



Планеты земной группы

Внутренняя область Солнечной системы населена разнообразными телами: крупными планетами, их спутниками, а также малыми телами — астероидами и кометами. С 2006 г. в группе планет введена новая подгруппа — планеты-карлики (*dwarf planet*), обладающие внутренними качествами планет (сфероидальная форма, геологическая активность), но в силу малой массы не способные доминировать в окрестности своей орбиты. Теперь 8 самых массивных планет — от Меркурия до Нептуна — решено называть просто планетами (*planet*), хотя в разговоре астрономы для однозначности часто называют их «большими планетами», чтобы отличать от планет-карликов. Термин «малая планета», который многие годы применялся к астероидам, теперь не рекомендовано использовать во избежание путаницы с карликовыми планетами.

В области больших планет мы видим четкое деление на две группы по 4 планеты в каждой: внешнюю часть этой области занимают планеты-гиганты, а внутреннюю — значительно менее массивные планеты земной группы. Группу гигантов также обычно делят пополам: газовые гиганты (Юпитер и Сатурн) и ледяные гиганты (Уран и Нептун). В группе планет земного типа тоже намечается деление пополам: Венера и Земля чрезвычайно похожи друг на друга по многим физическим параметрам, а Меркурий и Марс уступают им по массе на порядок и почти лишены атмосферы (даже у Марса она в сотни раз меньше земной, а у Меркурия практически отсутствует).

Следует отметить, что среди двух сотен спутников планет можно выделить не менее 16 тел, обладающих внутренними свойствами полноценных планет. Нередко они превосходят своими размерами и массами планеты-карлики, но при этом находятся под контролем гравитации значительно более массивных тел. Речь идет о Луне, Титане, галилеевых спутниках Юпитера и им подобных. Поэтому было бы естественно ввести в номенклатуру Солнечной системы новую

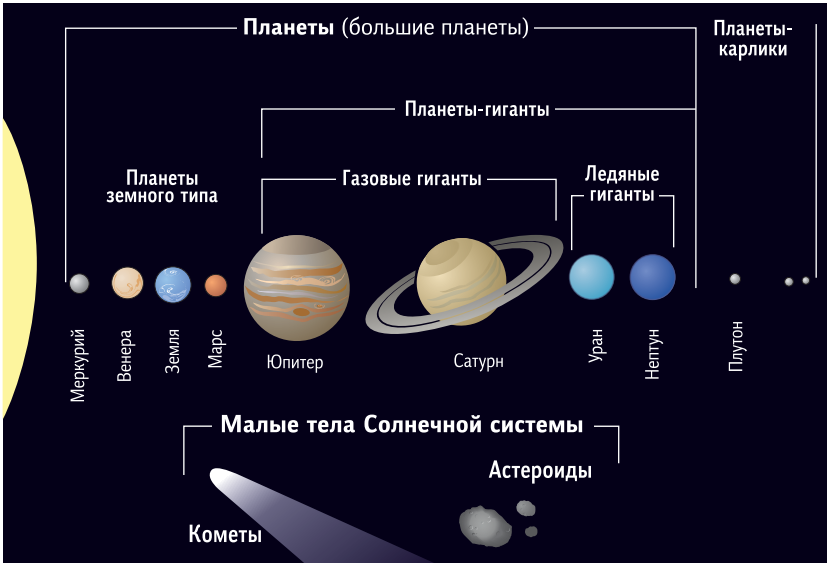


Рис. 4.1. Классификация тел Солнечной системы.

группу для таких «подчиненных» объектов планетного типа, назвав их «планетами-спутниками». Но пока эта идея в стадии обсуждения.

Вернемся к планетам земного типа. По сравнению с гигантами они привлекательны тем, что имеют твердую поверхность, на которую могут осуществлять посадку космические зонды. Начиная с 1970-х гг. автоматические станции и самоходные аппараты СССР и США неоднократно селились на поверхность Венеры и Марса и успешно там работали. Посадок на Меркурий пока не было, поскольку полеты в окрестности Солнца и посадка на массивное безатмосферное тело технически весьма сложны.

Изучая планеты земного типа, астрономы не забывают и саму Землю. Анализ снимков из космоса позволил многое понять в динамике земной атмосферы, в строении ее верхних слоев (куда не поднимаются самолеты и даже аэростаты), в процессах, происходящих в ее магнитосфере. Сравнивая между собой строение атмосфер земледобных планет, можно многое понять в их истории и точнее прогнозировать их будущее. А поскольку все высшие растения и животные обитают на поверхности нашей (или не только нашей?) планеты, особенно важны для нас характеристики нижних слоев атмосферы. Эта лекция посвящена планетам земного типа, в основном их внешнему виду и условиям на поверхности.

Яркость планеты. Альbedo

Глядя на планету издалека, мы легко различаем тела с атмосферой и без нее. Присутствие атмосферы, а точнее наличие в ней облаков, делает внешность планеты изменчивой и существенно повышает яркость ее диска. Это ясно видно, если расположить планеты в ряд от совершенно безоблачных (безатмосферных) до полностью закрытых облаками: Меркурий, Марс, Земля, Венера. Каменистые безатмосферные тела похожи друг на друга до почти полной неразличимости: сравните, например, крупномасштабные снимки Луны и Меркурия. Даже опытный глаз с трудом различает между собой поверхности этих темных тел, густо покрытых метеоритными кратерами. Зато атмосфера придает любой планете неповторимый вид.

Наличием или отсутствием атмосферы у планеты управляют три фактора: температура, гравитационный потенциал у поверхности и глобальное магнитное поле. Такое поле есть только у Земли, и оно существенно защищает нашу атмосферу от потоков солнечной плазмы. Луна потеряла атмосферу (если вообще ее имела) из-за низкой критической скорости у поверхности, а Меркурий — из-за высокой температуры и мощного солнечного ветра. Марс при почти той же гравитации, что у Меркурия, смог сохранить остатки атмосферы, поскольку из-за удаленности от Солнца он холоден и не так интенсивно обдувается солнечным ветром.

По своим физическим параметрам Венера и Земля — почти близнецы. У них весьма схожи размер, масса, а значит, и средняя плотность. Их внутренняя структура — кора, мантия, железное ядро — также должна быть сходной, хотя уверенности в этом пока нет, поскольку сейсмические и прочие геологические данные о недрах Венеры отсутствуют. Разумеется, и в недра Земли мы глубоко не проникали: в большинстве мест — на 3–4 км, в отдельных точках — на 7–9 км и лишь в одной — на 12 км. Это менее 0,2% радиуса Земли. Но сейсмические, гравиметрические и другие измерения позволяют судить о земных недрах весьма детально, а для других планет таких данных почти нет. Детальные карты гравитационного поля получены только для Луны; потоки тепла из недр измерены только на Луне; сейсмометры пока работали тоже лишь на Луне и (не очень чувствительный) на Марсе.

О внутренней жизни планет геологи до сих пор судят по особенностям их твердой поверхности. Например, отсутствие признаков литосферных плит у Венеры существенно отличает ее от Земли, в эволю-

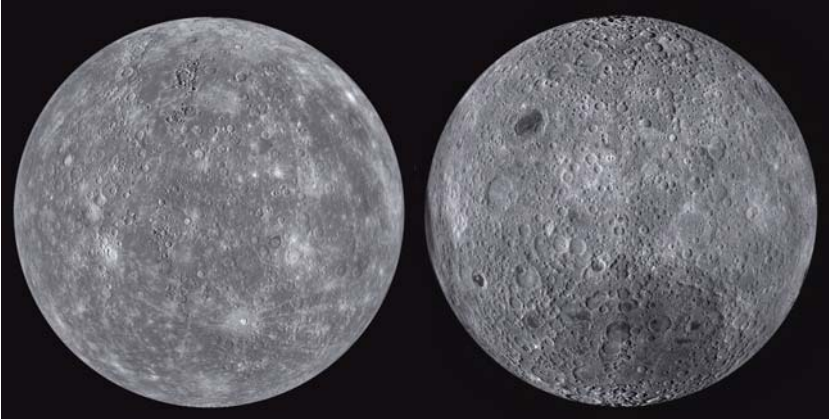


Рис. 4.2. Поверхности Меркурия (слева) и Луны (показана ее невидимая с Земли сторона). Очевидно, что они очень похожи. Фото Меркурия: спутник «Messenger» (NASA). Фото Луны: спутник LRO (NASA).

ции поверхности которой тектонические процессы (дрейф континентов, спрединг, субдукция и т. п.) играют определяющую роль. В то же время некоторые косвенные данные указывают на возможность тектоники плит на Марсе в прошлом, а также тектоники ледяных полей на Европе, спутнике Юпитера. Таким образом, внешнее сходство планет (Венера — Земля) не гарантирует сходства их внутреннего строения и процессов в их недрах. А планеты, не похожие друг на друга, могут демонстрировать сходные геологические явления.

Вернемся к тому, что доступно астрономам и прочим специалистам для прямого изучения, а именно — к поверхности планет или их облачного слоя. В принципе непрозрачность атмосферы в оптическом диапазоне не является непреодолимым препятствием для изучения твердой поверхности планеты. Радиолокация с Земли и с борта космических зондов позволила изучить поверхности Венеры и Титана сквозь их непрозрачные для света атмосферы. Однако эти работы носят эпизодический характер, а систематические исследования планет до сих пор проводятся оптическими приборами. И что еще более важно: оптическое излучение Солнца служит главным источником энергии для большинства планет. Поэтому способность атмосферы отражать, рассеивать и поглощать это излучение прямо влияет на климат у поверхности планеты.

Яркость поверхности планеты зависит от ее расстояния от Солнца, а также от наличия и свойств ее атмосферы. Облачная атмосфе-



Рис. 4.3. Фото Земли и Луны, полученное зондом «Галилео» (NASA).

хорошо рассеивают и отражают свет. Вот фотография (рис. 4.3), где в кадр одновременно попали Земля и Луна. Этот снимок сделал космический зонд «Галилео», пролетая мимо Земли по пути к Юпитеру. Посмотрите, насколько Луна темнее Земли и вообще темнее любой планеты с атмосферой. Это общая закономерность: безатмосферные тела очень темные. Дело в том, что под воздействием космической радиации любое твердое вещество постепенно темнеет.

