовка» в нескольких сотнях километров от кальдер. Сюда относятся вулканы Пеле, Сурт и Атен. Общее количество вулканических кальдер — несколько десятков, большинство из них — с застывшей лавой.

Один из наиболее интересных объектов на Ио — так называемая патера Локи (названная в честь скандинавского бога огня). Как указано в лекции 8, посвященной Марсу, патерами называются вулканические конусы с очень пологими склонами, разрушенными стенами кальдер и радиальными каналами лавовых потоков на склонах. Скорее всего, патеры сложены пористыми зольными отложениями из изверженных пород, обработанных последующей эрозией. Патера Локи представляет собой круглое темное озеро из жидкой серы диаметром около 250 км. В центре находится некий светлый объект, который интерпретируется как плавающий «айсберг» из твердой серы. В 300 км к северу виден разлом длиной около 200 км с таким же темным дном, имеющий такой же «айсберг». С обеих сторон разлома в небо бьют на высоту до 250 км два белых газовых султана. Один вулкан Локи превышает по мощности все вместе взятые вулканы на Земле.

Внимание исследователей привлекает вулкан Прометей, который извергается непрерывно уже по крайней мере 20 лет (см. рис. 11.3). Активный лавовый поток протяженностью в 500 км изливается из жерла вулкана, названного по имени Амирани — грузинского аналога титана Прометея, подарившего людям огонь.

Активный вулканизм Ио стремительно меняет ландшафты спутника. За время, прошедшее между съемками спутника с аппаратов «Вояджер» и аппарата «Галилео», карта Ио разительно изменилась: появились новые

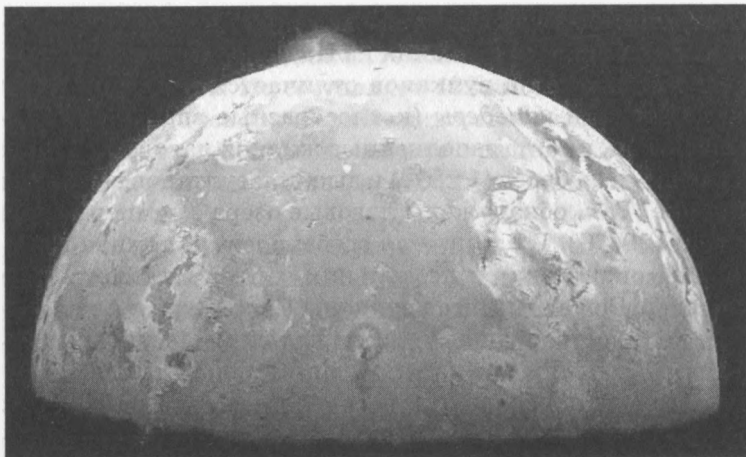


Рис. 11.3

Спутник Юпитера Ио (космический аппарат «Галилео», НАСА):
в верхней части снимка виден выброс вещества над вулканом Прометей.

вулканические объекты, изменилась форма лавовых потоков. На Ио не обнаружены метеоритные кратеры, что позволяет сделать выводы, что поверхность спутника очень молода — самым старым объектам не более 1 млн лет. Для названий объектов на поверхности Ио применяются земные географические названия, а также названия из мифов об огне, жаре и свете.

Причины мощной вулканической активности Ио состоят в следующем. Разогрев недр спутника вызывается мощными приливными воздействиями со стороны гигантской массы близко находящегося Юпитера, соседнего спутника — Европы, и отчасти Ганимеда. Рассмотрим это воздействие подробнее.

Во-первых, Ио, как указано выше, всегда повернута одной и той же стороной к Юпитеру. С этой и с противоположной стороны на спутнике сформировались приливные выступы высотой в несколько километров, вытянувшие фигуру спутника вдоль линии, направленной к центру Юпитера. Орбита Ио немного отличается от окружности. Движение по слабо вытянутому эллипсу приводит, по второму закону Кеплера, к ускорению и замедлению движе-

ния на разных участках орбиты, в результате возникают либрации — своеобразные «покачивания» относительно среднего положения. Когда приливной выступ отклоняется от прямой, соединяющей центры масс Юпитера и Ио, в теле Ио возникает напряжение. Кора Ио деформируется, оценки показывают, что поверхность спутника может прогибаться на 500 м (в отличие от нескольких десятков сантиметров в теле Земли за счет лунных приливов).

Во-вторых, на состояние Ио оказывают влияние Европа и в определенной степени Ганимед. Периоды обращения Ио, Европы и Ганимеда находятся в резонансе: 1,77; 3,55 и 7,15 суток и относятся как 1:2:4 — один оборот Ганимеда равен двум оборотам Европы и четырем оборотам Ио. Как только Ио сближается с Европой, а затем с Ганимедом, гравитационное влияние Европы искажает орбиту Ио. В итоге Ио дважды за оборот вокруг Юпитера меняет параметры орбиты, смещаясь радиально вверх и вниз по отношению к Юпитеру почти на 10 км. Это влияние увеличивает отличие орбиты от окружности, а значит, усиливает вариации скорости движения Ио вокруг Юпитера и, как следствие, амплитуду либраций.

За счет результирующих мощных деформаций литосферы Ио изгибается под воздействием приливных сил и нагревается, подобно тому как нагревается изгибаемая проволока. В недрах Ио выделяется огромная энергия (до 10^{14} , или 100 трлн Вт), расплавляющая вещество спутника. Согласно некоторым моделям уже на глубине 20...30 км под поверхностью все недра спутника расплавлены. Мощность, рассеиваемая в приливных взаимодействиях, оценивается примерно в 2 Вт/м^2 , что в 30 раз превышает поток тепла, который выделяется через поверхность Земли. Не исключено, что в центре спутника имеется небольшое ядро (не более 3% массы Ио) из более тяжелых каменных пород.

Источником энергии, которая выделяется в недрах спутников в результате приливных деформаций, служит вращение Юпитера. Поэтому вращение планеты постепенно (очень медленно) замедляется, а спутники удаляются от планеты.

Выбросы в космос огромного количества вещества вулканами Ио приводят к образованию на ее орбите гигантского облака из водорода, паров серы, натрия и других элементов. Облако имеет форму бублика (тора), охватывающего орбиту Ио. Вулканы Ио непрерывно поставляют в тор огромное количество вещества — по некоторым оценкам, до 2...3 тыс. тонн вещества в секунду.

Ио обладает собственной ионосферой — оболочкой из заряженных частиц. Двигаясь внутри магнитосферы Юпитера, ионосфера Ио осуществляет своеобразную сортировку частиц с разными электрическим зарядами, когда отрицательные заряды смещаются в одну сторону, положительные — в другую. Возникает разность потенциалов в 400 кВ. Когда Ио попадает в определенные положения на своей орбите, возникает электрический разряд между Юпитером и Ио, причем сила тока (определяемого потоком заряженных частиц) достигает нескольких миллионов ампер. Ионосфера Юпитера перенаправляет поток частиц обратно к Ио, электрический контур замыкается. Этот грандиозный электрический генератор вызывает всплеск радиоизлучения в дециметровом диапазоне. Мощность этой «энергосистемы» Юпитер–Ио в 20 раз превышает суммарную мощность всех земных электростанций всех типов.

Существует гипотеза, согласно которой электромагнитные силы могут вносить вклад в нагрев недр Ио: движение спутника в неоднородном магнитном поле Юпитера должно порождать электрические токи внутри Ио, нагревающие глубинные слои этого небесного тела.

Европа. Диаметр этого спутника составляет 3130 км (по более поздним данным — 3138), масса — $4,8 \cdot 10^{23}$ кг.

Соответственно средняя плотность вещества Европы составляет 3,01...2,97 г/см³ (несколько меньше, чем у Ио). Современная модель внутреннего строения Европы выглядит следующим образом. Европа примерно на 20% по массе состоит из водяного льда, образующего мощную кору (толщиной, по различным оценкам, от 10 до 100 км, рис. 11.4). Современные оценки позволяют допустить, что толщина ближе к нижнему, чем к верхнему пределу ука-

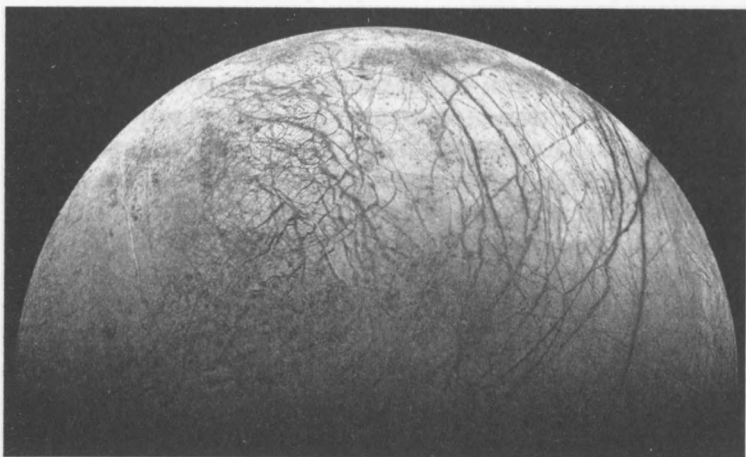


Рис. 11.4

Спутник Юпитера Европа (космический аппарат «Галилео», НАСА): темные линии на поверхности — трещины в ледяной коре.

занных значений. Под ледяной корой находится жидкий водяной океан. Глубина океана достоверно неизвестна, но как минимум она составляет несколько десятков километров, что в несколько раз превышает среднюю глубину океана на Земле. Океан покрывает разогретое силикатное ядро. В центре спутника может оказаться небольшое плотное (возможно, с примесями металлов) ядро, но, судя по данным о движении Европы, масса ядра не может превышать 3% от общей массы спутника.

Объем океана при глубине в 50 км примерно равен объему океана на Земле. Поскольку ускорение свободного падения на поверхности Европы составляет $1,32 \text{ м/с}^2$, давление на дне 50-километрового океана близко к давлению на дне 4-километрового океана на Земле.

Вращение Европы синхронное, как у Ио (спутник всегда повернут к Юпитеру одной и той же стороной). Период обращения вокруг планеты составляет 3,551 земных суток. Если среднее расстояние от Юпитера до Ио составляет 422 тыс. км, то Европа находится несколько дальше: большая полуось ее орбиты равна 671 тыс. км, соответственно приливные возмущения со стороны Юпитера здесь

заметно меньше. Выделяемой в недрах Европы тепловой энергии не хватает, чтобы расплавить силикатное вещество, но достаточно, чтобы растопить снизу ледяную оболочку и обеспечить существование водяной мантии (океана). Поскольку температура на поверхности ледяной коры близка к -140°C , низкая теплопроводность льда предохраняет океан от замерзания и испарения. По-видимому, температура в ледяной коре нарастает вблизи нижней кромки до 0°C и выше.

Поверхность Европы представляет собой ледяное поле с высоким альбедо. Перепады высот не превышают 100 м. Поверхность ледяной коры покрыта сетью трещин разных размеров, видимо, возникших в результате тектонических процессов. Наблюдаются разломы шириной от нескольких километров до сотен километров. Длина наиболее значительных трещин составляет тысячи километров. Имеются и трещины меньших размеров (рис. 11.4).

Отсутствие на ледяных пространствах поверхности Европы ударных кратеров рассматривается как свидетельство незначительного возраста структур коры. Похоже, что плавающая ледяная кора постоянно обновляется. Съемки с аппарата «Галилео» с высоким разрешением показали сложную структуру трещин, включающую в себя параллельные линии. Присутствие во льдах темных линейных образований интерпретируется как наличие силикатных частиц, выносимых через трещины на поверхность жидкой водой в результате выдавливания снизу. Здесь при отсутствии атмосферы и низких температурах жидкая вода стремительно замерзает и частично испаряется, силикатные частицы вмерзают в лед, обрисовывая контуры трещин. Испаренные частицы в виде снежинок могут опускаться на поверхность, обновляя ее и обеспечивая высокую отражательную способность. Темные частицы согласно результатам спектральных исследований содержат сульфат магния. Красноватый цвет пятен на льду позволяет предположить наличие оксидов железа. Обнаружено присутствие перекиси водорода и некоторых кислот. Все это позволяет предположить, что соленый океан Европы содержит множество растворенных веществ.

Образования на поверхности Европы получают названия, сходные с земными географическими названиями. Применяются также имена, взятые из древнегреческого мифа о Европе (возлюбленной бога Зевса).

У Европы обнаружено слабое и быстро изменяющееся магнитное поле, не превышающее по напряженности $1,2 \cdot 10^{-3}$ Гс. Магнитные полюса, расположенные вблизи экватора спутника, постоянно смещаются. Изменения мощности и ориентации поля коррелируют с прохождением Европы через определенные области магнитного поля Юпитера. Этот факт можно рассматривать как дополнительный довод в пользу существования подледного океана из токопроводящей жидкости (воды). Сильное магнитное поле Юпитера порождает электрические токи в насыщенном солями океане Европы, которые формируют магнитное поле спутника.

Помимо сложной системы пересекающихся трещин, во льдах Европы отмечены темные красноватые пятна с характерным размером около 10 км — так называемые *лентиккулы* (веснушки). Их происхождение достоверно не известно: согласно существующей версии это глыбы относительно более теплого льда, поднявшиеся из нижних слоев ледяной коры.

Приливные напряжения со стороны Юпитера, а также периодически приближающейся Ио должны приводить к сложной динамике ледяной коры Европы, деформациям, растрескиванию. Некоторые участки поверхности напоминают ледяные поля Арктики, как будто крупные льдины застывали в замерзающей воде. Учитывая крайне низкие температуры, трудно представить себе жидкую среду на поверхностном уровне. Поэтому многие особенности динамики ледяной коры остаются неизвестными.

Судя по всему, Европа не является «мертвым» небесным телом: сам факт наличия силикатных вкраплений на поверхности свидетельствует о мощных процессах, которые приводят к выносу каменного материала с глубины 50-километрового океана сквозь трещины в многокилометровой ледяной коре наружу. Очевидная молодость поверхности ледяной коры Европы свидетельствует о ее

постоянном обновлении. Некоторые особенности цветовой гаммы поверхности объяснений пока не нашли.

Существование жидкого (вероятно, сильно соленого) океана позволяет развивать пока неподтвержденные гипотезы о возможном существовании здесь каких-либо форм жизни. Неизвестно, существуют ли подводные вулканы на Европе. В случае их существования могут возникать сложные химические соединения на базе термохимического синтеза.

В 2009 г. было объявлено о подготовке международно-го проекта исследования Европы с помощью космического зонда, который направится к Юпитеру. В рамках этого проекта Российское космическое агентство будет готовить отделяемый посадочный аппарат, который должен будет впервые совершить посадку на поверхность Европы. Эта миссия будет реализована в начале 2020-х гг.

Ганимед. Спутник Юпитера Ганимед является самым большим в системе Юпитера, а также самым большим спутником в Солнечной системе. Его диаметр составляет 5262 км, что превышает размеры планеты Меркурий. Его масса составляет $1,482 \cdot 10^{23}$ кг — более чем втрое больше массы Европы и вдвое больше массы Луны. Средняя плотность Ганимеда меньше, чем у Ио и Европы — $1,94 \text{ г/см}^3$ (всего вдвое больше, чем у воды), что указывает на увеличенное содержание льда в этом небесном теле. По расчетам, водяной лед составляет не менее 50% общей массы спутника.

Большое удаление от Юпитера (большая полуось орбиты Ганимеда составляет 1070000 км, период обращения вокруг планеты — 7,155 земных суток) приводит к существенному ослаблению приливных эффектов. В результате в недрах небесного тела выделяется значительно меньше тепловой энергии, что приводит к крайне незначительной активности в ледяной коре Ганимеда.

Современная модель Ганимеда предполагает, что под ледяной корой толщиной порядка 75 км простирается силикатно-ледяная мантия вплоть до небольшого металлического ядра с размером порядка 0,2 радиуса Ганимеда. Вывод о существовании железного ядра сделан на основе

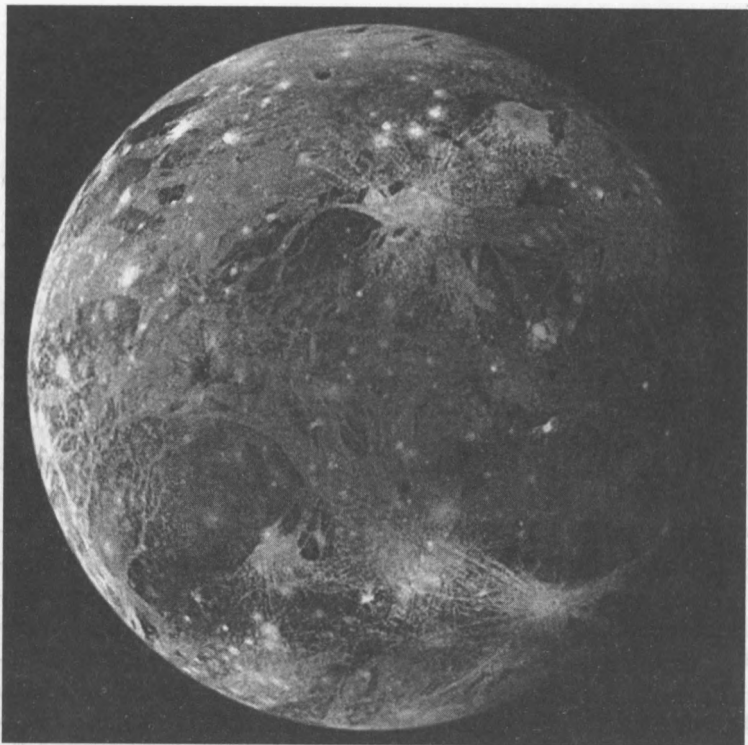


Рис. 11.5

Спутник Юпитера Ганимед (космический аппарат «Галилео», НАСА)

открытия магнитосферы Ганимеда аппаратурой космического аппарата «Галилео» в 1996–1997 гг. Оказалось, что собственное дипольное магнитное поле спутника имеет напряженность около 750 нТл, что превышает напряженность магнитного поля Меркурия. Таким образом, после Земли и Меркурия Ганимед является третьим в Солнечной системе твердым телом, обладающим собственным магнитным полем (рис. 11.5).

Имеет ли ледяная мантия Ганимеда жидкую составляющую, неизвестно, но существование жидкого слоя в принципе не исключено.

На поверхности коричневого цвета находится большое количество светлых ударных кратеров, окруженных

ореолами светлых лучей выброшенного при ударах материала. Две крупные темные области на поверхности Ганимеда названы Галилей и Симон Мариус (в честь исследователей, независимо и почти одновременно открывших галилеевы спутники Юпитера).

Возраст поверхности небесных тел определяется по количеству ударных кратеров, которые интенсивно образовывались в Солнечной системе 2...3 млрд лет назад. Абсолютная шкала возраста выстроена по Луне, где непосредственно (по результатам радиоизотопного изучения образцов доставленного на Землю грунта из лавовых участков) выполнена датировка. Судя по числу метеоритных кратеров, наиболее древние участки поверхности Ганимеда имеют возраст в 3...4 млрд лет.

На темной ледяной поверхности Ганимеда наблюдаются ряды многочисленных субпараллельных *борозд* и *хребтов*, отчасти напоминающих поверхность Европы. Глубина светлых борозд — несколько сотен метров, ширина — десятки километров, протяженность доходит до тысяч километров. Борозды наблюдаются на некоторых, сравнительно молодых локальных участках поверхности. Судя по всему, борозды образовались в результате растяжений коры. Особенности некоторых участков поверхности напоминают следы вращения больших ее блоков, подобно тектоническим процессам на Земле. Для обозначения образований на Ганимеде используются земные географические названия, а также имена персонажей древнегреческого мифа о Ганимеде и персонажей из мифов Древнего Востока.

Анализ особенностей сохранившейся до настоящего времени древней поверхности Ганимеда позволяет допустить, что на начальном этапе своего существования молодой Юпитер излучал в окружающее пространство значительно больше энергии, чем сейчас. Излучение Юпитера могло приводить к частичному плавлению поверхностных льдов на близких к нему спутниках, включая Ганимед. Морфологию некоторых участков коры спутника можно интерпретировать как следы плавления. Такие темные области (своеобразные моря), видимо, образованы продуктами водяных извержений.

Каллисто. Диаметр этого небесного тела составляет 4821 км, масса — $1,076 \cdot 10^{23}$ кг. Средняя плотность близка к $1,83 \text{ г/см}^3$ — самая низкая среди галилеевых спутников Юпитера. 60% массы Каллисто составляет водяной лед. Кора спутника, состоящая из льда с примесью каменных пород (силикатов), имеет толщину порядка 75 км. Водно-ледяная мантия простирается вплоть до центра спутника. Как и в случае Ганимеда, неизвестно, есть ли в недрах Каллисто расплавленный лед (жидкий водяной океан). Судя по всему, плотного ядра у Каллисто нет, как нет и магнитного поля.

Здесь нет протяженных равнин со следами расплавленного в прошлом вещества: судя по всему, из-за большого удаления от Юпитера (среднее расстояние до планеты — 1883000 км, соответствующий период обращения вокруг планеты — 16,69 земных суток) приливные возмущения и излучение планеты-гиганта на ранних стадиях ее существования были относительно слабыми, что не обеспечило достаточного нагрева для плавления льдов на Каллисто. Каллисто, как и остальные галилеевы спутники, обладает синхронным вращением, т. е. всегда повернута одной стороной к Юпитеру.

Поверхность Каллисто древняя (ее возраст оценен в 3,5 млрд лет). Темный лед покрыт огромным количеством светлых метеоритных кратеров. Кратеры отличаются слабо выраженными формами (невысокие валы, неглубокие впадины), что, видимо, объясняется пластичностью и текучестью льда, которые за большие промежутки времени сглаживают рельеф.

При близких размерах Ганимеда и Каллисто их внутреннее строение существенно различается. Одна из гипотез допускает, что Каллисто досталось меньше импактных событий, чем Ганимеду, во время так называемой *поздней тяжелой бомбардировки* (Late Heavy Bombardment) 3,9 млрд лет назад. В результате лед Ганимеда мог таять, и каменные фрагменты должны были погрузиться в недра спутника, формируя ядро. Меньшая интенсивность бомбардировки Каллисто (которая тоже требует объяснения) позволила сохраниться этому спутнику в виде

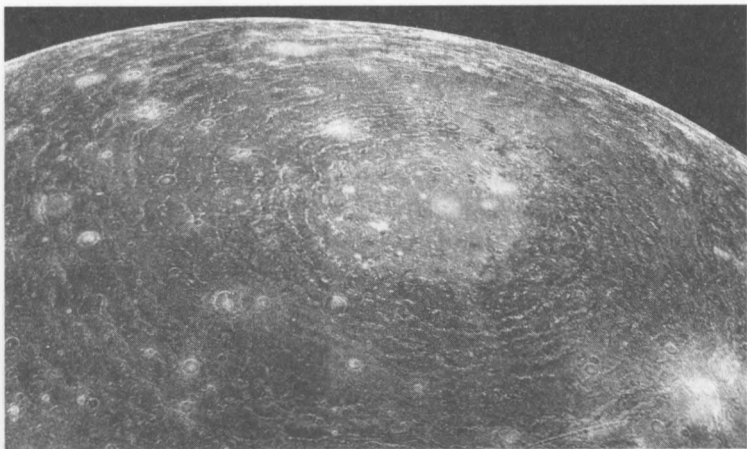


Рис. 11.6
Спутник Юпитера Каллисто
(космический аппарат «Галилео», НАСА):

виден гигантский импактный бассейн Валгалла с кольцевыми трещинами в ледяной коре.

относительно однородной исходной смеси льда и горных пород. Тем не менее на поверхности Каллисто сохранился след древнего чудовищного по мощности удара. Около одного из метеоритных кратеров система из более 10 концентрических кольцевых трещин в ледяной коре имеет диаметр до 2600 км (больше половины диаметра Каллисто), что близко к размерам ударного бассейна Калорис на Меркурии. Это импактное образование на Каллисто получило название Валгалла (рис. 11.6). Это и другие названия для объектов на поверхности Каллисто взяты из мифов народов Крайнего Севера.

Кольцо Юпитера, Метида, Адрастея, Амальтея и Теба. Съемки с аппарата «Вояджер-2» показали, что около Юпитера в плоскости его экватора существует кольцо из мельчайших частиц микронных размеров. Внутренняя кромка кольца, судя по всему, примыкает к верхним слоям атмосферы Юпитера, а резкий наружный край находится на расстоянии 128 тыс. км от центра планеты (57 тыс. км над верхней кромкой облаков). Кольцо неоднородно по ширине, его внешняя часть обладает повышен-

ной плотностью, и ширина этой части приблизительно равна 5200 км. Толщина кольца не превышает нескольких километров.

С Земли кольцо Юпитера современными средствами практически не наблюдаемо.

Считается, что вещество кольца состоит из микропылинок, которые поставляются двумя ближайшими к Юпитеру небольшими спутниками регулярной группы — Метидой и Адрастеей. Их орбиты находятся вблизи внешней границы кольца. Гравитационное поле этих спутников формирует резкую внешнюю границу кольца. Радиусы круговых орбит Метиды и Адрастеи равны соответственно 128000 и 129000 км. Эти крошечные (43 км и 16×26 км) небесные тела неправильной формы обладают синхронным вращением, их большие оси всегда направлены на центр Юпитера. Они стремительно облетают планету, делая один оборот вокруг Юпитера соответственно за 0,295 и 0,298 земных суток (примерно за 7 ч). По-видимому, это каменные тела — их средняя плотность близка к 3 г/см^3 .

Ещё один спутник — Амальтея,двигающийся вокруг Юпитера на более высокой орбите (181 тыс. км), имеет более крупные размеры — $131 \times 73 \times 67$ км. Его большая ось также всегда нацелена на центр Юпитера. Один оборот Амальтеи вокруг Юпитера осуществляется за 12 ч. Поверхность спутника имеет оранжевый цвет (есть большое белесое пятно неизвестной природы), альbedo очень низкое — около 0,05.

Исследования, выполненные аппаратом «Галилео» с близкого расстояния (160 км), показали, что плотность Амальтеи крайне низка — меньше плотности воды ($0,857 \text{ г/см}^3$). Судя по всему, это небесное тело состоит из льда и пористых вкраплений силикатных пород (щебня), причем со значительными пустотами в теле спутника. Происхождение Амальтеи остается загадочным, поскольку вблизи Юпитера (спутник движется на расстоянии 120 тыс. км над верхней кромкой облаков планеты, что втрое меньше расстояния от Земли до Луны) должны были формироваться плотные тела с большим содержанием железа и силикатов, а «легкие» породы должны были вытесняться на

периферию системы Юпитера. Существует версия о поздней миграции Амальтеи с высокой орбиты.

Альтернативная гипотеза заключается в том, что в прошлом Амальтея была крупным спутником, подобным Ио, и мощный вулканизм из-за еще более сильных, чем на Ио, приливов, мог привести к эффективной потере массы за счет ее выбросов в окружающее пространство в процессе мощных и постоянных извержений. В таком случае Амальтея — это «огарок», остаток ядра спутника после его разрушения под воздействием сверхмощного вулканизма. Еще одна гипотеза предполагает, что Амальтея — это захваченный гравитацией Юпитера астероид С-типа, похожий по своим свойствам на астероид Главного пояса Матильду, состоящий их камня (65%), водяного льда (34%) и графита (1%).

Восьмой, последний спутник внутренней (регулярной) группы называется Теба. Орбита Тебы находится между орбитами Амальтеи и Ио и имеет радиус 222 тыс. км (период обращения чуть больше 16 ч). Теба имеет размеры 110×90 км, обладает синхронным вращением и состоит из каменных пород (подобно Метиде и Адрастее, имеет плотность около 3 г/см³). Снимки Тебы, Амальтеи и Метиды приведены на рис. 11.7. На сегодняшний день это пока лучшие изображения данных небесных тел.

Названия спутников взяты из древнегреческой мифологии. Метиды — мудрая богиня мысли, первая супруга Зевса. Адрастее — богиня кары и возмездия. Амальтея — нимфа, вскормившая своим молоком младенца Зевса на острове Крит. Теба — дочь Зевса от одной из нимф.

Внешние спутники Юпитера. Вторая (иррегулярная) группа спутников Юпитера насчитывает, по состоянию на



Рис. 11.7
Внутренние
спутники Юпитера
Теба, Амальтея
и Метиды в одном
масштабе (косми-
ческий аппарат
«Галилео», НАСА)

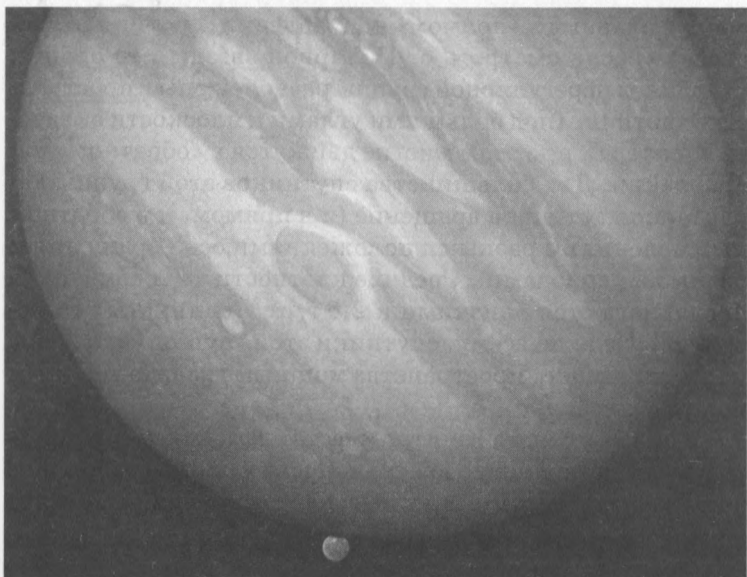


Рис. 11.8

Юпитер и Ганимед (космический аппарат «Галилео», НАСА)

начало 2011 г., 55 объектов. Это небольшие небесные тела. Всего несколько спутников внешней группы имеют размеры, измеряемые десятками километров (например, Леда — 20 км, Гималия — 170 км, Лиситея — 36 км, Элара — 83 км, Ананке — 28 км, Карме — 46 км, Пасифе — 58 км и Синопе — 38 км). Все остальные спутники внешней группы имеют размеры меньше 10 км, причем два из них по 1 км. Весьма вероятно, что в будущем будут обнаружены спутники размерами в сотни и десятки метров. Большая полуось орбиты самого близкого к Юпитеру спутника внешней группы — Фемисто — составляет 7,284 млн км (в 4 раза дальше Каллисто), самого дальнего (S/2003 J4 — пока без названия) — 29,541 млн км.

Периоды обращения вокруг планеты существенно различаются — от 240,92 земных суток (Леда) до 980 суток (спутник S/2003 J4).

Если орбиты спутников регулярной группы лежат практически в плоскости экватора Юпитера и все они движутся

вокруг планеты в «прямом» направлении (против часовой стрелки, если смотреть от Полярной звезды), то орбиты спутников нерегулярной группы расположены в пространстве хаотично (под большими углами к плоскости экватора Юпитера), при этом многие движутся в «обратном» направлении. Для большинства спутников этой группы характерно хаотичное вращение (и в прямом, и в обратном направлениях с разными положениями осей вращения и разными периодами). Средние плотности этих спутников предполагаются близкими к $2,6 \text{ г/см}^3$ (силикаты без металлов). Судя по всему, спутники этой группы захвачены из окружающего пространства мощным гравитационным полем Юпитера.

В целом планета Юпитер вместе с семейством его спутников представляет собой грандиозную, крайне сложную физическую систему, многие свойства которой еще ждут своего объяснения (см. рис. 11.8).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие экспериментальные данные позволяют считать, что Юпитер является газожидким шаром?
2. Что такое Большое красное пятно?
3. Какие гипотезы предложены для объяснения причин избыточного потока тепла из недр Юпитера?
4. Какова причина несферической формы Юпитера?
5. Что известно о магнитном поле Юпитера?
6. Утверждается, что на поверхность Юпитера нельзя совершить посадку. Почему?
7. Каковы причины мощного вулканизма на спутнике Юпитера Ио?
8. На спутнике Юпитера Европе не было ни одного космического аппарата. Какие данные позволяют утверждать, несмотря на это, что подо льдами Европы существует глубокий водяной океан?
9. Какова причина мощного радиоизлучения Юпитера?
10. Как можно объяснить вытянутые в широтном направлении разноцветные полосы в атмосфере Юпитера?



ПЛАНЕТА САТУРН

Сатурн, как и Юпитер, относится к классу планет-гигантов и по многим свойствам близок к Юпитеру, хотя имеет ряд существенных отличий. Сатурн виден на небе невооруженным глазом (см. рис. 12.1).

Название получил по имени древнеримского бога — отца Юпитера. Согласно мифу Сатурн знал о пророчестве, согласно которому он должен быть свергнут с трона своим сыном, во избежание чего он поедал собственных детей. Спрятанный и спасенный Юпитер впоследствии стал верховным богом. Греческие аналоги римских богов Сатурна и Юпитера — Кронос и Зевс.

Движение и вращение. Орбита Сатурна расположена вдвое дальше от Солнца, чем орбита Юпитера, ее большая полуось составляет 9,58378 а. е. (несколько меньше 1,5 млрд км). Период обращения Сатурна вокруг Солнца составляет 29,6661 земных лет (часто указывают округленное значение — 30 лет). Орбита мало отличается от круговой — ее эксцентриситет составляет 0,05689. Благодаря большому удалению от Солнца Сатурн движется по своей орбите сравнительно медленно (средняя скорость 9,6 км/с).

Как и Юпитер, Сатурн очень быстро вращается вокруг своей оси, причем вращается дифференциально. Точка на экваторе совершает оборот за 10 ч 12 мин, на широтах около 40° — за 10 ч 39,4 мин, приполярные районы (широта больше 57°) — за 11 ч. Стремительное вращение приводит к ощутимому сжатию планеты: отношение полярного

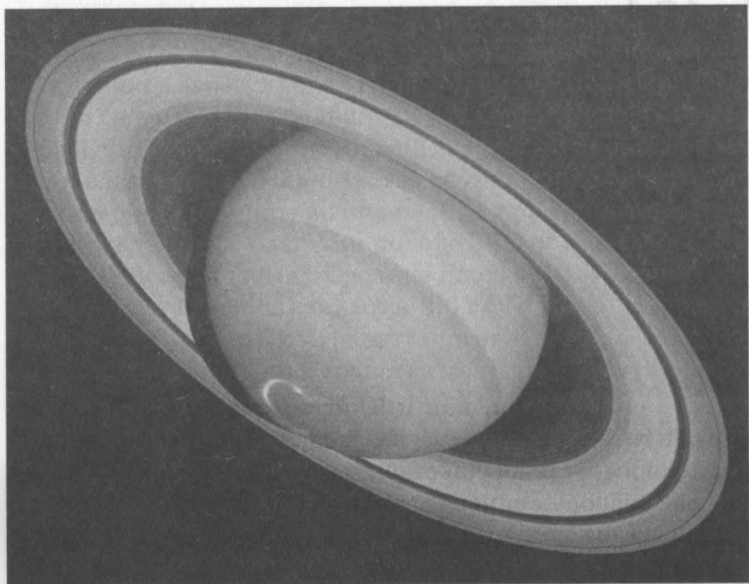


Рис. 12.1

**Планета Сатурн (космический аппарат «Кассини», НАСА):
на полюсе видно полярное сияние в виде яркого кольца.**

радиуса к экваториальному составляет $0,912$. Сжатие планеты можно легко увидеть при наблюдениях в телескоп либо на снимках с близкого расстояния.

Плоскость орбиты Сатурна незначительно (на $2,486^\circ$) наклонена к плоскости земной орбиты (к эклиптике). Ось вращения планеты наклонена к плоскости ее орбиты на $63,3^\circ$, т. е. примерно так же, как у Земли ($66,6^\circ$) и у Марса ($64,8^\circ$). Это означает, что для Сатурна тоже характерна смена времен года, по-видимому, сильно сглаженная быстрыми движениями газов в атмосфере, осуществляющими эффективный перенос тепла.

Исследования Сатурна с помощью космических зондов. Сатурн исследовался четырьмя космическими аппаратами. «Пионер-11», переименованный после запуска в «Пионер-Сатурн» (США), с пролетной траектории в 1979 г. выполнил цикл исследований планеты. Зонд «Вояджер-1» в 1980 г., а затем «Вояджер-2» в 1981 г. (оба аппарата —

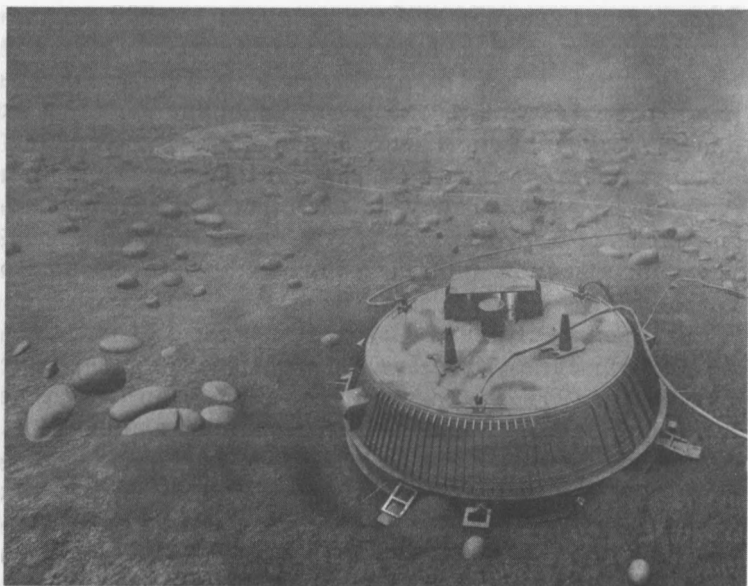


Рис. 12.2

Посадочный зонд «Гюйгенс» на спутнике Сатурна — Титане
(рисунок ЕКА)

США) прошли вблизи Сатурна и передали множество снимков планеты, его колец и его спутников. В 2004 г. зонд «Кассини», созданный НАСА (США), Европейским космическим агентством (ЕКА) и Итальянским космическим агентством (ИКА), стал первым в истории искусственным спутником Сатурна. Исследования Сатурна с помощью успешно работающего аппарата «Кассини» продолжаются до настоящего времени (начало 2011 г.) и планируются в дальнейшем. В начале 2005 г. от «Кассини» был отделен посадочный зонд «Гюйгенс» (ЕКА), который совершил парашютный спуск в атмосфере крупнейшего спутника Сатурна — Титана и передал данные о свойствах атмосферы и поверхности спутника. На сегодняшний день новые миссии к Сатурну не планируются (рис. 12.2).

Внутреннее строение и магнитное поле. Экваториальный диаметр, определенный по верхней кромке облаков, равен 120540 км, что в 9,4 раза превышает диаметр Земли.

Соответственно по объему Сатурн примерно в 800 раз превышает Землю. Масса Сатурна равна $5,685 \cdot 10^{26}$ кг (95,159 масс Земли), или в 3,3 раза меньше массы Юпитера. Средняя плотность планеты оказалась самой низкой для всех планет Солнечной системы — всего $0,70 \text{ г/см}^3$, что заметно ниже плотности воды. Безразмерный момент инерции планеты равен 0,22, что указывает на существование небольшого плотного ядра и протяженной флюидной оболочки переменной плотности (см. лекцию 8 настоящего пособия).

Внутреннее строение Сатурна, очевидно, сходно с внутренним строением Юпитера. Атмосфера планеты состоит из водорода (94% по объему) и гелия (6%) — в атмосфере Юпитера, к примеру, объемное содержание гелия — 11%. Это различие может указывать на повышенную по сравнению с Юпитером концентрацию гелия во внутренних слоях Сатурна. На верхней кромке облаков планеты температура около -180°C (93 К). Эффективная температура планеты составляет всего 95 К. Это связано с очень небольшим потоком солнечной энергии, падающим на единицу площади Сатурна (в 91 раз меньше, чем на Земле).

По мере погружения в газовую оболочку Сатурна температура и давление быстро растут. С их увеличением, как и на Юпитере, с глубины в несколько тысяч километров начинается протяженная газожидкая водородно-гелиевая атмосфера, слой которой значительно толще, чем на Юпитере. Если газожидкая атмосфера Юпитера согласно существующим моделям заканчивается на глубинах от 0,77 радиуса от центра планеты (здесь начинается слой жидкого металлического водорода), то на Сатурне жидкий металлический водород начинается гораздо глубже — с глубины 0,49 радиуса. Существует металлосиликатное ядро (от центра до 0,15 радиуса планеты). Согласно расчетам, температура в центре Сатурна достигает 17000 К, давление — 23 Мбар.