Утверждение, что поверхность Луны темная, обычно вызывает недоумение: на первый взгляд лунный диск выглядит очень ярким, безоблачной ночью он даже ослепляет нас. Но это лишь по контрасту с еще более темным ночным небом. Для характеристики отражающей способности любого тела используют величину под названием *альбедо*. Это степень белизны, то есть коэффициент отражения света. Альбедо, равное нулю, — абсолютная чернота, полное поглощение света. Альбедо, равное единице, — полное отражение. У физиков и астрономов есть несколько различных подходов к определению альбедо. Ясно, что яркость освещенной поверхности зависит не только от типа материала, но и от его структуры и ориентации относительно источника света и наблюдателя. Например, пушистый свежевывающий снег имеет одно значение коэффициента отражения, а снег, в который вы наступили ботинком, — совсем другое. А зависимость от ориентации легко продемонстрировать зеркальцем, пуская солнеч-

ра Венеры отражает свет в 2–3 раза лучше, чем частично облачная атмосфера Земли, а безатмосферная поверхность Луны — втрое хуже земной атмосферы. Ярчайшее светило на ночном небе, не считая Луну, — Венера. Она очень яркая не только из-за относительной близости к Солнцу, но и из-за плотного облачного слоя из капель концентрированной серной кислоты, прекрасно отражающего свет. Наша Земля тоже не слишком темная, поскольку 30–40% земной атмосферы заполнены водяными облаками, а они тоже

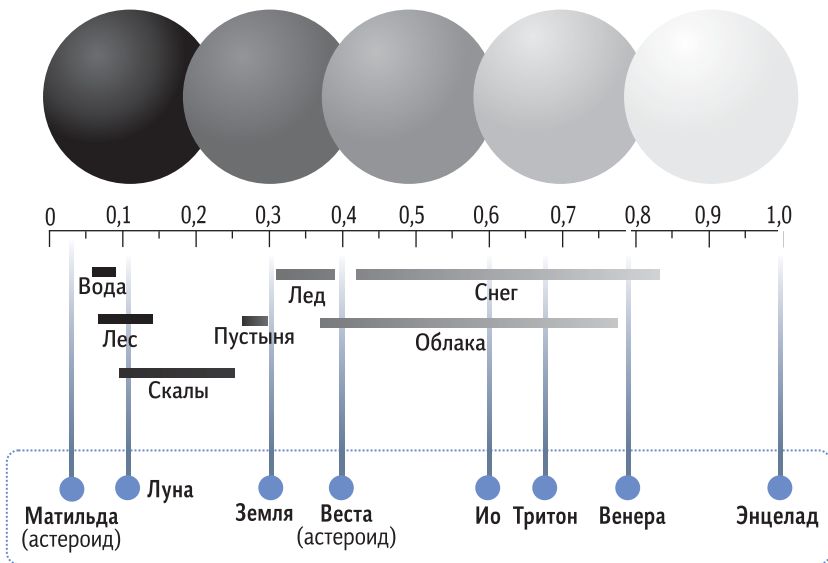


Рис. 4.4. Альbedo — доля солнечного света, отраженная поверхностью. Показан диапазон значений альbedo типичных поверхностей на Земле, а также альbedo Бонда некоторых космических тел.

ных зайчиков. Точное определение альbedo различного типа дано в главе «Краткий справочник» (с. 325). Знакомые поверхности с разным альbedo — бетон и асфальт. Освещенные одинаковыми потоками света, они демонстрируют разную визуальную яркость: у свежевымытого асфальта альbedo около 10%, а у чистого бетона — около 50%.

Весь диапазон возможных значений альbedo перекрыт известными космическими объектами. Скажем, Земля отражает около 30% солнечных лучей, в основном благодаря облакам, а сплошной облачный покров Венеры отражает 77% света. Наша Луна — одно из самых темных тел, в среднем отражающее около 11% света, а ее видимое полушарие из-за наличия обширных темных «морей» отражает свет еще хуже — менее 7%. Но встречаются и еще более темные объекты — например, астероид 253 Матильда с его альbedo в 4%. С другой стороны, есть удивительно светлые тела: спутник Сатурна Энцелад отражает 81% видимого света, а его геометрическое альbedo просто фантастическое — 138%, т. е. он ярче идеально белого диска такого же сечения. Даже трудно понять, как ему это удается. Чистый снег на Земле и то хуже отражает свет; какой же снег лежит на поверхности маленького и симпатичного Энцелада?

Тепловой баланс

Температура любого тела определяется балансом между притоком к нему тепла и его потерями. Известны три механизма обмена теплом: излучение, теплопроводность и конвекция. Два последних процесса требуют прямого контакта с окружающей средой, поэтому в космическом вакууме важнейшим и, по сути, единственным становится первый механизм – излучение. Для конструкторов космической техники это создает немалые проблемы. Им приходится учитывать несколько источников тепла: Солнце, планету (особенно на низких орбитах) и внутренние агрегаты самого космического аппарата. А для сброса тепла есть лишь один способ – излучение с поверхности аппарата. Для поддержания баланса тепловых потоков конструкторы космической техники регулируют эффективное альbedo аппарата с помощью экранно-вакуумной изоляции и радиаторов. Когда такая система дает сбой, условия в космическом корабле могут стать весьма некомфортными, о чем напоминает нам история экспедиции «Аполлон-13» к Луне.

Но впервые с этой проблемой столкнулись еще в первой трети XX в. создатели высотных аэростатов – так называемых стратостатов. В те годы еще не умели создавать сложные системы терморегулирования герметичной гондолы, поэтому ограничивались простым подбором альbedo ее внешней поверхности. Насколько чувствительна температура тела к его альbedo, говорит история первых полетов в стратосферу. Швейцарец Огюст Пикар покрасил гондолу своего стратостата FNRS-1 с одной стороны в белый, а с другой – в черный цвет. Предполагалось регулировать температуру в гондоле, поворачивая сферу той или иной стороной к Солнцу: для этой цели снару-



Рис. 4.5. Огюст Пикар готовится к полету на стратостате FNRS-1 (1931 г.)



Рис. 4.6. Экипаж стратостата «Explorer II» (1935 г.)

жи установили пропеллер. Но устройство не заработало, солнце светило с «черной» стороны, и внутренняя температура в первом полете поднялась до $+38^{\circ}\text{C}$. В следующем полете всю капсулу просто покрыли серебряной краской для отражения солнечных лучей. Внутри стало минус 16°C .

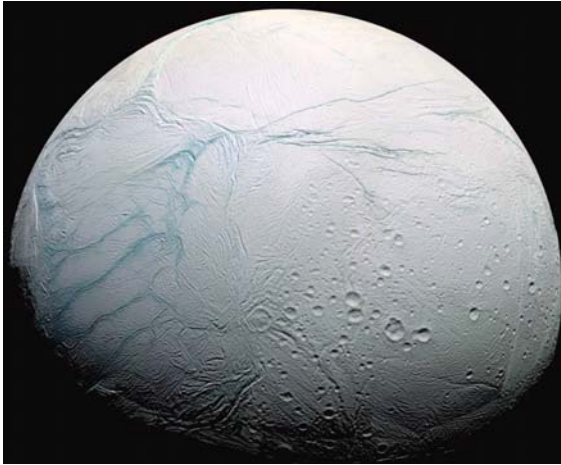


Рис. 4.7. Энцелад — спутник Сатурна, обладающий чрезвычайно высоким альбедо. Фото зонда «Кассини» (NASA).

Американские конструкторы стратостата «Explorer» учли опыт Пикара и приняли компромиссный вариант: покрасили верхнюю часть капсулы в белый, а нижнюю — в черный цвет. Идея состояла в том, что верхняя половина сферы будет отражать солнечное излучение, а нижняя — поглощать тепло от Земли. Этот вариант оказался неплохим, но тоже не идеальным: во время полетов в капсуле было +5 °С.

Советские стратонавты просто теплоизолировали алюминиевые капсулы слоем войлока. Как показала практика, такое решение было самым удачным. Внутреннего тепла, в основном выделяемого экипажем, оказалось достаточно для поддержания стабильной температуры.

Но если планета не имеет собственных мощных источников тепла, то значение альбедо очень важно для ее климата. Например, наша планета поглощает 70% падающего на нее солнечного света, перерабатывая его в собственное инфракрасное излучение, поддерживая за счет него круговорот воды в природе, запасая его в результате фотосинтеза в биомассе, нефти, угле, газе. Луна поглощает почти весь солнечный свет, «бездарно» превращая его в высокоэнтропийное инфракрасное излучение и за счет этого поддерживая свою довольно высокую температуру. Зато Энцелад своей идеально белой поверхностью гордо отталкивает от себя почти весь солнечный свет, за что и расплавляется чудовищно низкой температурой поверхности: в среднем около -200 °С, а местами до -240 °С. Впрочем, этот спутник — «весь в белом» — не сильно страдает от наружного холода,

поскольку у него есть альтернативный источник энергии – приливное гравитационное влияние соседа-Сатурна (глава 6), поддерживающее его подледный океан в жидком состоянии. Но у планет земной группы внутренние источники тепла очень слабы, поэтому температура их твердой поверхности в значительной степени зависит от свойств атмосферы – от ее способности, с одной стороны, отражать часть солнечных лучей обратно в космос, а с другой – удерживать энергию излучения, прошедшего сквозь атмосферу к поверхности планеты.

Парниковый эффект и климат планеты

В зависимости от того, как далеко от Солнца находится планета и какую долю солнечного света она поглощает, формируются температурные условия на поверхности планеты, ее климат. Как выглядит спектр любого самосветящегося тела, например звезды? В большинстве случаев спектр звезды – это «одногорбая», почти планковская кривая, у которой положение максимума зависит от температуры поверхности звезды. В отличие от звезды, у спектра планеты два «горба»: часть звездного света она отражает в оптическом диапазоне, а другую часть поглощает и переизлучает в инфракрасном диапазоне. Относительная площадь под этими двумя горбами как раз и определяется степенью отражения света, то есть альбедо.

Посмотрим на две ближайшие к нам планеты – Меркурий и Венеру. На первый взгляд ситуация парадоксальная. Венера отражает почти 80% солнечного света и лишь около 20% поглощает, а Меркурий почти ничего не отражает, а всё поглощает. К тому же Венера дальше от Солнца, чем Меркурий; на единицу ее облачной поверхности падает в 3,4 раза меньше солнечного света. С учетом разницы в альбедо каждый квадратный метр твердой поверхности Меркурия получает почти в 16 раз больше солнечного тепла, чем такой же участок на Венере. И тем не менее на всей твердой поверхности Венеры адские условия – огромная температура (олово и свинец плавятся!), а Меркурий прохладнее! На полюсах там антарктический холод, а на экваторе средняя температура +67 °С. Конечно, днем поверхность Меркурия нагревается до 430 °С, а ночью остывает до -170 °С. Но уже на глубине 1,5–2 метров суточные колебания сглаживаются, и мы можем говорить о средней температуре поверхности +67 °С. Жарковато, конечно, но жить можно. А в средних широтах Меркурия вообще комнатная температура.