Об особенностях внутреннего строения Сатурна говорит его тепловой баланс. Несмотря на большие размеры планеты, Сатурн получает в 2,7 раз меньше тепла от Солнца, чем, например, Земля. Это связано с огромным удале-

нием (почти в 10 раз дальше от Солнца) и более высоким альбедо (0,47 для Сатурна при 0,37 для Земли). Измерения показали, что тепловой поток из глубин планеты в 1,9...2,2 раза превышает поток тепла, поступающий от Солнца. Причина этого феномена окончательно не выяснена. Основная гипотеза заключается в том, что здесь, как и на Юпитере, работает гравитационная дифференциация. Более тяжелый гелий погружается в недра планеты, более легкий водород вытесняется в наружные слои. В результате происходит выделение тепловой энергии. Поскольку подробности таких процессов неясны, при этом возможны сложные варианты типа изменений концентрации раствора гелия в металлическом водороде, окончательная теория теплового баланса планет-гигантов не построена. Не исключено, что часть внутреннего тепла носит реликтовый характер (сохранилась со времен формирования планеты при столкновениях крупных небесных тел).

Как и на Юпитере, громадные температура и давление в недрах Сатурна приводят к ионизации водорода и гелия (отрыву электронов от ядер атомов), в результате чего все недра планеты оказываются электропроводящими. Движения в недрах планеты порождают электрические токи, которые, в свою очередь, становятся источником магнитного поля. В отличие от Юпитера, Меркурия и Земли, ось магнитного диполя Сатурна с высокой точностью совпадает с осью вращения планеты. Поэтому магнитосфера Сатурна имеет правильную симметричную форму. Есть основания полагать, что магнитное поле планеты формируется на глубинах, которые существенно больше, чем соответствующие глубины на Юпитере. В целом магнитосфера Сатурна проще, чем у Юпитера, но имеет достаточно сложную структуру. Здесь есть несколько радиационных поясов, где магнитное поле планеты образует замкнутые «резервуары» для заряженных частиц. Между радиационными поясами есть тороидальные зоны, где концентрация заряженных частиц крайне низка. Заряженные частицы здесь перехватываются веществом колец (о кольцах будет сказано ниже) и спутниками. Радиус радиационных поясов составляет 20...22 радиуса Сатурна.

Напряженность магнитного поля на уровне наблюдаемых снаружи облаков на экваторе составляет 0,2 Гс (на Земле около 0,35 Гс).

Атмосфера. Как и в случае Юпитера, мы имеем возможность наблюдать непосредственно только верхние слои атмосферы Сатурна. Сатурн имеет развитую систему поясов и зон. Однако контраст этих образований существенно меньше, чем на Юпитере. Это объясняется более низкими температурами в верхних слоях атмосферы планеты. В надоблачных слоях температура около -180°C , что, видимо, приводит к вымораживанию паров аммиака NH_3 , в результате чего над облаками образуется плотный слой тумана. Этот слой скрывает структуру поясов и зон в облаках Сатурна.

Помимо аммиака, спектральные наблюдения позволили обнаружить в атмосфере планеты метан CH_4 , ацетилен C_2H_2 , этан C_2H_6 . Суммарная концентрация этих и других химических соединений не превышает 1%, как и у Юпитера, 99% состава атмосферы планеты составляют водород и гелий.

Несмотря на существование аммиачного тумана, окутывающего верхние слои атмосферы Сатурна, отчетливо наблюдаются отдельные структуры в облаках Сатурна. В отличие от Юпитера, зональная структура здесь просматривается вплоть до очень высоких широт — почти 78° (на Юпитере — до 60°). Скорость ветра в экваториальной зоне Сатурна достигает громадных значений порядка 400...500 м/с, что значительно превышает соответствующие скорости на экваторе Юпитера. Скорости ветра на умеренных широтах ниже, чем на экваторе (для широт 30° характерны скорости порядка 100 м/с).

В верхних слоях атмосферы Сатурна могут возникать вихри антициклонического характера, подобные Большому красному пятну на Юпитере. Так, съемки космического телескопа «Хаббл» в 1994 г. позволили обнаружить аналог БКП — так называемое Большое коричневое пятно на Сатурне. Эта структура оказалась высокоширотной (74° северной широты). Она не единственная — ураганы с характерным размером порядка 1 тыс. км постоянно наблю-

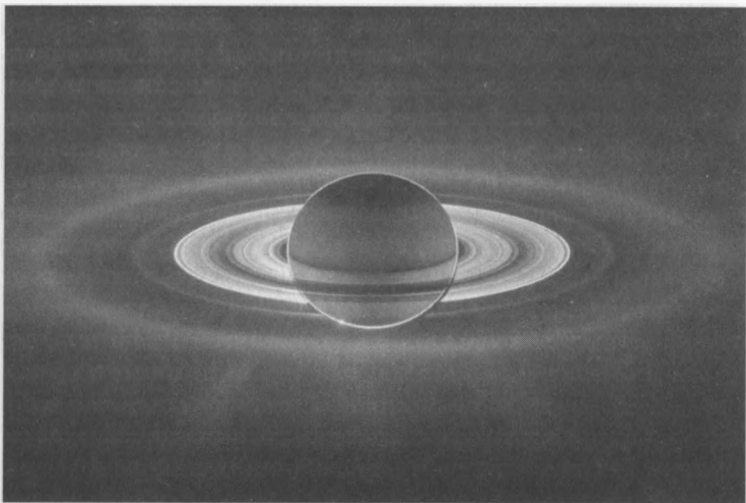


Рис. 12.3

Система колец Сатурна в контровом свете
(космический аппарат «Кассини», НАСА)

даются на умеренных широтах. Из-за высокой скорости перемещения газа продолжительность жизни отдельных ураганов меньше, чем на Юпитере.

Кольца Сатурна. Сатурн обладает уникальной системой колец, охватывающих планету в плоскости экватора. В отличие от слабых колец Юпитера, кольца Сатурна хорошо видны даже в небольшой школьный телескоп. Их заметил еще Галилей во время первых телескопических наблюдений, но из-за низкого качества изображения ему не удалось правильно определить форму необычного образования. В 1655 г. кольца были открыты Христианом Гюйгенсом, который установил, что Сатурн окружен плоским кольцом, нигде не прикасающимся к телу планеты (рис. 12.3).

Исследования колец с помощью наземных и космических телескопов, а также космических зондов позволили установить следующее. Кольцо в действительности состоит из нескольких тысяч узких концентрических колец. Внутренние кольца начинаются вблизи верхних слоев атмосферы Сатурна, внешние расположены на расстояниях

до 200 тыс. км от центра планеты. Система колец очень тонка — порядка 10 м, но очень широка — многие десятки тысяч километров.

Традиционно система колец подразделяется на несколько элементов — концентрических колец, разделяемых *щелями*, или *делениями*. В порядке, если считать от планеты, кольца обозначены буквами латинского алфавита D, C, B, A, F, G, E. Нетрудно догадаться, что первоначально были открыты кольца A, B, C, а затем обнаружены более слабые (менее контрастные) почти прозрачные кольца — внутреннее D и внешние F, G, E. Внешнее кольцо E практически невидимо, и его существование подтверждается аппаратурой космических зондов, регистрирующих заряженные частицы. Внутреннее неплотное кольцо D не имеет резкой внутренней границы, его внутренний край размыт и постепенно сходит на нет, примыкая к верхним слоям атмосферы Сатурна. Размеры основных колец приведены в табл. 12.1.

Кольцо A обычно называют внешним, B — средним, C — внутренним. Кольцо B самое яркое, кольцо C — более темное и полупрозрачное (*креповое*). Между кольцами A и B даже в небольшие телескопы хорошо заметен темный промежуток, который получил название *деление (щель) Кассини*. Внешний радиус щели Кассини близок 120 тыс. км, ее ширина — 4450 км. Внутри кольца A выделяется так называемое *деление Энке* (внешний радиус — 133570 км, ширина — 330 км). Как указано выше, в пределах каждого из колец можно выделить сотни более узких колец (рис. 12.4).

Таблица 12.1

Параметры колец Сатурна

Кольцо	Внутренний радиус, км	Внешний радиус, км
D	~ 66970	74510
C	74510	92000
B	92000	117520
A	122170	136780
F	~ 140130	140180

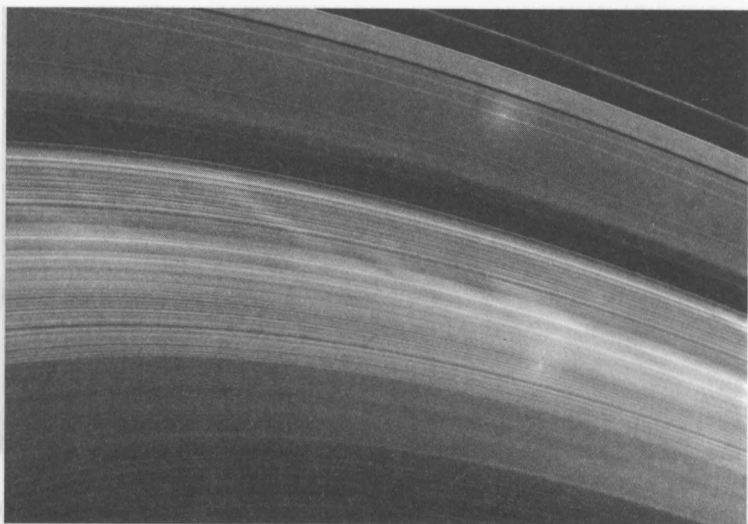


Рис. 12.4

Кольца Сатурна (космический аппарат «Кассини», НАСА)

Исследования, выполненные зондом «Вояджер-2», показали, что кольца состоят из частиц различного размера. Так, в кольце А вокруг Сатурна движутся многочисленные тела с размерами около 10 м, в делении Кассини — тела со средними размерами 8 м, в кольце С — с размерами 2 м. В каждом из колец присутствуют частицы и меньших размеров — вплоть до микронных пылинок. Частицы присутствуют и в щелях (делениях). Различия между свойствами вещества в различных кольцах и делениях заключаются в разной степени измельченности и разной концентрации присутствующего здесь материала. Кольца состоят из ледяных глыб различных размеров с вкраплениями силикатных частиц (грязный лед). В некоторых частях колец частицы состоят из снега. Наиболее тонкоструктурные кольца содержат мириады мелких ледяных кристалликов и снежинок, двигающихся вокруг Сатурна подобно многочисленным спутникам.

Спутники Сатурна. По состоянию на начало 2011 г. в системе Сатурна открыто 62 спутника. Большинство спутников обладают регулярным вращением (они движутся

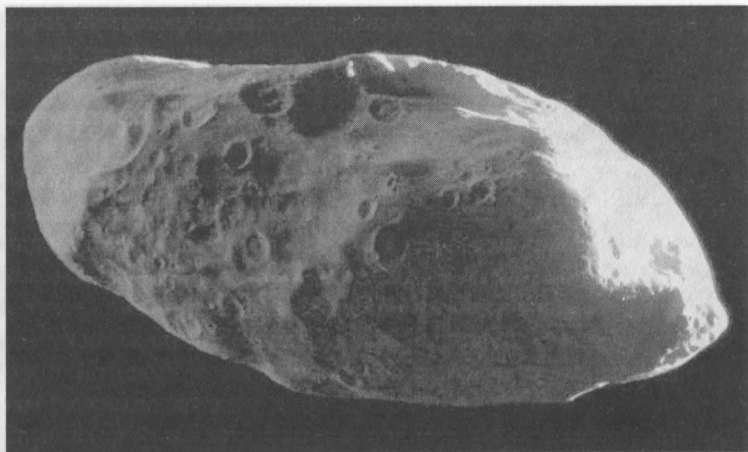


Рис. 12.5

Спутник Сатурна Прометей (космический аппарат «Кассини», НАСА)

в «прямом» направлении, и их орбиты лежат в плоскостях, близких к плоскости экватора и плоскости колец Сатурна). В то же время открыт ряд небольших спутников, плоскости которых, как и у нерегулярных спутников Юпитера, сильно наклонены к плоскости экватора планеты, при этом движение может быть обратным. Ниже кратко рассмотрены несколько спутников Сатурна. Большинство из них состоит из водяного льда с несущественными добавками других компонентов.

Пан, Дафнис и Атлант. Крошечные (соответственно 20, 8 и 39×27 км) спутники обращаются вокруг Сатурна вблизи внешнего края кольца А (в 133600, 136500 и 137700 км от центра Сатурна). Видимо, именно гравитационное воздействие этих спутников делает упомянутый край резким. Спутники, находящиеся вблизи края того или иного кольца Сатурна, получили название «пастухов» соответствующего кольца. Так, миниатюрный Дафнис вращается у внешней кромки кольца А внутри образованной им *щели Килера* с шириной от 32 до 47 км. Средняя плотность пастухов кольца А — Пана и Атланта — оценена всего в $0,6 \text{ г/см}^3$. Это характерно для плотности рыхлого льда с большими пустотами.

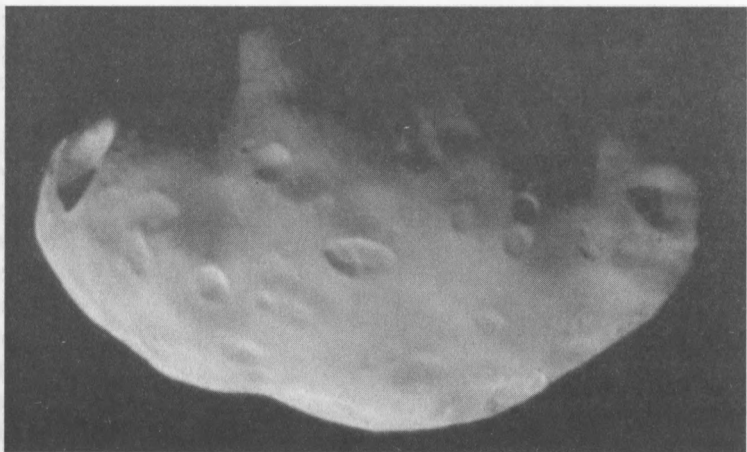


Рис. 12.6

Спутник Сатурна Пандора (космический аппарат «Кассини», НАСА)

Названия этих небесных тел даны в соответствии с именами греческой мифологии: Пан — бог стад, покровитель природы; Дафнис — прекрасный юноша, сын Гермеса и сицилийской нимфы, любимец богов, Атлант (Атлас) — титан, сын титана Япета.

Прометей и Пандора. Эти спутники являются внутренним и внешним пастухами кольца F с размерами соответственно 148×68 и 110×62 км и радиусами орбит 139400 и 141700 км. Снимки Пандоры с КА «Кассини» показали, что кратеры на этом небольшом спутнике сильно сглажены, а мелкие кратеры не видны. Создается впечатление, что весь этот спутник запорошен толстым слоем мелкозернистого вещества (ледяной пыли). Обнаружено два крупных кратера с размерами около 30 км (рис. 12.5 и 12.6).

Согласно греческой мифологии Прометей — титан, добывший огонь для людей. Пандора — супруга Эпиметея, открывшая подаренный ей Зевсом ларец (так называемый ящик Пандоры), откуда появились все возможные людские несчастья.

Эпиметей и Янус. Спутники, находящиеся на очень близких орбитах, практически *коорбитальные*. Высота орбит соответственно 151400 и 151500 км над центром

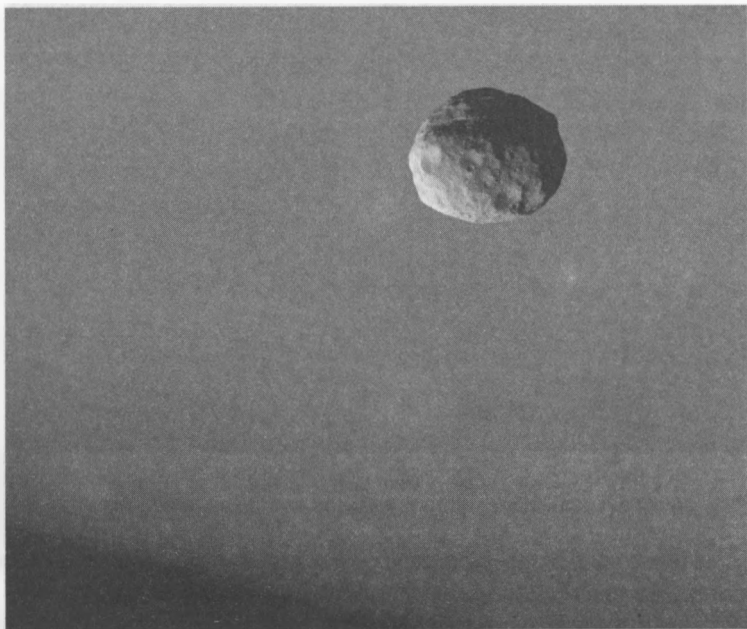


Рис. 12.7
Спутник Янус на фоне Сатурна
(космический аппарат «Кассини», НАСА)

Сатурна. Размеры спутников — 138×110 и 194×154 км соответственно. Есть версия, что и Эпиметей, и Янус являются осколками одного и того же родительского небесного тела. Несмотря на относительно небольшие размеры, на Эпиметее обнаружено множество ударных кратеров, включая несколько крупных (с диаметром более 30 км). В частности, кратер *Hilaigea* имеет диаметр 33 км.

Эпиметей — мифологический персонаж, женившийся на Пандоре. Янус у древних греков — двуликий бог изменений во времени, входов и выходов (рис. 12.7).

Эгеон. Миниатюрный спутник размерами всего 500 м, встроенный в тонкое кольцо G. Предполагается, что выбросы вещества в результате ударов метеоритов о поверхность Эгеона и породили это кольцо. Область кольца вблизи спутника выглядит уплотненной, это уплотнение кольца называется *арка*. Орбита Эгеона находится в резонансе

с орбитой спутника Мимас в отношении 6:7. Гравитационные возмущения со стороны Мимаса регулируют распределение вещества в арке вблизи Эгеона.

Мимас. Большая полуось орбиты этого спутника (среднее расстояние от центра Сатурна) — 185 тыс. км. Диаметр Мимаса 397 км. Его плотность выше, чем у небольших спутников, описанных выше, — $1,2 \text{ г/см}^3$ (лед с вкраплениями силикатов). Для этого спутника характерна относительно большая глубина метеоритных кратеров, наблюдаемых здесь повсеместно. По-видимому, это связано с меньшим количеством мелкозернистой пыли на поверхности (например, по сравнению с Пандорой) — Мимас находится дальше от плотных пылевых колец Сатурна. Спутник обладает синхронным вращением. Посередине полушария, всегда повернутого к Сатурну, находится гигантский импактный кратер Гершель диаметром 130 км (треть диаметра самого спутника) с центральным поднятием (пиком в центре кратера, рис. 12.8). Очевидно, удар был очень сильным, в результате чего могла измениться

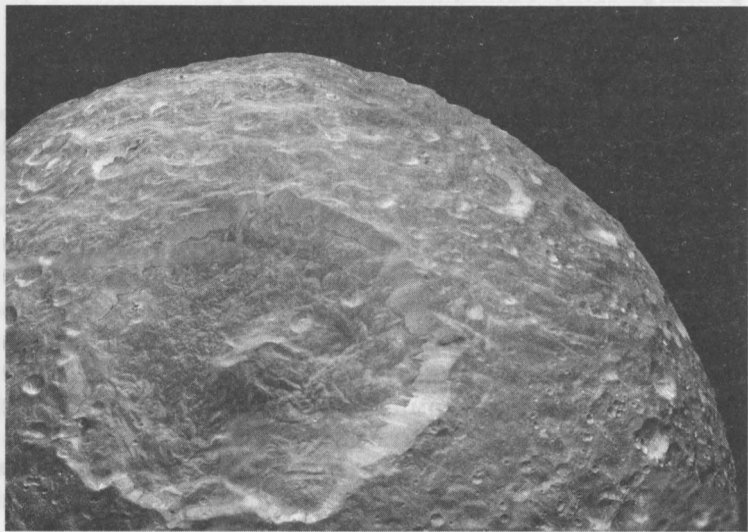


Рис. 12.8
Кратер Гершель на Мимасе
(космический аппарат «Кассини», НАСА)

структура всего спутника. В принципе такой удар мог разрушить спутник.

Мимас и Эгеон названы по именам гекатонхейров — сторуких и пятидесятиголовых великанов, сыновей богов Урана и Геи.

Анфа и Мефона. Крошечные спутники (размеры 2 и 3 км),двигающиеся на средних расстояниях около 194... 200 тыс. км от центра Сатурна. В 2008 г. станция «Кассини» зарегистрировала тонкие неполные кольца — *арки*, тянущиеся вдоль орбит спутников. Судя по всему, материалом арок является вещество, выбитое ударами метеоритов с поверхностей этих спутников. Размеры (протяженность) арок соответствуют областям, в пределах которых смещаются на своих орбитах Анфа и Мефона из-за орбитального резонанса с Мимасом (периоды обращения этих спутников с периодом обращения Мимаса относятся как 11:10 и 15:14). Эти спутники наглядно демонстрируют пример взаимодействия спутников и колец Сатурна.

Названия даны по именам превращенных в птиц дочерей мифического великана Алкионея, бросившихся в море после убийства их отца Гераклом.

Энцелад. Один из интереснейших спутников Сатурна. Двигается по почти круговой орбите на расстоянии 238100 км от центра Сатурна. Диаметр этого практически сферического спутника 500 км. Средняя плотность Энцелада — $1,6 \text{ г/см}^3$. Поверхность спутника очень светлая, Энцелад обладает одним из самых высоких показателей альбедо в Солнечной системе, отражая 90% падающего света. Съёмки с борта аппарата «Кассини» показали, что поверхность спутника молодая (кратеров очень мало), зато есть явные признаки мощных тектонических процессов в ледяной коре спутника. Обнаружены следы *спрединга* (рис. 12.9). На Земле термин «спрединг» применяется для обозначения геодинамического процесса растяжения (раздвигания) блоков литосферы, сопровождающегося заполнением освобождающегося пространства поступающей из недр магмой. Отличие спрединга на Энцеладе заключается в том, что здесь он происходит в одном направлении, подобно движению ленты конвейера. Спрединг свидетель-

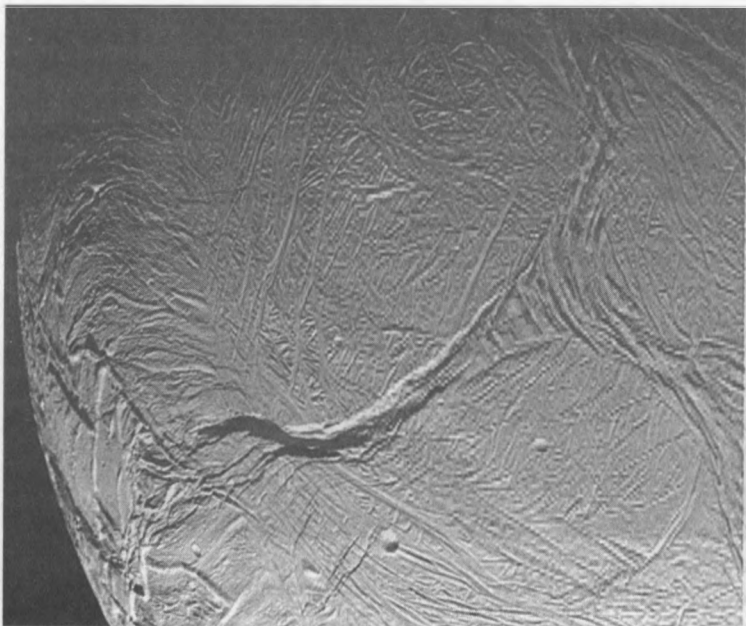


Рис. 12.9

Сложные структуры в ледяной коре Энцелада
(космический аппарат «Кассини», НАСА)

ствует о том, что здесь действуют мощные силы подповерхностного нагрева и конвекции.

Еще один характерный тип поверхности Энцелада — система длинных квазипараллельных разломов в ледяной коре (трещин в полярных районах), получивших название «*тигровые полосы*». Тигровые полосы являются аналогом срединно-океанических хребтов на Земле, где поднимающееся вулканическое вещество обновляет земную кору. В случае Энцелада речь может идти о движениях в расплаве льда (т. е. в воде).

Наблюдения с «Кассини» позволили обнаружить удивительный феномен — струи водяного пара, бьющие из-под поверхности Энцелада в районе «тигровых полос».

Аппарат «Кассини», двигаясь по орбите вокруг Сатурна, неоднократно проходил вблизи Энцелада, при этом, помимо фотографирования гейзеров, он проходил прямо

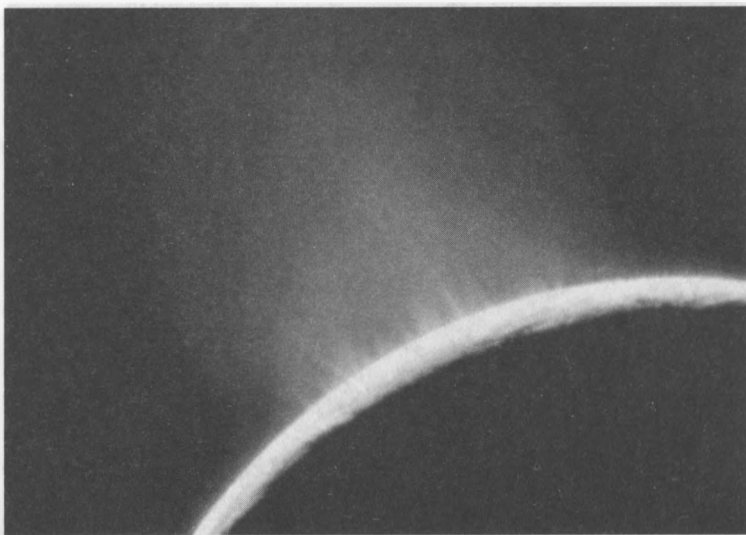


Рис. 12.10

Гейзеры из водяного пара на южном полюсе Энцелада
(космический аппарат «Кассини», НАСА)

через струю гейзера, бьющую в космическое пространство (рис. 12.10). Непосредственные измерения показали, что в струе присутствуют микроскопические (с характерным размером 10 микрон) твердые кристаллики замерзшей при выбросе из недр спутника воды. В составе кристалликов, помимо воды, обнаружен бикарбонат натрия NaHCO_3 (пищевая сода).

Весь набор имеющихся данных заставляет предполагать, что подо льдами Энцелада имеется океан из ледяной мантии (жидкой воды). Можно также обосновать возможное существование *криовулканов* (ледяных вулканов) на дне подледного океана. Аппаратура «Кассини» зафиксировала заметные (в два раза) флуктуации плотности вещества в отдельных струях над «долиной гейзеров».

Открытие геологической активности на Энцеладе представляет собой серьезную научную проблему. Спутник слишком мал, чтобы долго сохранять тепло некогда разогретых недр. Это означает, что процесс разогрева внутренних слоев Энцелада происходит непрерывно, в том числе

и сейчас. Основная версия сводится к применению теории, разработанной для Ио и Европы, к Энцеладу: сильное приливное воздействие Сатурна, а также возмущения орбиты близкими крупными спутниками, усиливающие приливные деформации, вызывают разогрев недр. Приливные деформации должны приводить к разогреву скального силикатного ядра Энцелада, плавлению снизу ледяной оболочки и образованию водяной жидкой мантии. Вода под давлением плавающего на поверхности сплошного панциря (ледяной коры) выдавливается через трещины и другие каналы. В результате водяной пар, стремительно замерзая (на поверхности Энцелада температура близка к -200°C), выбрасывается в космос в виде струи мелкодисперсных ледяных кристалликов.

Остаются серьезными вопросы о причинах разогрева только вблизи южного полюса спутника (здесь теплее примерно на 10°C по сравнению с экватором). Узкие участки вблизи тигровых полос заметно нагреты: здесь температура близка к -130°C , в отдельных местах (вблизи так называемой долины Багдад) -93°C . Установлено, что области повышенной температуры совпадают с молодыми, геологически активными рывтинами и долинами во льдах Энцелада. Неясно, почему процессы, характерные для Энцелада, не наблюдаются на Мимасе, который лишь несущественно меньше по размерам. Феномен гейзеров и вероятного водного океана под ледяной поверхностью небольшого Энцелада остается предметом дискуссий и интенсивных исследований.

Согласно мифологии гигант Энцелад был сыном богов Урана и Геи и похоронен под вулканом Этна на острове Сицилия.

Тефия, Телесто и Калипсо. На расстоянии 294700 км от центра Сатурна по одной и той же круговой орбите движутся три спутника. Крупнейший из них — Тефия — входит в число наиболее крупных спутников Сатурна, его диаметр составляет 1071 км (см. рис. 12.11). Средняя плотность спутника оценена в $1,0 \text{ г/см}^3$; это означает, что вся Тефия состоит из водяного льда с минимальными примесями. Ледяная поверхность Тефии очень светлая, здесь

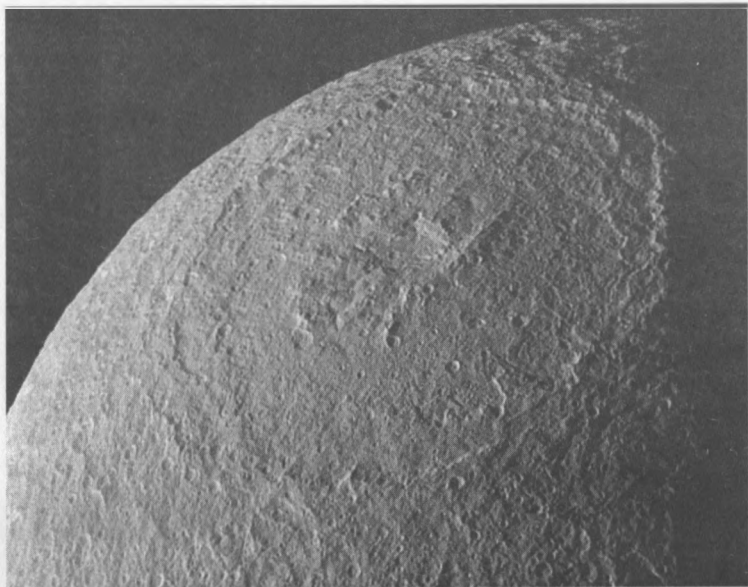


Рис. 12.11

Спутник Сатурна Тефия (космический аппарат «Кассини», НАСА)

видны многочисленные древние импактные кратеры. Один из кратеров Тефии имеет огромные размеры — почти 400 км (диаметр Мимаса). С противоположной стороны спутника имеется гигантская долина Ithaca Chasma, которая вытянута почти на $3/4$ окружности этого небесного тела. Обнаружены следы древней активности: недра ледяного спутника, вероятно, в далеком прошлом расплавленные (содержащие жидкую воду), замерзали, расширяясь. При этом кора лопалась и трескалась, следы этих грандиозных процессов сохранились до настоящего времени. Оценки показывают, что указанные процессы могли примерно на 10% увеличить общую площадь поверхности Тефии.

Для описания особенностей движения трех спутников по одной орбите необходимо введение понятия точек Лагранжа, или точек либрации. Решение задачи — как будут двигаться в пространстве три тела под влиянием собственного тяготения — оказывается чрезвычайно сложным. Тем не менее для нескольких частных случаев Лагранж

нашел устойчивые математические решения, когда конфигурация из трех тел остается стабильной. Оказывается, если одно массивное тело обращается вокруг другого по кругу, то существуют как минимум пять точек, неподвижных относительно этих двух тел, попав в любую из которых третье тело незначительной массы останется там навсегда: действие сил тяготения двух массивных тел заставит третье тело двигаться синхронно с ними и не позволит ему покинуть эту точку.

Рассмотрим точки Лагранжа на примере спутников Сатурна. Пусть спутник Тефия движется вокруг Сатурна по круговой орбите. Существуют точки Лагранжа L_1 , L_2 и L_3 , лежащие на прямой, соединяющей Сатурн и Тефию: точка L_1 располагается между ними, точка L_2 находится на продолжении этой прямой за Тефией, а точка L_3 — на противоположной стороне орбиты Тефии, за Сатурном. Наконец, существуют симметричные относительно этой прямой точки L_4 и L_5 — в 60° впереди и в 60° позади Тефии на ее орбите. Понятно, что точки Лагранжа имеет смысл исследовать во всех системах из двух массивных тел: Земля–Луна, Солнце–Юпитер и т. д. Особенно интересны точки L_4 и L_5 , поскольку движение небольшого тела в окрестности каждой из них происходит устойчиво: случайно попавшее в окрестность одной из этих точек тело остается там навсегда. Небольшие спутники Телесто и Калипсо находятся в точках Лагранжа L_4 и L_5 на орбите Тефии. Размеры Телесто — 30×15 км, Калипсо — всего 19 км. Как и Тефия, это стопроцентно ледяные спутники.

Согласно мифам Тефия — древнейшее божество, титанида — дочь Урана и Геи, Телесто — дочь Тефии, нимфа Калипсо — дочь держателя неба титана Атласа.

Диона, Елена и Полидевк. Спутники Диона, Елена и Полидевк также образуют лагранжеву тройку объектов,двигающуюся по одной и той же орбите с радиусом 377400 км вокруг Сатурна. Заметим, что радиус орбиты этих объектов равен радиусу орбиты Луны. Диона является крупным спутником диаметром 1120 км (втрое меньше Луны). Плотность ее около $1,5 \text{ г/см}^3$, т. е. помимо льда там присутствуют более плотные (силикатные) материалы.

Древняя поверхность Дионы испещрена ударными кратерами, причем здесь видны длинные светлые лучевые системы из материала, выброшенного во время импактных событий далекого прошлого. Одна из версий допускает существование отложений инея в лучах. Диаметр крупнейшего из кратеров на Дионе — около 100 км. Удалось обнаружить протяженную извилистую долину, связанную скорее всего с трещинами в ледяной коре. Маленький спутник Елена размером 36×30 км движется вблизи точки Лагранжа L4, обгоняя Диону в ее движении вокруг Сатурна на 60° . Судя по всему, Елена совершает колебания вблизи точки L4, то удаляясь, то приближаясь к Дионе с амплитудой около 15° и периодом 785 суток. Полидевк, находящийся на той же орбите, имеет размеры около 3 км, совершает либрационные колебания возле точки Лагранжа L5 с периодом 791,3 суток и амплитудой около 20° .

Согласно мифам Диона — богиня дождя, Елена — прекрасная женщина, дочь Зевса, жена царя Менелая, Полидевк (Поллукс) — сын Зевса.

Рея. Крупный спутник, диаметр — 1530 км при средней плотности $1,2 \text{ г/см}^3$. Светлая поверхность (даже темные участки обладают альбедо выше 50%) покрыта огромным количеством древних кратеров (рис. 12.12). Крупнейшие достигают в размерах 300 км, например плоскодонный кратер Тирава. Плотность Реи несколько ниже, чем у Дионы ($1,2 \text{ г/см}^3$). Это значение плотности можно интерпретировать как проявление существования каменного ядра, соответствующего примерно трети диаметра спутника. Рея по многим параметрам похожа на Диону. Здесь наблюдаются яркие прямолинейные образования — структуры, возникавшие в древности, когда здесь мог развиваться криовулканизм и ледяные вулканы извергали воду.

В греческих мифах Рея — дочь Урана и Геи, мать Зевса и многих других богов.

Титан. Самый крупный спутник Сатурна, по размерам превышающий планету Меркурий (диаметр Титана составляет 5150 км). Титан является также и самым плотным спутником Сатурна ($1,9 \text{ г/см}^3$). Магнитного поля у Титана не обнаружено.

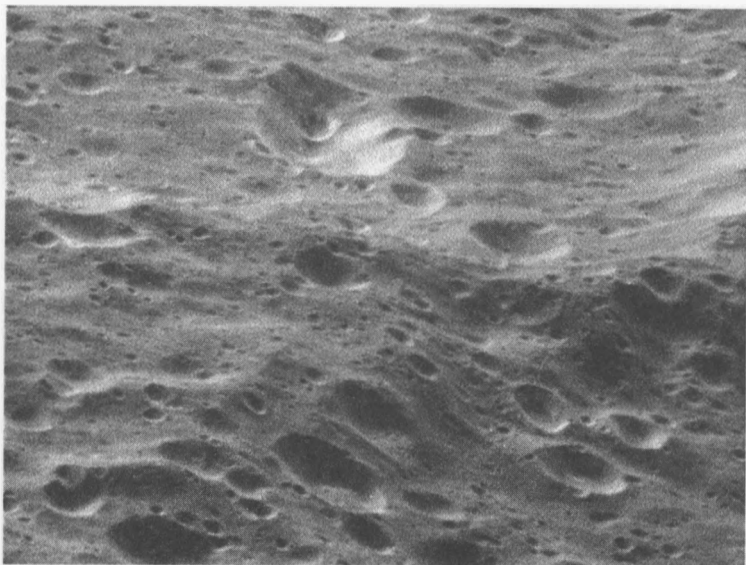


Рис. 12.12

Поверхность спутника Сатурна Реи с расстояния 620 км
(космический аппарат «Кассини», НАСА)

Титан уникален и еще по одному параметру: это единственный спутник в Солнечной системе, обладающий плотной атмосферой. Атмосферное давление у поверхности спутника составляет 1,5 бар (в 1,5 раза больше, чем на Земле). Общая масса атмосферы Титана также в 1,5 раза больше земной, и простирается она ввысь гораздо дальше, чем воздушная оболочка Земли. В составе атмосферы — азот (98,4%) и метан (1,6%). Кроме того, в газовой оболочке Титана обнаружено небольшое количество этана C_2H_6 , пропана C_3H_8 , ацетилен C_2H_2 , аргона Ar , окиси и двуокиси углерода (CO и CO_2), гелия He и некоторых других газов.

Как и для всех других спутников Сатурна, для Титана характерны крайне низкие температуры ($-179^{\circ}C$) на поверхности. Температура верхних слоев атмосферы заметно выше ($-120^{\circ}C$). Плотный туман, не позволяющий непосредственно наблюдать поверхность спутника, отражает и рассеивает лучи Солнца, создавая своеобразный



Рис. 12.13
Поверхность Титана из
замерзших углеводородов
(космический аппарат
«Гюйгенс», ЕКА)

антипарниковый эффект, снижающий температуру поверхности. Поверхность Титана состоит из льда с примесью силикатных пород.

14 января 2005 г. от аппарата «Кассини» отделился посадочный зонд «Гюйгенс» весом 318 кг, в течение почти двух с половиной часов совершивший парашютный спуск в атмосфере Титана и проработавший около трех часов на его грунте (рис. 12.13). Прямые измерения показали, что вблизи поверхности концентрация метана в воздухе выросла до 5%. Судя по звуку, зарегистрированному во время посадки (характерный шлепок), аппарат опустился на грунт, сильно насыщенный жидкостью (консистенция грязи). Этой жидкостью оказался метан, при крайне низких температурах сгу-

щенный до жидкого состояния. Выяснилось, что жидкий метан играет на Титане роль воды, а водяной лед — роль земных горных пород. Съёмки, выполненные во время спуска, показали, что аппарат опустился на равнину, на которой наблюдались ряды длинных дюн высотой до 100 м. Химический состав этих дюн оказался неожиданным: это не лед и не силикатный песок, а комочки (аналоги песчинок) из смерзшихся углеводородов.

На Титане обнаружены огромные запасы углеводородов. В верхней атмосфере под влиянием солнечных ультрафиолетовых лучей идут химические реакции, в результате которых из метана и других легких углеводородов и азота формируются тяжелые органические молекулы. Это

вещество, похожее в концентрированном виде на темные смолы или деготь, осаждается на поверхность спутника в виде холодной аэрозольной мороси, похожей на густой смог (смесь тумана и дыма на Земле). Расчеты показывают, что за тысячу лет на поверхности накапливается слой толщиной в 1 мм, за миллион лет — толщиной в метр. Это означает, что на поверхности Титана можно ожидать многометровых наслоений органических соединений.