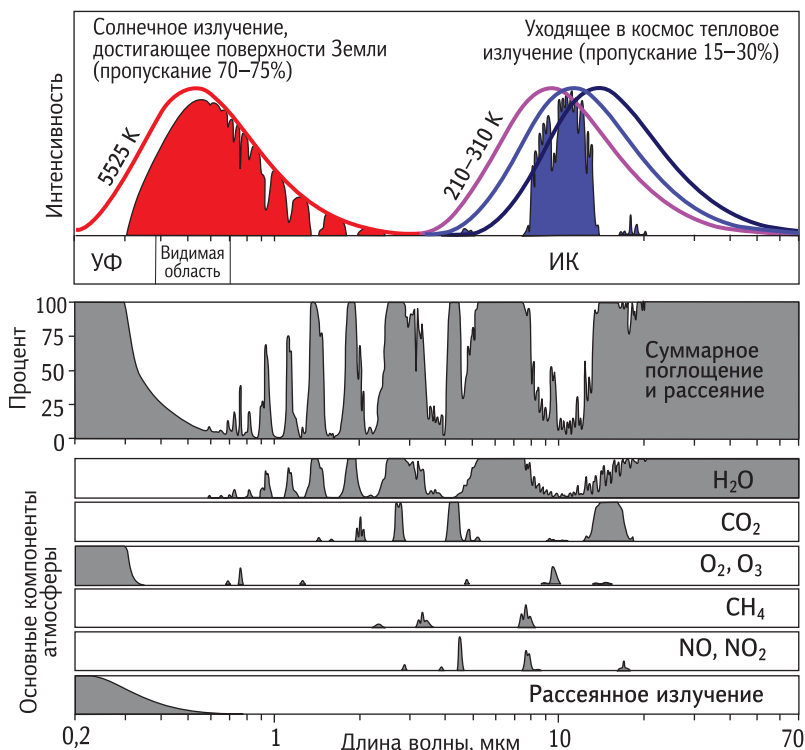


Рис. 4.8. Спектры отраженного атмосферой и поглощенного земной поверхностью солнечного излучения и вклад отдельных компонентов атмосферы в поглощение.

В чем же дело? Почему близкий к Солнцу и охотно поглощающий его лучи Меркурий нагрет до комнатной температуры, а Венера, более далекая от Солнца и активно отражающая его лучи, раскалена как печь? Как объяснит это физика?

Атмосфера Земли почти прозрачна: она пропускает 80% приходящего солнечного света. «Убежать» в космос в результате конвекции воздух не может — планета не отпускает его. Значит, охлаждаться она может только в виде инфракрасного излучения. А если ИК-излучение остается запертым, то оно нагревает те слои атмосферы, которые его не выпускают. Эти слои сами становятся источником тепла и частично направляют его обратно к поверхности. Некоторая часть излучения уходит в космос, но основная его часть возвращается к поверхности Земли и греет ее до тех пор, пока не установится термодинамическое равновесие. А как оно устанавливается?

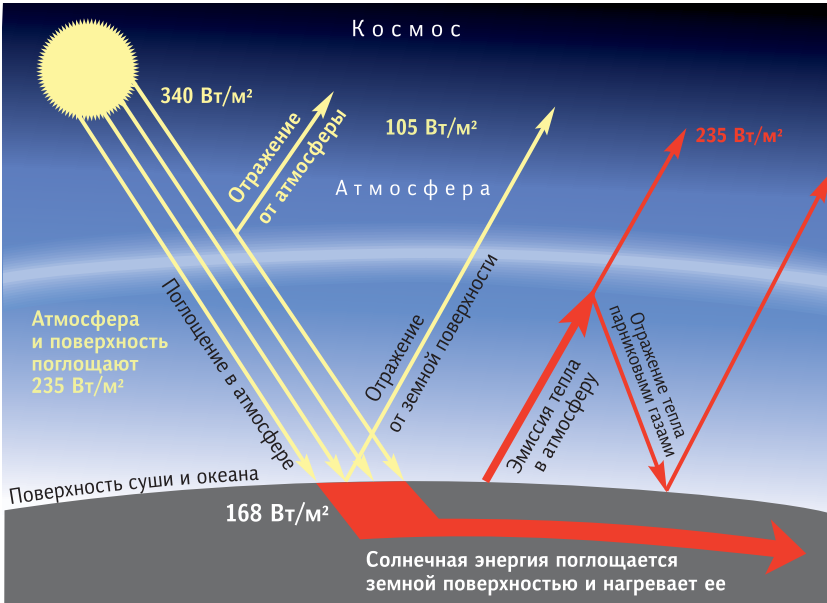


Рис. 4.9. Поток тепла у Земли. Указаны средние потоки лучистого тепла на единицу поверхности.

Температура растет, и максимум в спектре смещается (закон Вина) до тех пор, пока не найдет в атмосфере «окно прозрачности», сквозь которое ИК-лучи уйдут в космос. Баланс тепловых потоков устанавливается, но при более высокой температуре, чем могло бы быть при отсутствии атмосферы. Это и есть парниковый эффект.

В своей жизни мы довольно часто сталкиваемся с парниковым эффектом. И не только в виде садового парника или толстой шубы,

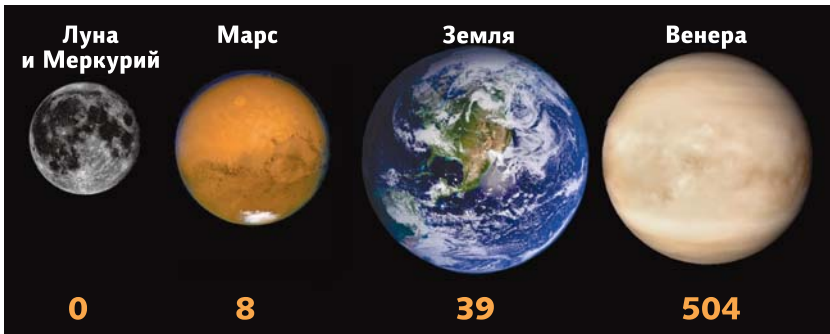


Рис. 4.10. Влияние парникового эффекта (ΔT , К) на среднюю температуру поверхности планет.

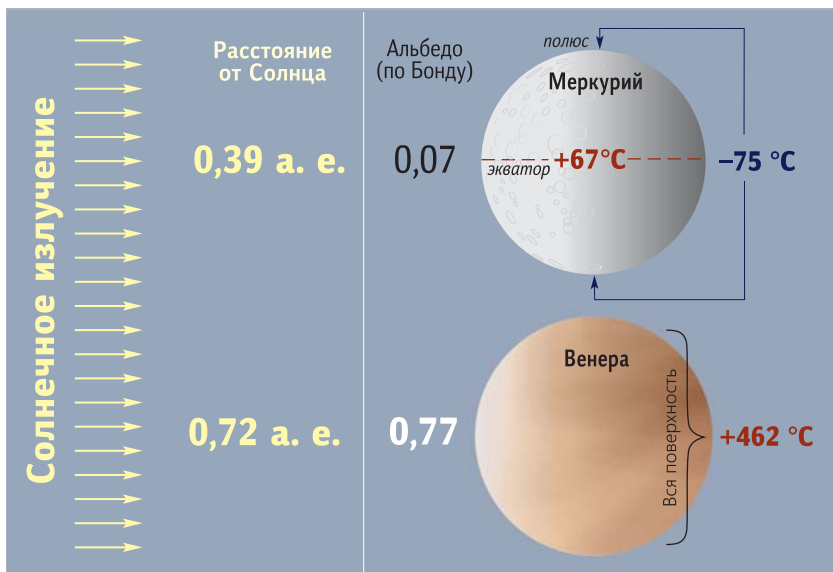


Рис. 4.11. Несмотря на относительную удаленность от Солнца и высокое альbedo, температура поверхности Венеры в результате парникового эффекта значительно выше средней температуры поверхности Меркурия.

которую надевают в морозный день, чтобы согреться (хотя сама шуба не выделяет, а лишь удерживает тепло). Как раз эти примеры не демонстрируют чистый парниковый эффект, поскольку в них уменьшается как лучистый, так и конвективный отвод тепла. Гораздо ближе к описанному эффекту пример ясной морозной ночи. При сухом воздухе и безоблачном небе (например, в пустыне) после захода солнца земля быстро остывает, а влажный воздух и облака сглаживают суточные колебания температуры. К сожалению, этот эффект хорошо знаком астрономам: ясные звездные ночи бывают особенно холодными, что делает работу у телескопа весьма некомфортной. Вернувшись к рис. 4.8, мы увидим причину: именно пары воды в атмосфере служат главным препятствием для уносящего тепло ИК-излучения.

У Луны нет атмосферы, а значит, нет и парникового эффекта. На ее поверхности термодинамическое равновесие устанавливается в явном виде, никакого обмена излучением между атмосферой и твердой поверхностью нет. У Марса разреженная атмосфера, но все-таки ее парниковый эффект добавляет свои 8 °C. А Земле он добавляет почти 40 °C. Если бы у нашей планеты не было такой плот-

ной атмосферы, температура Земли была бы на 40° ниже. Сегодня она составляет по всему земному шару в среднем +15 °С, а было бы –25 °С. Все океаны замерзли бы, поверхность Земли от снега стала бы белой, альbedo повысилось, и температура упала бы еще ниже. В общем – страшное дело! Хорошо, что парниковый эффект в нашей атмосфере работает и греет нас. И еще гораздо сильнее он работает на Венере – более чем на 500 °С поднимает среднюю венерианскую температуру.

Поверхность планет

До сих пор мы не приступали к детальному изучению иных планет, в основном ограничиваясь наблюдением их поверхности. А насколько важна для науки информация о внешнем виде планеты? Что ценного может поведать нам изображение ее поверхности? Если это газовая планета, как Сатурн или Юпитер, или же твердая, но покрытая плотным слоем облаков, как Венера, то мы видим лишь верхний облачный слой и, следовательно, почти никакой информации о самой планете не имеем. Облачная атмосфера, как говорят геологи, – это супермолодая поверхность: сегодня она такая, а завтра будет иной (или не завтра, а через 1000 лет, что лишь миг в жизни планеты).

Большое Красное Пятно на Юпитере или два планетарных циклона на Венере наблюдаются уже 300 лет, но говорят нам лишь о некоторых общих свойствах современной динамики их атмосфер. Наши потомки, глядя на эти планеты, будут видеть совсем иную картину, а какую картину могли видеть наши предки, мы никогда не узнаем. Таким образом, глядя со стороны на планеты с плотной атмосферой, мы не можем судить об их прошлом, поскольку видим лишь изменчивый облачный слой. Совсем другое дело – Луна или Меркурий, поверхности которых хранят следы метеоритных бомбардировок и геологических процессов, происходивших в течение последних миллиардов лет.