Эти наслоения местами нарушаются метановыми дождями. Метановые ручьи и реки смывают органику, обнажая светлые ледяные массивы. Такие реки, впадающие в озера из жидких углеводородов, были обнаружены на снимках идущего на посадку зонда «Гюйгенс» и подтверждены радарными измерениями с космического аппарата «Кассини» (рис. 12.14). Всего на Титане обнаружено более 400 озер из жидкого метана, причем грандиозное озеро Кракен в северном полушарии имеет площадь более 400 тыс. км², что больше крупнейшего озера на Земле — Каспийского моря. Аппарату «Кассини» удалось сфотографировать солнечный блик, отраженный от жидкой поверхности моря Кракена. Береговая линия этого уникального резервуара не менялась по крайней мере с 2007 по 2010 г.

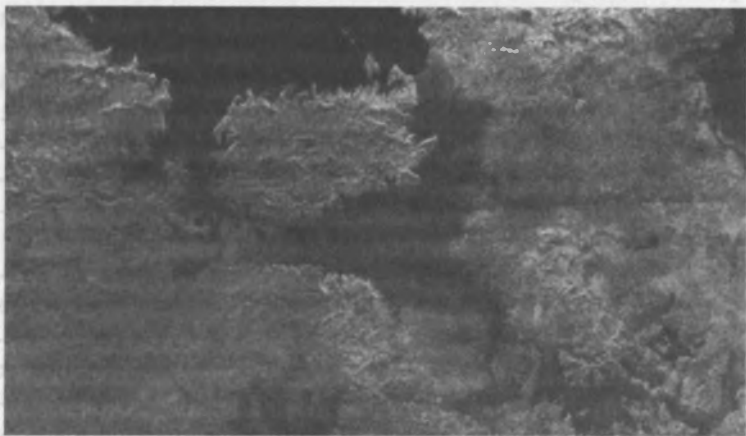


Рис. 12.14

Озера из жидких углеводородов на Титане
(космический аппарат «Кассини», НАСА)

Возерах Титана обнаружен жидкий этан (молярная доля около 75%). Еще 5...10% приходится на метан и пропан, 2...3% — на синильную кислоту, около 1% — на бутан, бутилен и ацетилен. По-видимому, на Титане присутствует круговорот жидкого метана: метановые дожди, стекание по руслам «ручьев и рек» в метановые озера и испарение метана с образованием новых метановых облаков. В этом смысле метан выполняет роль воды на Земле.

На Титане удастся выделить темные и светлые образования, которым даются названия. Привлекает внимание крупный светлый «материк» Ксанадугу, природа которого пока неизвестна. Возможно, это сравнительно молодая поверхность без кратеров, но истинная природа этой области пока неясна.

Общая площадь озер в северном полушарии в 20 раз превышает соответствующую величину в южном полушарии. Этот факт требует объяснений. Одна из версий сводится к тому, что этот эффект связан со сменой времен года. Год на Титане продолжается около 30 лет, каждое из времен года продолжается в среднем 7,5 лет. Вполне возможно, что по мере прогревания летнего полушария могут происходить интенсивное испарение метановых озер, перенос газообразного метана в зимнее полушарие, конденсация, выпадение в виде жидкости в сухие котловины и заполнение здесь зимних озер.

В то же время исследования показывают, что глубина озер Титана может достигать нескольких сотен метров. В летнее время согласно расчетам может испариться около метра жидкости, но вряд ли больше. Поэтому полностью испариться или наполниться за полгода (15 лет) озера не могут.

Другая версия связывает асимметрию Титана с особенностями орбиты Сатурна. Поскольку орбита Сатурна все же обладает некоторым эксцентриситетом, планета движется неравномерно вокруг Солнца. В результате и поток солнечных лучей, падающих на Титан, меняется неравномерно. Во время лета в южном полушарии Титан находится примерно на 11% ближе к Солнцу, чем во время лета в своем северном полушарии. Поэтому лето в север-

ном полушарии длится дольше, но оно менее теплое по сравнению с коротким, но более жарким летом южного полушария. Возможно, именно это обстоятельство приводит к неравномерному испарению жидкостей и выпадению осадков, в результате в северном полушарии оказалось больше углеводородных озер, чем на юге.

Существует также гипотеза о существовании на Титане подповерхностного жидкого водяного либо углеводородного океана.

Наблюдения с зонда «Кассини» свидетельствуют в пользу гипотезы о существовании криовулканизма на Титане (выбросы воды, метана и аммиака из недр планеты). Есть гипотезы, которые говорят, что без выбросов метана из недр трудно объяснить общее его количество в атмосфере, поскольку часть метана должна разлагаться в атмосфере, а часть связываться, переходя в твердое состояние на поверхности. Присутствие в верхних слоях атмосферы паров воды и аммиака также трудно объяснить испарением при крайне низких температурах и может быть связано с вулканическими выбросами. Не исключено, что климат может периодически меняться в связи с деятельностью криовулканов: извержения должны инициировать обильные дожди и заполнение русел потоками углеводородных жидкостей, которые со временем испаряются и исчезают. Съемки с «Кассини» позволили обнаружить на Титане структуру, морфологически напоминающую вулканический купол диаметром около 30 км, имеющий впадину на вершине, похожую на кальдеру, и образования на склонах, напоминающие русла.

На поверхности Титана с помощью радиолокационной съемки обнаружены сложные формы рельефа — образования в форме пчелиных сот, долины с причудливыми краями. Там также открыты аналоги земных карстовых рельефов. На Земле появление таких рельефов связано с геологической деятельностью поверхностных и подземных вод: в результате горные породы растворяются и в них формируются пустоты.

Так, область Лабиринт Сикун на Титане очень похожа с точки зрения морфологии рельефа на области Белого

Каньона в штате Юта (США), холмов Папуа — Новой Гвинеи и провинции Гуанси в Китае. (Сикун — название планеты из романа «Дюна» американского писателя-фантаста Фрэнка Герберта. Названия из «Дюны» стали использоваться для обозначения геологических объектов на Титане: например, темная равнина Chusuk Planitia, названная в честь еще одной фантастической планеты — Чусук.) Если гипотетические карсты Титана, где роль воды играют жидкие этан и метан, действительно похожи на карстовые структуры Земли, то можно ожидать, что в толще поверхностных льдов Титана могут существовать мощные пещерные системы.

Наблюдения с «Кассини» показали, что на Титане существует система ветров, дующих вдоль экватора. Скорость ветра на больших высотах, непосредственно измеренная аппаратом «Гюйгенс», составляла 60 км/ч и медленно уменьшалась по мере приближения аппарата к поверхности спутника.

В целом на Титане обнаружена сложная климатическая система с множеством процессов, нетипичных для Земли в связи с другим химическим составом и температурным режимом. Титан обнаружен первым (открыватель Христиан Гюйгенс, 1655) среди спутников Сатурна.

Термином «титаны» обозначалась в греческой мифологии группа божеств старшего поколения, детей Урана (Неба) и Геи (Земли). Титаны были братьями и сестрами Сатурна (Крона), который тоже был титаном. В этом смысле название спутника выглядит неудачным (предпочтительнее было бы конкретное имя конкретного титана), однако оно исторически закреплено за этим спутником.

Гиперион. Один из самых необычных спутников Сатурна и всей Солнечной системы. Размеры 360×280×226 км, высота орбиты — 1464100 км. Гиперион вращается хаотически (непредсказуемым образом).

Средняя плотность составляет 0,57 г/см³. Столь низкая плотность связана с высокой пористостью: более 40% объема спутника занимают пустоты и поры в его теле. Ударные кратеры на Гиперионе не только многочисленны, но и очень глубоки (рис. 12.15). Высокая пористость

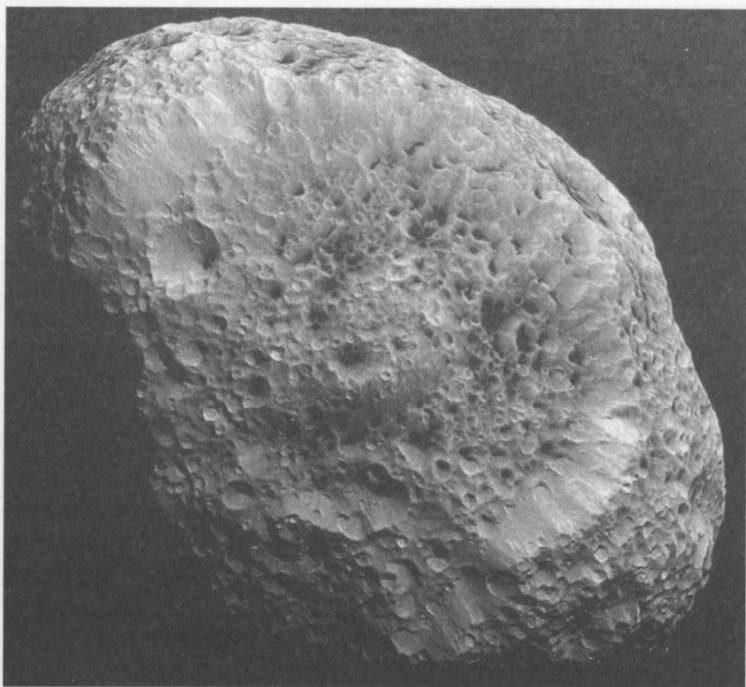


Рис. 12.15

Спутник Сатурна Гиперион (космический аппарат «Кассини», НАСА)

спутника позволяет ему эффективно поглощать мелкий и крупный космический мусор: метеориты проваливаются вглубь спутника, оставляя за собой новые глубокие каверны. Наблюдения с борта «Кассини» показали, что в глубине ледяного спутника, в нижних слоях глубоких кратеров наблюдается некий темный материал. Все это обеспечивает довольно низкое альbedo Гипериона (около 30%). Исследования показали, что поверхностный лед покрыт местами темно-красным органическим материалом неясного происхождения. Обнаружен здесь и «сухой лед» — молекулы замерзшей углекислоты присоединены к другим молекулам, что позволило им сохраниться на Гиперионе. Согласно одной из версий именно утрата углекислоты привела к углублению кратеров и превращению спутника в высокопористое небесное тело.

Не исключено, что другие небольшие спутники Сатурна имеют схожее строение. Пока это неизвестно, поскольку отсутствуют снимки, сделанные с близкого расстояния.

Согласно мифологии Гиперион — титан, сын Урана и Геи.

Япет. Крупный спутник, несколько меньше Реи (диаметр равен 1436 км). Расстояние до центра Сатурна — 3560800 км (почти в 10 раз больше радиуса орбиты Луны). Средняя плотность $1,3 \text{ г/см}^3$. Япет имеет уникальное свойство: две стороны этого спутника сильно различаются по альбедо (более чем в 10 раз): одна сторона светлая (альбедо составляет 60%), другая — очень темная (альбедо близко к 4%). Эти различия были обнаружены еще Джованни Доменико Кассини, открывшим спутник в 1671 г. Япет обладает синхронным вращением. Он летит по своей орбите вокруг Сатурна темной стороной вперед. Темная, покрытая кратерами «передняя» сторона получила название Cassini Regio. Диаметр крупнейшего кратера — почти 600 км, высота вала этого кратера — почти 15 км. Многие кратеры на светлой стороне Япета вблизи границы с темной стороной имеют темное дно. Спектрофотометрические исследования показали, что темная поверхность Япета близка по свойствам к органическим включениям в метеоритах типа углистых хондритов. И темное, и светлое вещество на поверхности переднего полушария спутника имеет красноватый оттенок, в отличие от «заднего» полушария. Но дно у молодых кратеров на темной стороне светлое. Это позволяет предположить, что темно-красный слой имеет толщину не более нескольких метров.

Различия в альбедо разных сторон Япета окончательного объяснения не имеют. Считается, что изначально Япет был светлым (водяной лед), а темное вещество образовано более поздними отложениями. Это может быть метан, извергавшийся из самого Япета, осевший на поверхность вблизи места извержения и потемневший под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца. Наиболее обоснована версия, что темно-красное пылевое вещество было извергнуто вулканами другого спутника — Фебы (либо выбито импактными событиями) — и осело на Япе-

те. В то же время цвет поверхности Фебы сильно отличается от цвета темной стороны Япета.

Одна из версий предполагает, что Япет «набирал» своей передней стороной темный материал из окружающего пространства (например, заряженные частицы из плазмосферы Сатурна). Другой вариант гипотезы заключается в том, что набранные этой стороной спутника заряженные частицы разрушили ярко-белый иней, некогда покрывавший всю поверхность Япета. По-видимому, окончательный ответ будет получен в будущем. Возможно, какое-то значение имеет тот факт, что плоскость орбиты Япета заметно (на $7,5^\circ$) наклонена к плоскости колец Сатурна, в отличие от всех вышеперечисленных спутников, чьи орбиты практически совпадают с этой плоскостью.

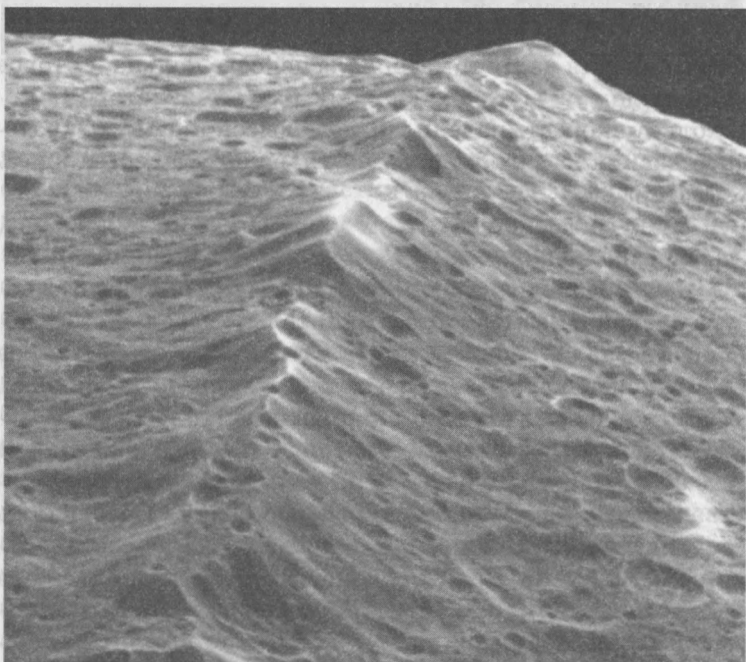


Рис. 12.16

Экваториальный хребет на спутнике Сатурна Япете
(космический аппарат «Кассини», НАСА)

Еще один впечатляющий феномен Япета — уникальный хребет высотой и шириной до 20 км, протянувшийся точно вдоль экватора спутника на 1300 км (почти треть длины экватора). Из-за этого хребта Япет напоминает грецкий орех или целлулоидный мячик, склеенный из двух одинаковых половинок. Происхождение хребта представляет собой загадку (см. рис. 12.16).

Согласно одной из гипотез в прошлом скорость вращения спутника была существенно больше, чем сейчас, при этом экваториальный диаметр был существенно больше полярного за счет центробежных сил. Впоследствии скорость вращения Япета быстро уменьшилась из-за приливных сил со стороны Сатурна, в результате чего спутник приобрел форму, близкую к сферической, площадь его поверхности сократилась, и выдавленные породы образовали хребет вдоль экватора.

Другая гипотеза рассматривает возможность медленного падения на Япет материала некоего кольца, которое в прошлом охватывало спутник над его экватором. Поскольку скорость падения была невысокой, вместо кратеров возникло нагромождение упавшего вещества вдоль экватора.

Япет согласно греческим мифам — один из титанов, сын Урана и Геи.

Феба. Находится на расстоянии 12944000 км от центра Сатурна. Размер этого сравнительно небольшого спутника составляет 220 км. Плотность $1,6 \text{ г/см}^3$ указывает на приблизительное равенство количества силикатов и льда. Феба движется в обратном направлении, плоскость ее орбиты сильно наклонена к экватору Сатурна и к плоскости его орбиты. Существует версия, что Феба — астероид, захваченный гравитацией Сатурна (рис. 12.17). Поверхность спутника достаточно темная. Феба близка по составу астероидам С-типа. Не исключено, что Феба принадлежала так называемому семейству *кентавров* — темным объектам,двигающимся вокруг Солнца по вытянутым орбитам, вероятно, пришедшим во внутренние области Солнечной системы из периферийного образования — пояса Койпера за пределами орбиты Нептуна (об этом подробнее

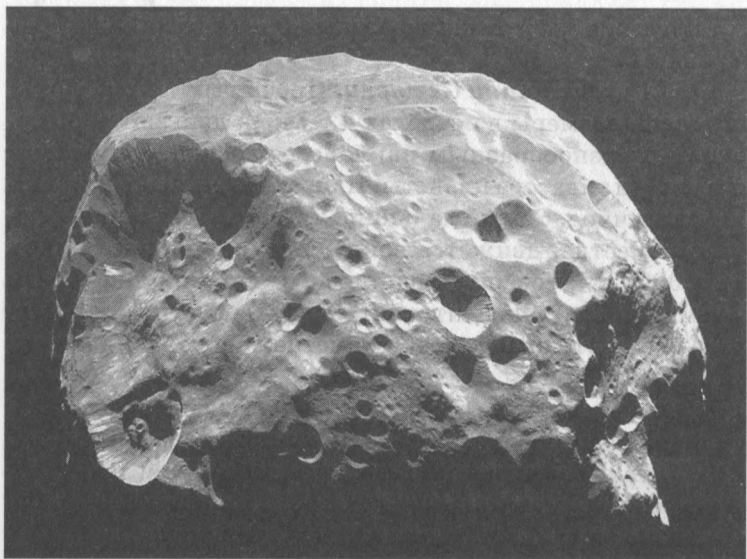


Рис. 12.17

Спутник Сатурна Феба (космический аппарат «Кассини», НАСА)

в лекции 15). Феба покрыта темным веществом толщиной от 300 до 500 м. Яркие участки поверхности связаны с обнажениями льда. В спектре Фебы присутствуют линии поглощения, свидетельствующие о наличии здесь молекул органических веществ, цианидов и азотсодержащих соединений.

Вероятно, именно с Фебой связано открытие, сделанное космическим телескопом «Спитцер» в мае 2009 г., работавшим в инфракрасном диапазоне. «Спитцер» обнаружил еще одно, крайне разреженное кольцо около Сатурна, не наблюдаемое в оптическом диапазоне из-за чрезвычайно низкой плотности. Кольцо, еще не получившее названия, начинается примерно в 6 миллионах километров от Сатурна и тянется еще на 12 миллионов километров. Оно состоит преимущественно из частиц пыли и льда, температура которых не превышает 80 К. В центре нового кольца располагается Феба. Было высказано предположение, что именно этот спутник является основным источником материала для обнаруженной структуры.

Согласно греческой мифологии Феба — титанида, дочь Урана и Геи.

Малые спутники Сатурна. Прочие спутники Сатурна малы (размеры в пределах 4...7 км), двигаются по орбитам с разнообразным наклоном плоскости орбиты к плоскости экватора планеты. Направление вращения также различное. Самый дальний спутник, получивший название Бестла, движется вокруг Сатурна на расстоянии 19650000 км, совершая один оборот за 1052 дня (почти 3 земных года). Эксцентриситет орбиты Бестлы составляет 0,795 — это практически кометная орбита (сильно вытянутый эллипс).

В целом система Сатурна, включая гигантскую планету, кольца и многочисленные спутники, в том числе спутник Титан, обладающий плотной атмосферой, представляет собой сложную физическую систему, многие параметры которой пока лишь начинают изучаться.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные отличия Сатурна и Юпитера?
2. Какие существуют гипотезы, объясняющие избыточное внутреннее тепло Сатурна?
3. Чем можно объяснить существование щелей (делений) в кольцах Сатурна?
4. Опишите основные характеристики колец Сатурна.
5. Опишите основные характеристики Титана.
6. Как можно объяснить различия в альbedo разных полушарий Януса?
7. Каковы основные гипотезы, объясняющие феномен гейзеров Энцелада?
8. Чем объясняется несферичность Сатурна?
9. Что такое спутники-пастухи? Почему они так называются?
10. Сравните БКП на Юпитере и на Сатурне.
11. Существует мнение, что сегодняшний Титан напоминает древнюю Землю. Укажите сходство и различия двух небесных тел.



ПЛАНЕТА УРАН

Уран — первая из планет, которую почти невозможно увидеть невооруженным глазом (см. рис. 13.1). Планета была случайно открыта 13 марта 1781 г. английским астрономом (бывшим немецким полковым музыкантом) Вильямом Гершелем при наблюдении в телескоп области неба вблизи эклиптики.

Уран назван в честь древнего бога неба из греческой мифологии.

Движение и вращение. Уран движется вокруг Солнца по слабоэллиптической орбите с эксцентриситетом 0,04634. Среднее расстояние Урана от Солнца составляет 19,18722 а. е., или приблизительно 2870400000 км (менее 3 млрд км). Средняя скорость движения по орбите составляет 6,8 км/с. В результате Уран совершает полный оборот вокруг Солнца за 84,048 земных лет, или почти 30700 земных суток — больше средней продолжительности жизни человека.

Уран обладает уникальными параметрами вращения вокруг своей оси. Плоскость его экватора наклонена к плоскости орбиты на $97^{\circ}55'$. Угол наклона, превышающий 90° , означает, что планета вращается в сторону, противоположную ее орбитальному обращению, как Венера. Правда, Уран, в отличие от Венеры, вращается в обратную сторону почти «лежа на боку». Про него в шутку говорят, что он «катится» по орбите. Поскольку ось вращения планеты в пространстве сохраняет свое положение, подобно оси раскрученного гироскопа, на разных участках орбиты

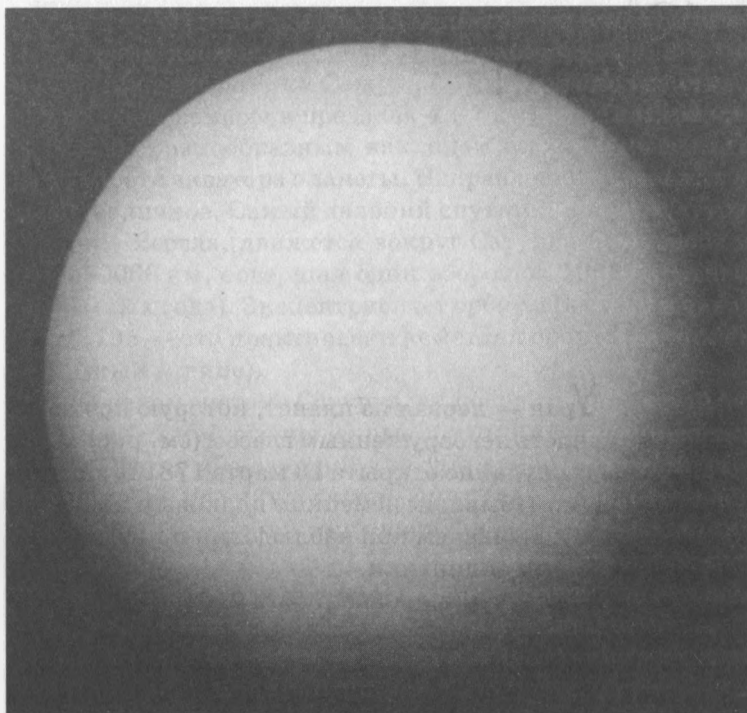


Рис. 13.1

Планета Уран (космический аппарат «Вояджер-2», НАСА)

Урана чередование дня и ночи происходит существенно по-разному. При этом движение Солнца по небу оказывается существенно различным для разных широт.

На полюсах полярная ночь и полярный день длятся по 42 года, на широтах 60° — по 28 лет, на широтах 30° — по 14 лет.

Причина аномального наклона оси вращения к плоскости орбиты достоверно неизвестна. Одна из версий допускает, что в прошлом произошло касательное столкновение Урана с массивным небесным телом. Вторая версия, подтвержденная численными расчетами на суперкомпьютере в 2009 г., предусматривает возможность гравитационного влияния со стороны массивного спутника Урана, который в прошлом был «потерян» планетой.

Уран, как и другие планеты-гиганты, обладает дифференциальным вращением. На широтах 70° период вращения составляет 14 ч, на широте 33° заметно больше — 16,2 ч.

Исследования Урана. Из-за своей удаленности от Земли Уран чрезвычайно сложен для исследований. Максимальный угловой диаметр Урана составляет всего $3,9''$. Если учесть, что до недавнего времени разрешение в $1''$ было очень неплохим показателем для большинства наземных телескопов, понятно, что увидеть какие-то детали на поверхности планеты, даже если бы они там были, практически невозможно. Известно, что Уран имеет зелено-голубой цвет из-за сильного поглощения света в красной части спектра. Указанное поглощение связано с присутствием в атмосфере Урана небольшого количества метана. Неясные неконтрастные полосы иногда неуверенно наблюдались на маленьком диске планеты, иногда никаких деталей обнаружить не удавалось.

Основной объем имеющихся данных был получен во время единственного пролета вблизи Урана космического аппарата «Вояджер-2» (США), который, совершив гравитационный маневр вблизи Юпитера, а затем Сатурна, был перенаправлен к Урану. Его максимальное сближение с Ураном состоялось 24 января 1986 г. Удалось провести съемки планеты и нескольких ее спутников. В обозримом будущем новые миссии к Урану не планируются.

Современные крупные наземные и космические телескопы позволяют обнаружить в атмосфере Урана формирование огромных долгоживущих вихрей (циклонов) и скоплений облаков.

Внутреннее строение и магнитное поле. Анализируя движение спутников планеты, можно, используя третий закон Кеплера, определить массу Урана. Это было сделано уже давно. Масса Урана $86,625 \cdot 10^{24}$ кг, что составляет 14,5 масс Земли. Экваториальный диаметр планеты 51118 км, полярный диаметр несколько меньше — 50540 км на уровне атмосферного давления, равного 1 бар. Средняя плотность Урана оказалась лишь немного больше плотности воды ($1,3 \text{ г/см}^3$).

Что касается внутреннего строения планеты, то оно окончательно не известно. Имеющиеся данные допускают различные интерпретации. Основная модель, распространенная на сегодняшний день, предусматривает следующую структуру Урана.

Ядро Урана состоит из металлов, силикатов, льдов аммиака и метана и занимает около 0,3 радиуса планеты. Температура в центре составляет около 7200 К (что ниже, чем в недрах Юпитера и Сатурна, но больше, чем в ядре Земли). Давление здесь должно составлять около 8 млн бар (втрое меньше, чем в центре Сатурна).

Над ядром располагается мантия из смеси аммиачно-метанового и водяного льдов. В планетологии льдами принято называть распространенные в космосе соединения водорода, углерода, кислорода и азота (вода H_2O , метан CH_4 и аммиак NH_3). Термин связан с тем, что на уровне верхней кромки облачного слоя в атмосферах планет-гигантов эти соединения превращаются в лед — твердые кристаллики. В недрах планет, ввиду быстро нарастающих с глубиной давления и температуры, смесь воды, метана и аммиака находится в газожидком состоянии. Мантия простирается до уровня 0,7 радиуса планеты.

Выше находится газовая оболочка из водорода, гелия и метана, их соотношение оценено как 85,7:12:2,3. Очень холодные верхние слои этой оболочки могут быть условно названы атмосферой, хотя резкой границы тут нет. Есть указания на присутствие над облаками Урана дымки из кристалликов замерзшего метана. Кроме того, обнаружен в небольших концентрациях ацетилен, образующийся в результате разложения (*фотолиза*) метана под действием солнечного ультрафиолетового излучения.

В спектрах Урана отсутствуют признаки аммиака в верхних слоях атмосферы, где он выморожен из-за крайне низких температур — существенно ниже, чем над облаками Юпитера и Сатурна. На уровне давления около 0,1 бар (что выше верхней кромки облаков) температура оказалась равной 53 К (-220°C). Нептун, находясь в 19 раз дальше от Солнца, чем Земля, получает на единицу поверхности в 370 раз меньше солнечного тепла, а в сумме,

с учетом огромной площади поверхности, в 140 раз меньше, чем наша планета.

Измерения потока излучения от Урана показали, что он излучает ровно столько же, сколько получает от Солнца (находится в равновесном состоянии с Солнцем). Эффективная температура Урана составляет всего 56...58 К. Это означает, что Уран не имеет собственных внутренних источников тепла, как Юпитер, Сатурн и Нептун.

Основная модель, которая объясняет, почему Юпитер, Сатурн и Нептун излучают больше, чем получают от Солнца, уже рассматривалась выше и сводится к следующему. Считается, что в результате фазовых переходов водорода, находящегося в недрах планет под гигантским давлением, гелий становится нерастворимым в водороде. В результате он, будучи более тяжелым элементом по сравнению с водородом, должен просачиваться к центру масс (ядру планеты), вытесняя более легкий компонент (водород). Этот процесс гравитационной дифференциации, связанный с движениями в недрах планет-гигантов, должен согласно расчетам приводить к выделению большого количества тепла. Согласно общей логике этот процесс должен действовать и на Уране. Это предположение входит в противоречие с фактом отсутствия потока дополнительного тепла из недр планеты. Считать, что этот процесс на Уране уже прекратился, сложно, поскольку соотношение гелия и водорода на Уране и на Юпитере одинаково.

Другая версия связана с возможными теплоизолирующими особенностями атмосферы, которая, вероятно, «не выпускает» по каким-то причинам тепловой поток наружу.

Еще одна странная деталь, касающаяся физики атмосферы Урана, — равенство температур на экваторе и на полюсах. Отчасти это может быть связано с необычным наклоном оси вращения планеты, отчасти — со специфическими метеорологическими процессами в атмосфере. В частности, рассматривается гипотеза о влиянии большого количества водных паров, которые за счет баланса процессов конденсации и парообразования приводят к регулированию (выравниванию) температуры на разных широтах.

Свой вклад должна вносить и активная циркуляция атмосферы.

Космический аппарат «Вояджер-2» обнаружил сложное (отличающееся от дипольного) магнитное поле Урана. На уровне видимой верхней кромки облаков индукция магнитного поля составляет примерно 0,23 Гс, что близко к значению для Земли.

Структура поля отличается от земного. С некоторым приближением его можно считать дипольным, если сместить ось магнитного диполя на 8000 км ($1/3$ радиуса) к северному полюсу от центра планеты и наклонить к оси вращения на 59° .

Специфическая структура магнитного поля Урана может быть объяснена большим содержанием воды и аммиака, которые становятся электропроводящими при меньших давлениях (дальше от центра планеты), чем металлические водород и гелий на Юпитере. Это означает, что свой вклад в формирование магнитного поля вносят слои, гораздо дальше удаленные от центра планеты, чем у Юпитера и Сатурна, — вероятно, магнитное поле генерируется уже в газожидкой мантии, сравнительно недалеко от видимой поверхности.

Наличие своеобразного магнитного поля Урана приводит к гипотезе о большом содержании в мантийных слоях водяных паров под большим давлением. Ранняя версия о существовании здесь не газожидкой мантии, а горячего водяного океана глубиной до 10000 км, не подтверждается наблюдениями формы планеты. При наблюдаемых значениях сплюснутости и скорости вращения Урана идея о существовании жидкого океана выглядит невозможной: в этом случае из-за центробежных сил сплюснутость Урана была бы значительно большей. Поэтому основная теория, описывающая внутреннее строение Урана, предусматривает присутствие здесь большого количества водяных паров, но отсутствие жидкого водяного океана. Тем не менее на наличие большого количества воды (хотя бы и в парообразном состоянии) указывает повышенная плотность планеты (по сравнению, например, с Сатурном).

Следует заметить, что спектральные наблюдения непосредственного присутствия воды (водяного льда) на верхней кромке облаков не показали.

Кольца и спутники. В 1977 г. наблюдения Урана с борта самолета во время покрытия Ураном одной из звезд было обнаружено небольшое ослабление свечения этой звезды вблизи Урана, что было интерпретировано как действие полупрозрачных колец, охватывающих Уран. Впоследствии кольца Урана были сфотографированы в инфракрасном диапазоне.

Долгое время были известны 9 колец планеты, которые находятся вблизи от облачного слоя, начинаясь на высоте 16300 км над облаками (от 41850 до примерно 51160 км от центра Урана). Все кольца занимают диапазон высот в пределах примерно 9300 км. Порядок обозначений колец от внутренних к внешним таков: 6, 5, 4, α , β , η , γ , δ , ϵ . Самое узкое кольцо — третье снаружи, обозначенное буквой γ , имеет ширину всего 600 м. Последнее, внешнее кольцо имеет несколько асимметричную форму и обозначается греческой буквой ϵ ; его ширина максимальна среди всех колец планеты — 32 км. Средний радиус этого кольца около 51150 км, что очень близко к величине радиуса Урана.

Наблюдения с помощью космического телескопа «Хаббл» и наземного 10-метрового телескопа «Кек» привели к подтверждению существования еще одного (внутреннего) кольца с радиусом около 40000 км. Оно в тысячу раз темнее кольца ϵ . С учетом этого открытия, можно считать, что кольца начинаются уже на высоте около 14000 км над облачным слоем Урана.

Если кольца Сатурна широкие и разделены сравнительно узкими делениями (щелями), то кольца Урана, наоборот, очень узкие, и разделены широкими интервалами. Общая масса колец невелика: материала, содержащегося в них, хватило бы на образование микроскопического спутника с диаметром около 15 км (вещества в кольцах Сатурна в 1 тыс. раз больше). Вещество колец Урана очень темное (альbedo как у сажи). Наблюдать их крайне сложно не только с Земли, но даже со спутников Урана.

Предполагается, что вещество колец приобрело темный цвет под влиянием постоянной бомбардировки заряженными частицами, присутствующими в радиационных поясах Урана. В отличие от колец Сатурна, где много пылевой компоненты, кольца Урана состоят из многочисленных глыб с характерным размером около 10 м. Фрагментов меньших размеров (порядка 10 см) существенно меньше.

В дневнике Вильяма Гершеля есть запись, относящаяся к 1789 г. Здесь изображен Уран с кольцами и подписью: «Кольцо короткое, не такое, как у Сатурна». Технические средства того времени не позволяли увидеть кольца Урана. Есть предположение, что два с лишним столетия назад кольца могли быть значительно более мощными и яркими — только в этом случае Гершель мог их заметить. Это означает, что, если запись в дневнике не ошибка и не фальсификация, то свойства колец могут быстро (за несколько десятилетий) существенно менять свои свойства. Эта гипотеза еще ждет своих доказательств.

Помимо колец, Уран имеет систему спутников. По состоянию на начало 2011 г. их известно 27. В их числе 4 крупных, открытых еще в XVIII–XIX вв. Традицию называть спутники Урана именами персонажей пьес Шекспира заложил Гершель, открывший в 1787 г. два крупнейших спутника планеты и предложивший их названия — Оберон и Титания. Эту традицию продолжил американский астрофизик Джерард Койпер, открывший в 1948 г. пятый спутник — Миранду.

Группа небольших спутников была открыта во время миссии космического аппарата «Вояджер-2». Затем открытия были возобновлены на рубеже XX–XXI вв.

Принято выделять среди спутников Урана так называемые главные — наибольшие по массе небесные тела. К ним относят пять объектов: Миранда, Ариэль, Умриэль, Титания и Оберон. Остальные обычно называются малыми спутниками Урана. Они образуют две группы — внутреннюю (13 объектов) и внешнюю (9 объектов, рис. 13.2).

Корделия и Офелия (малые спутники, открыты в 1986 г. аппаратом «Вояджер-2») движутся вокруг Урана вблизи

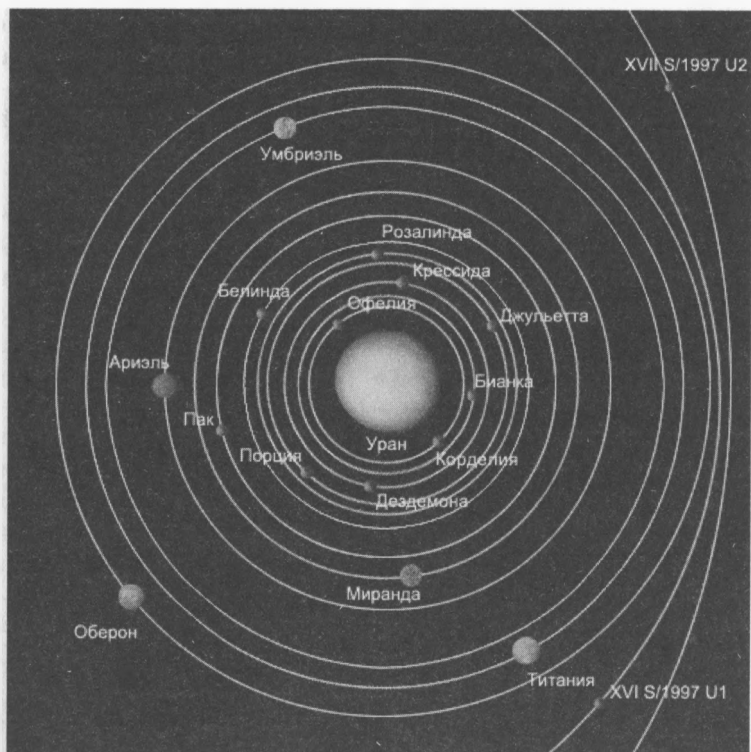


Рис. 13.2
Система спутников Урана

внешнего кольца ϵ (пастухи кольца), с внутренней и внешней его сторон. Средние радиусы орбит спутников составляют соответственно 49800 км и 53800 км. Размеры спутников невелики — 40 и 43 км, плотность оценена в $1,3 \text{ г/см}^3$ (лед с вкраплениями силикатов), информация о параметрах вращения этих спутников отсутствует.

Корделия — дочь короля Лира, Офелия — возлюбленная принца Гамлета (персонажи пьес В. Шекспира «Король Лир» и «Гамлет»).

Бианка, Крессиды, Дездемона, Джульетта, Порция, Розалинда, Купидон, Белинда, Пердита — группа малых спутников, располагающихся за пределами системы колец в диапазоне радиусов орбит от 59200 км до 76400 км.

Их плотность — $1,3 \text{ г/см}^3$, размеры от 20 км (Пердита) до 135 км (Порция). Все они движутся в плоскости экватора Урана (наклон орбит не превышает долей градуса) по практически круговым орбитам. Характеристики вращений вокруг собственных осей неизвестны.

Пак и Маб. Спутник на орбите с радиусом 86000 км. Размеры превышают габариты всех предыдущих спутников: его диаметр равен 162 км. Поверхность Пака отличается очень низким альбедо (0,02...0,03), как и кольца Урана. Согласно основной гипотезе длительная бомбардировка заряженными частицами приводит к разрушению присутствующих здесь молекул метана и образованию частиц углерода, который придает поверхности черный цвет. Если некоторые темные спутники Юпитера слегка красноватые, то черный цвет Пака и колец Урана не имеет цветовых оттенков. Несмотря на сравнительно небольшие размеры, Пак отличается правильной сферической формой (подобно близкой по размерам Фебе около Сатурна). На поверхности Пака, сфотографированной «Вояджером-2», видны ударные кратеры, включая один, который имеет диаметр, близкий к четверти диаметра самого спутника.

Пак — злой дух (эльф) из комедии В. Шекспира «Сон в летнюю ночь».

Еще один малый (диаметр 32 км) ледяной спутник на орбите с высотой 97700 км назван именем Маб (королева фей, упоминавшаяся в пьесе В. Шекспира «Ромео и Джульетта»). Спутник замыкает внутреннюю группу из 13 малых спутников, занимающих пространство от внешнего кольца до примерно 100000 км от центра Урана.

Миранда. Этот спутник, названный Койпером в честь героини пьесы В. Шекспира «Буря», сравнительно подробно исследован «Вояджером-2» в 1986 г. Он отличается по своим свойствам от предыдущих спутников. Миранду относят к группе главных спутников Урана, поскольку он существенно крупнее многочисленных малых спутников (диаметр 472 км). Плоскость орбиты Миранды наклонена на $4,34^\circ$ к плоскости экватора Урана. Среднее расстояние до центра Урана — 129900 км (втрое меньше радиуса

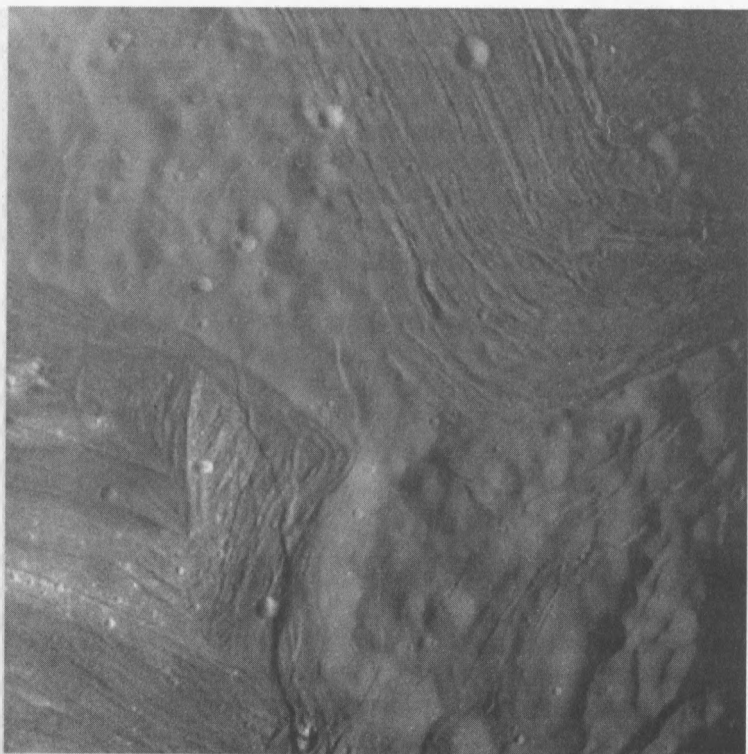


Рис. 13.3
Сложные ландшафты Миранды
(космический аппарат «Вояджер-2», НАСА)

орбиты Луны). Миранда обладает синхронным вращением. Поверхность спутника несет на себе следы мощной тектонической деятельности, причем некоторые структуры трудно объяснить известными геологическими процессами (рис. 13.3).