А подобные бомбардировки планет-гигантов практически не оставляют следов. Одно из таких событий произошло в конце XX века прямо на глазах астрономов. Речь идет о комете Шумейкеров–Леви-9. В 1993 г. недалеко от **Юпитера** была замечена странная цепочка из двух десятков небольших комет. Расчет показал, что это фрагменты одной кометы, пролетавшей рядом с Юпитером в 1992 г. и разорванной на части приливным эффектом его мощного гравитационного поля. Сам эпизод распада кометы астрономы не видели, а за-



Рис. 4.12. Фрагменты кометы Шумейкерв—Леви-9 (май 1994 г.). Фото космического телескопа «Хаббл» (NASA).

стали лишь тот момент, когда цепочка кометных осколков «паровозиком» удалялась от Юпитера. Если бы не произошло распада, то комета, подлетев к Юпитеру по гиперболической траектории, по второй ветви гиперболы ушла бы вдаль и, скорее всего, больше никогда не сблизилась бы с Юпитером. Но тело кометы не выдержало приливного напряжения и разрушилось, а затрата энергии на деформацию и разрыв тела кометы уменьшила кинетическую энергию ее орбитального движения, переведя осколки с гиперболической орбиты на эллиптическую, замкнутую вокруг Юпитера. Расстояние орбиты в перигеуме оказалось меньше радиуса Юпитера, и в 1994 г. осколки врезались в планету один за другим.

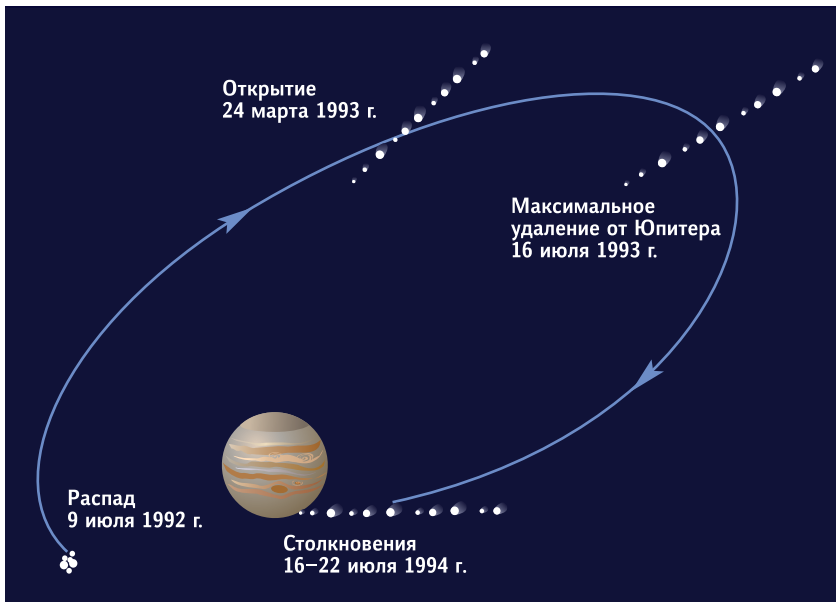
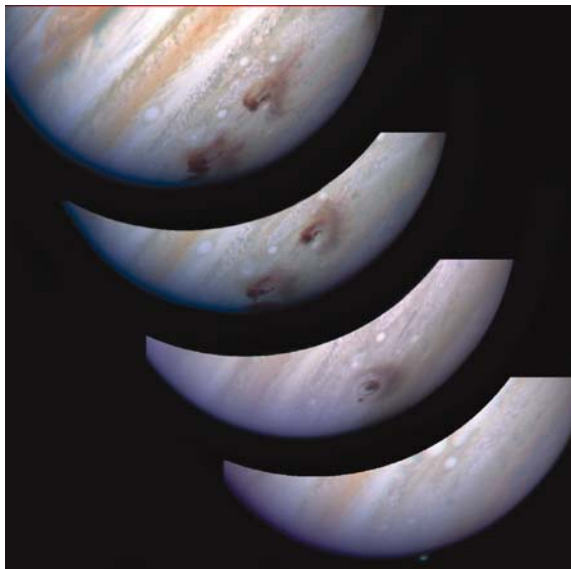


Рис. 4.13. Траектория кометы Шумейкерв—Леви-9

Рис. 4.14. Следы на поверхности атмосферы Юпитера от столкновения с кометой были заметны в течение нескольких месяцев. Наблюдение за последствиями этого редкого космического события вели многие наземные и космические исследовательские станции. Серия снимков сделана космическим телескопом «Хаббл» (последовательность кадров — справа налево).



Происшествие было грандиозное. Каждый «осколочек» кометно-го ядра — это ледяная глыба размером $1 \div 1,5$ км. Они по очереди влетали в атмосферу гигантской планеты со скоростью 60 км/с (вторая космическая скорость для Юпитера), обладая удельной кинетической энергией, в $(60/11)^2 \approx 30$ раз большей, чем если бы это было столкновение с Землей. Астрономы с большим интересом, находясь в безопасности на Земле, наблюдали космическую катастрофу на Юпитере. К сожалению, осколки кометы били в Юпитер с той стороны, которую не было в этот момент видно с Земли. К счастью, как раз в это время на пути к Юпитеру был космический зонд «Галилео», он увидел эти эпизоды и показал их нам. За счет быстрого суточного вращения Юпитера области столкновения через несколько часов становились доступны и наземным телескопам, и, что особенно ценно, околосемным, таким как космический телескоп «Хаббл». Это было очень полезно, поскольку каждая глыба, врезааясь в атмосферу Юпитера, вызывала колоссальный взрыв, разрушающий верхний облачный слой и создающий на некоторое время окно видимости вглубь юпитерианской атмосферы. Так благодаря кометной бомбардировке мы ненадолго смогли туда заглянуть. Но прошло два месяца — и никаких следов на облачной поверхности не осталось: облака затянули все окна, как будто ничего не произошло.



Рис. 4.15. Аризонский метеоритный кратер. Фото: Stephen Alvarez.

Иное дело — **Земля**. На нашей планете метеоритные шрамы остаются надолго. Перед вами самый популярный метеоритный кратер диаметром около 1 км и возрастом около 50 тыс. лет (рис. 4.15). Он все еще хорошо виден. Но кратеры, образовавшиеся более 200 млн лет назад, можно найти лишь с помощью тонких геологических методов. Сверху их не видно.

Кстати, есть довольно надежное соотношение между размером упавшего на Землю крупного метеорита и диаметром образованного им кратера — 1:20. Кратер километровой диаметра в Аризоне образовался от удара маленького астероида диаметром около 50 м. А в далекие времена по Земле ударяли и более крупные «снаряды» — и километровые, и даже десятикилометровые. Мы знаем сегодня около 200 крупных кратеров; их называют *астроблемами* («небесными ранами») и каждый год обнаруживают несколько новых. На территории России крупнейший кратер — Попигай в Якутии, диаметром 100 км. Известны и более крупные астроблемы, например южноафриканский кратер Вредефорт диаметром около 300 км и возрастом около 2 млрд лет или еще не изученный кратер Земли Уилкса под ледяным щитом Антарктиды, диаметр которого оценивается в 500 км. Он выявлен по данным радиолокации и гравиметрических измерений.

На поверхности **Луны**, где нет ни ветра, ни дождя, где отсутствуют тектонические процессы, метеоритные кратеры сохраняются миллиарды лет. Глядя на Луну в телескоп, мы читаем историю космической бомбардировки. На обратной стороне — еще более полезная для науки картина. Похоже, что туда по какой-то причине никогда не падало особенно крупных тел либо, падая, они не могли пробить лунную кору, которая на обратной стороне вдвое толще, чем на видимой. Поэтому вытекавшая лава не заполняла крупные кратеры и не скрывала исторические детали. На любом клочке лунной поверхности есть метеоритный кратер, большой или маленький, и их так много, что более молодые разрушают те, что образовались раньше. Произошло насыщение: Луна уже не может стать более кратерированной, чем она есть; везде кратеры. И это замечательная летопись истории Солнечной системы: по ней выделено несколько эпизодов активного кратерообразования, в том числе эпоха тяжелой метеоритной бомбардировки (4,1÷3,8 млрд лет назад), оставившая следы на поверхности всех планет земного типа и многих спутников. Почему потоки метеоритов обрушивались на планеты в ту эпоху, нам еще предстоит понять. Нужны новые данные о строении лун-



Рис. 4.16. Температура на Меркурии. Данные зонда «Мессенджер» (NASA), 2008 г.

ных недр и составе вещества на разной глубине, а не только на поверхности, с которой до сих пор были собраны образцы.

Меркурий внешне похож на Луну, поскольку, как и она, лишен атмосферы. Его каменная поверхность, не подверженная газовой и водной эрозии, длительное время сохраняет следы метеоритной бомбардировки. Среди планет земного типа Меркурий хранит самые старые геологические следы возрастом около 4 млрд лет. Но на поверхности Меркурия нет крупных морей, заполненных темной застывшей лавой и похожих на лунные моря, хотя крупных ударных кратеров там не меньше, чем на Луне.

Размером Меркурий примерно в полтора раза больше Луны, но своей массой он превосходит Луну в 4,5 раза. Дело в том, что Луна — почти целиком каменное тело, тогда как у Меркурия имеется огромное металлическое ядро, состоящее, по-видимому, в основном из железа и никеля. Радиус ядра составляет около 75% радиуса планеты (у Земли — лишь 55%), объем — 45% объема планеты (у Земли — 17%). Поэтому средняя плотность Меркурия ($5,4 \text{ г/см}^3$) почти равна средней плотности Земли ($5,5 \text{ г/см}^3$) и существенно превосходит среднюю плотность Луны ($3,3 \text{ г/см}^3$). Имея большое металлическое ядро, Меркурий мог бы своей средней плотностью превосходить Землю, если бы не малая сила тяжести на его поверхности. Имея массу всего 5,5% земной, он обладает почти втрое меньшей силой тяжести, которая не в состоянии так уплотнить его недра, как уплотнились недра Земли, у которой даже силикатная мантия имеет плотность около 5 г/см^3 .

Меркурий трудно исследовать, поскольку он движется близко к Солнцу. Чтобы запустить к нему межпланетный аппарат с Земли, его нужно сильно затормозить, т. е. разогнать в направлении, противоположном орбитальному движению Земли: только тогда он начнет «падать» в сторону Солнца. Сделать это сразу с помощью ракеты невозможно. Поэтому в двух до сих пор осуществленных полетах к Меркурию были использованы гравитационные маневры в поле Земли, Венеры и самого Меркурия для торможения космического зонда и перевода его на орбиту Меркурия.

Впервые к Меркурию отправился в 1973 г. «Маринер-10» (NASA). Он сначала сблизился с Венерой, притормозил в ее гравитационном поле и затем трижды прошел вблизи Меркурия в 1974–1975 гг. Поскольку все три встречи происходили в одной и той же области орбиты планеты, а ее суточное вращение синхронизовано с орбиталь-

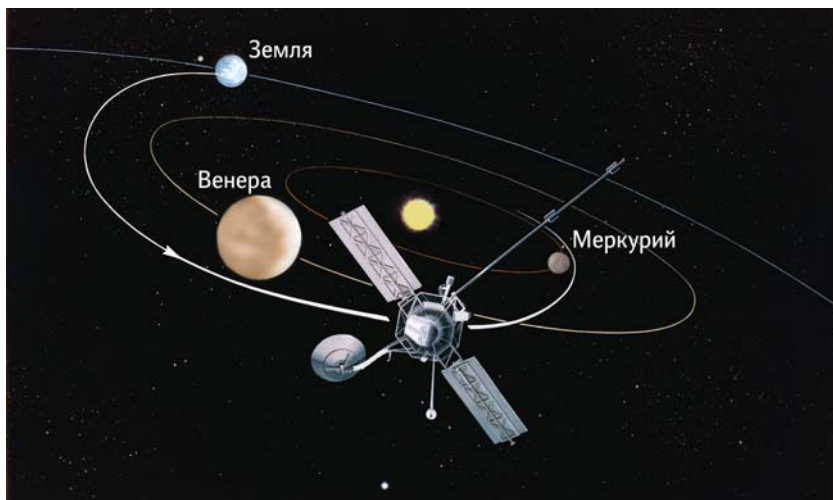


Рис. 4.17. Траектория полета зонда «Маринер-10» с гравитационным маневром около Венеры.

ным, все три раза зонд фотографировал одно и то же полушарие Меркурия, освещенное Солнцем.

В течение следующих нескольких десятилетий полетов к Меркурию не было. И только в 2004 г. удалось запустить второй аппарат – MESSENGER (Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry, and Ranging; NASA). Осуществив несколько гравитационных маневров вблизи Земли, Венеры (дважды) и Меркурия (трижды), зонд в 2011 г. вышел на орбиту вокруг Меркурия и 4 года вел исследования планеты.

Работа вблизи Меркурия осложняется тем, что планета в среднем в 2,6 раза ближе к Солнцу, чем Земля, поэтому поток солнечных лучей там почти в 7 раз больше. Без специального «солнечного зонтика» электронная начинка зонда перегрелась бы. Сейчас готовится третья экспедиция к Меркурию под названием BepiColombo, в ней участвуют европейцы и японцы. **Запуск намечен на осень 2018 г.** Полетят сразу два зонда, которые выйдут на орбиту вокруг Меркурия в конце 2025 г. после пролета вблизи Земли, двух пролетов вблизи Венеры и шести вблизи Меркурия. Кроме детального исследования поверхности планеты и ее гравитационного поля, намечено подробное изучение магнитосферы и магнитного поля Меркурия, представляющего для ученых загадку. Хотя Меркурий вращается очень медленно, а его металлическое ядро должно было давно остыть и затвер-



Рис. 4.18. Зонд «Мессенджер» во время одного из наземных испытаний.

деть, планета имеет дипольное магнитное поле, уступающее земному по напряженности в 100 раз, но все же поддерживающее вокруг планеты магнитосферу. Современная теория генерации магнитного поля у небесных тел, так называемая теория турбулентного динамо, требует наличия в недрах планеты слоя жидкого проводника электричества (у Земли это внешняя часть железного ядра) и сравнительно быстрого вращения. По какой причине ядро Меркурия до сих пор остается жидким, пока не ясно.

У Меркурия есть удивительная особенность, которой нет больше ни у одной планеты. Движение Меркурия по орбите вокруг Солнца и его вращение вокруг своей оси четко синхронизованы друг с другом: за время двух орбитальных периодов он совершает три оборота вокруг оси. Вообще говоря, с синхронным движением астрономы были знакомы давно: наша Луна синхронно вращается вокруг оси и обращается вокруг Земли, периоды этих двух движений одинаковы, т. е. они находятся в соотношении 1:1. И у других планет некоторые спутники демонстрируют ту же особенность. Это результат действия приливного эффекта.

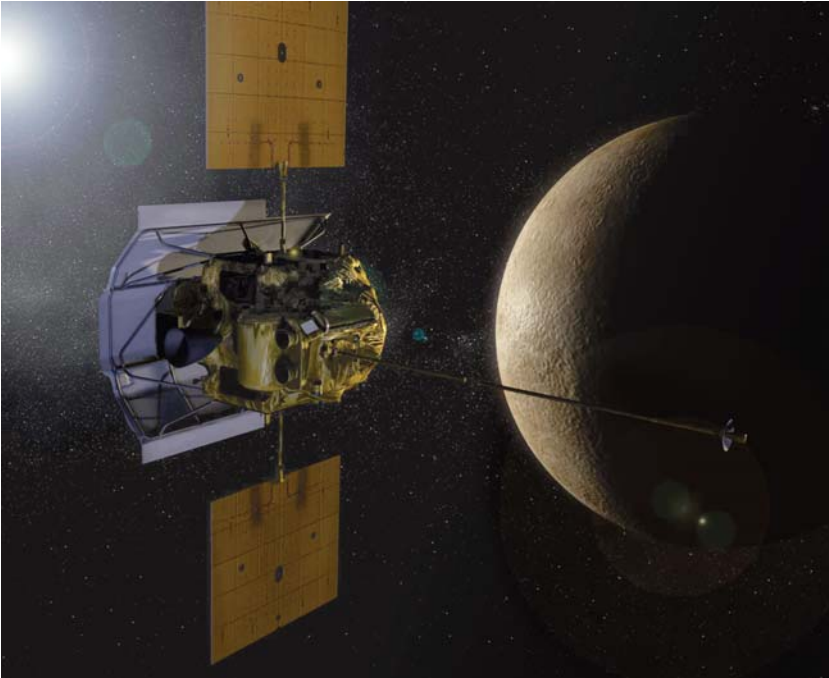


Рис. 4.19. Зонд «Messenger» на орбите вокруг Меркурия. Рисунок: NASA.

Чтобы проследить за движением Меркурия, поставим на его поверхности стрелочку (рис. 4.20). Видно, что за один оборот вокруг Солнца, т. е. за один меркурианский год, планета повернулась вокруг оси ровно полтора раза. За это время день в районе стрелки сменился ночью, прошла половина солнечных суток. Еще один годичный оборот — и в районе стрелки вновь наступает день, истекли одни солнечные сутки. Таким образом, на Меркурии солнечные сутки делятся два меркурианских года.

Подробно говорить о приливах мы будем в главе 6. Именно в результате приливного влияния со стороны Земли Луна синхронизовала два своих движения — осевое вращение и орбитальное обращение. Земля очень сильно влияет на Луну: вытянула ее фигуру, стабилизировала вра-

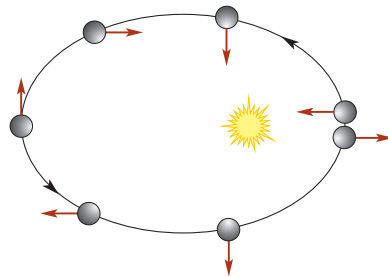


Рис. 4.20. Схема орбитального и суточного движений Меркурия.

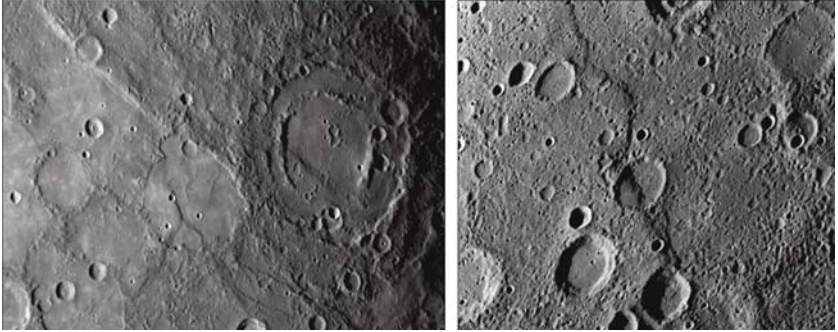


Рис. 4.21. Участки поверхности Меркурия, на которых видны уступы. Эти «морщины» возникли от взаимного надвигания слоев коры планеты при остывании и сжатии ее недр. Фото: NASA.

шение. Поскольку орбита Луны близка к круговой, Луна движется по ней с почти постоянной скоростью на почти постоянном расстоянии от Земли (степень этого «почти» мы обсуждали в главе 1). Поэтому приливный эффект меняется слабо и контролирует вращение Луны вдоль всей орбиты, приводя к резонансу 1:1.

В отличие от Луны, Меркурий движется вокруг Солнца по существенно эллиптической орбите, то приближаясь к светилу, то удаляясь от него. Когда он далеко, в районе афелия орбиты, приливное влияние Солнца ослабевает, поскольку оно зависит от расстояния как $1/R^3$. Когда Меркурий приближается к Солнцу, приливы действуют намного сильнее, поэтому лишь в области перигелия Меркурий эффективно синхронизует два своих движения – суточное и орбитальное. Второй закон Кеплера гласит, что угловая скорость орбитального движения максимальна в точке перигелия. Именно там происходят «приливный захват» и синхронизация угловых скоростей Меркурия – суточной и орбитальной. В точке перигелия они в точности равны друг другу. Двигаясь дальше, Меркурий почти перестает ощущать приливное влияние Солнца и сохраняет свою угловую скорость вращения, постепенно снижая угловую скорость орбитального движения. Поэтому за один орбитальный период он успевает сделать полтора суточных оборота и вновь попадает «в лапы» приливного эффекта. Очень простая и красивая физика.