На Миранде привлекает внимание необычное образование (*шеvron*) размером 140×200 км в виде почти правильной трапеции вблизи южного полюса. На нем нет ни одного ударного кратера, что свидетельствует об относительной молодости этого района. Шеврон образован системой полос в виде параллельных гряд высотой до 4,6 км, сходящейся с аналогичной системой гряд почти под прямым

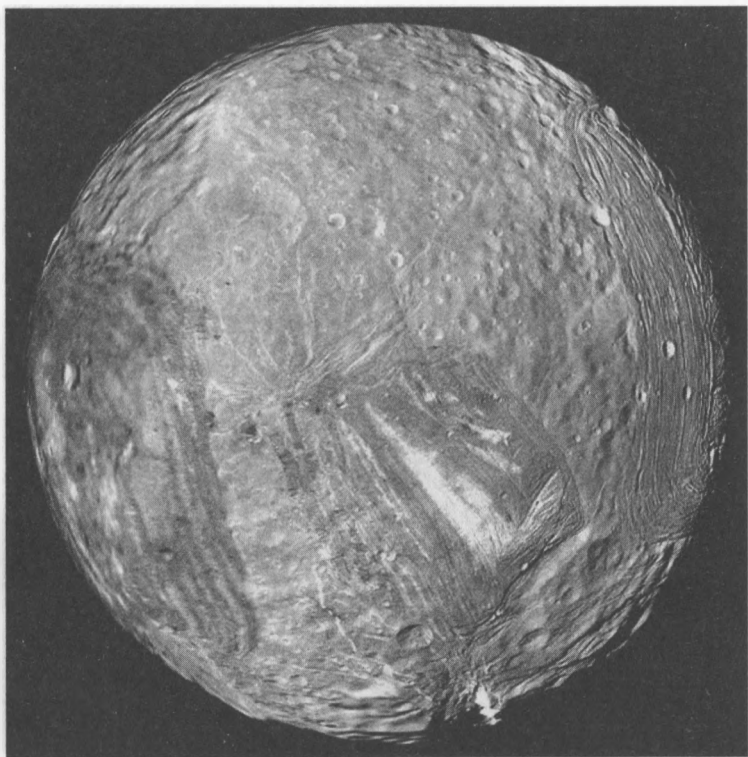


Рис. 13.4

Южные полярные области Миранды
(космический аппарат «Вояджер-2», НАСА)

углом. Шеврон продолжен глубоким (до 20 км) разломом с очень крутыми склонами (рис. 13.4).

Еще одно похожее образование, расположенное вблизи экватора, отличающееся большей шириной чередующихся светлых и темных полос, имеет форму пятиугольника, превышающего площадь шеврона в 5 раз. Для этой структуры предложено название «Circi Maximi» (большой стадион у древних римлян).

На диаметрально противоположной стороне спутника обнаружено еще одно подобное образование — второй «стадион». Здесь видны 20 параллельных горных гряд шириной 5...7 км, разделенные долинами такой же ширины.

Эта система неожиданно поворачивает под прямым углом, как и в случае шеврона.

На Миранде обнаружены линейные (прямые) структуры, напоминающие сбросы — ледяные стены (обрывы), разделяющие участки разной высоты. Высота стен составляет 2...4 км. На снимках видны также ледяные горы и трещины с большими (в несколько километров) перепадами высот.

Для объяснения природы поверхности Миранды предложен ряд гипотез. Одна из них предполагает, что Миранда была расколота во время мощного столкновения. Часть выбитого вещества могла упасть на Уран, часть сформировала обновленный спутник. Один из вариантов гипотезы — части Миранды не разошлись, а соединились, обнажив в некоторых местах внутреннюю структуру небесного тела. Еще одна гипотеза рассматривает вариант, связанный с неравномерным разогревом недр спутника, в результате чего локальное плавление коры обнажило плиты, всплывшие на поверхность. Средняя плотность Миранды оценена в $1,2 \text{ г/см}^3$. Не исключено, что это свойство связано с большими пустотами (трещинами, разломами) в теле спутника, что как раз и объясняется неплотным прилеганием частей небесного тела после катастрофического столкновения. В целом проблема поверхности Миранды далека от разрешения.

Ариэль, Умбриэль, Титания и Оберон. Вместе с Мирандой эти крупные спутники образуют группы главных спутников Урана. Каждый из них превышает 1 тыс. км в диаметре (соответственно 1158, 1170, 1578 и 1523 км) и обладает синхронным вращением. Есть указания, что эти спутники несколько различаются по плотности, которая оказалась заметно выше плотности рассмотренных выше 13 малых спутников и Миранды (соответственно 1,7; 1,4; 1,7; 1,6 г/см^3). Это означает, что в недрах этих небесных тел содержится больше тяжелых элементов. Вероятно, они имеют ядра из гидратированных силикатов, составляющие больше половины диаметра спутников.

Поверхности этих спутников несут на себе следы древних метеоритных бомбардировок. Температура на поверхности всех спутников Урана крайне низка — около

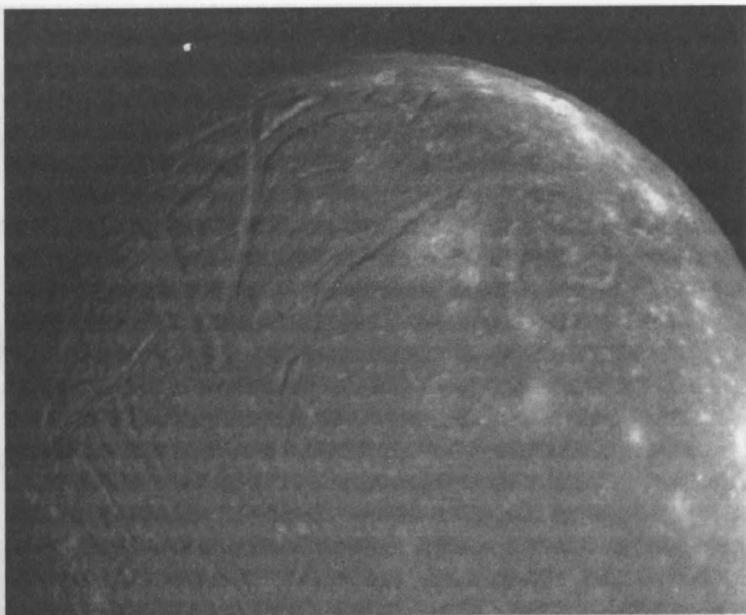


Рис. 13.5

Спутник Урана Ариэль (космический аппарат «Вояджер-2», НАСА)

–210...–220°C. При таких температурах водяной лед, доля которого превышает половину состава этих небесных тел, приобретает свойства (прочность) камня и является одним из основных минералов, слагающих кору спутников.

Несмотря на низкие температуры и относительную удаленность от Урана (высота орбиты Ариэля — 190900 км, Оберона — 583500 км от центра планеты), на поверхности этих спутников присутствуют следы мощных древних тектонических процессов, помимо ударных кратеров. Некоторые кратеры заполнены темным веществом, напоминающим застывшие потоки жидкости. Возможно, сквозь образовавшиеся трещины и разломы в ледяной коре в кратере появлялась «грязная» вода, несущая частицы силикатов либо органических веществ. При застывании формировалась ровная темная поверхность (рис. 13.5). Не исключено, что, помимо импактных событий, мощные внутрен-

ние силы и потоки тепла также разрушали и расплавляли ледяную кору спутников.

На поверхности Титании (самого крупного спутника Урана) кратеров заметно меньше, чем, например, на Обероне. Это означает, что некие процессы привели к их разрушению. На Титании видны системы рифтов (долин с крутыми краями), а также системы извилистых долин, напоминающих русла рек, длиной до 1000 км. Это означает, что какие-то силы в прошлом приводили к интенсивному плавлению льда, формированию мощных потоков жидкости, возможно, связанных с выдавливанием воды через трещины в ледяной коре, подобно ситуации на Европе. В пользу этой гипотезы свидетельствуют результаты поляриметрических измерений светлых отложений на поверхности Титании. Этот эксперимент показал, что светлый материал имеет пористый характер. Наиболее вероятное объяснение: это водяной иней, сконденсировавшийся после прорыва водяных паров через трещины в ледяной коре.

Отсутствие крупных импактных кратеров, которые, несомненно, имели место в далеком прошлом Титании, говорит о том, что активные процессы на этом спутнике в древности изменили кору, переплавили ее, в результате чего следы наиболее древних ударов не сохранились (см. рис. 13.6).

Признаки мощных геологических процессов нарастают от Оберона к Миранде (что естественно по мере приближения к Урану и усилению приливных воздействий с его стороны). Особняком стоит Умбриэль: здесь наблюдается множество древних кратеров, многократно наложенных друг на друга. Этот факт можно рассматривать как признак отсутствия тектоники в коре спутника: главным рельефообразующим процессом здесь явились импактные события. На очень темной поверхности Умбриэля нет светлых выбросов, обычных для других спутников (см. рис. 13.7). Здесь могла сказаться либо интенсивная обработка со стороны потоков заряженных частиц на том расстоянии от Урана, где движется Умбриэль, либо вся поверхность спутника представляет собой равномерно перемешанный лед с темным силикатным веществом. В последнем случае цвет

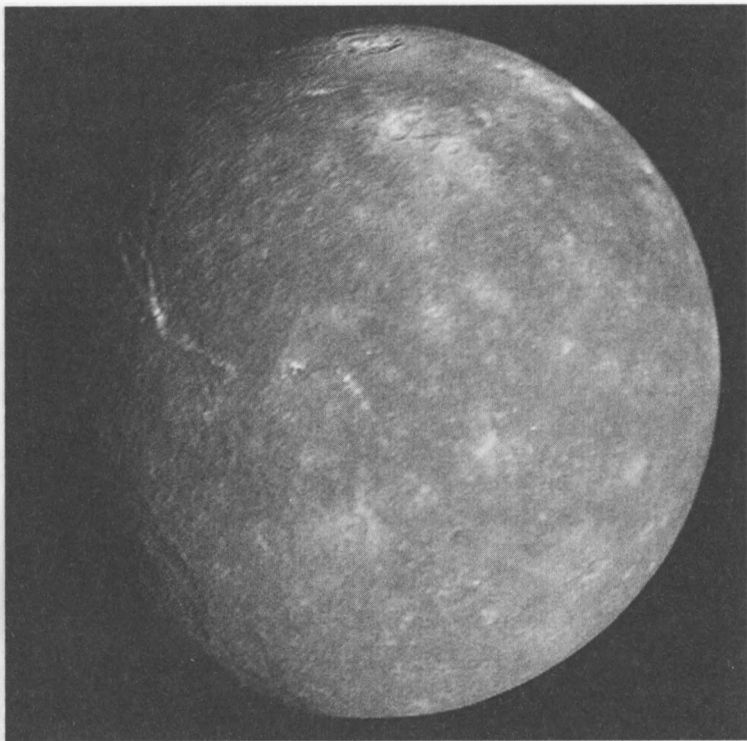


Рис. 13.6

Спутник Урана Титания (космический аппарат «Вояджер-2», НАСА)

выбросов не отличается от цвета окружающего пространства. В то же время обнаружено светлое дно у некоторых крупных кратеров, что обычно интерпретируется как обнажения слоев чистого льда.

Активные процессы, видимо, происходили в прошлом и на Ариэле. Здесь на четырех снимках «Вояджера-2» видны рифтовые долины глубиной до 10 км, длиной в сотни километров и шириной до 30 км. Ветвящиеся системы долин образуют целую сеть притоков. По-видимому, локальные плавления льда происходили и здесь.

Основная версия, объясняющая существование внутренних источников тепла спутников Урана, связана с приливным трением, вызванным резонансными сближения-

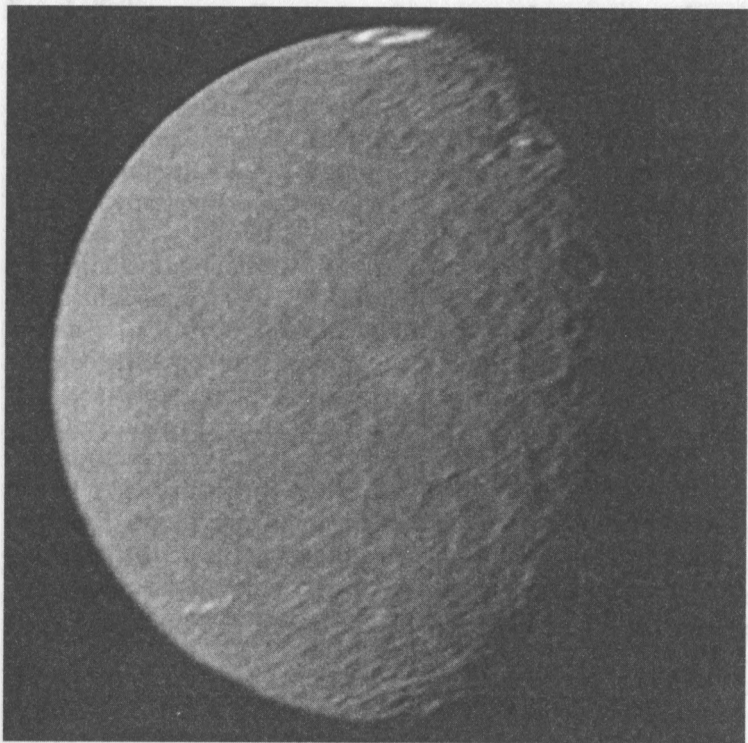


Рис. 13.7

Спутник Урана Умбриэль (космический аппарат «Вояджер-2», НАСА)

ми друг с другом. Проблема состоит в том, что в настоящее время резонансы в движении Ариэля с движением Умбриэля и Миранды не наблюдаются. Возможно, они были в прошлом.

Потоки жидкости, протопившие следы в ледяной коре главных спутников Урана, связаны, несомненно, с движением льда, возможно, в смеси с жидкими аммиаком и метаном, которые обеспечивали пластичность водяного льда. Жидкая вода без примесей при температурах близких к -210°C , должна была бы стремительно замерзнуть.

Ариэль и Умбриэль открыты У. Ласселом в 1851 г., названия (имена духов) взяты из пьесы А. Поупа («Похищение локона»).

Франциско, Калибан, Стефано, Тринкуло, Сикоракса, Маргарита, Просперо, Сетебос, Фердинанд. За орбитой Оберона наблюдается большой разрыв в орбитах спутников шириной почти в 3500000 км. Далее, начиная с расстояния до Урана 4276000 км, расположены орбиты второй группы малых спутников Урана, начиная со спутника Франциско диаметром всего 12 км. В эту группу входят 9 спутников. Самый крупный из них — Сикоракса (диаметр 190 км), самый дальний — Фердинанд (большая полуось его орбиты составляет 20921000 км, период обращения вокруг Урана — 2887 земных суток, или почти 8 земных лет. Плотность спутников этой группы составляет $1,5 \text{ г/см}^3$, т. е. доля силикатов в ледяной массе несколько меньше, чем в недрах главных спутников, но больше, чем в спутниках первой группы малых спутников.

Вполне возможно, что в систему Урана входят и иные, пока не зарегистрированные малые спутники. Система Урана остается малоисследованной ввиду крайней удаленности и явной недостаточности единственного опыта изучения планеты с помощью космических аппаратов (уже ставшая давней миссия «Вояджера-2»).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как можно объяснить отсутствие избыточного внутреннего тепла Урана, в отличие от Юпитера и Сатурна?
2. Постройте теорию смены дня и ночи на Уране в течение одного его оборота вокруг Солнца.
3. Какие гипотезы объясняют аномальный наклон оси вращения Урана?
4. Сравните кольца Сатурна и Урана.
5. Чем объясняется темная поверхность Умбриэля?
6. Почему отвергнута гипотеза о водяном океане на Уране?
7. Как можно попытаться объяснить равенство температур на полюсе и экваторе Урана?
8. Что такое шеврон?



ПЛАНЕТА НЕПТУН

Нептун — последняя крупная планета Солнечной системы (см. рис. 14.1). Она была открыта в 1846 г. В результате анализа движения Урана французский астроном Урбен Леверье вычислил местоположение на небе неизвестной восьмой планеты, которая своим тяготением отклоняла Уран от движения по невозмущенной орбите. На основе этого прогноза немецкие астрономы И. Галле и д'Арре обнаружили планету, получившую название Нептун в честь римского бога морей. Позднее выяснилось, что Нептун наблюдался и ранее, однако принимался за звезду.

Движение и вращение. Нептун движется по слабовытянутой орбите (эксцентриситет, равный 0,01129, существенно меньше, чем у орбиты Земли), на среднем расстоянии 30,021 а. е. (4491100000 км) от Солнца. Один оборот вокруг Солнца Нептун совершает за 164,491 земных лет, двигаясь со средней скоростью около 5,4 км/с. Плоскость орбиты Нептуна наклонена на $1,8^\circ$ к плоскости эклиптики (земной орбиты). Наклон экватора к плоскости орбиты составляет $29,6^\circ$, что больше, чем у Земли, Марса и Сатурна, и должно приводить к заметному эффекту смены времен года.

Период вращения Нептуна вокруг оси, измеренный по движению его магнитного поля, составляет 16 ч. Этот период относится к глубинным слоям планеты, где расположены источники поля. Но вращение видимого облачного слоя отличается неоднородностью. Наблюдающийся

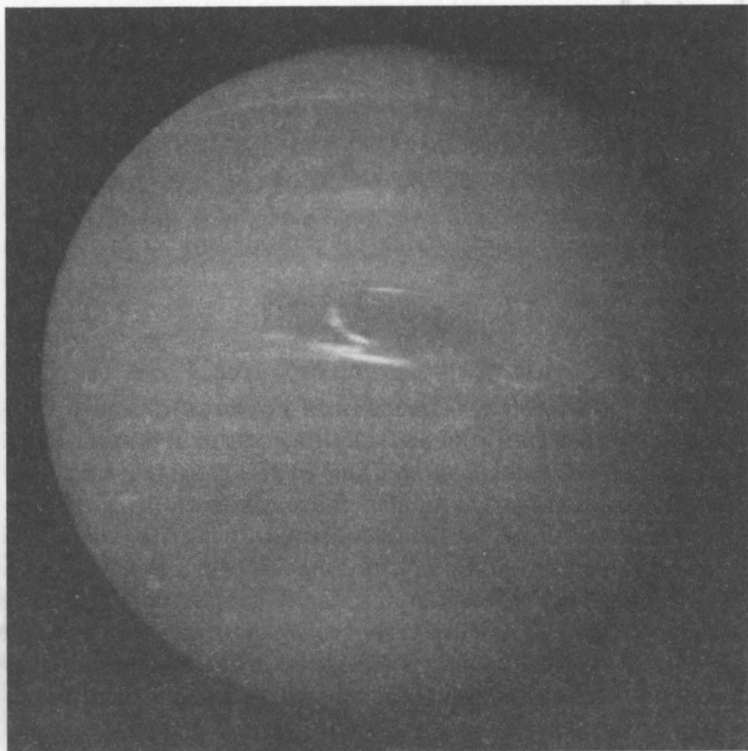


Рис. 14.1

Планета Нептун (космический аппарат «Вояджер-2», НАСА)

с Земли верхний слой облаков на низких и средних широтах вращается с периодом около 18 ч, т. е. отстает от вращения планеты, а облака в полярных областях вращаются с периодом около 12 ч, опережая планету.

Исследования Нептуна. Наблюдения Нептуна чрезвычайно затруднены из-за его удаленности. Диск планеты виден от Земли в телескоп под микроскопическим углом, не превышающим $2,3''$ (вдвое меньше, чем у Урана). Подавляющее количество подробностей о планете получено в итоге уникальной миссии космического аппарата «Вояджер-2», который, совершив гравитационные маневры при прохождении Юпитера, Сатурна и Урана, смог, изменяя направление полета, пройти вблизи всех четырех пла-

нет-гигантов. Сближение с Нептуном до расстояния всего 5000 км произошло 25 августа 1989 г. после 12 лет полета. «Вояджер-2» в настоящее время является единственным аппаратом, выполнившим с пролетной траектории исследования Урана и Нептуна. В обозримом будущем новые миссии к Нептуну не планируются.

Внутреннее строение и магнитное поле. Нептун относится к разряду планет-гигантов, подобно Юпитеру, Сатурну и Урану. По ряду параметров он близок к Урану, однако есть и серьезные различия между этими планетами. Масса Нептуна превышает массу Урана и равна $86,625 \cdot 10^{24}$ кг, или 17,204 масс Земли. В то же время размеры Нептуна меньше, чем у Урана. Экваториальный диаметр Нептуна составляет 49528 км, полярный диаметр — 48680 км. Меньшие размеры при большей массе указывают на то, что внутреннее строение Нептуна отличается от строения Урана: плотность Нептуна выше ($1,7 \text{ г/см}^3$), здесь больше тяжелых компонентов.

Строение планеты окончательно не известно, но существующие модели соответствуют некоторым наблюдаемым параметрам. Согласно базовой модели строения Нептуна на сегодня верхние слои газовой оболочки планеты содержат в основном водород (около 84%). На втором месте по содержанию находится гелий, которого в атмосфере Нептуна около 15%. Примерно 1% падает на метан. Метан, как и на Уране, окрашивает верхние слои атмосферы в зеленовато-синие тона. Верхний слой облаков Нептуна, находящийся на уровне давления около 1,2 бар, имеет аквамариновый цвет. Типичная температура там близка к -220°C , что связано с гигантским удалением Нептуна от Солнца. Нептун, как указано выше, в 30 раз дальше от Солнца, чем Земля, соответственно поток солнечной энергии, приходящийся на единицу площади, в 900 раз меньше, чем на Земле. Всего на Нептун попадает примерно 0,5% количества солнечного тепла, падающего на освещенное полушарие Земли.

Предполагается, что глубина газообразной водородно-гелиевой атмосферы составляет около 3...5 тыс. км. С погружением в недра атмосферы планеты быстро растут

давление и температура. На дне этого толстого слоя газа давление достигает около 200000 бар.

Ниже этого слоя газа находится, судя по всему, жидкий океан из воды, насыщенный ионами. Глубина этого океана неизвестна, но она может лежать в пределах от 1000 до 10000 км. Поскольку масса планеты существенно меньше, чем у Юпитера и Сатурна, здесь, видимо, отсутствуют слои металлического водорода, поскольку необходимое для перехода к этому состоянию давление достигается на таких глубинах, где относительно легкий водород уже отсутствует, будучи замененным водой, метаном и аммиаком.

По мере дальнейшего погружения в океан, температура и давление продолжают нарастать. Увеличивается и содержание более тяжелых, чем вода, соединений — аммиака и метана. При давлении около 1000000 бар (1 Мбар) и температуре порядка 2000...5000°C из смеси воды, аммиака и метана может начаться формирование твердых или газожидких льдов. Оценки показывают, что на долю ледяной мантии может приходиться до 70% от общей массы планеты. Отметим, что отличие Нептуна от менее плотного Урана состоит в гипотетической возможности существования жидкого водного океана.

Под слоем мантии в центре Нептуна находится твердое ядро. Исходя из известных значений средней плотности и безразмерного момента инерции планеты, сделано заключение, что здесь должны присутствовать оксиды кремния, магния и железа, а также сульфиды железа. По-видимому, здесь должны находиться и материалы, присутствовавшие в протопланетном облаке на начальном этапе формирования планет Солнечной системы (хондриты), включая углеродистые соединения. Расчеты показывают, что в ядре Нептуна должны царить примерно те же давления и температуры, что и в ядре Урана: 6...8 Мбар и более 7000°C.

Измерения «Вояджера-2» показали, что Нептун излучает в окружающее пространство примерно в 2,7 раза больше энергии, чем получает от Солнца. Эффективная температура равна 59 К, как и у Урана, хотя Нептун получает в

2,46 раз меньше энергии от Солнца, чем Уран. Альbedo обеих планет достаточно высокое: 0,51 — для Урана и 0,41 — для Нептуна, причем в видимом диапазоне длин волн обе планеты отражают солнечный свет примерно одинаково — до 85%. Это означает, что внутренние процессы в недрах Нептуна отличаются от таковых на Уране.

Применить теорию, объясняющую избыток теплового излучения Юпитера и Сатурна с помощью гравитационной дифференциации, для Нептуна также не получается. В результате базовой идеей, объясняющей феномен избыточного излучения Нептуна, стала гипотеза о вкладе радиоактивного распада тяжелых элементов, привнесенных в тело планеты древними хондритами.

Необходимо заметить, что идея вклада радиоактивного распада для объяснения внутреннего тепла спутников планет-гигантов не является парадигмой в современной космогонии. В то же время наличие большого количества радиоактивных веществ в недрах Нептуна (и только его) выглядит странным и маловероятным, несмотря на то что мы не знаем в деталях, как распределялись различные химические элементы и их соединения в разных областях протопланетного газопылевого облака, из вещества которого формировались планеты и спутники. По-видимому, гипотезу о возможном вкладе радиоактивных элементов в тепловой баланс необходимо иметь в виду при анализе всех крупных объектов Солнечной системы.

«Вояджер-2» обнаружил магнитное поле Нептуна. Оно вдвое слабее, чем у Урана. Угол между осью магнитного диполя Нептуна и осью вращения составляет $46,8^\circ$. Центр диполя смещен на 6000 км в южное полушарие (у Урана — на 8000 км в северное полушарие). В результате индукция магнитного поля у южного магнитного полюса Нептуна в 10 раз больше, чем у северного. Тем не менее напряженность поля в среднем в 2,5 раза меньше напряженности магнитного поля Земли.

Вблизи самого Нептуна поле не похоже на дипольное, здесь проявляются и другие (недипольные) составляющие. Поле Нептуна возбуждается не в твердом ядре, а в окружающей его жидкой проводящей среде — мантии. Здесь,

в горячем океане Нептуна, где, очевидно, сильны конвективные потоки, возникают электрические токи, возбуждающие сложное магнитное поле со множеством магнитных полюсов.

Атмосфера. Как и у других планет-гигантов, верхние слои атмосферы Нептуна — единственная часть, доступная непосредственным наблюдениям.

Съемки «Вояджера-2» показали, что верхние слои атмосферы Нептуна, несмотря на крайне низкие температуры, обладают чрезвычайно высокой динамичностью. Съемки с борта «Вояджера-2» позволили обнаружить в облачных слоях появление деталей, которые быстро исчезали.

В атмосфере Нептуна выделяются, подобно Юпитеру и Сатурну, темные пояса и светлые полосы. Они выражены нечетко и несимметричны относительно экватора. В частности, темные пояса расположены в интервалах широт от 6° до 25° в северном полушарии и от 45° до 75° в южном полушарии.

Скорость вращения Нептуна велика (на экваторе — 2,7 км/с), поэтому суммарная скорость движения атмосферных масс оказывается направленной, как и у самой планеты. Тем не менее скорость перемещения атмосферных масс оказалась очень высокой. Судя по результатам «Вояджера-2», некоторые детали в облаках смещались относительно тела планеты со скоростью 2200 км/ч. Вблизи экватора (в пределах полосы, ограниченной широтами $\pm 20^\circ$), скорость ветра достигает 400...700 м/с. В некоторых районах скорость ветра достигает скорости звука. Минимальные скорости (100 м/с) наблюдаются на более высоких широтах.

Видимый облачный слой расположен на высоте 24550 км от центра планеты, давление на этом уровне оценено в 1,2...1,3 бар. Выше сплошного облачного слоя наблюдались на снимках «Вояджера-2» группы светлых вытянутых полос облаков шириной по 50...200 км, эти полосы отбрасывали четкие тени на нижележащий основной облачный слой. Эти полосы напоминают по структуре земные перистые облака (*cirrus*, рис. 14.2).

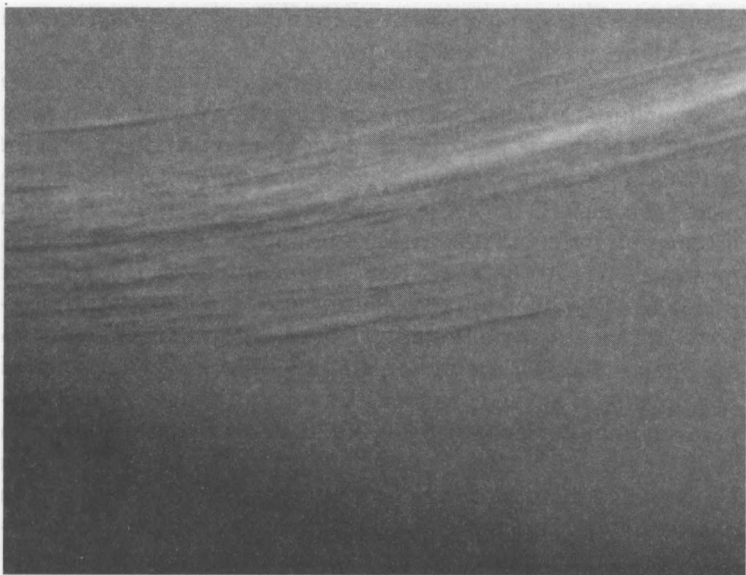


Рис. 14.2

Облака в верхней атмосфере Нептуна
(космический аппарат «Вояджер-2», НАСА)

Помимо упомянутых полос, над верхней кромкой облачного слоя Нептуна наблюдается полупрозрачная дымка. Она была видна в виде дуг над лимбом (краем диска) планеты.

Наиболее вероятный состав надоблачной дымки — легкие углеводороды, образующиеся при разложении метана солнечным ультрафиолетовым излучением. Это скорее всего этан C_2H_6 и ацетилен C_2H_2 (на высотах 45...60 км), а также этилен C_2H_4 (на уровне около 120 км) над облачным слоем.

Радиопросвечивание верхних слоев облаков с борта «Вояджера-2» показало, что существует радионепрозрачный слой на глубине примерно 25 км под верхней кромкой облаков. Предполагается, что здесь находится аммиак и, возможно, сероводород.

Южный полюс Нептуна охвачен своеобразной полярной шапкой из светлых облаков, по яркости близкой к полосе на широте 20° в южном полушарии. Северный полюс

планеты в настоящее время находится на ночной стороне и не наблюдаем.

В атмосфере Нептуна было обнаружено грандиозное образование, напоминающее по внешнему виду и по сути Большое красное пятно (БКП) на Юпитере. По аналогии оно было названо Большим темным пятном (БТП). Угловые размеры БТП (38° в долготном направлении, 15° в широтном направлении) примерно такие же, как и у БКП на Юпитере (30° по долготе и 20° по широте). Центр БТП находился во время наблюдений с «Вояджера-2» на широте 20° в южном полушарии, на самой яркой полосе. Общие размеры БТП близки к габаритам земного шара. БТП представляет собой гигантский антициклон, который вращается против часовой стрелки, совершая один оборот за 16 земных суток. В отличие от БКП на Юпитере, БТП на Нептуне не отличается от окружающего пространства по температуре. Над центром БТП наблюдались высокие белые облака, судя по их теням, они располагались на высотах от 50 до 100 км над облачным слоем.

БТП движется в обратном по отношению к вращению планеты направлении со средней скоростью 325 м/с, непредсказуемо смещаясь по долготе и широте. Помимо БТП, на более высоких широтах южного полушария отмечены и другие сходные образования меньших размеров.

Кольца и спутники. Как и другие планеты-гиганты, Нептун имеет систему колец и спутников.

Наблюдения покрытия Нептуном звезды в 1985 г. привели к открытию колец, которое было позднее подтверждено «Вояджером-2». Непосредственно увидеть кольца в телескоп от Земли невозможно. При съемках с длительной экспозицией удалось получить изображения четырех тонких колец Нептуна. Кольца напоминают систему возле Урана (но общая площадь поверхности вещества в них в 100 раз меньше, чем у Урана). В кольцах Нептуна обнаружен интересный феномен: внешнее кольцо оказалось незамкнутым. Отдельные его участки образуют дуги, получившие название «*арки*». Арки трассируют отдельные участки кольца малой плотности. Диаметр кольца 1989 N1R составляет 62900 км, ширина арок не превышает 50 км.

Таблица 14.1

Кольца Нептуна

Кольцо	Расстояние до центра планеты, км	Ширина кольца, км	Содержание пыли, %
1989 N3R	41900	1700	40...70
1989 N2R	53200	< 15	40...70
1989 N4R	53200...59000	5800	Малое
1989 N1R	62900	< 50	Три пылевые арки

По своим свойствам кольцо 1989 N1R близко к кольцам δ и η Урана. Основные параметры колец Нептуна приведены в табл. 14.1.

Окончательно теория, объясняющая феномен арок, не создана. Одна из гипотез допускает, что арки могут стабилизироваться гравитационным воздействием крупного спутника планеты,двигающегося по орбите, сильно наклоненной к экватору Нептуна. Однако такой спутник не обнаружен.

Вещество, из которого состоят кольца Нептуна, отличается низким альбедо (около 6%). В кольцах, помимо пыли, присутствуют сравнительно крупные темные глыбы, наибольшее количество глыб — во внешнем кольце. Предполагается, что бомбардировка заряженными частицами из магнитосферы планеты приводит к разложению углеводородов и выделению углерода в виде сажи, которая окрашивает поверхность глыб в черный цвет.

Помимо вещества в кольцах Нептуна, известны также 13 спутников планеты. Поскольку Нептун — бог океана, традиция предлагает названия для его спутников, связанные с именами морских божеств. Два спутника — Тритон и Нереида были открыты в середине XX в. в результате наземных наблюдений Нептуна. Открытие еще 6 спутников выполнено во время миссии «Вояджера-2». В начале XXI в. были обнаружены еще 5 удаленных спутников.

Наяда, Таласса, Деспина, Галатей, Лариса, Протей. Эти небольшие спутники движутся практически в плоскости экватора Нептуна в прямом направлении на срав-

нительно низких орбитах от 48230 км (Наяда) до 117650 км (Протей). Низкое альbedo их темной поверхности связано с постоянным воздействием частиц из колец. Самый маленький в этой группе спутников — Наяда (96×52 км), самый крупный — Протей (440×404 км).

Тритон. Самый крупный из спутников Нептуна — Тритон, открытый еще в 1846 г., почти одновременно с Нептуном, имеет диаметр 2707 км. Он движется по сильно наклоненной к экватору круговой орбите ($23,2^\circ$) в обратном направлении на высоте 354800 км над центром Нептуна. Тритон обладает синхронным вращением. Несмотря на то что он находится лишь немногим ближе к Нептуну, чем Луна к Земле, полный оборот вокруг планеты он совершает гораздо быстрее (за 5,877 земных суток).

Средняя плотность Тритона составляет $2,07 \text{ г/см}^3$, что указывает на возможность существования здесь силикатного ядра диаметром около 2000 км. Температура его поверхности крайне низка (-235°C). Съёмки, проведенные «Вояджером-2», показывают, что большая часть поверхности Тритона выглядит как равнина, изрезанная большим количеством трещин. Обнаружено несколько впадин с диаметром 150...250 км. В целом ледяная кора претерпевала многократные воздействия тектонической активности. Здесь видны следы расплавов ледяной коры, разломы, уступы. Ударные кратеры заполнялись ледяными лавами, содержащими водные растворы метана, аммиака и различных солей (рис. 14.3).

Около южного полюса Тритона видна яркая полярная шапка, вероятно, состоящая из слоя азотного инея. В районе полярной шапки обнаружены множественные темные пятна. Съёмки «Вояджера-2» показали, что здесь из небольших темных источников (газовых гейзеров) поднимаются вверх две струи темного газа толщиной от 20 м до 2 км. На высоте около 8 км эти струи поворачиваются на 90° , превращаясь в практически горизонтальные широкие шлейфы. Излом газовых струй можно объяснить наличием в атмосфере Тритона на этой высоте *тропопаузы*, выше которой дуют в западном направлении сильные ветры. Вещество, выбрасываемое гейзерами, осаж-

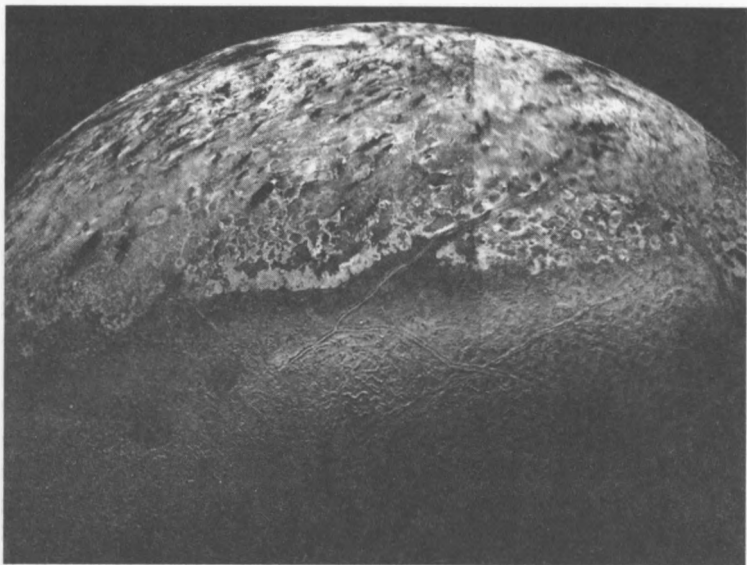


Рис. 14.3
Спутник Нептуна Тритон
(космический аппарат «Вояджер-2», НАСА)

дается на ледяной поверхности в виде темных пятен длиной 100...150 км.

Одно из предположений, объясняющих феномен газовых гейзеров Тритона, состоит в следующем. В недрах ледяной коры, прогреваемой солнечными лучами, может осуществляться возгонка замерзших азота или метана. В полостях подо льдом в результате должно возрасти газовое давление, что может привести к прорыву ледяной оболочки и выбросу газа, который выносит из недр какое-то темное вещество. Следует отметить, что гейзеры обнаружены только в пределах южной полярной шапки. Окончательной теории описанных явлений не существует.

Помимо гейзеров, на снимках «Вояджера-2» видны темные пятна со светлой окантовкой, напоминающие по внешнему виду пересыхающие солончаковые озера.

Внутреннее строение Тритона согласно современным представлениям таково. Спутник обладает самым массивным среди всех спутников планет-гигантов каменным

ядром (70% от всей массы спутника), 30% занимают легкие компоненты — так называемые льды, в состав которых входят азот, окись углерода и метан. На начальном этапе формирования Тритон испытал множественные соударения, которые приводили к выделению значительных порций тепла, плавлению и гравитационной дифференциации, которая, в свою очередь, также усиливала нагрев недр Тритона.

В результате дифференциации должно было сформироваться плотное ядро, покрытое снаружи более легкой мантией. Мантия представляла собой водный раствор многих солей с примесями аммиака и метана.

По окончании интенсивных метеоритных бомбардировок Тритон начал остывать, и глубокий океан начал покрываться ледяным панцирем. В настоящее время толщина ледяной коры составляет около 180 км, под ней остается океан глубиной около 150 км. Водный океан насыщен солями, аммиаком и метаном.

Приливные явления, тепловые потоки в недрах спутника, либрации в прошлом вызывали сильные механические напряжения в ледяной коре Тритона. Здесь возникали длинные трещины (грабены). Видны на ледяной коре образования неизвестной природы, указывающие на внутреннюю (криовулканическую) активность Тритона. По-видимому, здесь происходил локальный нагрев и плавление материала ледяной коры. Малое количество древних ударных кратеров говорит о том, что кора спутника подвергалась существенным трансформациям. В настоящее время орбита отличается малым эксцентриситетом, это означает, что либрации невелики и приливные возмущения, подобные описанным выше для спутников Юпитера, незначительны. Тем не менее приливные механизмы также могут вносить вклад в генерацию криовулканических явлений на Тритоне.