Поверхность Меркурия почти неотличима от лунной. Даже профессиональные астрономы, когда появились первые детальные снимки Меркурия, показывали их друг другу и спрашивали: «А ну-ка угадай, Луна это или Меркурий?». Угадать действительно трудно:

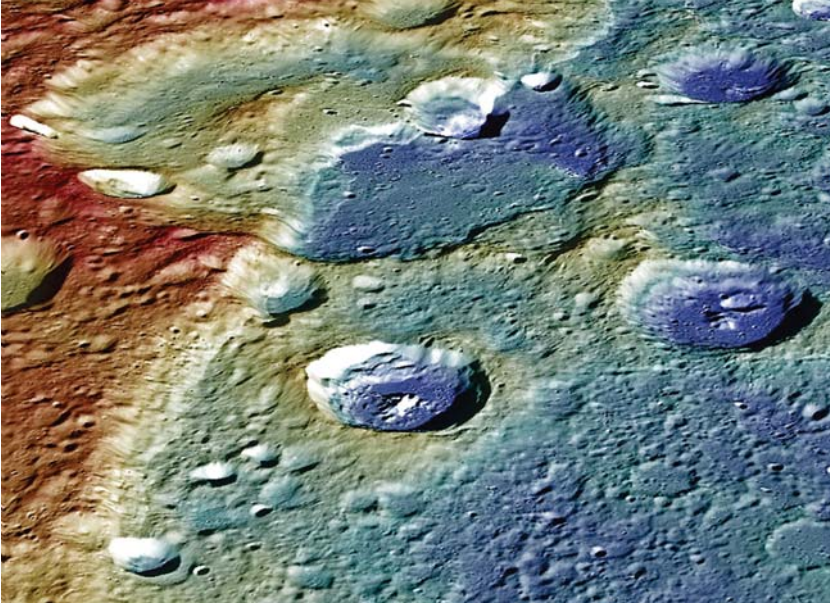


Рис. 4.22. Рельеф Меркурия. Цвета условные (показывают высоту элементов рельефа).

и там и там избитая метеоритами поверхность. Но особенности, конечно, есть. Хотя крупные лавовые моря на Меркурии отсутствуют, его поверхность неоднородна: есть области более старые и более молодые (основанием для этого служит подсчет метеоритных кратеров). От Луны Меркурий отличается и наличием характерных уступов и складок на поверхности, возникших в результате сжатия планеты при остывании ее огромного металлического ядра.

Перепады температуры на поверхности Меркурия больше, чем на Луне: в дневные часы на экваторе $+430^{\circ}\text{C}$, а ночью -173°C . Но грунт Меркурия служит хорошим теплоизолятором, поэтому на глубине около 1 м суточные (или двухгодичные?) перепады температуры уже не чувствуются. Так что если вы прилетите на Меркурий, то первое, что нужно сделать, – вырыть землянку. В ней на экваторе будет около $+70^{\circ}\text{C}$: жарковато. Но в районе географических полюсов в землянке будет около -70°C . Так что без труда можно найти географическую широту, на которой в землянке окажется комфортно.

Самые низкие температуры наблюдаются на дне полярных кратеров, куда никогда не попадают солнечные лучи. Именно там обнаружились залежи водяного льда, которые прежде были «нащупаны» радиолокаторами с Земли, а затем подтверждены приборами косми-

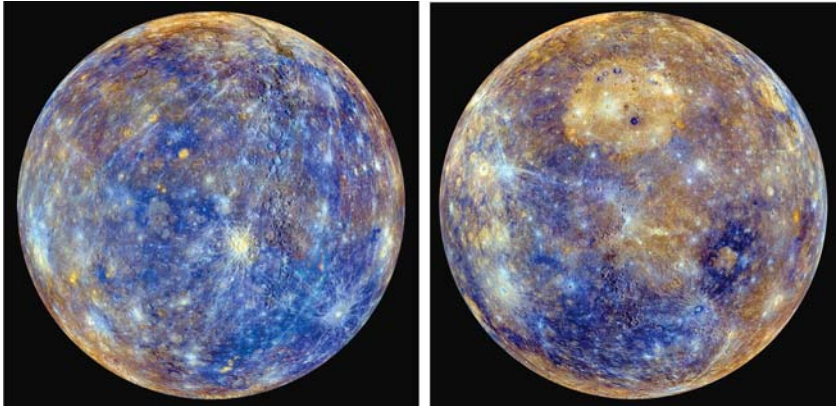


Рис. 4.23. Меркурий при повышенном цветовом контрасте. Хотя поверхность планеты выглядит темно-серой, в действительности она имеет цветовые оттенки.

ческого зонда MESSENGER. Происхождение этого льда пока обсуждается. Его источниками могут быть как кометы, так и выходящие из недр планеты пары воды.

Цвет у Меркурия есть, хотя на глаз он выглядит темно-серым. Но если повысить цветовой контраст (как на рис. 4.23), то планета приобретает красивый и таинственный вид.

На Меркурии есть один из самых больших ударных кратеров в Солнечной системе – Равнина Жары (Caloris Basin) диаметром 1550 км. Это след от удара астероида диаметром не менее 100 км, чуть не расколовшего маленькую планету. Случилось это около 3,8 млрд лет назад, в период так называемой «поздней тяжелой бомбардировки» (Late Heavy Bombardment), когда по не до конца понятным причинам увеличилось число астероидов и комет на орбитах, пересекающих орбиты планет земной группы.

Когда в 1974 г. «Маринер-10» сфотографировал Равнину Жары, мы еще не знали, что получилось на противоположной стороне Меркурия после этого страшного удара. Ясно, что если по шару стукнули, то возбуждаются звуковые и поверхностные волны, которые распространяются симметрично, проходят через «экватор» и собираются в антиподной точке, диаметрально противоположной точке удара. Возмущение там стягивается в точку, и амплитуда сейсмических колебаний стремительно возрастает. Это похоже на то, как погонщики скота щелкают своим кнутом: энергия и импульс волны практически сохраняются, а толщина кнута стремится к нулю, по-

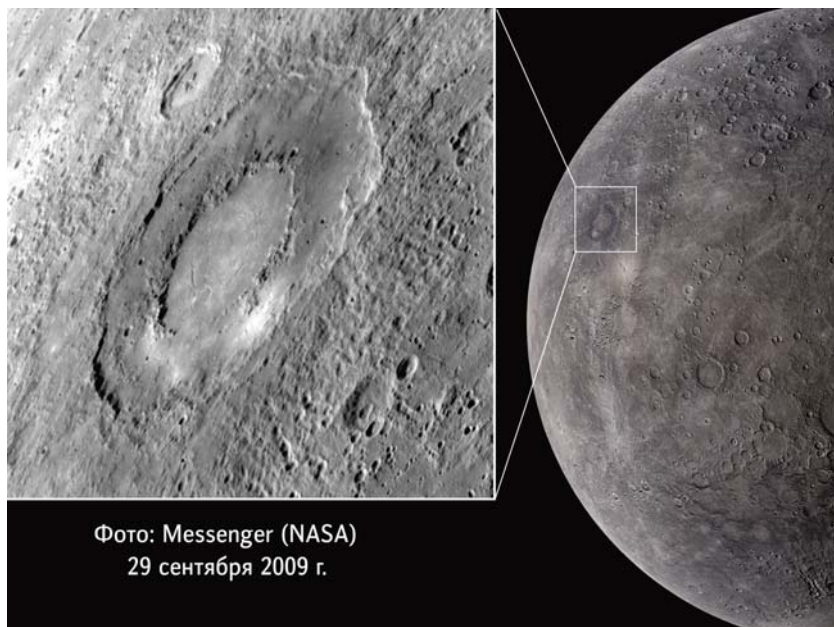


Рис. 4.24. Кратер Рахманинов на Меркурии.

этому скорость колебания увеличивается и становится сверхзвуковой. Ожидалось, что в области Меркурия, противоположной бассейну Caloris, будет картина невероятного разрушения. В общем, почти так и оказалось: там обнаружилась обширная холмистая область с рифленой поверхностью, хотя я ожидал, что там будет кратер-антипод. Мне представлялось, что при схлопывании сейсмической волны произойдет явление, «зеркальное» падению астероида. Мы наблюдаем это при падении капли на спокойную поверхность воды: сначала она создает маленькое углубление, а затем вода устремляется обратно и выкидывает небольшую новую каплю вверх. На Меркурии этого не случилось, и мы теперь понимаем почему: его недра оказались неоднородными, и точной фокусировки волн не произошло.

В целом рельеф Меркурия более гладкий, чем у Луны. Например, стенки меркурианских кратеров не такие высокие. Основная причина этого, вероятно, в большей силе тяжести и более теплых и мягких недрах Меркурия. К тому же на Меркурии более интенсивной должна быть метеоритная эрозия, поскольку пространственная плотность и скорость движения метеороидов в окрестности Меркурия существенно выше, чем вблизи Луны. В результате ударного испарения меж-



Рис. 4.25. Облачный покров атмосферы Венеры. Основой для этого синтетического изображения стали снимки «Маринера-10» (NASA), полученные в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Оптический дал распределение цвета, а ультрафиолетовый позволил повысить контраст и более четко выделить детали. Обработка: *Mattias Malmer*.

планетных пылинок и более крупных метеороидных частиц, непрерывно падающих на поверхность Меркурия, его крайне разреженная экзосфера постоянно пополняется газами и парами металлов.

Венера — вторая планета от Солнца и самая загадочная из планет земной группы. Неясно, каково происхождение ее очень плотной атмосферы, почти целиком состоящей из углекислого газа (96,5%) и азота (3,5%) и обеспечивающей мощный парниковый эффект. Непонятно, почему Венера так медленно вращается вокруг оси — в 244 раза медленнее Земли, и к тому же в противоположном направлении. При этом массивная атмосфера Венеры, а точнее ее облачный слой, за четверо земных суток облетает вокруг планеты. Это явление называют *суперротацией* атмосферы. При этом атмосфера трется о поверхность планеты и давно должна была бы притормозиться, ведь не может она долго двигаться вокруг планеты, твердое тело которой практически стоит на месте. Но атмосфера вращается, да еще и в направлении, противоположном вращению самой планеты. Понятно, что от трения о поверхность энергия атмосферы рассеивается, а ее момент импульса передается телу планеты. Значит, есть приток энергии (очевидно — солнечной), за счет которой работает тепловая машина. Вопрос: как реализована эта машина? Как энергия Солнца трансформируется в движение венерианской атмосферы?

Из-за медленного вращения Венеры кориолисовы силы на ней слабее, чем на Земле, поэтому атмосферные циклоны там менее ком-

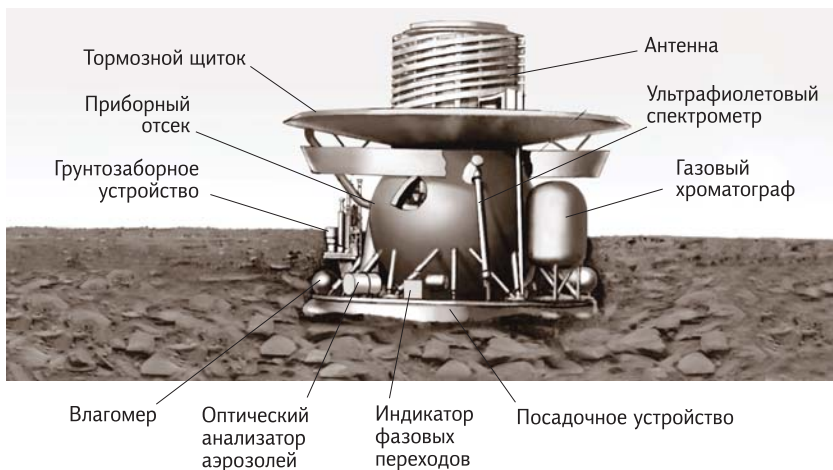


Рис. 4.26. Спускаемый аппарат серии «Венера»

пактны. По сути, их всего два: один в северном полушарии, другой в южном. Каждый из них «наматывается» от экватора на свой полюс.

Верхние слои венерианской атмосферы детально исследовали пролетные (в процессе гравитационного маневра) и орбитальные зонды — американские, советские, европейский и японский. Аппараты серии «Венера» в течение нескольких десятилетий запускали туда советские инженеры, и это был самый успешный наш прорыв в области исследования планет. Главной задачей было посадить на поверхность спускаемый аппарат, чтобы посмотреть, что там под облаками.

Конструкторы первых зондов, как и авторы научно-фантастических произведений тех лет, ориентировались на результаты оптических и радиоастрономических наблюдений, из которых следовало, что Венера — это более теплый аналог нашей планеты. Именно поэтому в середине XX в. все фантасты — от Беляева, Казанцева и Стругацких до Лема, Брэдли и Хайнлайна — представляли Венеру как негостеприимный (жаркий, болотистый, с ядовитой атмосферой), но в целом подобный Земле мир. По этой же причине первые посадочные аппараты венерианских зондов делали не очень прочными, не способными сопротивляться большому давлению. И они гибли, спускаясь в атмосфере, один за другим. Затем их корпуса стали делать покрепче, с расчетом на давление в 20 атмосфер, но и этого оказалось мало. Тогда конструкторы, «закусив удила», создали титановый зонд, выдерживающий давление в 180 атм. И он благополучно сел на поверхность («Венера-7», 1970). Заметим, что далеко не каждая под-



Рис. 4.27. Снимки поверхности Венеры, сделанные аппаратом «Венера-14».

водная лодка выдерживает такое давление, царящее на глубине около 2 км в океане. Выяснилось, что у поверхности Венеры давление не опускается ниже 92 атм (9,3 МПа, 93 бар), а температура составляет 464 °С.

С мечтой о гостеприимной Венере, похожей на Землю каменноугольного периода, было окончательно покончено именно в 1970 г. Впервые аппарат, рассчитанный на такие адские условия («Венера-8»), успешно опустился и работал на поверхности в 1972 г. С этого момента посадки на поверхность Венеры стали рутинной операцией, однако долго поработать там не удастся: через 1–2 часа внутренность аппарата нагревается и электроника выходит из строя.

Первые искусственные спутники появились у Венеры в 1975 г. («Венера-9 и -10»). В целом чрезвычайно удачной оказалась работа на поверхности Венеры спускаемых аппаратов «Венера-9...-14» (1975–1981 гг.), изучивших как атмосферу, так и поверхность планеты в месте посадки, сумевших даже взять пробы грунта и определить его химический состав и механические свойства. Но наибольший эффект среди поклонников астрономии и космонавтики вызвали переданные ими фотопанорамы мест посадки, сначала черно-белые, а позже – цветные. Кстати, венерианское небо при взгляде с поверхности оранжевое. Красиво! До сих пор (2017 г.) эти снимки остаются единственными и вызывают у планетологов большой интерес. Их продолжают обрабатывать и время от времени находят на них новые детали.

Существенный вклад в изучение Венеры в те годы внесла и американская космонавтика. Пролетные аппараты «Маринер-5 и -10»

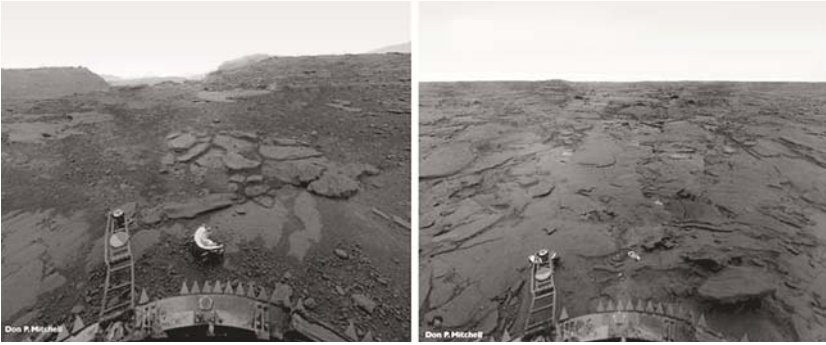


Рис. 4.28. Изображения, переданные «Венерой-13» 1 марта 1982 г. (слева) и «Венерой-14» 5 марта 1982 г. Спустя десятки лет удалось исправить искаженную перспективу и смягчить контраст. Но следует учесть, что эти изображения мозаичны: нижняя часть кадра взята из середины панорамы, а дальняя часть, где виден горизонт – с краев. Это работа Дона Митчелла (Don P. Mitchell), mentallandscape.com/V_Venus.htm.

изучали верхние слои атмосферы. «Пионер-Венера-1» (1978 г.) стал первым американским спутником Венеры и провел радиолокационные измерения. А «Пионер-Венера-2» (1978 г.) послал в атмосферу планеты 4 спускаемых аппарата: один большой (315 кг) с парашютом в экваториальную область дневного полушария и три малых (по 90 кг) без парашютов – в средние широты и на север дневного полушария, а также на ночное полушарие. Ни один из них не создавался для работы на поверхности, однако один из малых аппаратов благополучно приземлился (без парашюта!) и проработал на поверхности более часа. Этот случай позволяет почувствовать, насколько велика плотность атмосферы у поверхности Венеры. Атмосфера Венеры почти в 100 раз массивнее земной, а ее плотность у поверхности составляет 67 кг/м^3 , что в 55 раз плотнее земного воздуха и лишь в 15 раз уступает плотности жидкой воды.

Весьма непросто было создать прочные научные зонды, которые выдерживают давление венерианской атмосферы, такое же, как на километровой глубине в земных океанах. Но еще сложнее было заставить их противостоять окружающей температуре ($+464^\circ\text{C}$) при столь плотном воздухе. Поток тепла сквозь корпус колоссальный, поэтому даже самые надежные аппараты работали не более двух часов. Чтобы скорее опуститься на поверхность и продлить там работу, «Венеры» в ходе посадки сбрасывали парашют и продолжали спуск, тормозясь лишь небольшим щитком на своем корпусе. Удар о поверхность смягчало специальное демпфирующее устройство – посадочная опора.

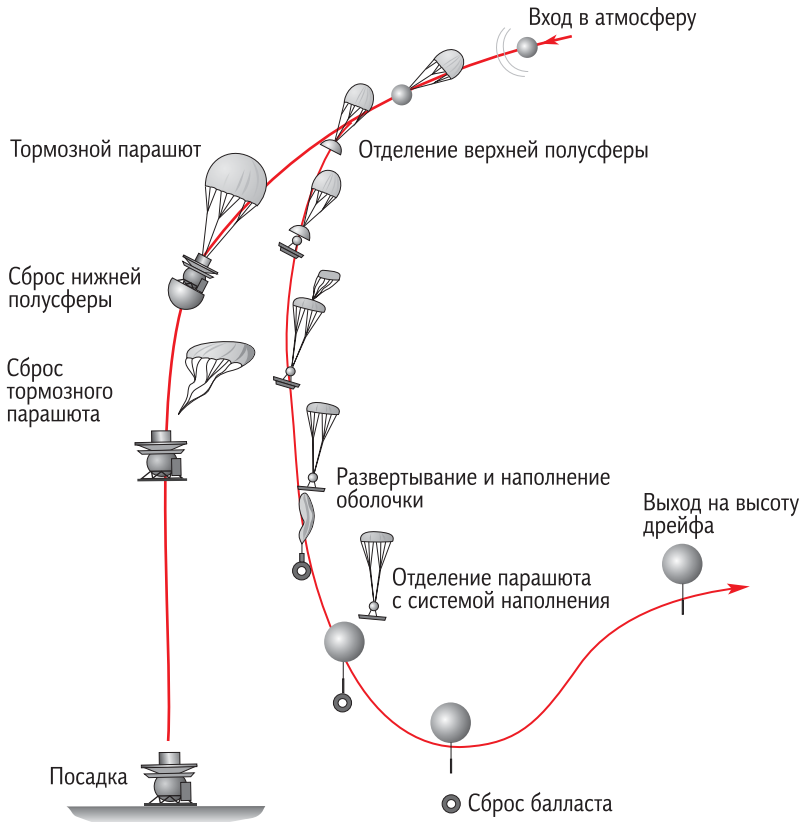


Рис. 4.29. Схема проекта «Вега».

Конструкция оказалась настолько удачной, что «Венера-9» без проблем села на склон с наклоном 35° и нормально работала.

Такие панорамы Венеры (рис. 4.27) публиковались сразу после их получения. Здесь можно заметить любопытное событие. Во время спуска каждую камеру защищала полиуретановая крышка, которая после посадки отстреливалась и падала вниз. На верхнем снимке эта белая полукруглая крышка видна у посадочной опоры. А где она на нижнем снимке? Лежит левее центра. Именно в нее, распрямляясь, вонзил свой пробник прибор для измерения механических свойств грунта. Измерив ее твердость, он подтвердил, что это полиуретан. Прибор, так сказать, был испытан в полевых условиях. Вероятность этого печального события была близка к нулю, но оно произошло!

Учитывая высокое альbedo Венеры и колоссальную плотность ее атмосферы, ученые сомневались, что у поверхности будет достаточно солнечного света для фотографирования. К тому же у дна газового океана Венеры вполне мог висеть плотный туман, рассеивающий солнечный свет и не позволяющий получить контрастное изображение. Поэтому на первых посадочных аппаратах ставили галогенные ртутные лампы для освещения почвы и создания светового контраста. Но оказалось, что естественного света там вполне достаточно: на Венере светло, как в пасмурный день на Земле. И контраст при естественном освещении тоже вполне приемлемый.



Рис. 4.30. Аэростат в атмосфере Венеры.
Рисунок: ESA.

В октябре 1975 г. посадочные аппараты «Венера-9 и -10» через свои орбитальные блоки передали на Землю первые в истории снимки поверхности другой планеты (если не брать в расчет Луну). На первый взгляд перспектива на этих панорамах выглядят странно искаженной: причиной служит поворот направления съемки. Эти снимки получены телефотометром (оптико-механическим сканером), «взгляд» которого медленно перемещался от горизонта под «ноги» посадочного аппарата и затем к другому горизонту: получалась развертка на 180°. Два телефотометра на противоположных бортах аппарата должны были дать полную панораму. Но крышки на объективах открывались не всегда. Например, на «Венере-11 и -12» не открылась ни одна из четырех.