У Тритона обнаружена атмосфера с исчезающе малой плотностью (давление у поверхности спутника — около 15 миллионных долей бара). Состав ее — азот с мизерной добавкой метана. Обнаружена ионосфера Тритона, и даже слабое *авроральное* свечение, аналогичное полярным сия-

ниям на Земле, Юпитере и Сатурне, но существенно более слабое.

Разложение (*фотолиз*) метана под воздействием солнечного излучения должно приводить к образованию этана, этилена и ацетилена. При низких температурах эти углеводороды должны конденсироваться, осаждаясь на поверхность Тритона. Расчеты показывают, что толщина углеводородного слоя может достигать нескольких метров. Эти оценки требуют экспериментальных подтверждений.

Нереида. Спутник диаметром около 340 км, открытый в 1949 г., движется по чрезвычайно вытянутой (практически кометной) орбите с эксцентриситетом 0,7512. Среднее расстояние от центра Нептуна — 5513400 км. Таким образом, наблюдается огромный пустой «просвет» между орбитами Тритона и Нереиды. Наклонение орбиты Нереиды к плоскости экватора Нептуна составляет 29°. Средняя плотность спутника около 1 г/см³ (это плотность воды при нормальных условиях).

Галимеда, Сао, Лаомедея, Псамафа, Несо. Это небольшие спутники, обнаруженные в 2002 и 2003 гг. Орбиты их хаотические — с большими эксцентриситетами, движение трех из пяти спутников — в обратном направлении, наклоны орбит к плоскости орбиты Нептуна — десятки градусов. Ближайший к Нептуну спутник этой группы (Галимеда) имеет большую полуось своей орбиты 15728000 км, самый дальний спутник (Несо) — 48387000 км и период обращения 25,6 земных лет. Размеры спутников невелики — не более 60 км.

Существует гипотеза, согласно которой в древности Нептун захватил массивное внешнее тело, которое столкнулось с существовавшим на орбите крупным спутником. Фрагменты разрушившихся при столкновении небесных тел могли приобрести необычные орбиты, сильно наклоненные к плоскости орбиты Нептуна (Тритон и Нереида). Первоначально вытянутая орбита Тритона могла постепенно изменяться от высокоэллиптической до круговой под воздействием торможения в среде пылегазовой туманности на больших удалениях от центра Солнечной системы. В ходе этих изменений Тритон мог «перехватить»

большое количество малых спутников и в результате многочисленных столкновений приобрести дополнительный запас внутренней тепловой энергии. Этим может быть объяснено неожиданно малое количество спутников за орбитой Тритона и неожиданно высокие плотность и энергетика Тритона.

Нептун и его спутники, расположенные на периферии Солнечной системы, представляют большой интерес. Многие свойства планеты, его колец и спутников остаются неизвестными. Основная масса данных о системе Нептуна получена в результате единственной миссии космического аппарата «Вояджер-2», выполнившего непродолжительный цикл исследований с пролетной траектории в 1989 г. Очевидно, что будущие космические исследования с близкого расстояния могли бы существенно обогатить наши знания о Нептуне. Как указано выше, новые полеты к Нептуну в обозримом будущем не планируются.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изложите основные факты, относящиеся к метеорологии Нептуна.
2. Что такое арки в кольцах Нептуна?
3. Поясните понятие криовулканизма. Приведите известные вам примеры.
4. Что вам известно о магнитном поле Нептуна?
5. Что такое фотолиз, и к чему приводит этот процесс на спутниках Нептуна?
6. Изложите гипотезы, претендующие на объяснение гейзеров Тритона.
7. Как объясняется избыточное тепловое излучение Нептуна?

ПОЯС
КОЙПЕРА

Поясом Койпера (или поясом Эджворта–Койпера, или Уиппла–Койпера) называется второй (после Главного пояса астероидов) пояс малых тел, обращающихся вокруг Солнца за орбитой Нептуна. Долгое время здесь был известен единственный объект — Плутон, открытый в 1930 г. Клайдом Томбо (см. рис. 15.1). Размеры Плутона первоначально были плохо известны, считалось, что это достаточно крупная планета. Впоследствии выяснилось, что Плутон невелик (в 1,5 раза меньше Луны), но вплоть до 2006 г. он сохранял статус планеты, которого был лишен в соответствии с резолюцией Международного астрономического союза (МАС). С 1992 г. начались открытия за орбитой Нептуна других небесных объектов, формирующих пояс Койпера.

К началу ноября 2010 г. в занептунном пространстве было открыто около 1156 объектов, принадлежащих поясу Койпера.

Протяженность пояса Койпера составляет около 25 а. е.: от орбиты Нептуна (30 а. е.) до примерно 60 а. е. Выделяют «внутренний» (в пределах 36...40 а. е.) и «классический» (в пределах 43...60 а. е.) пояса внутри общего пояса. Внешняя граница определяется по сравнительно резкому уменьшению числа небесных тел на более удаленных от Солнца орбитах. Не исключено, что указанная граница связана с гравитационным воздействием неизвестного массивного небесного тела, находящегося несколько дальше. В то же время внешняя область пояса



Рис. 15.1
Карликовые планеты
Плутон (Pluto) и Харон
(Charon), спутники
Плутона Никта (Nix)
и Гидра (Hydra) в поясе
Койпера (космический
телескоп «Хаббл», НАСА)

Койпера с уменьшающейся плотностью объектов протягивается, судя по всему, очень далеко — вплоть до 1 тыс. а. е. от Солнца.

Радиальная протяженность внутреннего и классического поясов в 20 раз превышает ширину Главного пояса астероидов и, вероятно, по крайней мере в 20...200 раз — по массе. Предполагается, что всего пояс Койпера насчитывает 10 млрд объектов различных размеров и масс, самые крупные из которых могут иметь размеры порядка 1...3 тыс. км. Поскольку распределение находящихся здесь тел по размерам приблизительно соответствует степенному закону, можно оценить количество крупных (более 200 км) объектов. Такие оценки указывают, что в поясе Койпера должно быть порядка 10000 таких тел. Тем не менее, общая масса вещества в поясе Койпера, по-видимому, не превышает 1,3 массы Земли.

Название связано с именами ученых, предсказывавших существование пояса занептунных тел. В 1943 г. Кеннет Эджворт высказал предположение, что за Нептуном должен находиться пояс из маломассивных небесных тел — источник комет. Джерард Койпер в 1951 г. показал, что тела, находящиеся внутри орбиты Нептуна, должны были сместиться далеко за пределы указанной орбиты. По его мнению, в настоящее время пространство за Нептуном должно было давно очиститься. Таким образом, Койпер считал, что маломассивные небесные тела должны быть значительно дальше (на более высоких орбитах), чем это оказалось.

Теоретическое подтверждение возможности существования пояса было получено в 1988 г., когда численные расчеты на компьютерах продемонстрировали, что ядра короткопериодических комет (об этом ниже) не могут приходить из очень удаленных областей Солнечной системы и должны находиться ближе, возможно, за орбитой Нептуна.

Первое (после открытия Плутона) открытие объекта в этой области Солнечной системы состоялось в 1992 г. Этот объект был обозначен как 1992 QB1 (система обозначений вновь открытых небесных тел приведена в лекции 9). Период обращения вокруг Солнца для этого объекта оказался равным 291 году, орбита почти круговая, среднее расстояние от Солнца — 40,9 а. е., диаметр тела — 283 км. В течение следующих 7 лет общее число объектов пояса Койпера достигло 120. В дальнейшем средний темп открытий составлял около 100 объектов в год.

Несомненно, на настоящее время открыта лишь незначительная часть объектов, составляющих пояс Койпера, включая достаточно крупные объекты.

Имеющаяся статистика позволяет разделить объекты пояса Койпера на несколько классов, или категорий, по характерным параметрам орбит. Могут быть предложены несколько классификаций объектов небесных тел в этой области. Самая простая классификация разделяет объекты с орбитами, близкими к круговым, и объекты с эксцентричными (вытянутыми) орбитами. Применяются и более подробные классификации.

Классические объекты пояса Койпера. Эти объекты движутся по слабовытянутым (почти круговым) орбитам. Значительная их часть движется на расстояниях, примерно в 1,5 раза превышающих радиус орбиты Нептуна. Наклонения орбит к главной плоскости Солнечной системы (средней плоскости орбит восьми больших планет) различны, как правило, от 0 до 40°. Эти наклонения орбит можно считать небольшими (в пределах острого угла менее 45°). Поэтому система орбит классических объектов пояса Койпера тяготеет к главной плоскости Солнечной системы.



Рис. 15.2
Некоторые объекты пояса Койпера

Размеры указанных объектов лежат в пределах от 100 км до примерно 1000 км. Несомненно, существуют и менее крупные объекты, но технические возможности современных телескопов не позволяют обнаружить их на таких гигантских удалениях (более 6 млрд км).

Иногда для обозначения этих объектов применяется термин «кьюбивано» (от обозначения QB1 для первого из обнаруженных объектов этого класса). Этот термин нельзя считать устоявшимся (рис. 15.2).

Резонансные объекты. Для многих тел пояса Койпера характерны неслучайные соотношения с движением Нептуна (соизмеримость периодов в виде отношений небольших натуральных чисел) вида 4:3 или 3:2 во внутреннем поясе и 2:1 в классическом поясе. Отмечены и другие резонансы: 5:2, 5:3, 5:4 и 7:4. Расчеты показывают, что орбиты резонансных объектов оказываются стабильными и могут существовать без существенных изменений на протяжении очень длительного времени (сотен миллионов и даже миллиардов лет).

К числу резонансных объектов пояса Койпера относится, например, карликовая планета Плутон, чья орбита находится в резонансе 3:2 с орбитой Нептуна. Был открыт целый ряд объектов с таким же резонансом, получивших название «*плутино*». Объекты класса плутино находятся во внутреннем поясе Койпера, имеют большую полуось орбит около 39 а. е., но могут различаться по эксцентриситетам (от 0,11 до 0,35) и наклонам орбит (от 0 до 20°). Перигелийное расстояние объектов типа плутино достигает 26 а. е. (внутри орбиты Нептуна), афелийное — до 53 а. е. (в пределах классического пояса).

Рассеянные объекты. Орбиты объектов этого класса пояса Койпера отличаются огромными эксцентриситетами, в результате в афелиях своих орбит эти тела удаляются на несколько сотен астрономических единиц (а. е.) от Солнца.

В отличие от резонансных объектов, орбиты тел вне резонансов обладают пониженной стабильностью. Их состояние сохраняется в течение не более 100 млн лет. Гравитационное влияние Нептуна на объекты, находящиеся на нерезонансных орбитах, приводит к существенным изменениям параметров их орбит, росту эксцентриситета и последующему рассеянию тел за пределы пояса Койпера. В частности, пониженная плотность тел на границе между внутренним и классическим поясами, возможно, связана с тем, что попавшие в эту область объекты долго здесь не задерживаются и выбрасываются, в частности, во внутренние области Солнечной системы.

Есть основания полагать, что часть рассеянных объектов пояса Койпера может таким образом пополнять Главный пояс астероидов и, возможно, системы спутников планет-гигантов.

Плутониды. Помимо классификации, связанной с параметрами орбит, существуют попытки классифицировать объекты пояса Койпера по их физическим характеристикам. 11 июня 2008 г. Международный астрономический союз на очередном заседании, проходившем в Осло, принял решение о введении нового термина «*плутониды*», обозначающего небесные тела сферической формы и обращающиеся вокруг Солнца за Нептуном. Формально на

сегодняшний день к разряду плутоидов относятся Плутон, Эрида и Макемаке, есть ряд претендентов. Правомочность использования этого термина остается дискуссионной, поскольку Плутон, Эрида и Макемаке, кроме того, являются согласно определению МАС *карликовыми планетами*.

Согласно определению МАС карликовая планета — это небесное тело, которое, не являясь спутником планеты, обращается вокруг Солнца, имеет сфероидальную форму, но не доминирует на своей орбите (на близких орбитах имеются объекты сходных размеров). Различие в определениях карликовой планеты и плутоида заключается только в указании на положение объекта в Солнечной системе для плутоидов (за орбитой Нептуна). Церера, находясь в Главном поясе астероидов, является по определению карликовой планетой, но не плутоидом. Дублирование определений является, по-видимому, избыточным и требует дальнейшего совершенствования системы понятий.

Некоторые объекты пояса Койпера. Свойства объектов пояса Койпера известны плохо. Ввиду огромных расстояний изучить детали на поверхности даже самых крупных из них не представляется возможным. В июле 2015 г. вблизи Плутона впервые в истории должен пройти космический аппарат «Новые горизонты» (США), который будет к этому моменту находиться в полете 9 лет (запущен в январе 2006 г.). Ожидается съемка поверхности Плутона с близкого расстояния. После пролета Плутона планируется маневрирование с целью сближений с другими телами пояса Койпера. До настоящего времени ни один из космических аппаратов не исследовал с близкого расстояния эти объекты. Тем не менее методами наземной астрономии получен ряд данных об этих небесных телах. Считается, что основное отличие их от объектов Главного пояса астероидов заключается в составе: здесь преобладают не силикаты и железо, а замерзшие летучие вещества (метановые, аммиачные и водные «льды»). Наиболее вероятно, что объекты пояса Койпера по составу представляют собой лед с небольшими примесями органических веществ.

Плутон–Харон. Пара карликовых планет, движущаяся по вытянутой орбите с эксцентриситетом 0,24448. Плоскость орбиты Плутона наклонена на $17,165^\circ$ к плоскости земной орбиты. Период обращения пары Плутон–Харон вокруг Солнца равен 245,7 земных лет, средняя скорость движения по орбите — 4,8 км/с. В перигелии (сентябрь 1989 г.) Плутон и Харон приблизились к Солнцу на расстояние 29,6 а. е., при этом оказавшись ближе к Солнцу, чем Нептун. 15 марта 1999 г. пара карликовых планет пересекла орбиту Нептуна и стала удаляться от Солнца в сторону афелия своей орбиты (48,8 а. е.), которого достигнет в 2112 г. Плутон был открыт в 1930 г. Клайдом Томбо, второй компонент пары — Харон — обнаружил Дж. Кристи в 1978 г. Расстояние между двумя объектами, по космическим меркам, очень мало — всего 19410 км. Оба компонента вращаются вокруг общего центра масс (барицентра) системы по почти круговым орбитам с периодом 6,387 земных суток. Плутон и Харон вращаются синхронно, всегда будучи повернутыми друг к другу одной и той же стороной. Поскольку барицентр системы находится за пределами Плутона, нельзя сказать, что Харон вращается вокруг Плутона и является его спутником. В настоящее время принято считать, что Плутон и Харон являются тесной парой равноправных карликовых планет. Тем не менее надо отметить, что прямое указание на то, чтобы отнести Харон к разряду карликовых планет, в резолюциях МАС отсутствует (по состоянию на начало 2011 г.), таким образом, несмотря на формальное соответствие определению карликовой планеты, статус Харона остается не определенным окончательно.

Угол между осью вращения Плутона и плоскостью его орбиты составляет около 32° , направление вращения — обратное.

В 1985–1991 гг. наблюдалась серия взаимных затмений Плутона и Харона. Во время затмений суммарный блеск системы уменьшался поочередно то на 8%, то на 4%, из чего был сделан вывод, что поверхность Харона на 30% темнее, чем Плутона. Параметры вращения системы позволили оценить массы и размеры компонентов. Диаметр

Плутона оказался равным 2306 км, диаметр Харона 1205 км, массы соответственно $130 \cdot 10^{20}$ кг и $15 \cdot 10^{20}$ кг, отношение масс 8,66:1. Снимки Плутона и Харона, полученные с околоземной орбиты космическим телескопом «Хаббл», показывают, что обе карликовые планеты имеют сферическую форму (что, в частности, и позволяет их так классифицировать). Средняя плотность Плутона около $2,0 \text{ г/см}^3$, Харона — около $1,7 \text{ г/см}^3$, различия указывают на отличия во внутреннем строении. Плутон обладает силикатно-ледяным строением, подобно Титану, Тритону и Ганимеду. Предполагается, что Плутон обладает ядром, состоящим из силикатов с водным льдом, выше идет ледяная мантия, и на поверхности — слой из замерзших азота и метана. Спектрометрические наблюдения свидетельствуют о существовании на Плуtone метана, но неясно, какая его часть находится на поверхности, а какая часть — в атмосфере.

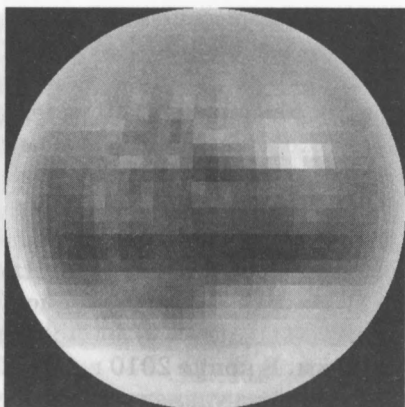
Несмотря на чрезвычайно большую удаленность системы от Солнца и соответственно очень низкие температуры на поверхности, у Плутона обнаружена атмосфера. При покрытии звезды Плутоном яркость звезды убывала несколько секунд, что указывает на наличие сравнительно плотной атмосферы. Тем не менее ее плотность значительно меньше плотности атмосферы Земли и даже Марса. Состав ее окончательно не известен, но считается, что здесь присутствуют азот, окись углерода и метан, причем из термодинамических соображений ожидается, что соотношение соответствующих концентраций должно быть 99:0,9:0,1. При движении Плутона и Харона по вытянутой орбите в области афелия расстояние до Солнца увеличивается, температура поверхности падает и атмосфера вымораживается, оседая в виде инея на поверхности Плутона. В 2006 г. на Плуtone был открыт этан. Толщина дымки в атмосфере оценивается в 45 км, толщина атмосферы — примерно в 270 км. Максимальная температура при нахождении в перигелии орбиты не превышает -211°C . Температура газов в атмосфере несколько выше (-180°C).

Атмосфера Плутона, таким образом, обладает уникальным свойством появляться и исчезать, в зависимости от положения карликовой планеты на орбите вокруг Солнца.

Рис. 15.3

Карликовая планета
Плутон (космический
телескоп «Хаббл», НАСА):

до реализации миссии космического аппарата «Новые горизонты», лучший из имеющихся снимков Плутона.



Спектральные наблюдения показывают, что поверхность Плутона, судя по всему, покрывает метановый лед (рис. 15.3). Что касается Харона, то его покрывает водяной лед. В 2007 г. на Хароне были открыты гидраты аммония, что позволяет предположить наличие здесь криовулканизма.

У Плутона есть два спутника (если не считать Харон еще одним крупным спутником). В 2005 г. наблюдения на космическом телескопе «Хаббл» позволили обнаружить два спутника, получивших название Никта и Гидра. Никта (диаметр около 46 км) движется вокруг Плутона по орбите высотой 50000 км, Гидра (диаметр около 61 км) — по орбите с радиусом около 65000 км. Указанные размеры окончательно не известны и подлежат уточнению. Плоскости орбит спутников совпадают с плоскостью экватора Плутона и с плоскостью орбиты Харона.

Решение о лишении Плутона статуса планеты не было воспринято однозначно. В штатах Нью-Мексико (2006) и Иллинойс (2009) США приняты законодательные акты, в соответствии с которыми Плутон продолжает здесь считаться планетой, а день его открытия Клайдом Томбо отмечается как День Плутона.

Эрида. Карликовая планета, открытая 21 октября 2003 г. группой астрономов под руководством Майкла Брауна, возможно, превышает по размерам Плутон.

Первоначально объект был неофициально назван Зеной (по имени героини сериала «Зена — королева воинов»), затем переименована в Эриду (имя мифологической богини раздора, подкинувшей так называемое яблоко раздора, что послужило поводом для Троянской войны). Название выбрано не случайно: именно открытие Эриды, превышающей по размерам Плутон, послужило МАС основанием для формулировки определения понятия планеты и последующего исключения Плутона из списка планет, что произошло в ходе острых дискуссий. Диаметр Эриды первоначально оценивался примерно в 2400 км с точностью ± 100 км. В конце 2010 г. по наблюдениям покрытия Эридой одной из удаленных звезд удалось уточнить размеры карликовой планеты. Оказалось, что ее диаметр не превышает 2340 км, а возможно, еще меньше. Было даже объявлено, что Плутон снова вернул себе титул самого крупного из занептунных тел. Окончательное уточнение габаритов Эриды и Плутона впереди, пока можно утверждать, что они близки по размерам.

Эрида обладает небольшим спутником, названным Дисномия, который обращается вокруг Эриды по круговой орбите с периодом около 16 земных суток (рис. 15.4). Сама Эрида относится к разряду рассеянных объектов пояса Койпера, двигаясь по сильно вытянутой орбите (эксцентриситет равен 0,44) с перигелием 37,77 а. е. и афелием 97,56 а. е. Один оборот вокруг Солнца Эрида с Дисномией совершают за 557 лет. Средняя плотность оценена в $2,2 \text{ г/см}^3$ (согласно данным на конец 2010 г. — даже $2,5 \text{ г/см}^3$), что соответствует силикатно-ледяному составу карликовой планеты (70% камня, 30% льда).

Хаумея. Карликовая планета в поясе Койпера, судя по всему, обладающая характерными размерами $1960 \times 1518 \times 996$ км. Для столь крупных размеров это небесное тело уникально своей несферической формой. Хаумея внесена в список карликовых планет резолюцией МАС 17 сентября 2005 г., хотя по формальным признакам (несферическая форма) этот объект не соответствует определению карликовой планеты. Это обстоятельство еще раз указывает на несовершенство существующей терминологии.

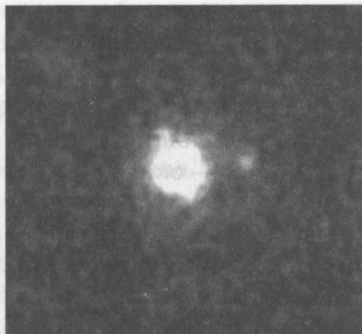


Рис. 15.4

Карликовая планета Эрида
и ее спутник Дисномия
(телескоп «Кек», США)

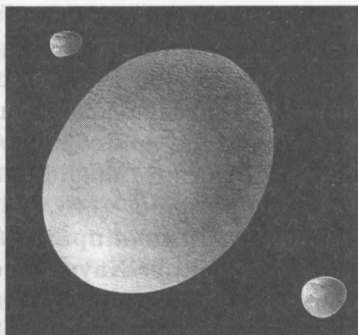


Рис. 15.5

Карликовая планета Хаумея
и ее спутники — Намака
и Хийака (рисунок)

Открыта 7 марта 2003 г. практически одновременно двумя группами американских и испанских астрономов и названа в честь гавайской богини плодородия и деторождения. Хаумея движется по вытянутой орбите с перигелием 35,16 а. е. и афелием 43,34, т. е. относится к классу резонансных объектов пояса Койпера и подклассу плутино. В перигелии Хаумея оказывается ближе к Солнцу, чем Плутон. Период обращения вокруг Солнца равен 285 годам, что превышает период обращения Плутона. Карликовая планета движется по орбите, сильно наклоненной к плоскости орбиты Земли (эклиптике) — на $28,19^\circ$.

На вытянутую форму Хаумеи указывают быстрые колебания ее блеска с периодом 4 ч, которые интерпретируются как свидетельство быстрого вращения вытянутого тела вокруг своей оси (рис. 15.5).

Не исключено, что колебания яркости связаны с различиями альбедо разных частей небесного тела, но более вероятным выглядит предположение об очень сильной «сплюснутости» карликовой планеты под воздействием сильных центробежных сил. Предполагается повышенная плотность объекта — до 3 г/см^3 . Причина быстрого вращения, вероятно, связана с сильным импактным событием в прошлом, когда в результате удара Хаумея могла быть быстро раскручена, а фрагменты могли быть потеряны.

Судя по спектральным характеристикам, Хаумея покрыта водяным льдом. Версия столкновения может быть подкреплена наличием на близких орбитах по крайней мере трех других объектов со сходными спектральными параметрами.

Вокруг Хаумеи обращаются два небольших спутника — Хийака и Намака. Диаметр *Хийака* — около 350 км, период обращения — 48,9 земных суток, радиус орбиты — 49900 км. *Намака* примерно вдвое меньше Хийака, обращается вокруг Хаумеи по орбите с большой полуосью 25600 км с периодом 18 земных суток.

Макемаке. Карликовая планета была открыта группой астрономов на Гавайских островах под руководством Майкла Брауна 31 марта 2005 г. Названа в честь божества аборигенов острова Пасхи (Рапа-Нуи), поскольку была открыта накануне праздника Пасхи. Размеры достоверно не известны (от 1300 до 1900 км), движется по вытянутой орбите с перигелием 38,508 а. е. и афелием 53,075 а. е., совершая один оборот вокруг Солнца за 310 лет. Наклонение орбиты к плоскости эклиптики составляет 28,96°. Масса, плотность, а также наличие спутников неизвестны. Макемаке относится к классическим объектам пояса Койпера, подклассу плутоидов.

Спектральные исследования показали, что поверхность Макемаке покрыта слоем метана, присутствует и этан. Предполагается присутствие замерзшего азота. Температура поверхности оценена в -240°C . Есть противоречивые сведения о параметрах вращения карликовой планеты вокруг своей оси на основе колебаний яркости: от 22,48 ч (2007) до 7,77 ч (2009). Макемаке по состоянию на конец 2009 г. считается третьим по размерам объектом пояса Койпера после Эриды и Плутона.

Помимо указанных карликовых планет, в поясе Койпера обнаружен еще ряд крупных *транснептуновых объектов* (находящихся за орбитой Нептуна), которые рассматриваются как потенциальные кандидаты в карликовые планеты, однако пока данных о них недостаточно (в частности, об их форме) для принятия соответствующего решения об идентификации их типа. К числу таких объектов относятся Орк, Седна, Кварвар, Варуна, Иксион,

а также объекты, на конец 2009 г. еще не получившие собственных имен: 2002 TC 302, 2002 UX 25, 2002 TX 300. Очевидно, что открытия крупных объектов пояса Койпера будут продолжены.

Орк. Объект, открытый в феврале 2004 г., относится к классу плутино. Остается существенная неопределенность в оценке размеров, зависящая от принятой модели альбеда (840...1880 км). Тем не менее наиболее вероятными размерами считается диаметр около 1600 км. В феврале 2007 г. был открыт спутник Орка, что позволит уточнить массу объекта. Если размеры Орка будут подтверждены, то объект окажется в числе наиболее крупных небесных тел в поясе Койпера после Эриды и Плутона рядом с Хаумеей и Макемаке.

Орк — бог смерти в римской мифологии.

Иксион. Объект, открытый группой астрономов в 2001 г. в чилийской обсерватории Сьерро Тололо, один из крупнейших плутино (диаметр 822 км). Орбита Иксиона находится в резонансе 2:3 с Нептуном, эксцентриситет орбиты — 0,2412, большая полуось орбиты — 39,5391 при перигелии 30,0009 а. е. и афелии 49,0773 а. е. Период обращения вокруг Солнца — 248,6269 земных лет, наклонение орбиты к плоскости эклиптики — 19,6164°. Окраска Иксиона оказалась умеренно красной. Альbedo более высокое (0,15) по сравнению с классическими красными объектами — Квавара (0,10) и Варуной (0,04). Результаты указывают на то, что на поверхности Иксиона присутствует смесь темного углерода и *толина*, образующегося при облучении клатратов воды и органических компонентов ультрафиолетовым излучением.

Назван в честь мифологического древнегреческого царя.

Квар (Кваовар). Крупнейший из классических объектов пояса Койпера, открытый в 2002 г. группой Майкла Брауна. Диаметр равен 1260 км, что существенно больше, чем у самого крупного объекта Главного пояса астероидов — карликовой планеты Цереры. Большая полуось орбиты составляет 43,61 а. е. (6,5 млрд км). Орбита отличается небольшим наклоном к плоскости эклиптики (8,0°) и небольшим эксцентриситетом (0,0385). Квар совершает один оборот вокруг Солнца за 287,97 земных

года, период обращения вокруг своей оси 17,7 земных суток. Масса равна $22 \cdot 10^{20}$ кг. В 2007 г. у Квавара обнаружен спутник размерами около 100 км.

Название выбрано по имени бога-созидателя в представлениях индейцев племени Тонгва.

Варуна. Крупный классический объект пояса Койпера, открыт в 2000 г. Р. Мак-Милланом. Диаметр равен 1060 км. Эксцентриситет орбиты невелик (0,051), большая полуось орбиты — 43,129 а. е., перигелий — 40,915 а. е., афелий — 45,335 а. е. Полный оборот вокруг Солнца Варуна совершает за 283,20 земных года. Угол наклона к плоскости эклиптики — $17,2^\circ$. Масса оценивается в $5,9 \cdot 10^{20}$ кг. Предположительно состоит из смеси пористых пород, плотность которых чрезвычайно низкая — около 1 г/см^3 . Цвет поверхности красный, альbedo крайне низкое ($< 0,04$). Вероятно, Варуна покрыт органическими соединениями. Название дано по имени ведического бога мировых вод.

Седна. Одним из наиболее интересных транснептуновых объектов является Седна, открытая в 2003 г. Брауном, Трухильо и Рабиновичем. Размеры Седны достаточно велики (диаметр в пределах 1200...1600 км, рис. 15.6). Седна привлекает внимание параметрами орбиты. При наклонении орбиты $11,534^\circ$ большая полуось орбиты оказалась огромной — 525,86 а. е. (78,7 млрд км). Перигелий орбиты — 76,156 а. е. (почти в два с половиной раза дальше орбиты Нептуна), афелий же оказался уникальным (почти 1 тыс. а. е.) — 975,56 а. е., или 141 млрд км. Эксцентриситет при этом очень велик — 0,8506. Один оборот вокруг Солнца Седна делает за 11487 лет. Средняя скорость движения по орбите составляет примерно 1,04 км/с (это несколько больше скорости движения Луны вокруг Земли). Период вращения вокруг своей оси точно не определен и лежит в пределах от 10 часов до 5 суток (скорее всего, ближе к нижней границе).

Формально Седна может быть отнесена к разряду рассеянных объектов пояса Койпера, однако есть версия о том, что Седна, принадлежит другому скоплению небесных объектов на дальней периферии Солнечной системы — так называемому облаку Оорта.

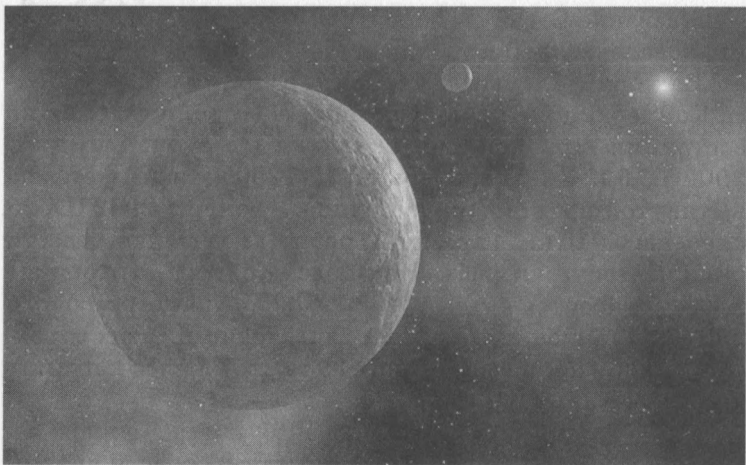


Рис. 15.6

Карликовая планета Седна (рисунок R. Hurt)

Первооткрыватель Седны Майкл Браун предложил три версии формирования вытянутой орбиты объекта. Во-первых, это может быть влияние пока неоткрытой массивной тренснептуновой планеты. Во-вторых, к такому исходу могло привести гипотетическое сближение в прошлом Солнечной системы со звездой, проходившей на расстоянии порядка 500 а. е. от Солнца. В-третьих, существование Седны на сверхвытянутой орбите может быть связано с тем, что сама Солнечная система в свое время формировалась не изолированно, а внутри тесного звездного скопления, что позволило влиять соседним звездам на структуру периферийных областей Солнечной системы. Степень обоснованности указанных версий пока неясна, нужны новые факты.

Седна относится к разряду «красных» объектов, она является почти столь же красной, что и Марс, хотя, несомненно, причина этого обстоятельства в другом. Красный цвет поверхности объектов типа Инсиона, Квавара и Варуны связывается с присутствием здесь определенных видов органических соединений типа толина. Это означает, что необходимо учитывать во всех космогонических гипотезах, анализирующих формирование Солнечной системы, факт обилия органических веществ на периферии системы.

Название Седна связано с именем эскимосской богини, повелевающей морскими животными.

Заключительные замечания. Еще три объекта пояса Койпера, пока не получивших собственных имен по состоянию на конец 2009 г., также достаточно велики. 2002 TC 302 имеет размеры около 1200 км и движется по вытянутой орбите вокруг Солнца. Размеры 2002 UX 25 оценены в 910 км, параметры орбиты позволяют отнести его к классическим объектам пояса Койпера. К этому же классу относится объект 2002 TX 300 с диаметром около 900 км. Уточнение в будущем характеристик этих объектов, возможно, позволит перевести их в класс карликовых планет.

Как указано выше, исследования пояса Койпера затруднены чрезвычайной удаленностью и отчасти низким альбедо находящихся здесь объектов. Несомненно, огромное количество малых объектов с размерами порядка километров, десятков и первых сотен километров, остаются пока недоступными для наблюдений. Тем не менее темпы открытия транснептуновых объектов, близкие к 100 объектам в год для первого десятилетия XXI в., не убывают. По-видимому, в ближайшие годы будут получены новые данные о характеристиках периферийной области Солнечной системы — пояса Койпера.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На какие области принято делить пояс Койпера?
2. Как классифицируют объекты, входящие в состав пояса Койпера?
3. Что привело к решению о лишении Плутона статуса планеты?
4. К какому классу небесных объектов можно отнести Харон?
5. Чем объясняется низкое альбедо большинства объектов пояса Койпера?
6. Чем можно объяснить неправильную форму такого массивного объекта, как Хаумея?
7. Чем уникальна Седна?
8. Как объясняется избыточное тепловое излучение Нептуна?
9. Что такое кьюбивно?
10. Дайте краткую характеристику свойств самого крупного плутоида.



КОМЕТЫ

Кометы — еще один тип небесных тел, которые, помимо планет, карликовых планет, спутников, астероидов, метеороидов и ледяных тел пояса Койпера, в большом количестве присутствуют в Солнечной системе. Кометы издавна наблюдались на ночном небе в виде объектов, имеющих относительно яркую *голову*, которая выглядит как размытая звезда, и длинный *хвост* меньшей яркости, иногда протягивающийся через все небо (см. рис. 16.1). Сквозь хвост могут быть видны яркие звезды, что указывает на крайне низкую плотность вещества в хвосте. Характерные размеры головы кометы — несколько тысяч (иногда десятки тысяч) километров, длина хвоста достигает нескольких миллионов (имели место случаи многих десятков миллионов) километров. Голова представляет собой разреженное облако из пыли и газа. Телескопические наблюдения позволяют обнаружить внутри головы кометы так называемое *ядро* — небольшое плотное небесное тело с характерными размерами в первые десятки километров, состоящее из льда с вкраплениями пыли и легких органических веществ.

Форма хвостов кометы бывает самой разнообразной. Традиционно (особенно в Средние века) считалось, что кометы являются предвестниками несчастий и катастроф. Отмечены случаи, когда люди со слабой нервной системой болели и даже умирали от страха при виде кометы, в сложной форме хвостов которых людям виделись изображения отрубленных голов, потоков крови и т. д. Давно уже



Рис. 16.1

Комета Уэста (фото Н. С. Черных,
Крымская астрофизическая обсерватория)

стало понятно, что эти страхи абсолютно беспочвенны. Физика комет, построенная на базе огромного количества наземных телескопических наблюдений, а также нескольких космических миссий, изучавших кометы с близких расстояний, на сегодняшний день в основном понятна, хотя остается много частных вопросов.

Движение комет. Характерные особенности движения комет впервые объяснил Эдмунд Галлей, указавший в 1705 г., что траектории движения комет представляют собой очень вытянутые эллипсы с большими эксцентриситетами. Поскольку эллипс является замкнутой кривой, Галлей предположил, что одна из ярких комет, орбиты которых он исследовал, должна вернуться к Солнцу и, согласно его вычислениям, снова появиться на небе в 1758 г. Прогноз подтвердился, и комета была названа именем Галлея (это произошло уже после его смерти). В дальнейшем традиция была продолжена, и кометы получают названия

по именам их первооткрывателей. Комета Галлея проходит свой перигелий раз в 76 лет; в очередной раз она будет наблюдаться в 2061 г. Афелий орбиты находится далеко за орбитой Нептуна.

Известно несколько сотен комет, однако только несколько десятков из них наблюдались в двух или более появлениях вблизи Солнца. Кометные орбиты представляют собой эллипсы с большими эксцентриситетами либо гиперболы (незамкнутые кривые), очень близкие к параболе.

Периодические кометы. Кометы,двигающиеся по эллиптическим орбитам, называются *периодическими* и возвращаются в точку своего перигелия с периодом, равным времени одного оборота вокруг Солнца. Периодические кометы принято разделять на *короткопериодические* (если период между двумя соседними последовательными появлениями в перигелии орбиты оказывается меньше 200 земных лет) и *долгопериодические* (если указанный период больше 200 лет). Как ясно из определения, комета Галлея оказывается короткопериодической кометой. Примером долгопериодической кометы может служить комета Хейла–Боппа, которая прошла перигелий в 1997 г. и вернется во внутренние области Солнечной системы спустя примерно 2500 лет (см. рис. 16.2).

Около 80% периодических комет движутся в плоскостях, несущественно наклоненных к плоскости эклиптики (менее 45°), при этом обладая «прямым» направлением — против часовой стрелки, если смотреть на Солнечную систему от *северного полюса мира* (в окрестностях Полярной звезды). Единственная из известных периодических комет — комета Галлея — движется в обратном направлении.

Среди короткопериодических комет можно выделить кометы, относящиеся к так называемому *семейству Юпитера*. Орбиты этих комет обладают афелиями в окрестностях 5,2 а. е. от Солнца (это большая полуось орбиты Юпитера). Существует гипотеза, подкрепленная расчетами, в соответствии с которой Юпитер может «перехватывать» своим гигантским тяготением кометы, которые ранее двигались по орбитам с существенно большей вытянутостью.



Рис. 16.2

Комета Хейла–Боппа (фото J. C. Casado)

Гравитация Юпитера изменяет параметры орбиты комет, чья масса ничтожна по сравнению с массой планеты-гиганта. Расчеты показывают, что в результате гравитационного взаимодействия Юпитера и кометы орбита последней может как увеличить, так и уменьшить эксцентриситет, в зависимости от конкретного взаимного расположения небесных тел во время их очередного сближения. В итоге может произойти как переход кометы на более короткопериодическую орбиту с уменьшением периода обращения, так и увеличение периода, и даже переход на незамкнутую гиперболическую орбиту (ускорение и выброс кометы на траекторию, по которой она навсегда уйдет из Солнечной системы).

В результате под влиянием тяготения планет-гигантов орбиты короткопериодических комет постоянно подвергаются значительным изменениям, поскольку они регулярно проходят вблизи больших масс планет-гигантов. Периодические кометы составляют не более 10% от общего количества наблюдаемых комет.

Непериодические кометы. Кометы, двигающиеся по гиперболическим орбитам, с высокой скоростью проходят вблизи Солнца (через зону планет земной группы), уходят и больше не возвращаются. В отличие от периодических, орбиты комет, которые движутся по гиперболическим орбитам, не тяготеют к плоскости эклиптики и могут двигаться с равной вероятностью в плоскостях, расположенных под любыми углами к плоскости орбиты Земли, причем как в прямом, так в обратном направлениях. Расчеты показывают, что кометы, имеющие почти параболические орбиты, приходят с гигантских расстояний $10^4 \dots 10^5$ а. е. от Солнца, что в 10...100 раз превышает афелий орбиты самого удаленного из известных занептунных тел — претендента в карликовые планеты Седны.

Непериодические кометы составляют около 90% от общего количества наблюдаемых комет. По-видимому, часть их перехватывается планетами-гигантами и превращается в периодические кометы. Возможен, как указано выше, и обратный вариант: комета, ставшая периодической, со временем выбрасывается обратно на незамкнутую траекторию и безвозвратно уходит на далекую периферию Солнечной системы.

Введение в физику комет. Находясь на огромном удалении от Солнца (в афелии орбиты, если речь идет о периодической комете, либо на незамкнутой траектории, если речь идет о непериодической комете) кометное ядро с характерными размерами 10...20 км имеет температуру, близкую к абсолютному нулю. На расстояниях порядка 10 и более а. е. от Солнца эти микроскопические по космическим меркам небесные тела практически не наблюдаемы.

Химический состав кометных ядер согласно современным данным, полученным как наземными спектроскопическими методами, так и в результате космических миссий, таков. Основу составляет водяной лед. Помимо замерзшей воды, здесь присутствуют малые примеси в виде замороженных оксидов углерода (окиси CO и двуокиси CO₂), синильной кислоты HCN, аммиака NH₃, а также формальдегида H₂CO. Есть основания полагать, что в недрах ледяных ядер могут присутствовать тугоплавкие

вкрапления из металлов, силикатов и органические соединения. Поверхность ядер, которая оказалась очень темной, по-видимому, покрыта коркой из пыли и органических соединений. Общепринято сравнение ядер кометы с «мартовскими сугробами в городе», представляющими собой рыхлый и пористый грязный лед.

В последние годы выполнены исследования нескольких ядер короткопериодических комет с помощью космических аппаратов. Ниже приводятся краткие результаты этих миссий. Отметим, что исследования проводились вблизи перигелиев орбит этих комет, когда температура их поверхности существенно выросла под влиянием солнечного излучения.

Комета Галлея. Во время последнего прохождения кометой Галлея своего перигелия в 1986 г. к комете были направлены четыре космических аппарата — «Вега-1» и «Вега-2» (СССР), «Джотто» (Европейское космическое агентство) и «Сакигакэ» (Япония). Было установлено, что ядро кометы Галлея представляет собой монолитную глыбу неправильной формы с характерными размерами $16 \times 8 \times 8$ км и очень низким альбедо (0,04) (рис. 16.3).

Комета Борелли. По данным аппарата «Deep Space 1» (США), осуществившего пролет вблизи ядра 22 сентября 2001 г. на расстоянии 2171 км, выяснилось, что водяного



Рис. 16.3

Комета Галлея (космический аппарат «Джотто», ЕКА)

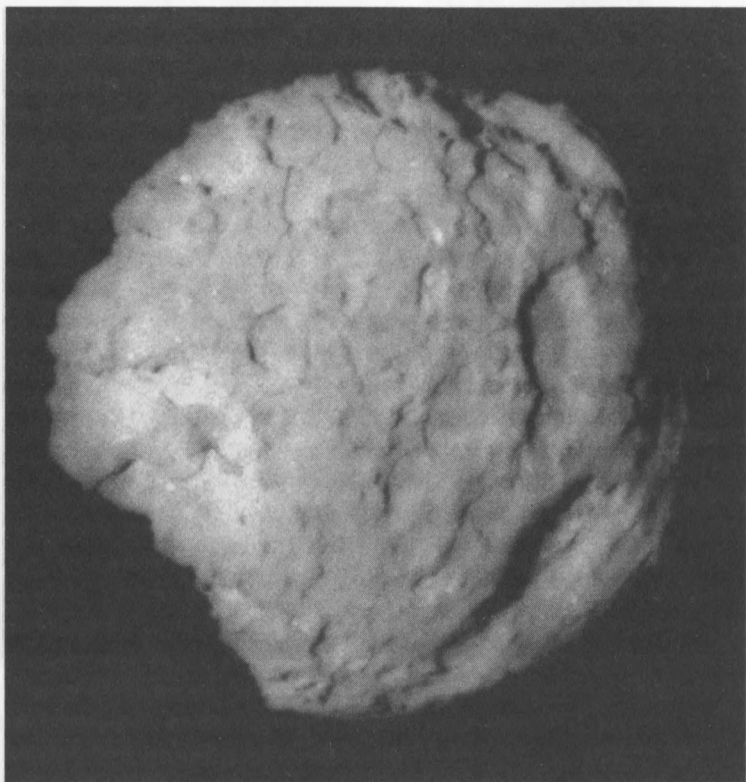


Рис. 16.4

Комета Вильда-2 (космический аппарат «СтарДаст», НАСА)

льда на его поверхности нет. Лед, по-видимому, испарился, осталась сухая и горячая корка из твердых темных частиц, покрывшая нижележащий водяной лед (температура до $+70^{\circ}\text{C}$). Цвет корки — черный, как у тонера для ксерокопирования.

Комета Вильда-2 изучалась аппаратом «СтарДаст» (США, 2 января 2004 г.) с расстояния 236 км. Обнаружены горы, утесы (до 100 м), кратеры, впадины, трещины глубиной до 150 м. Отмечены как плоское дно у кратеров, так и углубления в центре. Ядро продемонстрировало высокую активность — были обнаружены три мощные струи пылевых частиц, извергаемых кометным ядром (рис. 16.4).



Рис. 16.5

Комета Темпеля-1. Момент столкновения с ударным устройством (космический аппарат «Дип Импакт», НАСА)

Комета Темпеля-1 в июле 2005 г. исследовалась аппаратом «Дип Импакт» (США), осуществившим анализ результатов столкновения массивного ударного устройства из меди с ядром кометы. Ядро, как оказалось, имеет очень рыхлую структуру, мягче, чем сугроб порошкообразного тонкоструктурного снега. Был сделан вывод, что мелкие частицы изначально содержались в ядре и не были продуктом столкновения с ударным устройством. Одним из наиболее интересных результатов можно считать обнаружение большого количества углеродсодержащих молекул, обнаруженных при спектральном анализе плюма выброса. Это открытие показало (подтвердило), что кометы содержат существенное количество органических веществ (HCN , $(\text{CH})_x$, CO_2 , CH_3CN). Внутренняя часть кометы оказалась хорошо защищенной от солнечного нагрева. Дан-

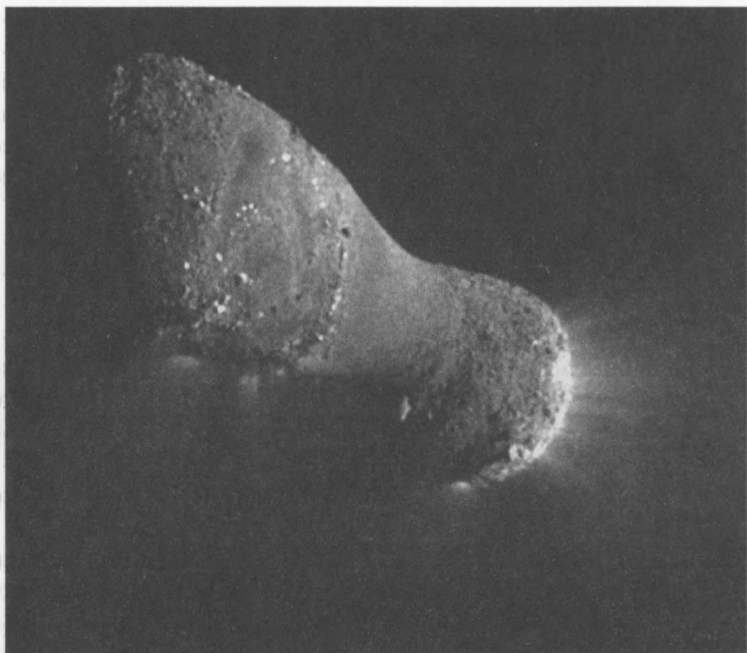


Рис. 16.6
Ядро кометы Хартли-2
(космический аппарат «ЕРОХІ», НАСА)

ные, полученные в ходе миссии, показали, что ядро сильно пористое и обладает крайне низкой теплопроводностью. Лед и другие вещества в глубине ядра могут оказаться неизменными со времен формирования Солнечной системы. В ходе спектральных измерений обнаружены эмиссионные полосы воды, испаренной теплом удара, за которыми уже через несколько секунд последовали полосы поглощения от частиц льда, выброшенных из-под поверхности (рис. 16.5).

Комета Хартли-2. Осенью 2010 г. космический зонд «Дип Импакт», переименованный в «ЕРОХІ», продолжая свою многолетнюю миссию, прошел в 700 км вблизи ядра кометы Хартли-2. Ядро кометы оказалось вытянутым гантелеобразным телом длиной 2,2 км с узкой перемычкой диаметром 400 м. Удалось зарегистрировать мощные газопылевые выбросы (джеты) с поверхностей обоих округлых

концов ядра кометы. Кометное ядро было окутано облаком мелких рыхлых комков снега максимальным размером в несколько десятков сантиметров. Инфракрасный спектрометр космического зонда показал, что выброс на освещенной стороне ядра кометы представляет собой струю водяного пара, а выброс на утолщенном конце небесного тела содержит углекислый газ.

Судя по всему, комета продемонстрировала два механизма потери воды: в гладкой области «шейки» сублимация льда приводит к испарению, а на концах, отличающихся сложным рельефом, испаряется твердая углекислота, вырывая из ледяного тела ядра кометы снежки разных размеров (см. рис. 16.6). Наблюдения показали, что ядро кометы Хартли-2 выбрасывает в окружающее пространство до 300 т вещества в секунду. При таких темпах потери массы ядро кометы должно разрушиться полностью примерно за 100 лет.

Таким образом, на больших расстояниях от Солнца ядра комет представляют собой тела из «грязного» льда с температурой, близкой к абсолютному нулю. По мере приближения к перигелию (либо к фокусу гиперболы, где находится Солнце) ядро нагревается и его свойства меняются. Лед начинает испаряться. При этом испаряющийся лед увлекает с собой пылинки, которые кометное ядро «нагребло» во время длительного полета через различные области Солнечной системы. Молекулы и пылинки движутся от ядра, образуя облако (голову, или кому, рис. 16.7). Под действием давления солнечного света пылинки и молекулы начинают двигаться из комы в сторону, противоположную Солнцу, образуя протяженный хвост. Ультрафиолетовое излучение Солнца приводит к диссоциации молекул, в результате в коме появляется большое количество «осколков» молекул, испарившихся с поверхности кометного ядра. Это отдельные атомы и радикалы — например группа CN, отделившаяся от молекул HCN, OH и H, на которые распадаются молекулы H₂O. Вторичные молекулы (осколки первичных), атомы и радикалы превращаются в ионы. В результате в хвосте наблюдаются только ионы, в коме же (вблизи ядра кометы) — как ионы,



Рис. 16.7
Голова кометы Холмса (фото М. Passarge)

так и нейтральные и ионизованные молекулы, радикалы и атомы. Ионы образуют собственную ионосферу кометы, которую обтекает поток солнечных частиц — *солнечный ветер*.

Видимое свечение комы на фоне черного неба обусловлено двумя причинами: рассеянием (отражением) солнечного света на пылинках и собственным излучением молекул C_2 , опять-таки инициированным излучением Солнца.

Под влиянием нагрева во время прохождения перигелия вблизи Солнца ядра больших комет теряют до 10^{30} атомов водорода в секунду, причем скорости отделяющихся от ядра молекул воды достигают 1 км/с. Прохождение перигелия оказывается важным фактором для эволюции ядра кометы. Из-под нагретой корки темного вещества на поверхности ядра начинают бить фонтаны испаряющегося льда, увлекающие за собой фрагменты корки, ледяную крошку, пылевые частицы. По-видимому, неравномерный нагрев поверхностных слоев ядра кометы (с подсолнечной стороны — до $+100^{\circ}C$, с противоположной — около



Рис. 16.8
Комета Люлин (фото М. Passarge)

абсолютного нуля) должен приводить к возникновению напряжений, растрескиванию ядра, образованию под внешней коркой полостей, наполняющихся водяным паром с растущим давлением, и другим динамическим процессам. Оценки показывают, что ядро крупной кометы типа кометы Галлея должно терять во время прохождения перигелия до нескольких метров поверхностных слоев, отделяющихся от ядра и формирующих кому, а затем хвост кометы.

Ионы ускоряются потоком *солнечного ветра* (частиц, извергаемых Солнцем) и образуют так называемый *хвост первого типа*, который всегда направлен радиально в сторону от Солнца. Он обычно имеет голубоватый цвет. В отличие от него, *хвост второго типа* состоит из светлых пылинок, имеющих размеры от долей до десятков микрометров. Хвосты второго типа обычно слегка изогнуты и отличаются по направлению от хвостов первого типа. Иногда наблюдается так называемый *антихвост*, направленный в сторону Солнца. Антихвост состоит из извергаемых ядром кометы крупных пылинок, распространяющихся от ядра в плоскости орбиты кометы (рис. 16.8).

Эволюция кометных ядер и метеорные потоки. Простейшие оценки показывают, что ядро короткопериодической кометы должно за несколько десятков (сотен) проходов через перигелий орбиты разрушиться, образовав рой так называемых *метеорных частиц*, которые продолжают двигаться по эллиптической орбите кометы. Давление солнечного света и гравитационное воздействие планет должно приводить к постепенной эволюции оставшегося от кометы *метеорного потока*, включающего в себя мелкие частицы с размерами от 0,5 микрон (мкм) до сантиметров и десятков сантиметров. Самые малые частицы (0,5...1,0 мкм) вымываются из Солнечной системы под действием светового давления и рассеиваются на огромных расстояниях от Солнца. Частицы более крупных размеров (порядка 10 мкм, или 0,01 мм) постепенно тормозятся за счет *эффекта Пойнтинга–Робертсона*. Суть этого эффекта состоит в том, что вектор силы солнечного светового давления имеет ненулевую компоненту, направленную против вектора скорости. В результате частица, находящаяся на круговой орбите с радиусом 3 а. е. (в Главном поясе астероидов), примерно за 10000 лет тормозится настолько, что по спиральной траектории приближается к Солнцу и падает на него. Таким образом, на кометной орбите остаются преимущественно относительно крупные частицы с размерами в доли миллиметра и сантиметра. Для таких частиц влияние силы солнечного давления малозначительно.

Земля в ходе своего движения по орбите вокруг Солнца постоянно пересекает траектории таких метеорных потоков, оставшихся после распада кометных ядер. Частицы размерами в доли миллиметра и миллиметры, входя в атмосферу, нагреваются и сгорают на высотах 90...70 км, оставляя светящиеся следы из ионизованного газа, которые быстро угасают. Такое свечение называется *метеором*. Если входящая в атмосферу частица оказывается больших размеров (порядка сантиметров), свечение оказывается более ярким, за летящим по небу ярким шаром виден яркий хвост из ионизованного раскаленного воздуха, и такой метеор принято называть *болидом*. Иногда явление болида

сопровождается выпадением метеорита, если метеорное тело оказывается достаточно крупным (от 0,5 м до первых метров) и не успевает полностью сгореть в верхних слоях атмосферы. Как правило, выпадение метеоритов связано с вхождением в атмосферу железных, силикатных либо железосиликатных фрагментов астероидов, в то время как метеоры считаются продуктом распада кометных ядер на микроскопические ледяные и пылевые частицы и их конгломераты. Вопрос о том, присутствуют ли в метеорных потоках, генетически связанных с распавшимися кометами, более крупные плотные тела с характерными размерами в метры и десятки метров, остается неизученным.

Плотность метеорного потока неоднородна. В связи с этим число метеоров, наблюдаемое в течение часа во время прохождения Земли сквозь рой метеорных частиц, меняется от года к году. Иногда (достаточно редко) наблюдаются так называемые метеорные дожди (синоним — распространенное, но, по сути, неправильное понятие «*звездные дожди*»), когда *часовое число метеоров* достигает тысяч и даже десятков тысяч. Если следы метеоров одного метеорного потока продолжить назад, то они пересекутся вблизи одной точки, которая называется *радиантом* метеорного потока. Наиболее известные метеорные потоки названы по именам созвездий, в пределах которых находится соответствующий радиант. Так, например, Персеиды — метеорный поток, наблюдаемый ежегодно в период с 20 июля по 20 августа и имеющий радиант в созвездии Персея, Леониды — метеорный поток (период наблюдения 18–19 ноября), имеющий радиант в созвездии Льва и т. д.

Помимо метеоров, относящихся к определенным метеорным потокам, наблюдаются так называемые отдельные *спорадические* метеоры, которые не удастся привязать к конкретным потокам. Предполагается, тем не менее, что и этот тип метеоров связан с орбитами периодических комет, вероятно, уже давно распавшихся.

Таким образом, близость кометных орбит и метеорных потоков позволяет считать, что метеорные потоки — это рои частиц, содержащие фрагменты распавшихся кометных ядер.

Кометная опасность. Понятию астероидной опасности посвящена соответствующая глава настоящего пособия. В то же время в литературе, посвященной этому вопросу, применяется термин «астероидно-кометная опасность», или АКО. Дело в том, что не только астероиды, но и ядра комет могут представлять опасность при возможных столкновениях с Землей. По некоторым оценкам, до 10% ударных кратеров на земной поверхности порождено столкновениями нашей планеты с кометными ядрами. По-видимому, наиболее интенсивные кометные бомбардировки наблюдались на ранней стадии формирования Земли. Заметим, что некоторые варианты теории эволюции нашей планеты допускают, что вода на Землю была в основном привнесена именно кометами. Интенсивность проникновения кометных ядер во внутренние области Солнечной системы, не является постоянной величиной. Вполне правдоподобной является гипотеза о кометных ливнях, когда из-за гравитационного воздействия на облако Оорта со стороны проходящей близко соседней звезды значительное количество кометных ядер может изменять параметры своих орбит и устремляться внутрь Солнечной системы. Не исключено, что подобные ливни неоднократно имели место в прошлом.

Поскольку наклоны орбит комет могут принимать значения от 0 до 180° , часть кометных ядер движется по отношению к Земле по встречным траекториям. Примером может служить комета Люлин, наблюдавшаяся в 2009 г. Это означает, что скорость столкновения может достигать 72 км/с, что многократно увеличивает разрушительные воздействия в случае импакта. Следует подчеркнуть, что при космических скоростях столкновений становится несущественным, из камня (в случае астероида) или льда (в случае кометного ядра) состоит тело-импактор.

Наиболее вероятным примером столкновения небольшого фрагмента ядра кометы с Землей является *Тунгусский феномен*. Наблюдения проявлений Тунгусского феномена в июне 1908 г. над Северной Сибирью расцениваются большинством исследователей как следствие вхождения в земную атмосферу со скоростью порядка 20 км/с фрагмента



Рис. 16.9

Вывал леса вблизи места взрыва Тунгусского космического тела

ледяного ядра кометы с характерным размером порядка нескольких десятков метров и массой порядка 1...2 млн тонн. Расчеты показывают, что ледяное ядро должно было взрывообразно испариться на высоте 6...10 км над поверхностью Земли, что эквивалентно взрыву с мощностью 8...15 млн тонн тринитротолуола (ТНТ). Ранние оценки давали мощность взрыва до 40 Мт ТНТ. В результате разрушения Тунгусского метеорного тела наблюдалось землетрясение, мощная ударная волна повалила лес на площади около 2200 км² (рис. 16.9), вспышка вызвала грандиозный лесной пожар. Восстановленная по многим данным траектория Тунгусского тела близка к траектории кометы Энке, с фрагментом которой, как правило, ассоциируют описываемый феномен. Надо заметить, что данная концепция, которая выглядит вполне убедительной и объясняет практически все известные факты, тем не менее, пока не считается окончательной и имеет статус наиболее вероятной рабочей гипотезы.

Еще одним наглядным примером столкновения кометы с планетой может служить падение фрагментов ядра

кометы Шумейкеров–Леви-9 в период с 16 по 22 июля 1994 г. на Юпитер. Уже через 1 час 45 минут после падения фрагмента G (обозначенного, как и другие фрагменты, буквами английского алфавита) в атмосфере Юпитера образовалось темное пятно размерами около 9000 км (несколько меньше диаметра Земли). Общее количество энергии, выделившееся при падении осколков кометы, соответствует $10^5 \dots 10^7$ мегатонн в тротиловом эквиваленте. Очевидно, что подобное столкновение с Землей уничтожило бы цивилизацию. В списке близких (меньше 15 млн км) прохождений комет за последние 300 лет значится 21 событие. Ближе всего к Земле подходила комета Лекселя в июле 1770 г. (2,25 млн км от Земли, или 6 радиусов орбиты Луны).

Тем не менее кометная угроза выглядит менее значительной по сравнению с астероидной опасностью из-за меньшего (по сравнению с астероидами) количества короткопериодических комет, которые к тому же довольно быстро разрушаются, превращаясь в неопасные и малоопасные рои мелких метеороидов и пыли. Общее количество наблюдаемых комет, видимо, недооценивается за счет сложностей наблюдений объектов,двигающихся со стороны Солнца.

Наиболее известная из комет — комета Галлея — проходила в 1910 г. в 22 млн км от Земли, при этом наша планета пролетела сквозь газопылевой хвост кометы. Это событие ожидалось обывателями с большой тревогой. Однако плотность вещества в хвосте кометы ничтожна, поэтому прохождение Земли сквозь кометный хвост не вызвало никаких последствий. Поэтому в рамках проблемы кометной опасности следует рассматривать только оценку вероятности возможных столкновений с ядрами комет. Кометные хвосты опасности для нас не представляют.

Проблема происхождения комет. Поскольку короткопериодические кометы, как показано выше, не могут существовать более нескольких тысяч (десятков тысяч) лет, но, тем не менее, в заметном количестве наблюдаются в настоящее время, а непериодические кометы регулярно появляются из удаленных областей Солнечной системы,

возникает задача построения теории, объясняющей постоянное проникновение кометных ядер во внутренние области Солнечной системы.

Такая теория в окончательном виде не существует. В качестве основной гипотезы (парадигмы) вводится представление о существовании так называемого *облака Оорта* — гигантского шарового слоя, содержащего сотни миллионов ледяных кометных ядер и охватывающего Солнце на гигантских расстояниях порядка 200000 а. е., или одного парсека (1 пк = 206265 а. е.). Кометные ядра здесь движутся по квазикруговым траекториям вокруг Солнца не только в плоскости, близкой к плоскости эклиптики, но и во всевозможных плоскостях. На этих расстояниях от Солнца круговая, или первая космическая, скорость составляет всего около 70 м/с. В результате согласно описываемой концепции гравитационное воздействие ближайших звезд (здесь расстояние до соседних звезд оказывается того же порядка, что и расстояние до Солнца) может изменить орбиту и направление движения кометного ядра. Часть ядер должна в результате покидать навсегда Солнечную систему. Но другая часть может перенаправляться в ее центральные области. Незначительного импульса может оказаться достаточно, чтобы ядро, направившееся в сторону Солнца, постепенно ускорялось. Оно может пролететь с огромной скоростью вблизи Солнца в виде непериодической кометы, а может быть перехвачено гравитацией Юпитера или других планет-гигантов, потерять скорость и выйти на эллиптическую орбиту вокруг Солнца, превратившись в периодическую комету. Дальнейшая судьба такой кометы зависит от взаимного расположения ядра кометы, Солнца и планет-гигантов.

Первый вариант эволюции — новое ускорение за счет гравитации планеты-гиганта и выход на гиперболическую траекторию с последующим покиданием Солнечной системы.

Второй вариант — сравнительно быстрое (за характерное время порядка $10^3 \dots 10^5$ лет) разрушение во время нахождения на короткопериодической орбите с низким перигелием и превращение в рой метеорных частиц.

Третий вариант — столкновение с какой-либо из планет Солнечной системы до реализации второго варианта. Падение распавшегося на отдельные фрагменты ядра кометы Шумейкеров–Леви-9 наблюдалось в июле 1994 г. Фрагменты с размерами порядка километров вызывали формирование огненных шаров с диаметрами порядка 1000 км в атмосфере Юпитера и темных пятен в облачном слое с характерным размером порядка земного шара. В 2009 г. аналогичное расплывающееся темное пятно было также обнаружено в атмосфере (в 2011 г. приведены аргументы в пользу версии о том, что на этот раз с планетой-гигантом столкнулся астероид). Эти наблюдения показывают, что планеты-гиганты могут выступать в качестве эффективных «ловцов комет», перехватывающих кометные ядра, движущиеся из облака Оорта в центральные области Солнечной системы.

Открытие осенью 2009 г. присутствия ледяного льда в кратере на полюсе Луны (в результате спектроскопического анализа вылетевших из кратера кусков грунта после падения туда американского космического зонда) подтверждает гипотезу о том, что столкновения во внутренних областях Солнечной системы с кометами могли быть достаточно частыми. Во всяком случае становится фактом, что в район, где лед никогда не тает под действием солнечного света, было доставлено значительное количество кометного вещества. Наземные спектроскопические наблюдения показали, что изотопный состав ядра кометы Линейар оказался сходным с составом земного океана. Этот факт указывает на то, что именно кометам Земля может быть обязана наличию гидросферы, возможно, принесенной из космоса.

В последние годы космический аппарат SOHO, ведущий исследования Солнца, выполнил многочисленные наблюдения так называемых комет, *царапающих Солнце*, т. е. пролетающих в непосредственной близости (в нескольких радиусах Солнца) от светила. Такие кометы не поддаются наблюдениям с помощью других средств, поскольку оказываются на дневном небе и прилетают, как правило, со стороны Солнца. Это обстоятельство позволяет

сделать вывод, что общее число комет, прибывающих извне в окрестности Солнца, недооценивалось.

Таким образом, гипотетическое облако Оорта рассматривается большинством исследователей как древний резервуар ледяных кометных ядер, сформировавшихся на ранних стадиях образования Солнечной системы, который и в наше время продолжает поставлять кометы во внутренние области Солнечной системы.

Гипотеза о существовании облака Оорта поддерживается не всеми исследователями, существуют и альтернативные модели. Надо заметить, что хотя имеющиеся факты могут быть согласованы с этой идеей, прямых доказательств существования облака Оорта пока нет. Есть гипотезы, связывающие приход комет из более близких областей (пояса Койпера). Советский исследователь С. К. Всехсвятский предлагал гипотезу о формировании комет (по крайней мере, из семейства Юпитера) в результате выбросов вещества в системе Юпитера.

В настоящее время в полете находится космический аппарат «Розетта», который спустя несколько лет будет исследовать с близкого расстояния ядро кометы Чурюмова–Герасименко. Исследования комет продолжаются.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На какие группы принято делить кометы?
2. Каковы основные характеристики кометы Галлея?
3. Может ли быть опасным для Земли прохождение сквозь хвост кометы? Поясните свой ответ.
4. Что такое «царапающие Солнце» кометы?
5. Изложите гипотезу об облаке Оорта как источнике комет.
6. Поясните, в чем состоит генетическая связь между кометами и метеорными потоками.
7. Разъясните следующие понятия: «метеороид», «метеорит», «метеор», «болид», «радиант».
8. Какова базовая гипотеза, объясняющая феномен Тунгусского небесного тела?
9. Почему термин «Тунгусский метеорит» некорректен?
10. Опишите, что происходит с кометными ядрами по мере их приближения к Солнцу.
11. Укажите, чем физически отличаются три основных типа кометных хвостов.



В предыдущих лекциях шла речь о небесных телах, составляющих Солнечную систему и состоящих главным образом из твердого (частично жидкого и газообразного) вещества. Основное внимание было уделено сравнительным характеристикам планет земной группы и спутников планет-гигантов, позволяющим сопоставлять параметры планеты Земля и указанных объектов. В настоящей лекции приведены краткие характеристики центрального объекта Солнечной системы, радикально отличающегося по своим физическим характеристикам от всех рассмотренных выше объектов. Речь идет о звезде Солнце (см. рис. 17.1).

Изучению Солнца может быть посвящен целый учебный курс. В настоящей лекции, носящей ознакомительный характер, кратко приведены лишь основные качественные характеристики Солнца.

Основные характеристики Солнца. Солнце — небесное тело (звезда) с массой $2 \cdot 10^{30}$ кг, что соответствует примерно 330 тыс. масс Земли. Возраст Солнца оценивается в 5 млрд лет. Состав соответствует составу родительской *пылегазовой туманности*. 74% массы Солнца приходится на водород, 24% — на гелий, т. е. во многом сохраняется первичное (со времен *Большого взрыва*) соотношение водорода и гелия. Кроме того, на Солнце присутствуют в мизерных концентрациях (но больших по сравнению с планетами абсолютных количествах) стабильные атомы (более 80 химических элементов) всей таблицы Менделеева.

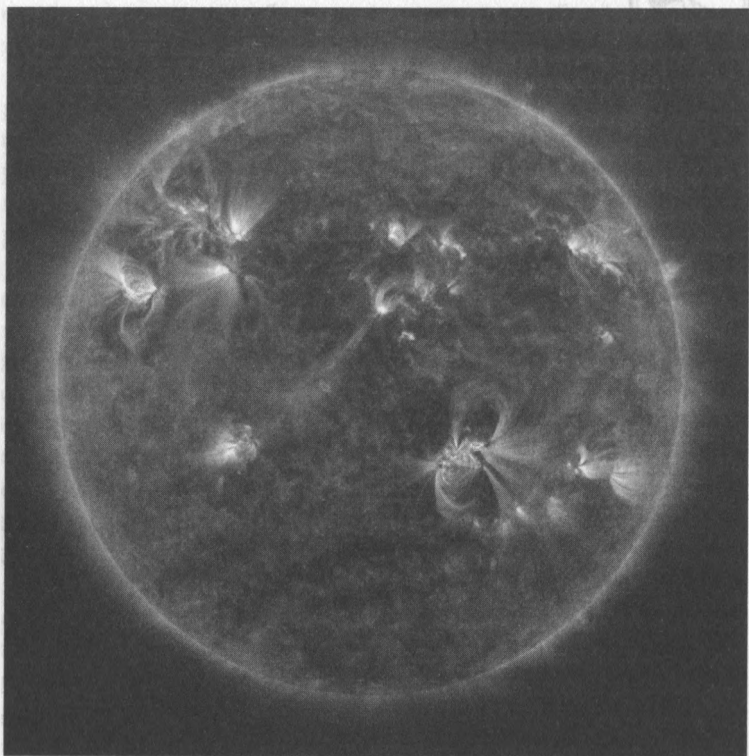


Рис. 17.1

Солнце в ультрафиолетовых лучах
(снимок космической обсерватории SDO, НАСА)

Температура на поверхности составляет 5500...6000 К. За поверхность Солнца условно принимается уровень так называемой фотосферы — тонкого, примерно в 400 км, слоя, ниже которого газ становится непрозрачным.

Средняя плотность Солнца около $1,4 \text{ г/см}^3$, что несущественно превышает плотность воды. Однако в центре Солнца из-за огромного давления ($2 \cdot 10^{15} \text{ Па}$) плотность вещества достигает значений на два порядка больших — более 150 г/см^3 , а температура — более $15 \cdot 10^6 \text{ К}$. При таких условиях в ядре Солнца протекают *реакции ядерного синтеза* (термоядерные реакции). Их суть сводится к тому, что в ходе цепочки из трех типов реакций протоны

(ядра атомов водорода) сливаются между собой, образуя в конечном итоге ядра атомов гелия. При этом из-за разницы в массе вступающих в реакции и образующихся при этом продуктов реакций (масса продуктов получается несколько меньшей) дефицит масс восполняется выделяющейся энергией в виде гамма-излучения. Здесь реализуются и иные типы реакций, приводящие к синтезу ядер других легких элементов.

Каждую секунду термоядерные реакции в ядре Солнца превращают примерно 5 млн тонн водорода в электромагнитное излучение. В центральных областях Солнца соотношение водород–гелий сдвинуто в сторону гелия, которого становится все больше. Тем не менее расчеты показывают, что водородного топлива хватит еще примерно на 5 млрд лет относительно стабильного энерговыделения. Эти процессы идут только в центральной области Солнца — ядре (не далее 0,25...0,3 радиуса Солнца от его центра).

На глубинах от 0,3 до 0,7 радиуса Солнца (считая от центра) энергия передается излучением. Эта зона так и называется — *зона излучения* или *зона радиативного* (т. е. лучистого) *переноса*. Как указано выше, энергия, выделяемая в виде гамма-квантов в ходе термоядерных реакций, протекающих в ядре, к поверхности просачивается чрезвычайно долго — порядка миллиона лет. Каждый последующий слой поглощает кванты из внутренних слоев и излучает кванты меньшей энергии, чем предыдущий.

На глубинах от 0,7 радиуса до поверхности Солнца основным процессом переноса энергии наружу становится *конвекция* — восходящие потоки вещества (раскаленной плазмы). Этот диапазон глубин называется *конвективной зоной*.

О внутренних слоях Солнца можно судить по характеру колебаний, которые регистрируются спектральными методами на *фотосферном* уровне (это направление исследований называется *гелиосейсмологией*).

Начиная с некоего уровня газ становится прозрачным, и мы можем наблюдать «вершины» восходящих конвективных потоков в виде так называемой *фотосферной грануляции* (см. рис. 17.2). Этот слой получил название *фотосфера*. Толщина фотосферы невелика — всего несколько

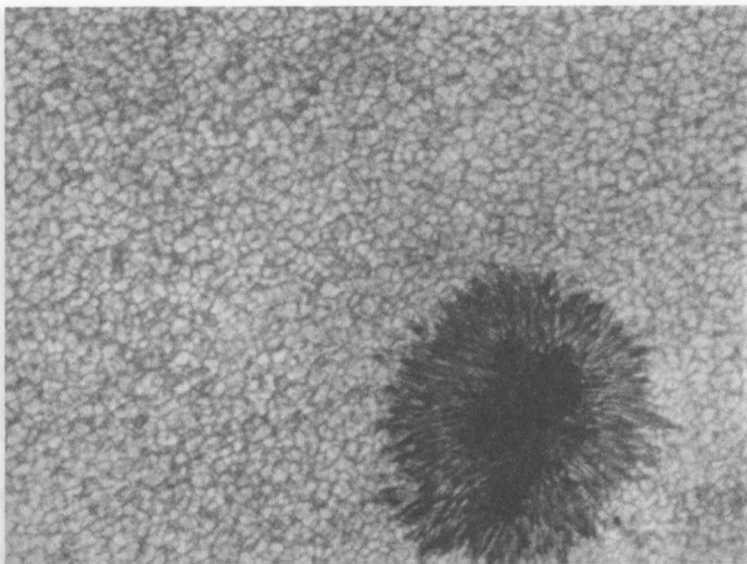


Рис. 17.2
Фотосферная грануляция и солнечное пятно
(советская стратосферная обсерватория, 1970)

сотен километров, на протяжении которых солнечная плазма меняет свойства от полной непрозрачности к прозрачности. На уровне фотосферы отмечены самые низкие на Солнце температуры — в пределах 4000...6000 К.

Прозрачные слои, расположенные над фотосферой, условно называются *солнечной атмосферой*. С помощью специальных фильтров (или на краю солнечного диска — во время полных солнечных затмений) можно увидеть так называемую *хромосферу* Солнца — неоднородный слой, лежащий в пределах от 2500 до 12000 км над фотосферой. Здесь температура снова начинает подниматься, хотя плотность газа продолжает падать по мере удаления от центра Солнца. Характерные температуры в хромосфере — 6000...15000 К.

Над хромосферой располагается протяженная солнечная *корона* — чрезвычайно разреженные, но очень горячие верхние слои солнечной атмосферы. Температура короны достигает 2 млн градусов, другими словами, части-

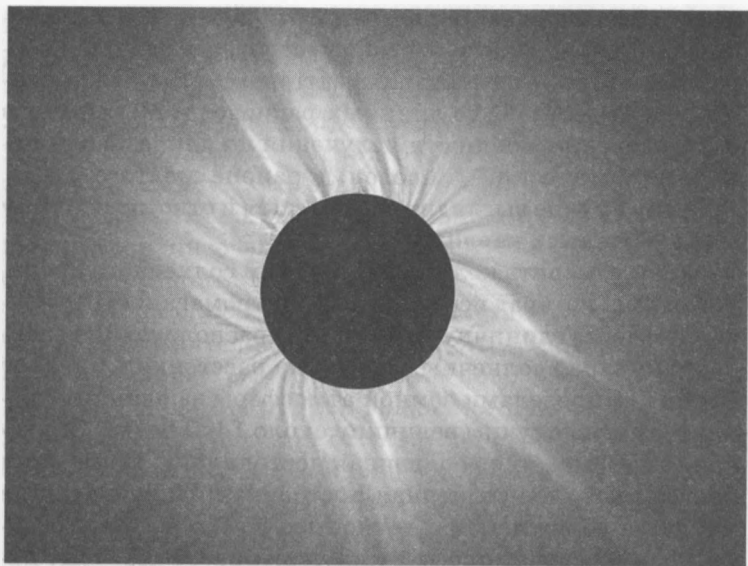


Рис. 17.3

Корона Солнца во время затмения 29 марта 2006 г.
(изображение синтезировано из многих снимков, фото Koen van Gorp)

цы, находящиеся здесь, двигаются с огромными скоростями. Корона простирается на много радиусов Солнца, ее плотность падает по мере удаления от Солнца (рис. 17.3). Поток частиц от Солнца — *солнечный ветер* — заполняет область вокруг Солнца, включающую в себя все планеты Солнечной системы.

Эта область, где преобладают частицы солнечного ветра (по сравнению с плотностью потока частиц, прилетевших от других звезд), называется *гелиосферой*. Положение границы гелиосферы — области, где плотность потока частиц, извергаемых Солнцем, сравнивается с плотностью частиц, приходящих от удаленных звезд, — до сих пор неизвестно (космические аппараты «Пионер» и «Вояджер», запущенные в 70-е гг. XX в. и преодолевшие орбиту Плутона, до сих пор не достигли границы гелиосферы и продолжают полет в ее пределах, хотя, по некоторым данным, продолжающим поступать с борта «Вояджера-2», приближаются к ней). Поэтому Земля погружена в постоянный

поток частиц и электромагнитного излучения, поступающих от Солнца. Излучение характеризуется полным набором длин волн — от коротких рентгеновских лучей (а иногда и гамма-лучей) до длинных радиоволн. Максимум в распределении мощности излучения по длинам волн падает на оптический диапазон, в районе желтого цвета. Поэтому Солнце выглядит желтоватым и относится к типу звезд — желтых карликов.

Если измерить количество энергии солнечного происхождения, которая переносится электромагнитным излучением через единичную площадку, расположенную перпендикулярно солнечным лучам на расстоянии 1 а. е. от Солнца за пределами земной атмосферы за единицу времени, то мы получим величину около 1400 Вт/м^2 . Эта величина называется «солнечная постоянная». Измерения показывают, что солнечная постоянная практически не меняется со временем с точностью до 0,5% (что, собственно, и обеспечило соответствующее название этому параметру). Это означает, что Солнце, по крайней мере в современную эпоху, является звездой с достаточно стабильным режимом энерговыделения. Стационарность солнечного излучения обеспечивает внешние условия для поддержания стабильности состояния поверхностей планет, включая Землю.

Понятие о солнечной активности. В свое время выдающийся астрофизик сэр Артур Эддингтон высказался в том духе, что ничего проще звезды невозможно себе представить. Сферически симметричный объем газа однозначно описывается давно известными физическими законами. Поскольку при сферической симметрии свойства вещества зависят только от одной переменной — расстояния до центра, вполне адекватным может быть одномерное рассмотрение.

Однако природа оказалась значительно сложнее. Два фактора, действующие на Солнце, существенно усложнили и сделали *нестационарными* (переменными во времени) многие процессы на Солнце.

Во-первых, в недрах Солнца генерируются мощные магнитные поля. Поскольку Солнце состоит из ионизо-

ванного при высоких температурах вещества (плазмы), движения заряженных частиц (токи) создают магнитные поля разнообразных конфигураций, масштабов и напряженностей. На Солнце определяющим становится свойство «*вмороженности*» магнитного поля в плазму. Суть его заключается в том, что вещество может двигаться только вдоль силовых линий магнитного поля. С другой стороны, поток ионизованного вещества может увлекать за собой и деформировать конфигурацию вмороженного поля.

Во-вторых, основополагающим становится свойство так называемого дифференциального вращения Солнца. Экваториальные слои Солнца близ поверхности совершают один оборот вокруг оси вращения нашего светила за 25 суток. При удалении от экватора скорость вращения снижается, вблизи полюсов один оборот требует 30...35 суток. Этот эффект уже рассматривался в предыдущих лекциях на примерах планет-гигантов.

Дифференциальное вращение вытягивает, искривляет и скручивает силовые линии магнитного поля. Это приводит по крайней мере к двум важнейшим следствиям.

Первое. На поверхности Солнца могут возникать (всплывать из подфотосферных слоев) локальные области с магнитными полями различной напряженности. Поскольку согласно свойству вмороженности поля магнитные поля могут управлять направлением движения вещества, на поверхности и в атмосфере Солнца возникает множество достаточно сложных структур. В их числе, например, жгуты из силовых линий магнитного поля (силовые трубки магнитного поля) очень высокой напряженности — 1000...4000 Гс. Конвекция в этих местах затруднена, в связи с чем температура там на уровне фотосферы оказывается пониженной примерно на 1500 К, и поэтому по контрасту с ярко светящейся фотосферой они выглядят как несколько более темные участки — *солнечные пятна* (см. рис. 17.2 и 17.4). Как правило, вокруг пятен располагаются зоны повышенной яркости, с напряженностью поля в сотни гаусс — *факелы*. Относительно компактные области (которые, впрочем, могут многократно превышать размеры Земли), где располагаются группы пятен

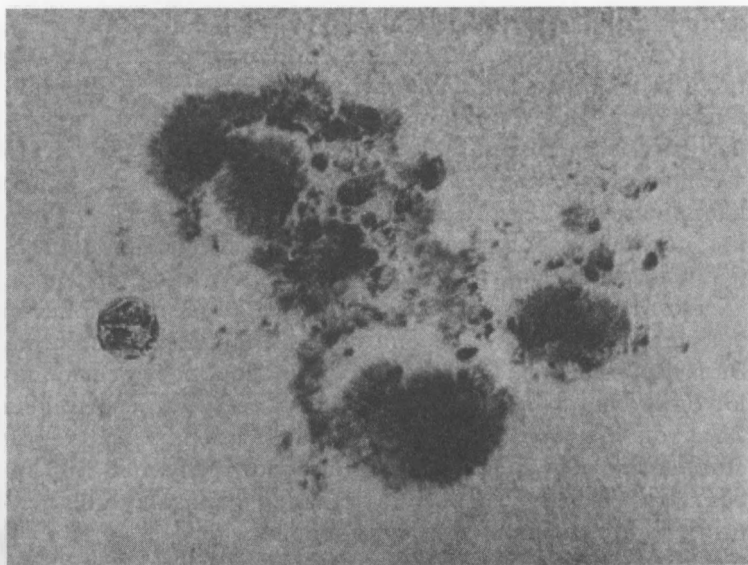


Рис. 17.4
Группа солнечных пятен и (для сравнения)
Земля в том же масштабе (НАСА)

и окружающие их факельные поля, образуют так называемые *активные области* на Солнце.

Над линиями раздела магнитных полярностей в хромосфере могут возникать облака из относительно плотного газа (*протуберанцы*). Вещество протуберанца поддерживается арками из силовых линий магнитного поля.

Пятна, факелы, протуберанцы отличаются широким спектром морфологических типов и времени жизни — от часов до многих недель (в отдельных случаях — месяцев).

Магнитное поле в активных областях способно накапливать огромную энергию, которая может импульсно освобождаться в виде грандиозных взрывов на Солнце — так называемых *солнечных вспышек*. Наиболее мощные вспышки высвобождают до $10^{23} \dots 10^{27}$ Дж. Во время вспышек выбрасывается огромное количество протонов, альфа-частиц (ядер атомов гелия) и электронов. Потoki частиц достигают внешних оболочек Земли через несколько часов (или десятков часов), вызывая здесь целый ряд эф-

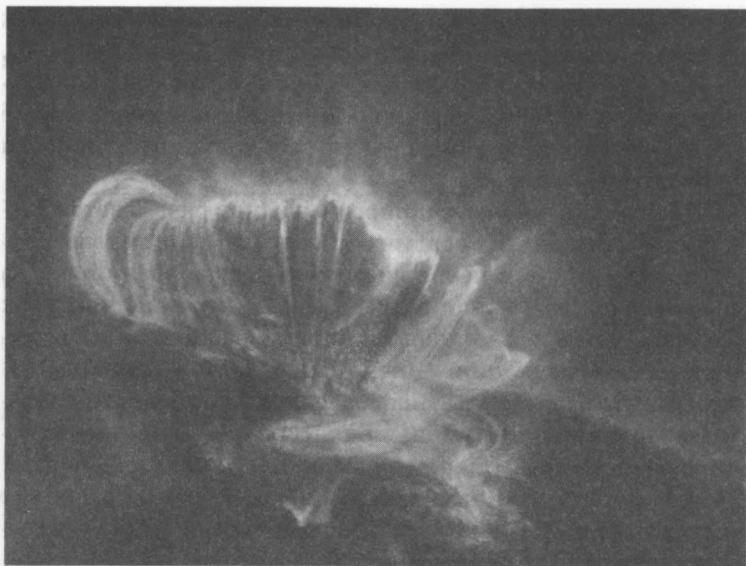


Рис. 17.5
Вспышка на Солнце
(космическая обсерватория TRACE, НАСА)

фектов. Кроме того, вспышки создают кратковременные мощные всплески электромагнитного излучения на некоторых длинах волн.

Весь комплекс нестационарных (переменных во времени) процессов и явлений на Солнце преимущественно магнитной природы называется *солнечной активностью*. К проявлениям солнечной активности относятся все перечисленные образования и явления — пятна, факелы, протуберанцы, вспышки и целый ряд других (рис. 17.5). Так, например, в последние годы XX в. спутниковые наблюдения позволили обнаружить еще один тип солнечной активности, так называемые *выбросы коронального вещества* — грандиозные выбросы сгустков вещества (газа), распространяющихся с высокими скоростями прочь от Солнца и способных достигать Земли.

Второе следствие. Сложное взаимодействие существующего режима генерации магнитных полей и дифференциального вращения приводит к явлению *циклическости*

солнечной активности. Количество активных областей, а также связанных с ними вспышек, протуберанцев и т. д., периодически меняется почти от нуля (минимумы солнечной активности) до довольно больших значений, после чего общее количество проявлений солнечной активности снова идет на спад.

Цикл солнечной активности обычно развивается следующим образом. На стадии минимума цикла первые пятна нового цикла в небольшом количестве возникают на широтах около $35...40^\circ$ в северном и южном полушариях Солнца. Постепенно процесс пятнообразования нарастает, число образующихся активных областей увеличивается. При этом широта пятнообразования постепенно уменьшается. Изменение (уменьшение) средней широты пятнообразования со временем называется *законом Шперера*. После максимума активности число пятен постепенно уменьшается, последние активные области цикла образуются уже вблизи экватора.

После минимума активности наступает новый цикл, при этом расположение знаков магнитных полярностей в активных областях меняется на противоположное. Продолжительность одного цикла солнечной активности, определяемого по количественным характеристикам индексов солнечной активности, составляет в среднем 11 лет. Продолжительность магнитного цикла, в течение которого расположение магнитных полярностей в активных областях возвращается к начальному состоянию, соответственно составляет 22 года — так называемые циклы Хейла.

Для описания уровня солнечной активности используется целый ряд специальных индексов. Наиболее широко известно относительное число солнечных пятен, или число Вольфа W — индекс, предложенный цюрихским врачом и гелиофизиком Вольфом в 1749 г. Число Вольфа вычисляется как

$$W = k(10 \cdot f + g), \quad (17.1)$$

где f — число групп пятен, наблюдаемых одновременно на диске Солнца; g — полное число отдельных пятен на Солнце; k — нормировочный коэффициент, не превышаю-

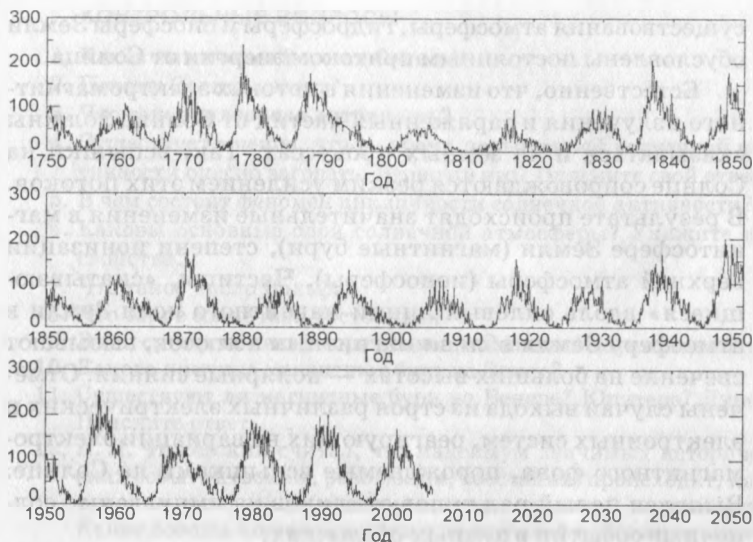


Рис. 17.6

Цикличность солнечной активности, выраженная в среднемесечных значениях чисел Вольфа

щий единицу, определяемый для каждого телескопа, на котором проводятся наблюдения солнечных пятен.

Существенно, что полный поток излучения Солнца очень мало меняется по мере изменения фазы цикла солнечной активности — не более долей процента. Значительные (иногда на порядки) изменения интенсивности излучения отмечаются только в очень узких диапазонах длин волн, соответствующих линиям излучения (поглощения) различных типов атомов.

Помимо 11-летних циклов, выделены и более низкочастотные циклы (вековые, квазидвухсотлетние и т. д.). Их амплитуда не столь велика, как у 11-летних, долгосрочные циклы в большей степени модулируют площадь пятен на Солнце, чем их количество. Изменения уровня солнечной активности, выраженные в числах Вольфа, показаны на рис. 17.6.

Проблема солнечно-земных связей. Земля находится под сильнейшим влиянием процессов, происходящих на Солнце. Практически все геофизические процессы, факт

существования атмосферы, гидросферы и биосферы Земли обусловлены постоянным притоком энергии от Солнца.

Естественно, что изменения в потоках электромагнитного излучения и заряженных частиц от Солнца должны сказываться и на земных процессах. Так, вспышки на Солнце сопровождаются резким усилением этих потоков. В результате происходят значительные изменения в магнитосфере Земли (магнитные бури), степени ионизации верхней атмосферы (ионосферы). Частицы, «скатывающиеся» вдоль силовых линий магнитного поля Земли в атмосферу Земли вблизи магнитных полюсов, вызывают свечение на больших высотах — полярные сияния. Отмечены случаи выхода из строя различных электрических и электронных систем, реагирующих на вариации электромагнитного фона, порождаемые вспышками на Солнце. Выявлен целый ряд типов откликов на импульсные солнечные события в земных оболочках.

В течение XX в. были выполнены тысячи работ, в которых отмечено, что для многих процессов на Земле, как и на Солнце, также характерна 11-летняя цикличность. В числе этих процессов — многие явления в атмосфере, геосфере, биосфере и даже социальной сфере. Один из пионеров исследований в области солнечно-земных связей, А. Л. Чижевский, указывал даже на 11-летние вариации в интенсивности потока исторических событий. Высокая степень корреляции между событиями традиционно трактуется как свидетельство причинно-следственной связи. Однако физические механизмы возможных воздействий чрезвычайно сложны, поскольку мы имеем дело с многофакторными воздействиями и нелинейными обратными связями. Проследить всю цепочку причинно-следственных связей от события на Солнце до конкретного отклика на Земле оказывается очень трудно, хотя созданы многие модели, как качественные, так и количественные, которые используются и в той или иной степени подтверждаются наблюдениями. Поэтому изучение проблемы солнечно-земных связей и прогноз состояния земных оболочек в зависимости от состояния солнечной активности остаются одной из наиболее актуальных и сложных задач современной гео- и гелиофизики.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков химический состав Солнца?
2. Почему Солнце светит?
3. Что такое солнечная активность?
4. Существует мнение, что во время повышенной солнечной активности опасно загорать. Верно ли это? Поясните свой ответ.
5. В чем состоит феномен цикличности солнечной активности?
6. Каковы основные слои солнечной атмосферы? Укажите их свойства.
7. Что такое число Вольфа?
8. Что такое солнечная постоянная?
9. В чем суть феномена вмороженности плазмы в магнитное поле?
10. Какова причина магнитных бурь на Земле?
11. Существуют ли магнитные бури на Венере? Юпитере? Луне? Поясните ответ.
12. А. Л. Чижевский считал, что максимум значимых исторических событий (войны, революции, восстания) происходит, как правило, на фазе максимума цикла солнечной активности. Какие доводы можно привести в пользу этой концепции и против нее?



ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ПРОБЛЕМЫ ПЛАНЕТНОЙ КОСМОГОНИИ

На протяжении долгой истории человечества был известен единственный пример планетной системы (нашей собственной — Солнечной), хотя Джордано Бруно уже в конце XVI в. декларировал тезис о множественности обитаемых миров.

Проблема образования Солнечной системы рассматривалась многими исследователями. Свои гипотезы выдвигали Пьер Симон Лаплас, Иммануил Кант, Джеймс Джинс и многие другие. В 40-е гг. XX в. была предложена так называемая космогоническая гипотеза советского исследователя О. Ю. Шмидта, заимствовавшая некоторые идеи Канта и Лапласа. Основной смысл концепции заключался в том, что Солнечная система сформировалась из газопылевого облака в результате *аккреции* вещества этого облака на некие первоначальные твердые тела — так называемые *планетезимали* (планетные зародыши). Аккреция (от лат. *accretion* — приращение, увеличение) в космогонии обозначает процесс падения рассеянного вещества на космическое тело (звезду, планету, центр галактики) под действием сил тяготения.

Закономерности Солнечной системы. Проблема образования и эволюции планет Солнечной системы была и остается актуальной для понимания протекавших и протекающих в Солнечной системе (и, в частности, на Земле) процессов. Любая космогоническая концепция должна убедительно объяснять следующие основные закономерности планетной системы, уже давно выявленные исследователями.

1. Орбиты всех крупных планет, мало отличающиеся от круговых, лежат практически в одной плоскости, близкой к экваториальной плоскости Солнца. Обращение планет (вокруг Солнца), а для большинства планет и вращение (вокруг своих осей) осуществляется в одном направлении с вращением Солнца.

2. Набор значений радиусов орбит крупных планет выглядит неслучайным и описан эмпирическим правилом Тициуса–Боде. В соответствии с этим правилом радиусы орбит планет подчиняются прогрессии:

$$a_n = 0,3 \cdot 2^n + 0,4, \quad (18.1)$$

где a_n — большая полуось орбиты планеты с номером n . Для Меркурия полагается $n = -\infty$, для Венеры $n = 0$, для Земли $n = 1$, для Марса $n = 2$, для Главного пояса астероидов $n = 3$, для Юпитера $n = 4$ и т. д.

3. Крупные планеты разделены на две группы с существенно различающимися параметрами. Планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) обладают относительно небольшими размерами (от 5,8 до 12,8 тыс. км), сравнительно высокой средней плотностью (от 3,9 до 5,5 г/см³), сравнительно медленным вращением и малым числом спутников (от 0 до 2). Планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) характеризуются существенно большими размерами (от 49 до 143 тыс. км), меньшей плотностью (от 0,7 до 1,6 г/см³), большей скоростью вращения и наличием многих спутников (от 13 до 63).

4. Между орбитами Марса и Юпитера находится так называемый Главный пояс астероидов, насчитывающий сотни тысяч астероидов и несколько карликовых планет. За орбитой Нептуна располагается пояс Койпера, включающий в себя многие тысячи ледяных небесных тел с размерами, характерными для карликовых планет и крупных астероидов. Орбиты объектов, входящих в эти пояса, разнообразны по степени вытянутости и расположению плоскостей, но, тем не менее, тяготеют к главной плоскости Солнечной системы, близкой к плоскости земной орбиты (эклиптики).

5. Момент количества движения Солнечной системы распределен неравномерно: на Солнце приходится всего

2% этой величины, хотя масса Солнца составляет более 99% всей массы Солнечной системы. В итоге 98% момента количества движения Солнечной системы падает на планеты, астероиды и другие малые тела. Моментом количества движения называется величина

$$I = mwr^2, \quad (18.2)$$

где m — масса элемента Солнечной системы, w — угловая скорость его движения по круговой орбите вокруг центра масс, r — радиус этой орбиты (расстояние от элемента до центра масс).

Если момент вращения отнести к единице массы, введя таким образом *удельный угловой момент*, то различие получится в 50 тыс. раз: обладая малой суммарной массой, планеты и другие малые тела обладают огромным угловым моментом. Это факт требует объяснения.

6. Необходимо объяснить и наблюдаемое соотношение концентраций химических элементов в Солнце, планетах и метеоритах. При этом следует учитывать, что подавляющее большинство типов атомов различных химических элементов, имеющих на Солнце и на планетах, не могли быть произведены в ходе термоядерных реакций внутри Солнца и, видимо, уже присутствовали в материале, из которого сформировалась Солнечная система.

Идей, пытающихся объяснить факт существования Солнечной системы, обладающей перечисленными свойствами, за последние два столетия было выдвинуто гигантское множество. Ведущий отечественный космогонист А. В. Витязев утверждает, что только известных ему авторов, предлагавших собственные теории происхождения Солнечной системы, оказывается около ста. Разумеется, речь идет не о полностью независимых концепциях: во всей совокупности теорий имеются и сходные, и различающиеся элементы.

Историческая гипотеза Ж. Бюффона (1749) о касательном ударе кометы, выбившей из Солнца струю раскаленного вещества, распавшуюся на отдельные сгустки (планеты), практически никогда не рассматривалась всерьез в приложении к Солнечной системе ввиду крайне

малой вероятности такого события. Отказу от этой гипотезы способствовало и увеличение наших знаний о сущности комет. Другая «катастрофическая» гипотеза, принадлежавшая Дж. Джинсу (1916), сводилась к тому, что струя вещества была «вырвана» из Солнца гравитационным воздействием некогда проходившей вблизи другой звезды. Версия Джинса не смогла объяснить ряд перечисленных выше закономерностей Солнечной системы и в настоящее время осталась невостребованной. Кроме того, гигантские расстояния между одиночными звездами превращают возможность реализации идеи Джинса в крайне маловероятное событие. Заметим, что в принципе гипотезы Бюффона и Джинса не противоречат законам физики, а следовательно, могут быть приложены к отдельным случаям других планетных систем.

В 1755 г. была выдвинута классическая гипотеза И. Канта, в 1796 г. — гипотеза П.-С. Лапласа, выводящие процесс формирования Солнца и планет из вещества единой туманности. В случае Канта речь шла об (относительно) горячем газе, в случае Лапласа — о холодной пыли. Собственное тяготение и вращение туманности (облака) должно было привести к его уплотнению и распаду на отдельные концентрические сгущения, породившие планеты, и формированию центрального массивного тела — Солнца.

В перечне видных фигур, внесших существенный вклад в развитие планетной космогонии, следует упомянуть О. Ю. Шмидта и его известную космогоническую гипотезу, впервые опубликованную в 1944 г. Несмотря на то что один из ключевых элементов его гипотезы (гравитационный захват Солнцем роя породивших планеты тел во время прохождения Солнца сквозь плоскость Галактики, где плотность вещества повышена) считается неподтвержденным и отставленным, можно утверждать, что именно к идеям Шмидта восходит сегодняшняя основная парадигма, описывающая формирование Солнечной системы. Следует, впрочем, заметить, что роль О. Ю. Шмидта в мировой науке, видимо, несколько преувеличена советской пропагандой.

История развития космогонии драматична и изобилует столкновениями идей и личностей, при этом острые дискуссии продолжаются и сегодня. Появляются новые идеи, изменяющие окраску старых концепций и даже сами концепции. Тем не менее можно говорить о существовании некоего стандартного сценария образования Солнечной системы, в разработку которого большой вклад внес выдающийся отечественный космогонист В. С. Сафронов. В стандартном сценарии зафиксировано большинство основополагающих положений многих, включая альтернативные, концепций. Разумеется, есть различия во взглядах, но в большинстве своем эти расхождения касаются деталей, хотя порой и существенных. Стандартным можно назвать этот сценарий лишь с точки зрения его признания большинством исследователей, что вовсе не гарантирует его абсолютную (а по мнению некоторых исследователей, и относительную) правильность.

Тем не менее принципиальная особенность современной космогонии, в отличие от теорий прошлого, заключается в том, что ее положения верифицируются (проверяются) экспериментальными результатами тонких химических и изотопных исследований космогенного вещества, имеющегося на сегодня в руках исследователей. Появилась возможность изучать образцы существенно выросшей за последние десятилетия мировой коллекции метеоритов, включая лунные и марсианские, образцы лунного грунта и даже, с оговорками, образцы солнечного (проект «Genesis») и кометного (проект «Deep Space») вещества. Факты наличия в космогенном веществе вполне определенных минералов, сочетаний концентраций определенных элементов и их изотопов в ряде случаев однозначно допускают одни варианты космогонических сценариев и столь же однозначно запрещают другие. В иных случаях однозначность не достигается, но становится по крайней мере понятно, куда и каким образом следует двигаться дальше для обеспечения верифицируемости оставшихся вариантов сценария.

Согласно современным представлениям гравитационная нестабильность привела к сжатию (коллапсу) газо-

пылевого облака в межзвездном пространстве внутри Галактики. Следует подчеркнуть, что в принципе процесс сходен с аналогичными процессами больших масштабов в первичной газовой среде, которые приводили к образованию галактик. В рассматриваемом случае размеры газопылевого облака были в сто тысяч — миллион раз меньше характерного размера Галактики. Число таких облаков в Галактике, по-видимому, достигало многих миллиардов.

В последнее время все более доказательными становятся представления о том, что импульсом к конденсации газопылевого облака, которая привела к образованию планет, явился близкий взрыв сверхновой. Расширяющаяся волна от взрыва привела к образованию уплотнений в облаке, что и вызвало возникновение гравитационных неустойчивостей.

В центре одного такого сжимающегося и уплотняющегося облака сформировалось медленно вращающееся ядро, давшее начало будущему Солнцу и дискообразной газопылевой туманности, которая вращалась вместе с ним (см. рис. 18.1). Этот солнечный протопланетный диск претерпел ряд существенных изменений, что в конечном итоге привело к образованию Солнечной системы.

Рассмотрим подробнее этот сценарий.

Предыстория стандартного сценария. Около 4,6 млрд лет назад в одной из областей интенсивного звездообразования в газопылевом облаке произошло сжатие одного из его фрагментов. В этом облаке уже присутствовали все элементы таблицы Менделеева, а также некоторые молекулярные соединения. Атомы тяжелых элементов, по-видимому, были привнесены сюда в результате взрывов сверхновых, последовавших задолго до этого. Соотношение долгоживущих ядер урана-235 и -238, тория-232 и рения-187 и продуктов их распада — ядер свинца-207, -206, свинца-208 и осмия-187 интерпретируется как следы по крайней мере трех впрыскиваний радиоактивных ядер, а значит, трех актов ядерного синтеза в окрестностях будущей Солнечной системы: более чем за 5, примерно за 5 и за 2 млрд лет до начала ее формирования.



Рис. 18.1
Протопланетный диск (рисунок)

Изотопный анализ древнего метеоритного вещества показал, кроме того, что за 100 млн лет до начала его формирования произошло впрыскивание в протосолнечную туманность йода-129 и плутония-244. В результате их распада изменился изотопный состав ксенона, что и позволило выявить событие. Существует гипотеза о том, что указанные ядра содержались в продуктах выброса взорвавшейся поблизости массивной магнитной звезды. Всего за миллион лет до формирования метеоритного вещества выявляется последнее впрыскивание ядер, содержавшее, в частности, алюминий-26.

Предполагается, что взорвалась сверхновая другого типа. Вероятно, именно этот взрыв и привел к гравитационному коллапсу протосолнечной туманности: ударная волна могла вызвать либо ускорить сжатие вещества.

В этой туманности содержались преимущественно молекулы водорода, воды, гидроксила, а также пыль (частицы, состоящие преимущественно из силикатов). Взрыв близкой сверхновой звезды мог привести в облако сформировавшиеся во время взрыва атомы тяжелых элементов от железа вплоть до урана.

Основной вариант стандартного сценария. Формирование будущей Солнечной системы началось в недрах газопылевой туманности. Как и другие аналогичные образования, она содержала в себе три фазы: железокаменную, которая образовывала пылевидные частицы, ледяную, составляющую оболочки этих частиц, и газовую, в которой пылевидные частицы находились во взвешенном состоянии. Поскольку протосолнечная туманность порождена взрывом сверхновой, облако оказалось насыщенным сложными соединениями, прошедшими высокотемпературную обработку (см. рис. 18.2).

Так, железокаменная фаза была сложена силикатами (оливином Mg_2SiO_4 , пироксенами $Mg_2Si_2O_6$, $CaMgSi_2O_6$, плагиоклазом $CaAl_2Si_2O_8$ – $NaAlSi_3O_8$), металлами (Fe, Ni), сульфидами (FeS), графитом (C) и другими соединениями. Эти продукты ранних конденсаций и затвердеваний вещества при температурах 900...1600 К выделились в виде мельчайших частичек (пылинок) еще в раскаленном газовом облаке, до образования плотных темных молекулярных туманностей. Мельчайшие каменные частицы служили центрами конденсации. На них намерзали газовые компоненты — частицы воды и другие легкие летучие компоненты.

Эволюция газопылевой туманности после взрыва сверхновой, таким образом, сводилась к постепенному охлаждению, в результате которого разрастались ледяные оболочки вокруг тугоплавких «породообразующих» каменных и металлических частиц. Газовая фаза в таком веществе остается только в мельчайших пузырьках внутри растущих кристаллов льда. На поверхности пылинок должен был возникать многослойный конденсат, в котором последовательность наслоения газовых соединений соответствует понижению температуры затвердевания.



Рис. 18.2
Сверхновая V 838 в созвездии Единорога
(космический телескоп «Хаббл», НАСА)

При падении температуры почти до абсолютного нуля мог конденсироваться и затвердевать даже водород. В результате в туманности могли образоваться огромные снежоподобные массы, поскольку водород, будучи самым распространенным элементом, составлял основу массы газопылевой туманности. Описанные компоненты должны были стать «строительным материалом» для будущих планет.

Формирование пылегазового диска. Изначально, судя по всему, протопланетное облако не имело формы диска. Важную роль должно было сыграть магнитное поле. Оно способствовало переносу момента вращения от массивно-

го ядра газопылевой туманности наружу. В результате из внешнего экваториального слоя центрального ядра — будущего Солнца — формировался плоский диск. Под действием турбулентной вязкости диск быстро разрастался. Оценки показывают, что за $10^5 \dots 10^6$ лет диаметр диска мог достичь 40...50 а. е. Расчеты показывают, что зерна пыли оседали в центральной плоскости, различия в температурных режимах в центре и на периферии диска приводили к дифференциации вещества: ферромагнезиальные силикаты конденсировались ближе к центру туманности — в зоне примерно до 2 а. е. от центра, силикаты с ледяными оболочками — дальше.

Существуют противоположные точки зрения на распределение температуры внутри протосолнечного диска. Согласно одной из концепций температура в центре туманности никогда не опускалась ниже 600 К. Поскольку железо и вода при таких температурах не взаимодействуют, этим можно объяснить тот факт, что вблизи от Солнца объекты богаты металлическим железом. На расстоянии более 2 а. е. от центра туманности, при температурах ниже 400 К, происходило образование оксидов — гидратированных силикатов. На дальней периферии, при низких температурах пылинки с ледяными оболочками практически в неизменном виде образовывали более крупные тела.

Альтернативная точка зрения предусматривает обратное распределение температуры: в центре — самая низкая, близкая к абсолютному нулю, что привело к конденсации почти всех газов, включая водород. На периферии облака температура приближалась к 200 К, где газы остались таковыми, а конденсации подверглись в основном вода и аммиак. Заметим, что эта версия не пользуется популярностью среди астрономов. В то же время оба описанных сценария приводят к неизбежной дифференциации протопланетного диска, разделению его на фракции, отличающиеся плотностью и составом. Это привело к существенным различиям в свойствах будущих планет.

Согласно расчетам за время порядка 1 млн лет или меньше, пылинки (ферромагнезиальные силикаты вблизи Солнца и силикаты с намерзшими ледяными оболочками

на периферии системы) должны были осесть к центральной плоскости диска.

Формирование планет и Солнца. Процессы оседания вещества в плоскости диска и конденсация крупных тел в результате аккреции играли все более важную роль. Существует целый ряд моделей, описывающих возможные пути эволюции нашей планетной системы. Они различаются в деталях, но сходятся в основном.

По-видимому, работали два механизма преобразования вращающегося диска из пыли и газа от конденсатов пылинок с размерами порядка микрона до планетезималей размерами до $1...10$ км: негравитационное слипание частиц и гравитационная неустойчивость. На начальном этапе, в центральной части протосолнечной туманности, по-видимому, превалировал первый механизм. По мере увеличения плотности, вблизи главной плоскости диска должна возникать гравитационная неустойчивость, в результате чего пылевой диск распадается на множественные сгущения. Гравитационное взаимодействие увеличивало разброс в скоростях этих сгущений, что привело к столкновениям и постепенному набору массы за счет объединения. Когда зародыши планет достигали размеров около 1 км, под действием сил гравитации они начинали сталкиваться и быстро увеличиваться в размерах. За время порядка $10^5...10^6$ лет крупнейшие объекты в диске становятся сравнимыми по размерам с наибольшими современными астероидами (до 1000 км). Относительные скорости тел были сначала невелики — порядка $10...100$ м/с. Столкнувшись при столь незначительных скоростях, тела астероидных размеров преимущественно объединялись. Расчеты показали, что скорости тел в диске планетезималей росли пропорционально радиусам крупнейших тел. Таких зародышей планет размерами с астероид (характерный размер — от единиц до сотен километров) образовалось огромное множество. Плотность вещества в этих образованиях приближалась к 1 г/см³.

При достижении размеров Луны относительные скорости возросли до 1 км/с. Нарастающий разброс в скоростях должен был привести к нарастанию энергии ударов

(импактов). При этом сталкивающиеся планетезимали начинали дробиться. Но наиболее крупные объекты обладали и большим гравитационным полем, в результате чего осколки становились спутниками центрального тела, со временем падали на него и продолжали увеличивать его массу.

Уже на стадии планетообразования (преимущественно импактных событий, а не *аккреции* пыли) начался процесс дифференциации вещества в формирующихся *протопланетах*. Тепло импактов вместе с теплом радиоактивных элементов должно было привести к разогреву, частичному плавлению вещества и оседанию к центрам масс будущих планет тяжелых частиц (преимущественно железоникелевых) и выдавливанию к поверхности более легких частиц (преимущественно силикатных). Так формировались первичные ядра, мантии и кора будущих планет.

Численное моделирование показало, что должно было образоваться множество (многие сотни) объектов примерно лунного размера. Взаимное гравитационное влияние этих объектов должно было приводить к изменениям их орбит с взаимными пересечениями. Это должно было привести к укрупнению объектов в результате взаимных столкновений. В итоге формируется система с небольшим числом крупных объектов — планет — Солнечная система.

Важную роль сыграл и центральный объект системы — массивный газопылевой шар в центре диска. Массы газа, содержащего в основном водород и гелий с примесями тяжелых элементов, хватило, чтобы в центре шара из-за гравитационного сжатия температуры и давления достигли критических параметров и начались термоядерные реакции. Солнце стало светить как звезда.

Мощное корпускулярное излучение (поток частиц) — солнечный ветер, а также интенсивное коротковолновое излучение молодого Солнца «вымели» из центральной части системы весь газ на периферию. Этот процесс продолжался, видимо, около 10^7 лет. В результате планеты земной группы — Меркурий, Венера, Земля, Марс — остались без протяженных водородно-гелиевых атмосфер.

В периферийных областях Солнечной системы плотность потока солнечного света была существенно меньше, поэтому значительная часть газа не успела диссипировать в межзвездное пространство. Удаленные от Солнца планеты — Юпитер и Сатурн — смогли захватить этот газ, который составил значительную часть их массы. Еще более далекие объекты — Уран, Нептун — очень долго формировали свои твердые ядра, и за это время газ в этой зоне оказался потерян (рассеялся в межзвездном пространстве). Эти планеты и множество кометных тел за орбитой Нептуна содержат преимущественно воду. Если же считать, что температура в этой области была относительно высокой (200 К), то можно объяснить доминирование здесь льда тем, что вода сконденсировалась, образовав кометные ядра и насытив оболочки Урана и Нептуна, а более легкие газы (водород и гелий) улетучились. Холодные легкие элементы были вынесены на периферию Солнечной системы, где могли быть сформированы объекты пояса Койпера и облака Оорта.

Указанный процесс описан аналитически и реализуется в численных расчетах на компьютерах. Эволюция диска приводит в конечном итоге к формированию набора из (примерно) 10 планет на слабоекцентричных орбитах. Расчеты, кроме того, приводят к реализации правила планетных расстояний (Тициуса–Боде) — отношение радиусов орбит сформировавшихся по соседству планет оказывается равным $1,4 \dots 2$. Таким образом, основные закономерности Солнечной системы объясняются стандартным сценарием. Детали сценария могут изменяться, но общая картина остается при этом в основном неизменной.

Формирование Земли. Остановимся подробнее на формировании Земли. Этот пример можно распространить, с некоторыми оговорками, на формирование других планет земной группы.

На протяжении длительного времени главенствующей парадигмой было представление о Земле как замкнутой системе. Считалось, что все процессы на Земле являются следствием земных же процессов, без «вмешательства извне». Несмотря на то что были давно известны соотноше-

ние масс Земли и Солнца (1:330000) и зависимость состояния внешних земных оболочек от притока солнечной энергии, как правило, внешними факторами при рассмотрении эволюции Земли пренебрегали.

В принципе подобные модели имеют право на существование, тем более, если считать, что вклад внешних сил со стороны Солнца и других небесных тел постоянен. Для решения некоторых типов прикладных задач такой подход вполне оправдан.

Естественнонаучные исследования в XX в. показали, что пренебрегать космическими факторами в ряде случаев нельзя. На первых этапах формирования Солнечной системы многократные столкновения планетезималей привели в конечном итоге к формированию планет. Столкновения и в дальнейшем оказывали существенное влияние на внешние оболочки формирующихся планет. Без учета внешних факторов невозможно построить адекватную историю формирования планетных атмосфер. Циклические изменения потока электромагнитного и корпускулярного излучений Солнца неизбежно модулируют процессы в наиболее чувствительных к внешним воздействиям флюидных оболочках планет (атмосферах и гидросферах).

Однако отдельные стороны планетной эволюции, особенно касающиеся эволюции внутреннего строения планет, можно и целесообразно рассматривать в приближении замкнутой саморегулирующейся системы. По-видимому, должен использоваться комплексный подход: на начальном этапе развития Земли внешние космические воздействия (процессы аккреции и солнечные излучения) представляются определяющими, в то время как на более поздних этапах эволюции эти факторы учитываются лишь эпизодически по мере необходимости, когда ими невозможно пренебречь.

Начальный этап эволюции Земли согласно современным представлениям выглядит следующим образом. Серия лабораторных экспериментов показала, что на фазе роста размеров протоземли от нескольких километров до размеров Луны (вчетверо меньших по диаметру по сравнению с современным значением) большая часть летучих

элементов и их соединений (вода, метан, окись углерода, циан, гидрокарбонаты и инертные газы), которые присутствовали в падающих на протоземлю планетезималиях, оставалась в протоядре будущей планеты.

Этот период формирования Земли назовем фазой А. Скорость столкновений на этом этапе не превышала 2 км/с. Поэтому удары были еще сравнительно слабыми, высокие температуры, способные привести к дегазации вещества, не достигались. На этом этапе протоземля аккумулировала падающее вещество, быстро наращивая массу.

На следующем этапе (фаза В) размер и масса растущей протоземли оказываются больше лунных. В результате из-за возросшей силы гравитации относительная скорость столкновений и масса аккрецирующих импакторов возрастали. Соответственно при больших, чем 2 км/с, скоростях соударений началась эффективная дегазация минералов. Это привело к образованию первичной атмосферы, состоявшей преимущественно из водяных паров и углекислого газа (легкая фракция — водород и гелий, присутствовавшие повсеместно в протопланетном диске, должны были улетучиться под влиянием мощного излучения молодого Солнца).

Компьютерное моделирование показало, что такая атмосфера должна была оказывать существенное влияние на тепловой режим растущей Земли. В момент удара очередной планетезимали приток энергии на некоторое время превышал приток солнечной энергии. Кроме того, при этом в атмосфере оказывалось большое количество пыли.

Пыль в совокупности с метаном, водяным паром и углекислым газом, которые являются парниковыми газами, сильно поглощала поток энергии от нагретой поверхности древней Земли. В результате потери энергии, обусловленные излучением во внешнее пространство, существенно уменьшались. В результате действия такого *суперпарникового эффекта* температура поверхности могла достигать 1500...3000 К. При таких температурах начиналось плавление поверхностных пород, а возможно, и испарение силикатов. Образовывался глобальный расплав — магмовый

океан, где тонули сгустки расплавленного железа от падающих планетезималей.

Поскольку планетезимали содержали углерод, их аккреция в условиях первичной атмосферы должна была обеспечить условия для преимущественно восстановительных реакций на фазе *B*. В результате силикаты железа (Fe_2SiO_4) разлагались на железо и кремний, которые потом вошли в состав ядра Земли. Летучие же элементы испарялись и переходили в состав атмосферы.

Расчеты показывают, что растущая Земля должна была столкнуться с сотнями объектов размерами до 10 км, десятками тел с диаметрами порядка 100...200 км и по крайней мере с несколькими объектами с размерами от Луны до Марса (диаметры порядка 2000 км). При этом были неизбежны частичные (а в случае наиболее значительных ударов — полные) срывы атмосферы. После такого рода событий атмосфера формировалась каждый раз заново, и на таких этапах превалировали окислительные реакции (возвращение фазы *A*). После одного из таких столкновений выброшенное в космос вещество послужило основой для формирования Луны. Таким образом, процессы аккреции существенно «переработали» первичное вещество сталкивающихся планетезималей, приводя к дифференциации (стратификации) тела древней Земли, формированию расплавных масс. Мантия Земли и сейчас содержит излишек так называемых метеоритных элементов (Mn, V, Cr, P, W, Co, Ag, Ni, Sb, As, Ge, Mo, Au, Re, Ir). Судя по всему, они были привнесены на Землю и распределились в верхней мантии во время последних периодов аккреции на фазе *A*.

Постепенно частота мощных столкновений уменьшилась, поскольку объектов, с которыми можно было столкнуться, становилось все меньше. Температура Земли на этом этапе также уменьшилась, поскольку уже отсутствовали частые дополнительные источники импульсного притока энергии (соударения) и «тепловая шуба» (суперпарниковая атмосфера). В результате уже не было глобального магмового океана, поверхность Земли представляла собой затвердевшие расплавы.

Необходимо отметить, что на ранних этапах развития Земли важную роль играло мощное излучение молодого Солнца, приводившее к поверхностной дегазации и потере возможной первичной флюидной водородной оболочки. По некоторым оценкам, активность Солнца на самых ранних этапах эволюции могла в 10 тыс. раз превышать современную. Таким образом, современная атмосфера Земли является полностью новообразованной. Падение температуры привело к конденсации водяных паров и образованию гидросферы, что уменьшило парниковые свойства атмосферы и дополнительно ускорило процесс уменьшения температуры. В недрах Земли тепло продолжало выделяться за счет распада радиоактивных элементов, приливных эффектов со стороны близкой Луны, гравитационного сжатия и движений в теле молодой планеты.

В рамках описанного сценария за первые 100 млн лет Земля набрала 90% своей массы за счет множественных столкновений крупных тел. Следующие 100 млн лет (второй этап) темп столкновений существенно упал (основные импакты уже произошли), шла первичная дифференциация Земли. На этом этапе импакты выступали как основной фактор в тектогенезе. На третьем этапе (очередные 100 млн лет) на Землю выпала масса, сравнимая с массой коры. Каменные метеориты, содержащие воду, органику и газы (около 1% от их массы), в совокупности привнесли основную массу летучих веществ, которые сформировали океан и атмосферу. Земля набрала 0,999% своей массы.

Последний, четвертый этап продолжается до сих пор. За последние 4 млрд лет на Землю выпало вещество, образовавшее слой толщиной не более 0,5 м. Импакты происходят все реже, но их локальное влияние на земные оболочки может быть иногда существенным.

Таким образом, можно констатировать, что на первых этапах возникновения и эволюции Земли состояние нашей планеты практически полностью определялось космическими факторами. К их числу можно отнести расстояние до взорвавшейся сверхновой, химический состав и состояние вещества в протопланетном диске, температуру среды, частоту и параметры столкновений

планетезималей, текущее значение нарастающей массы планеты, приливные деформации со стороны Солнца и близкой Луны, которая первоначально находилась на низкой орбите, и другие факторы. По мере эволюции Земли как планеты, формирования ядра, мантийных слоев, коры, атмосферы и гидросферы вклад космических факторов уменьшался и развитие процессов в земных оболочках все в большей степени определялось собственными параметрами.

В то же время необходимо учитывать, что влияние космических факторов не уменьшилось до нуля, и они продолжают влиять на эволюцию нашей планеты. Стали редкими, но не прекратились столкновения Земли с астероидами, вызывающие раз в десятки миллионов лет катастрофические изменения во внешних оболочках Земли. Солнце оказывает квазипериодическое воздействие на Землю по причине переменной солнечной активности. При этом хорошо изучены только короткопериодические циклы активности Солнца, в то время как есть указания на существование множества долгопериодных циклов, параметры которых только начинают по-настоящему изучаться с использованием, как правило, косвенных данных. В ходе движения вокруг центра Галактики (период вращения, по разным оценкам, 200...240 млн лет) Солнечная система периодически входит в зоны повышенной плотности межзвездного вещества, что усиливает его аккрецию на Землю. Экранирование межзвездной пылью солнечного излучения в такие периоды в принципе может вызывать глобальные похолодания на Земле. Наконец, взрывы близких сверхновых, которые с неизбежностью иногда должны были проходить вблизи Солнечной системы за время ее существования, могли оказывать существенное воздействие на состояние экосистемы Земли. Этот перечень неполон. По-видимому, рассматривая изменения состояния различных земных оболочек, необходимо учитывать сложные, переменные во времени и разнообразные по своим проявлениям космические факторы. С этой точки зрения Земля является принципиально открытой системой.

Дальнейшая эволюция планет. Изменения в составе и «устройстве» твердых тел начались еще на стадии планетезималей. Соударения небольших тел приводили к существенному нагреву объектов. Что касается крупных тел, то гравитационное сжатие, радиоактивный распад тяжелых элементов, а также приливные деформации в системах близких массивных объектов должны были приводить к росту температуры в недрах тел. В результате всех этих причин происходили существенные изменения планетезималей, а затем и планет. Нагрев приводил к дифференциации вещества, испарению легкоплавких фракций, плавлению и спеканию тугоплавких. В массивных телах тяжелые частицы «просачивались» к центрам тел, образуя железные и железоникелевые ядра. Более легкие силикатные частицы «выдавливались» наружу, впоследствии образуя поверхностные оболочки — кору будущих планет. Газы просачивались к поверхности, образуя (если у протопланеты хватало массы, чтобы удержать их) первичную атмосферу. Кроме того, атмосфера пополнялась летучими фракциями, выбрасываемыми во время соударений.

На ранней стадии образования планет Солнечная система изобиловала множеством аккрецирующих, сравнительно небольших тел, которые интенсивно сталкивались с более крупными телами. Следы этих множественных столкновений до сих пор видны на поверхностях Луны, Марса, спутников планет. Громадное число соударений претерпела и Земля. Таким образом, столкновения сыграли важную роль в формировании современного облика планет.

Сходным образом формировались, по-видимому, и другие планеты земной группы.

Существенно, что на ранней стадии формирования, судя по всему, практически все планеты претерпели катастрофические столкновения с планетезималями значительных размеров. Об этом свидетельствуют особенности вращения многих планет. Так, заметные наклоны осей вращения Земли, Марса, Сатурна, Урана, Нептуна по отношению к нормальям к плоскостям орбит могут свидетель-

ствовать о таких столкновениях (хотя возможен и механизм гравитационного влияния со стороны массивного, а затем утерянного спутника). Выше уже указывалось, что древнее соударение Земли с планетезималью размером с Марс могло привести к выбросу большей части вещества тела-импактора в околоземное пространство, из которого за счет дальнейшей аккреции образовалась Луна. На сегодняшний день это главная версия образования Луны.

Что касается планет-гигантов (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун), то на их эволюцию существенное воздействие оказали удаленность от Солнца и большие массы флюидных оболочек из водорода, гелия, с примесями воды, аммиака и метана. Судя по всему, эти планеты имеют металлические ядра, подобные по массе ядрам планет земной группы. Однако гигантские флюидные оболочки обеспечили ядрам особый режим высоких плотностей и температур и навсегда скрыли эти ядра под многотысячекилометровыми океанами из водородно-гелиевых смесей, которые с глубиной плавно переходят в жидкое, а затем квазитвердое состояние. Физика планет-гигантов существенно отличается от физики планет земной группы.

Проблемы и альтернативы стандартного сценария. В концепциях, даже примыкающих к стандартной, есть существенные расхождения. Например, разные авторы по-разному рисуют роль Солнца на начальных этапах эволюции Солнечной системы. Стандартный сценарий предполагает, что планетообразование шло на фоне мощного излучения уже вспыхнувшей молодой звезды, но есть иные мнения. Например, академик А. А. Маракушев выдвинул концепцию, согласно которой в центре системы сначала было холоднее всего — около абсолютного нуля, здесь находились снегоподобные массы замерзшего водорода, а формирование зародышей планет началось до вспыхивания термоядерных реакций в будущем Солнце.

Дискуссии продолжаются по поводу гомогенного или гетерогенного вариантов состава протопланетного диска. По мнению ряда авторов, протопланетный диск еще до распада на сгущения отличался существенными локальными вариациями химического состава, соответственно

на разных удалениях от центра диска планеты формировались из разных типов вещества. Заметим, что классический стандартный сценарий исходит из общей гомогенности состава диска.

Следует обратить внимание, что не все ясно с процессом дифференциации планет: многие авторы указывают, что в ходе агломерации одних хондритов невозможно формирование Земли (в хондритах не хватит железа для ее ядра). С другой стороны, дифференциация вещества Земли должна была бы вызвать гигантское выделение тепла, которое, в свою очередь, привело бы к полному расплавлению Земли, чего, судя по геологическим данным, все-таки не было. Остается неясным вопрос о количестве флюидов и радиоактивных веществ, содержащихся в ядрах и мантиях планет, и в частности Земли.

Вызывает много вопросов Меркурий с его неожиданно большим железоникелевым ядром, которое также невозможно получить в результате агломерации одних хондритовых тел. Недостаток силикатов на Меркурии в рамках концепции гомогенного диска предлагается объяснить мощным импактом и срывом с планеты уже сформированной силикатной коры. Обсуждается возможность последующего падения части сорванного меркурианского вещества на Венеру и даже на Землю.

По-прежнему представляет серьезную проблему вопрос о происхождении Луны. Существенные различия в химическом составе Земли и Луны, обнаруженные при анализе образцов лунного вещества (дефицит железа на Луне по сравнению с Землей), привели к тому, что долгое время казавшаяся наиболее убедительной теория совместного образования Земли и Луны перестала быть парадигмой. В настоящее время базовой стала теория о формировании Луны из выброшенного в космос фрагмента силикатной земной коры после катастрофического мегаимпакта (мощного касательного удара по молодой Земле телом размерами с Марс). Существует и облегченный вариант «фейерверка»: Луну могла сформировать целая серия менее мощных импактов, выбрасывавших в космос силикаты земной коры. В то же время академик Э. М. Галимов показал, что

некоторые сложности импактных теорий могут быть сняты, если считать, что Земля и Луна все-таки образовались рядом и вместе в ходе фрагментации пылевого сгустка при относительно высокой температуре.

Существует целый набор различных гипотез по поводу Главного пояса астероидов и возникновения спутников планет. Судя по свойствам метеоритного вещества, астероиды являются не простыми конгломератами из слипшихся пылинок, но телами со сложной историей, проходившими дифференциацию, частичное расплавление и подвергавшимися сильным давлениям. Стандартный сценарий полагает, что астероиды суть остатки блоков, из которых, сталкиваясь, строились планеты, но есть и альтернативные взгляды. В качестве примера можно привести концепцию А. А. Маракушева, считающего, что астероиды — это обломки крупных планет, имевших, подобно планетам-гигантам, протяженные и массивные флюидные газовые оболочки. Утрата этих оболочек при участии солнечного ветра привела к последующим разрушениям (взрывам) твердых ядер этих планет из-за огромного давления содержащихся в их недрах флюидов. Наличие микроалмазов в некоторых метеоритах, по мысли авторов концепции, говорит о былых огромных давлениях со стороны мощных реликтовых водородных атмосфер, впоследствии утерянных.

А. В. Багров полагает, что астероиды суть фрагменты разрушенной мегаимпактом «планеты Ольберса», или Фаэтона, между Марсом и Юпитером. Гипотеза, выдвинутая еще два столетия назад, выглядела долгое время неубедительной, поскольку трудно было представить, откуда мог появиться импактор с достаточной для разрушения крупной планеты кинетической энергией. Открытие других планетных систем с планетами на крайне вытянутых эллиптических орбитах позволяет говорить о высокой вероятности ухода таких планет в межзвездное пространство и превращения их в «планеты-скитальцы». Подобный «скиталец», несомненно, обладает достаточным запасом энергии для полного уничтожения крупной планеты. Что касается спутников планет, то крупные спутники

планет-гигантов в рамках стандартного сценария должны были отрываться от материнских планет за счет сильных центробежных сил. В то же время не исключены и формирование спутников из вещества импактных выбросов, и гравитационные захваты. Общая картина выглядит сложной и противоречивой. Не исключено, что работали разные механизмы создания разных спутников планет, и вопрос требует дальнейшего серьезного изучения.

Несмотря на присутствие в современных учебниках и энциклопедиях некоей (очень обобщенной) «стандартной» картины возникновения и эволюции Солнечной системы, восходящей к гипотезе Канта–Лапласа, многие детали, причем весьма существенные, остаются либо опущенными, либо допускают альтернативные варианты объяснения. Следует отметить, что фактического материала (образцов вещества небесных тел Солнечной системы) для окончательных выводов все же недостаточно. Несмотря на то что концепция, давшая основу стандартному сценарию, является на сегодня парадигмой (т. е. поддерживается большинством исследователей), открытые вопросы и альтернативные концепции нельзя сбрасывать со счетов.

Проблема внесолнечных планетных систем. Открытия внесолнечных планетных систем на рубеже XIX–XX вв. (500 объектов к началу 2011 г.) поставили ряд серьезных вопросов перед космогоническими теориями, описывающими образование планетных систем. Дело в том, что после упомянутых открытий привычная структура Солнечной системы стала выглядеть в определенном смысле аномальной.

Косвенные методы позволяют пока обнаруживать только крупные планеты с массами порядка массы Юпитера. Многие открытые планеты оказались неожиданно близкими по отношению к «своим» центральным звездам — значительно более близкими, чем Меркурий по отношению к Солнцу. Периоды обращения таких планет около звезд составили всего несколько суток. Близкие к звезде «горячие юпитеры» должны резко отличаться от периферийных планет-гигантов в Солнечной системе с холодными внешними оболочками. Предсказываются сложные

взаимодействия магнитных полей таких планет и центральных звезд, вокруг которых они обращаются.

Еще одна неожиданность — удивительно большая вытянутость орбит ряда планет, более удаленных от центральных звезд, чем описанные выше. Такие планеты тоже обнаружены. Почти круговые орбиты большинства планет Солнечной системы оказались уникальным явлением. Таким образом, проблема создания общей теории, объясняющей как наблюдаемое типичное строение целого ряда планетных систем, так и причину отличия строения Солнечной системы от типичного, еще ждет своего решения. С этой точки зрения, приведенные выше модели формирования Солнечной системы обладают существенным недостатком: в свете новых данных они оказываются моделями *ad hoc* (для данного случая) и не обладают свойством универсальности.

В этой области ведутся интенсивные исследования. Рассматриваются различные идеи, включая влияние неизвестной «второй» звезды, проходившей вблизи газопылевого облака во время формирования Солнечной системы. Повидимому, модифицированная базовая теория образования планетных систем будет создана в ближайшие годы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные закономерности Солнечной системы.
2. Изложите основные этапы стандартного сценария формирования Солнечной системы.
3. Чем отличаются свойства большинства планетных систем от параметров Солнечной системы?
4. Какова роль импактных событий на ранней стадии формирования Солнечной системы?
5. На Солнце обнаружено около 80 типов химических элементов, но термоядерные реакции на Солнце могут привести к образованию только нескольких из них. Откуда взялись на Солнце атомы остальных типов?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение объектов Солнечной системы всегда составляло важный раздел астрономических исследований. Во второй половине XX — начале XXI вв. в исследованиях Солнечной системы произошел перелом, прежде всего благодаря использованию космических аппаратов. Выполнено изучение с пролетных траекторий и/или орбит искусственных спутников Луны, Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Спускаемые аппараты работали на Луне, Венере, Марсе, Юпитере и спутнике Сатурна Титане. На Луне работали люди. В полете к Плутону находится межпланетный зонд «Новые горизонты». Выполнено изучение с близкого расстояния нескольких астероидов и кометных ядер. В атмосфере Венеры работали аэростаты с подвесками из научных приборов. Целый ряд космических аппаратов выполняет непрерывный мониторинг Солнца в различных диапазонах спектра электромагнитных волн.

В настоящее время разворачивается новый этап в исследованиях Солнечной системы. В планах космических агентств стран, занимающихся космической деятельностью, — продолжение широкого фронта научных исследований.

Космические миссии, готовящиеся на базе новых достижений микроэлектроники, позволят выполнить изощренные эксперименты. Еще одно отличие современного этапа — подключение к научным работам космических агентств новых стран, включая Китай и Индию. Очевид-

но, что в ближайшие десятилетия наши знания об объектах Солнечной системы существенно обогатятся.

Автор благодарен рецензентам — члену-корреспонденту РАН, доктору физико-математических наук В. М. Григорьеву и доктору физико-математических наук П. Г. Ковадло. Особую благодарность автор выражает научному редактору книги, кандидату физико-математических наук В. Г. Сурдину, во многом благодаря которому данное издание увидело свет.

Автор надеется, что настоящее пособие поможет студентам и всем, кто интересуется планетными исследованиями, ознакомиться с современным состоянием наших знаний о том маленьком участке Вселенной, где мы живем.

1.1.1	1.1.2	1.1.3	1.1.4	1.1.5	1.1.6
1.2.1	1.2.2	1.2.3	1.2.4	1.2.5	1.2.6
1.3.1	1.3.2	1.3.3	1.3.4	1.3.5	1.3.6
1.4.1	1.4.2	1.4.3	1.4.4	1.4.5	1.4.6
1.5.1	1.5.2	1.5.3	1.5.4	1.5.5	1.5.6
1.6.1	1.6.2	1.6.3	1.6.4	1.6.5	1.6.6

2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.1.4	2.1.5	2.1.6
2.2.1	2.2.2	2.2.3	2.2.4	2.2.5	2.2.6
2.3.1	2.3.2	2.3.3	2.3.4	2.3.5	2.3.6
2.4.1	2.4.2	2.4.3	2.4.4	2.4.5	2.4.6
2.5.1	2.5.2	2.5.3	2.5.4	2.5.5	2.5.6
2.6.1	2.6.2	2.6.3	2.6.4	2.6.5	2.6.6

Планета	Масса	Средняя орбитальная скорость	Средняя орбитальная скорость	Средняя орбитальная скорость	Средняя орбитальная скорость
1.1.1	1.1.2	1.1.3	1.1.4	1.1.5	1.1.6
1.2.1	1.2.2	1.2.3	1.2.4	1.2.5	1.2.6
1.3.1	1.3.2	1.3.3	1.3.4	1.3.5	1.3.6
1.4.1	1.4.2	1.4.3	1.4.4	1.4.5	1.4.6
1.5.1	1.5.2	1.5.3	1.5.4	1.5.5	1.5.6
1.6.1	1.6.2	1.6.3	1.6.4	1.6.5	1.6.6
1.7.1	1.7.2	1.7.3	1.7.4	1.7.5	1.7.6
1.8.1	1.8.2	1.8.3	1.8.4	1.8.5	1.8.6
1.9.1	1.9.2	1.9.3	1.9.4	1.9.5	1.9.6
1.10.1	1.10.2	1.10.3	1.10.4	1.10.5	1.10.6
1.11.1	1.11.2	1.11.3	1.11.4	1.11.5	1.11.6
1.12.1	1.12.2	1.12.3	1.12.4	1.12.5	1.12.6

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Элементы орбит планет Солнечной системы

Планета	Среднее расстояние от Солнца a		Сидерический период обращения P		Средняя скорость орбитального движения, км/с
	а. е.	млн км	тропических лет*	суток	
Меркурий	0,38710	57,9	0,24085	87,969	47,9
Венера	0,72333	108,2	0,61521	224,70	35,0
Земля**	1,00000	149,6	1,00004	365,26	29,8
Марс	1,52363	227,9	1,88078	686,94	24,1
Юпитер	5,20441	778,6	11,8677	4334,6	13,1
Сатурн	9,58378	1433,7	29,6661	10835,3	9,6
Уран	19,58378	2870,4	84,491	30697,8	6,8
Нептун	30,02090	4491,1	164,491	60079,0	5,4
Плутон	39,23107	5868,9	245,73	89751,9	4,8

* Тропический год равен 365 суток 5 часов 48 минут 45 секунд.

** На уровне атмосферного давления 1 бар.

Таблица 2

Физические характеристики планет Солнечной системы

Планета	Масса (с атмосферой, но без спутников)		Средний экваториальный радиус		Сплюснутость $(R_{\text{экват}} - R_{\text{полярн}})/R_{\text{экват}}$	Средняя плотность, г/см ³
	10 ²⁴ кг	$\Theta = 1$	км	$\Theta = 1$		
Меркурий	0,33022	0,055274	2439,7	0,3825	0	5,43
Венера	4,8690	0,815005	6051,8	0,9488	0	5,24
Земля	5,9742	1,000000	6,378,14	1,0000	0,003354	5,515
(Луна)	0,073483	0,012300	1737,4	0,2724	0,0017	3,34
Марс	0,64191	0,10745	3397	0,5326	0,006476	3,94
Юпитер	1898,8	317,83	71492	11,209	0,064874	1,33
Сатурн	568,50	95,159	60268	9,4491	0,097962	1,70
Уран	86,625	14,500	25559	4,0073	0,022927	1,3
Нептун	102,78	17,204	24764	3,8826	0,017081	1,7

Таблица 3

Некоторые характеристики планет Солнечной системы

Планета	Период вращения вокруг оси, дней	Момент инерции ($1/MR^2$)	Гравитационное ускорение ($\Theta = 1$)	Критическая скорость на поверхности, км/с	Температура, К		Атмосфера
					эффкт.	поверхн.	
Меркурий	58,6462	0,324	0,38	4,2	435	90...690	Практ. отсутс.
Венера	-243,0185	0,333	0,90	10,4	228	735	CO ₂ , N ₂
Земля	0,99726963	0,330	1,0	11,189	247	190...325	N ₂ , O ₂
(Луна)	27,321661	0,395	0,17	2,4	275	40...395	Практ. отсутс.
Марс	1,02595675	0,377	0,38	5,0	216	150...260	CO ₂ , N ₂
Юпитер	0,41354	0,20	2,53	59,5	134		H ₂ , He
Сатурн	0,44401	0,22	1,06	35,5	97		H ₂ , He
Уран	-0,71833	0,23	0,90	21,3	59		H ₂ , He
Нептун	0,67125	0,26	1,14	23,5	59		H ₂ , He

Примечание. Периоды указаны в сутках длительностью 86400 с. Для Юпитера и Сатурна указан период вращения в системе III (связанной с магнитным полем). Знак (-) периода указывает направления вращения. Критическая (вторая космическая) скорость дана без учета сопротивления атмосферы.

Таблица 4

Спутники планет: физические параметры*

Номер	Название	Большая полуось орбиты, тыс. км	Диаметр, км	Масса, 10 ²⁰ кг	Плотность, г/см
Земля					
	Луна	384,4	3475	735	3,34
Марс					
I	Фобос	9,38	26,18	0,000107	1,87
II	Деймос	23,46	26,10	0,000022	2,25
Юпитер					
XVI	Метида	128	43	0,001	3,0
XV	Адрастея	129	16,26	0,00007	3,0

Продолжение табл. 4

Номер	Название	Большая полуось орбиты, тыс. км	Диаметр, км	Масса, 10^{20} кг	Плотность, г/см
V	Амальтея	181	262-134	0,021	0,85
XIV	Теба	222	110-90	0,015	3,0
I	Ио	422	3643	893	3,53
II	Европа	671	3122	480	3,04
III	Ганимед	1070	5262	1482	1,94
IV	Каллисто	1883	4821	1076	1,83
XVIII	Фемисто	7284	8	0,0000007	2,6
XIII	Леда	11165	20	0,0001	2,6
VI	Гималия	11461	170	0,067	2,6
X	Лисигея	11717	36	0,006	18,2
VII	Элара	11741	83	0,0087	16,6
	S/2000 J11	12555	4	0,0000001	22,4
	S/2003 J12	15912	1	0,000000002	23,9
XLVI	Карпо	16989	3	0,0000004	
XXXIV	Эвпорие	19304	2	0,0000001	
	S/2000 J13	20221	2	0,0000001	
	S/2003 J18	20514	2	0,0000001	
XXXV	Ортоэне	20720	2	0,0000001	
XXXIV	Эвпорие	19304	2	0,0000001	
XXXV	Ортоэне	20720	2	0,0000001	
XXXII	Эванте	20797	3	0,0000004	
XXII	Гарпалике	20858	4	0,000001	
XXVII	Праксидике	20907	7	0,000004	
XXIX	Тионе	20939	4	0,000001	
	S/2003 J16	20963	2	0,0000001	
XXIV	Иокасте	21061	5	0,000002	
XL	Мнемее	21069	2	0,0000001	
XXX	Герпилие	21131	4	0,000001	
XLII	Тельксинное	21162	2	0,0000001	
XLIV	Гелике	21263	4	0,000001	
XII	Ананке	21276	28	0,0003	

Продолжение табл. 4

Номер	Название	Большая полуось орбиты, тыс. км	Диаметр, км	Масса, 10^{20} кг	Плотность, г/см
	S/2003 J15	22627	2	0,0000001	
XXXII	Эвридоме	22865	3	0,0000004	
XI.III	Архее	22931	3	0,0000004	
	S/2003 J17	23001	2	0,0000001	
XXXVIII	Пазите	23004	2	0,0000001	
	S/2003 J10	23042	2	0,0000001	
XXI	Халдене	23100	4	0,0000007	
XXVI	Исоное	23155	4	0,0000007	
XXV	Эроное	23196	3	0,0000004	
XXXVII	Кале	23217	2	0,0000001	
XXXI	Этне	29229	3	0,0000004	
XX	Тайгете	23280	5	0,000002	
	S/2003 J9	23384	1	0,0000002	
XI	Карме	23404	46	0,0013	
XXXVI	Спондее	23487	2	0,000001	
XIX	Мераклите	23493	5	0,00002	
	S/2003 J5	23495	4	0,000001	
	S/2003 J19	23533	2	0,0000001	
	S/2003 J23	23563	1	0,0000002	
XXIII	Калике	23566	5	0,000002	
	S/2003 J14	23614	2	0,0000001	
VIII	Пасифе	23624	58	0,003	
XLVII	Эвкеладе	23661	4	0,000001	
	S/2003 J4	23930	2	0,0000001	
IX	Синопе	23939	38	0,008	
XXXIX	Гегемоне	23947	3	0,0000004	
XLI	Аойде	23981	4	0,000001	
XLIV	Каллихоре	24043	2	0,0000001	
XXVIII	Автоное	24046	4	0,000001	
XVII	Каллирое	24103	9	0,000009	
XLVIII	Килтене	24349	2	0,0000001	
	S/2003 J2	29541	2	0,0000001	

Продолжение табл. 4

Номер	Название	Большая полуось орбиты, тыс. км	Диаметр, км	Масса, 10^{20} кг	Плотность, г/см ³
С а т у р н					
XVIII	Пан	133,6	20	0,00003	0,6
XV	Атлант	137,7	39-27	0,0001	0,6
XVI	Прометей	139,4	148-68	0,003	0,6
XVII	Пандора	141,7	110-62	0,002	0,6
XI	Эпиметей	151,4	138-110	0,005	0,6
X	Янус	151,5	194-154	0,002	0,7
I	Мимас	185,6	397	0,38	1,2
XXXII	Метона	194,0	3		
XXXIII	Паллена	211,0	4		
II	Энцелад	238,1	500	1,04	1,6
III	Тетфия	294,7	1060	6,18	1,0
XIII	Телесто	294,7	30-15	0,00007	1,0
XIV	Калипсо	294,7	19	0,00004	1,0
IV	Диона	377,4	1120	11,0	1,5
XII	Елена	377,4	36-30	0,0003	1,5
XXXIV	Полидевк	377,4	5		
V	Рея	527,1	1530	23,2	1,2
VI	Титан	1221,9	5150	1346,5	1,9
VII	Гиперион	1464,1	360-226	0,11	1,1
VIII	Япет	3560,8	1440	19,5	1,3
XXIV	Кивиок	11365	14	0,00003	2,3
XXII	Иджирак	11442	10	0,00001	2,3
IX	Феба	12944	220	0,07	1,3
XX	Палиак	15198	19	0,00008	
XXVII	Скади	15641	6	0,000003	
XXVI	Альбиорикс	16394	26	0,0002	
XXVIII	Эррипо	17604	9	0,000008	
XXIX	Снарнак	18195	32	0,0004	
XXI	Тарвос	18239	13	0,00003	
XXXI	Нарви	18719	7	0,000003	

Продолжение табл. 1

Номер	Название	Большая полуось орбиты, тыс. км	Диаметр, км	Масса, 10^{20} кг	Плотность, г/см ³
XXV	Мундилфари	18722	6	0,000002	
XXIII	Суттунг	19465	6	0,000002	
XXX	Трюм	20219	6	0,000002	
XIX	Имир	23130	16	0,00005	
Новые спутники Сатурна, об открытии которых заявлено в 2005 г.					
XXXV	Дафнис	136,5	7		
	S/2004 S7	19800	6		
XLII	Форньот	22200	6		
XL	Фарбаути	19800	5		
XXXVI	Эгир	19350	6		
XXXVII	Бефинд	16950	6		
	S/2004 S12	19650	5		
	S/2004 S13	18450	6		
XLIII	Хати	19950	6		
XXXVIII	Бергельмир	18750	6		
XLI	Фенрир	22200	4		
	S/2004 S17	18600	4		
XXXVX	Бестла	19650	7		
Уран					
VI	Корделия	49,8	40	0,0004	1,3
VII	Офелия	53,8	43	0,0005	1,3
VIII	Бианка	59,2	51	0,0009	1,3
IX	Крессида	61,8	30	0,003	1,3
X	Дездемона	62,7	64	0,002	1,3
XI	Джультетта	64,4	94	0,006	1,3
XII	Порция	66,1	135	0,017	1,3
XIII	Розалинда	69,9	72	0,003	1,3
XXVII	Купидон	74,8	24	0,00007	1,3
XIV	Белинда	75,3	80	0,004	1,3
XXV	Пердита	76,4	20		
XV	Пак	86,0	162	0,03	1,3

Продолжение табл. 4

Номер	Название	Большая полуось орбиты, тыс. км	Диаметр, км	Масса, 10^{40} кг	Плотность, г/см
XXVI	Маб	97,7	32	0,0002	1,3
V	Миранда	129,9	472	0,66	1,2
I	Ариэль	190,9	1158	13,5	1,7
II	Умбриэль	266,0	1170	11,7	1,4
III	Титания	436,3	1578	35,2	1,7
IV	Оберон	583,5	1523	30,1	1,6
XXII	Франциско	4276	12	0,00001	1,5
XVI	Калибан	7231	98	0,007	1,5
XX	Стефано	8004	20	0,00006	1,5
	Тринкуло	8571	10	0,000007	1,5
XVII	Сикоракса	12179	190	0,054	1,5
XXIII	Маргарита	14345	11	0,00001	1,5
XVIII	Просперо	16256	30	0,0002	1,5
XIX	Сетевос	17418	30	0,0002	1,5
XXIV	Фердинанд	20901	12	0,00001	1,5
Нептун					
III	Наяда	48,23	96-52	0,002	
IV	Таласса	50,08	108-52	0,004	
V	Деспина	52,53	180-128	0,02	
VI	Галатея	61,95	204-144	0,04	
VII	Ларисса	73,55	216-168	0,05	
VIII	Протей	117,65	440-404	0,5	
I	Тритон	354,8	2707	214	2,1
II	Нереида	5513,4	340	0,3	1,0
IX	Галимеда	15728	60	0,001	
XI	Сао	22422	50	0,001	
XII	Лаомедея	23571	50	0,001	
X	Псамафа	46695	30	0,0002	
XIII	Несо	48387	60	0,001	

* Спутники планет перечислены в порядке возрастания большой полуоси орбиты. У спутников неправильной формы вместо среднего диаметра приведены наибольший и наименьший размеры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Альвен, Х. Эволюция Солнечной системы / Х. Альвен, Г. Арре-
ниус. — М. : Мир, 1979. — 511 с.
- Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред.
Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. — М. : Физматлит, 2010. —
384 с.
- Астрономия: век XXI / ред.-сост. В. Г. Сурдин. — Фрязино : Век 2,
2007. — 608 с.
- Вишневский, С. А. Астрономия. — Новосибирск : Нонпарель, 2007. —
288 с.
- Багров, А. В. Планета Ольберса: история еще не закончена! // Исто-
рико-астрономические исследования / Ин-т истории естествозна-
ния и техники им. С. И. Вавилова. — М. : Наука, 1955. — 2003. —
Вып. 28 / отв. ред. Г. М. Идлис. — С. 72–82.
- Багров, А. В. Новый взгляд на происхождение планет и историю
Солнечной системы // Избранные проблемы астрономии: мате-
риалы научно-практической конференции «Небо и Земля» (г. Ир-
кутск, 21–23 ноября 2006 г.) / науч. ред. С. А. Язев. — Иркутск :
Иркут. гос. ун-т, 2006. — С. 10–20.
- Бронштэн, В. А. Планета Ольберса: история продолжается // Ис-
торико-астрономические исследования / Ин-т истории естество-
знания и техники им. С. И. Вавилова. — М. : Наука, 2003. —
Вып. 28. — С. 42–53.
- Витязев, А. В. Происхождение Солнечной системы / А. В. Витязев,
А. В. Козенко // Земля и Вселенная. — 1988. — № 2. — С. 25–32.
- Витязев, А. В. Ранняя эволюция Земли // Земля и Вселенная. —
1990. — № 2. — С. 18–23.
- Витязев, А. В. Импаkты в ранней и современной истории Земли //
Земля и Вселенная. — 2000. — № 2. — С. 9–17.
- Витязев, А. В. Происхождение Земли и геосфер: немного истории,
новые результаты, остающиеся проблемы // Историко-астрономи-
ческие исследования / Ин-т истории естествознания и техники
им. С. И. Вавилова. — М. : Наука, 2005. — Вып. 30. — С. 11–35.
- Галимов, Э. М. Происхождение Луны. Российская концепция против
американской // Земля и Вселенная. — 2005. — № 6. — С. 3–14.
- Дорофеева, В. А. Эволюция ранней Солнечной системы. Космохи-
мические и физические аспекты / В. А. Дорофеева, А. Б. Ма-
калкин. — М. : Едиториал УРСС, 2004. — 264 с.

- Жарков, В. Н.* Внутреннее строение Земли / В. Н. Жарков, В. А. Магницкий // Земля и Вселенная. — 1992. — № 4. — С. 3–9.
- Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова / Ин-т динамики геосфер РАН. — М. : Академкнига, 2005. — 310 с.
- Кононович, Э. В.* Общий курс астрономии / Э. В. Кононович, В. И. Мороз / под. ред. В. В. Иванова. — М. : Едиториал УРСС, 2001. — 544 с.
- Куликовский, П. Г.* Справочник любителя астрономии / под ред. В. Г. Сурдина. — М. : Едиториал УРСС, 2002. — 688 с.
- Ксанфомалити, Л. В.* Парад планет / Л. В. Ксанфомалити. — М. : Наука. Физматлит, 1997. — 256 с.
- Ксанфомалити, Л. В.* История открытия внесолнечных планет // Историко-астрономические исследования / Ин-т истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. — М. : Наука, 1955. — Вып. 27 / Отв. ред. Г. М. Идлис. — 2002. — С. 54–78.
- Лазарев, Е. Н.* Марс: от первых зарисовок до современных карт // Земля и Вселенная. — 2008. — № 1. — С. 67–75.
- Лазарев, Е. Н.* История картографирования Марса // Историко-астрономические исследования / Ин-т истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН. — М. : Наука, 1955. — Вып. XXXIII / отв. ред. Г. М. Идлис. — 2008. — С. 235–256.
- Лазарев Е. Н.* Новая карта рельефа Венеры / Е. Н. Лазарев, Ж. Ф. Родионова // Земля и Вселенная. — 2008. — № 2. — С. 3–15.
- Современная геодинамика и гелиодинамика / К. Г. Леви [и др.]. — Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2002. — 182 с.
- Леви, К. Г.* Глобальное потепление сегодня — необратимые изменения или локальный эпизод? / К. Г. Леви, С. А. Язев, Н. В. Задонина // Новые методы в дендрологии : материалы Всерос. науч. конф. (Иркутск, 10–13 сентября 2007 г.). — Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2007. — С. 22–26.
- Маракушев, А. А.* Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. — М. : Наука, 1992. — 208 с.
- Маров, М. Я.* Природа малых тел и их миграция в Солнечной системе // Земля и Вселенная. — 2008. — № 6. — С. 3–18.
- Марс: великое противостояние / ред.-сост. В. Г. Сурдин. — М. : Физматлит, 2004. — 224 с.
- Паннекук, А.* История астрономии. — М. : Наука, 1966. — 592 с.
- Резанов, И. А.* Метеориты свидетельствуют: в Солнечной системе была еще одна крупная планета // Историко-астрономические исследования / Ин-т истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. — М. : Наука, 1955. — Вып. 28 / Отв. ред. Г. М. Идлис. — 2003. — С. 54–71.
- Резанов, И. А.* История альтернативных течений в планетной космогонии (гомогенная или гетерогенная аккреция) // Историко-астрономические исследования / Ин-т истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. — М. : Наука, 1955. — Вып. 29 / Отв. ред. Г. М. Идлис. — 2004. — С. 77–109.
- Резанов, И. А.* Ошибки шмидтовской космогонии // Историко-астрономические исследования / Ин-т истории естествознания и тех-

- ники им. С. И. Вавилова. — М. : Наука, 1955. — Вып. 32 / Отв. ред. Г. М. Идлис. — 2007. — С. 65–115.
- Сафронов, В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М. : Наука, 1969.
- Симоненко, А. Н. Штрихи предыстории Солнечной системы // Земля и Вселенная. — 1984. — № 1. — С. 40–47.
- Сорохтин, О. Г. Эволюция и прогноз изменений глобального климата Земли. — М. ; Ижевск : Ин-т компьютерных исследований. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. — 88 с.
- Тутуков, А. В. Происхождение планетных систем // Земля и Вселенная. — 1999. — № 6. — С. 17–24.
- Угроза с неба — рок или случайность? / под ред. А. А. Боярчука. — М. : Космоинформ, 1999. — 220 с.
- Фишер, Д. Рождение Земли. — М. : Мир, 1990. — 264 с.
- Цицин, Ф. А. Истоки и перспективы шмидтовской планетной космогонии / Земля и Вселенная. — 2002. — № 2. — С. 47–56.
- Шингарева, К. Б. Названия на небесных телах (история и современное состояние) // Историко-астрономические исследования / Ин-т истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН. — М. : Наука, 2008. — Вып. 33. — С. 257–261.
- Шмидт, О. Ю. Возникновение спутников и планет // Тр. геофизического ин-та АН СССР. — М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1950. — № 11 (138). — 20 с.
- Энеев, Т. М. Миграция малых тел в Солнечной системе / Т. М. Энеев, Г. Б. Ефимов // Земля и Вселенная. — 2005. — № 1. — С. 80–89.
- Язев, С. А. Бритва Оккама и структура Солнечной системы // Вестник SETI. Информационный бюлл. — М., 2002. — № 2/19. — С. 84–96.
- Язев, С. А. Загадки красного соседа, или Марсианские хроники-2. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. — 227 с.
- Язев, С. А. Родная звезда. Повесть о Солнце. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. — 227 с.
- Язев, С. А. Глобальное потепление и вопросы научной методологии / С. А. Язев, К. Г. Леви, Н. В. Задонина // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. науки о Земле. — 2009. — Т. 2, № 1. — С. 198–213.
- Язев, С. А. Еще раз о роли комет в процессе зарождения и распространения жизни // Бюллетень Специальной астрофизической обсерватории РАН. — 2007. — Т. 60–61. — С. 100–105.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Лекция 1. Понятие о Солнечной системе	8
Лекция 2. Закон всемирного тяготения и законы Кеплера	19
Лекция 3. Форма небесных тел и приливные взаимодействия	32
Лекция 4. Планета Меркурий	45
Лекция 5. Планета Венера	57
Лекция 6. Планета Земля	76
Лекция 7. Спутник Земли — Луна	104
Лекция 8. Планета Марс	126
Лекция 9. Главный пояс астероидов	158
Лекция 10. Проблема астероидной опасности	178
Лекция 11. Планета Юпитер	200
Лекция 12. Планета Сатурн	233
Лекция 13. Планета Уран	265
Лекция 14. Планета Нептун	283
Лекция 15. Пояс Койпера	297
Лекция 16. Кометы	313
Лекция 17. Солнце	333
Лекция 18. Закономерности Солнечной системы и проблемы планетной космогонии	346
Закключение	370
Приложение	372
Библиографический список	379

Сергей Арктурович ЯЗЕВ

**ЛЕКЦИИ
О СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ**
Учебное пособие

Под редакцией кандидата
физико-математических наук **В. Г. СУРДИНА**

Издание второе,
исправленное и дополненное

Художественный редактор *С. Ю. Малахов*
Корректоры *Т. А. Кошелева, В. О. Логунова*
Выпускающие *Ю. Г. Бакишанова, Д. А. Щепелева*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5.
Тел./факс: (812)412-29-35, 412-05-97, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 08.06.11.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84·108¹/32.
Печать офсетная. Усл. п. л. 20,16. Тираж 1000 экз.

Заказ № 1279

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных
диапозитивов в ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие
«Правда Севера». 163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, 32.
Тел./факс (8182) 64-14-54, тел.: (8182) 65-37-65, 65-38-78, 20-50-52
www.ippps.ru, e-mail: zakaz@ippps.ru

ГДЕ КУПИТЬ

ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:

Для того, чтобы заказать необходимые Вам книги,
достаточно обратиться в любую из торговых компаний
Издательского Дома «ЛАНЬ»:

по России и зарубежью

«ЛАНЬ-ТРЕЙД»

192029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13

тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82

тел./факс: (812) 412-54-93

e-mail: trade@lanbook.ru

ICQ: 446-869-967

www.lanpbl.spb.ru/price.htm

в Москве и в Московской области

«ЛАНЬ-ПРЕСС»

109263, Москва, 7-ая ул. Текстильщиков, д. 6/19

тел.: (499) 178-65-85

e-mail: lanpress@lanbook.ru

в Краснодаре и в Краснодарском крае

«ЛАНЬ-ЮГ»

350072, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1

тел.: (861) 274-10-35

e-mail: lankrd98@mail.ru

ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:

интернет-магазины:

Издательство «Лань»: <http://www.lanbook.com>

«Сова»: <http://www.symplex.ru>

«Ozon.ru»: <http://www.ozon.ru>

«Библион»: <http://www.biblion.ru>



Сергей Арктурович Язев

Астроном в третьем поколении, родился и живет в г. Иркутске. С 1997 г. возглавляет астрономическую обсерваторию Иркутского государственного университета, по совместительству работает старшим научным сотрудником в Институте солнечно-земной физики СО РАН, читает лекции в университете. Автор и соавтор более 200 статей по солнечной физике, астроклимату, методике преподавания астрономии, трех монографий, пяти научно-популярных книг и трех учебных пособий по астрономии, множества научно-популярных публикаций в СМИ. Член правления Международной организации «Астрономическое общество». Участник и руководитель ряда метеоритных экспедиций, а также экспедиций, исследующих солнечные затмения.



ISBN 978-5-8114-1253-2



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЛАНЬ»
победитель конкурса по качеству
«Сделано в Санкт-Петербурге»