Один из наиболее красивых экспериментов по исследованию Венеры был проделан с помощью зондов «ВеГа-1 и -2» (1985 г.). Их название расшифровывается как «Венера–Галлей», поскольку после отделения спускаемых аппаратов, направленных к поверхности Венеры, полетные части зондов ушли исследовать ядро кометы Галлея

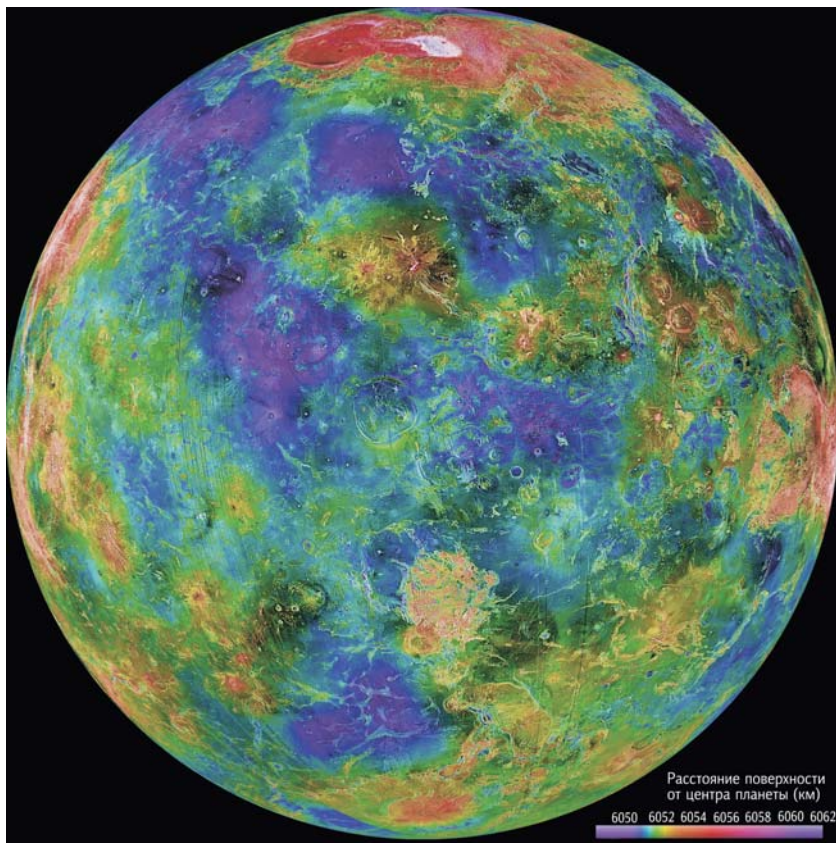
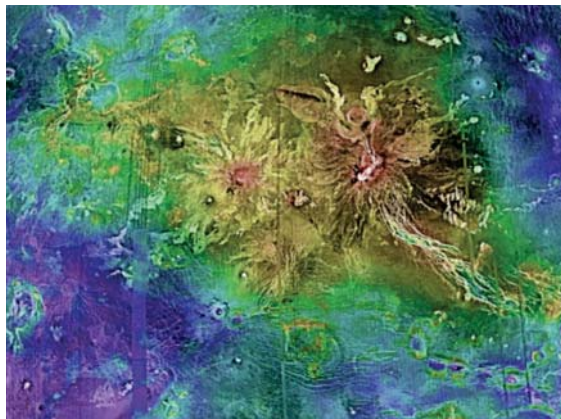


Рис. 4.31. Радиокарта Венеры («Магеллан», NASA). Голубым показаны низменности, зеленовато-желтым — средний уровень, красное и (особенно) белое — горы.

и впервые успешно это сделали. Посадочные аппараты были тоже не совсем обычными: главная часть аппарата садилась на поверхность, а при спуске от нее отделялся аэростат, изготовленный французскими инженерами, который около двух суток летал в атмосфере Венеры на высоте 53–55 км, передавая на Землю данные о температуре, давлении, освещенности и видимости в облаках. Благодаря мощному ветру, дующему на этой высоте со скоростью 250 км/ч, аэростаты успели облететь значительную часть планеты.

На фотографиях с мест посадки видны лишь небольшие участки венерианской поверхности. А можно ли увидеть всю Венеру сквозь облака? Можно! Радиолокатор видит сквозь облака. К Венере летали два советских спутника с радиолокаторами бокового обзора и один

Рис. 4.32. На этом участке радиокарты Венеры виден вулкан.



американский. По их наблюдениям составлены радиокарты Венеры с весьма высоким разрешением. На общей карте его трудно продемонстрировать, но на отдельных фрагментах карты оно ясно видно. Цветом на радиокартах показаны уровни: голубой и синий — это низменности; будь на Венере вода, это были бы океаны. Но жидкая вода на Венере существовать не может, да и газообразной воды там практически нет. Зеленоватые и желтоватые области — это континенты (назовем их так). Красное и белое — самые высокие точки на

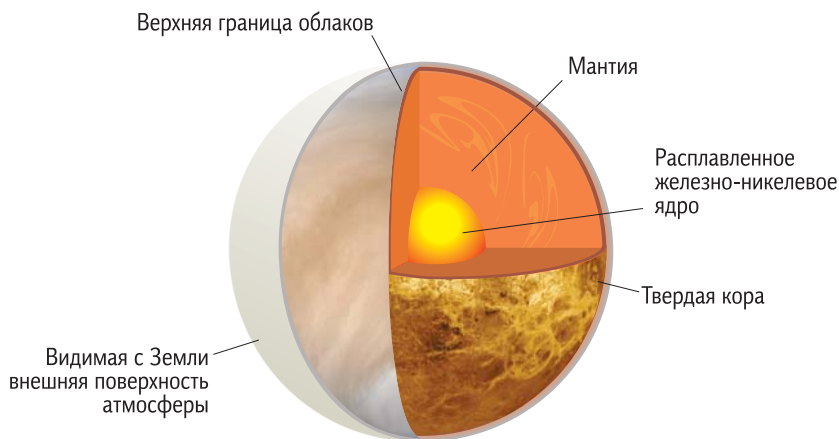


Рис. 4.33. Строение Венеры. Над поверхностью планеты простирается плотная облачная атмосфера, верхняя граница облаков проходит на высоте 65–70 км. Внешняя видимая с Земли «поверхность» атмосферы характеризуется наиболее резкими температурными колебаниями.

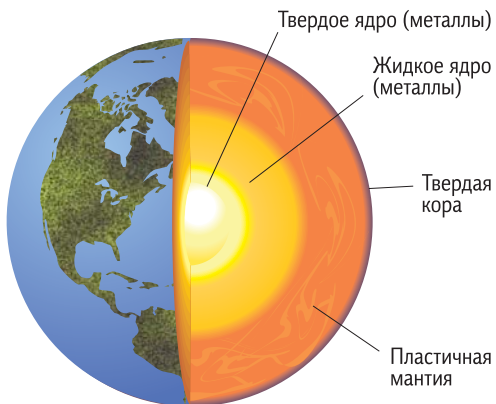


Рис. 4.34. Строение Земли. Конвективные потоки в расплавленном веществе мантии обеспечивают магнитное поле планеты.

Венере, это венерианский «Тибет» — самое высокое плато. Высочайшая вершина на нем — гора Максвелл — возвышается на 11 км.

Венера вулканически активна, активнее, чем сегодняшняя Земля. Это не совсем понятно. В Новосибирске работает известный геолог, академик Николай Леонтьевич Добрецов, у него имеется интересная теория по поводу эволюции Земли и Венеры (<https://scfh.ru/papers/venera-vozmozhnoe-budushchee-zemli/>).

О недрах Венеры, о ее внутреннем строении надежных фактов нет, поскольку сейсмические исследования там до сих пор не проводились. К тому же медленное вращение планеты не позволяет измерить ее момент инерции, который мог бы рассказать о распределении плотности с глубиной. Пока теоретические представления базируются на сходстве Венеры с Землей, а видимое отсутствие тектоники плит на Венере объясняется отсутствием на ней воды, которая на Земле служит «смазкой», позволяя плитам скользить и подныривать друг под друга. Вкупе с высокой температурой поверхности это приводит к замедлению или даже полному отсутствию конвекции в теле Венеры, снижает скорость охлаждения ее недр и может объяснить отсутствие у нее магнитного поля. Все это выглядит логично, но требует экспериментальной проверки.

Кстати, о **Земле**. Подробно обсуждать третью от Солнца планету не буду, поскольку я не геолог. К тому же каждый из нас имеет общее представление о Земле даже на основе школьных знаний. Но в связи с изучением других планет замечу, что и недра своей планеты нам понятны не до конца. Почти каждый год происходят крупные открытия в геологии, порой обнаруживают даже новые слои в недрах Земли, однако мы до сих пор точно не знаем температуру в ядре своей

планеты. Посмотрите свежие обзоры: некоторые авторы считают, что температура на границе внутреннего ядра около 5000 К, а другие — что более 6300 К. Это результаты теоретических расчетов, в которых фигурируют не вполне надежные параметры, описывающие свойства вещества при температуре в тысячи кельвинов и давлении в миллионы бар. Пока эти свойства не будут надежно изучены в лаборатории, точных знаний о недрах Земли мы не получим.

Уникальность Земли среди подобных ей планет состоит в наличии магнитного поля и жидкой воды на поверхности, причем второе, по-видимому, является следствием первого: магнитосфера Земли защищает от потоков солнечного ветра нашу атмосферу и, опосредованно, гидросферу. Для генерации магнитного поля, как сейчас представляется, в недрах планеты должны быть жидкий электропроводящий слой, охваченный конвективным движением, и быстрое суточное вращение, обеспечивающее кориолисову силу. Только при этих условиях включается динамо-механизм, усиливающий магнитное поле. Венера практически не вращается, поэтому у нее нет магнитного поля. Железное ядро у маленького Марса давно остыло и отвердело, поэтому он также лишен магнитного поля. Меркурий, казалось бы, очень медленно вращается и должен был остыть раньше Марса, но вполне ощутимое дипольное магнитное поле с напряженностью раз в 100 слабее земного у него есть. Парадокс! Ответственным за поддержание железного ядра Меркурия в расплавленном состоянии сейчас считается приливное влияние Солнца. Пройдут миллиарды лет, остынет и затвердеет железное ядро Земли, лишив нашу планету магнитной защиты от солнечного ветра. И единственной твердой планетой с магнитным полем останется, как это ни странно, Меркурий.

А теперь обратимся к **Марсу**. Его внешний вид сразу же привлекает нас по двум причинам: даже на фотографиях, полученных издали, видны белые полярные шапки и полупрозрачная атмосфера. Это роднит Марс с Землей: поляр-

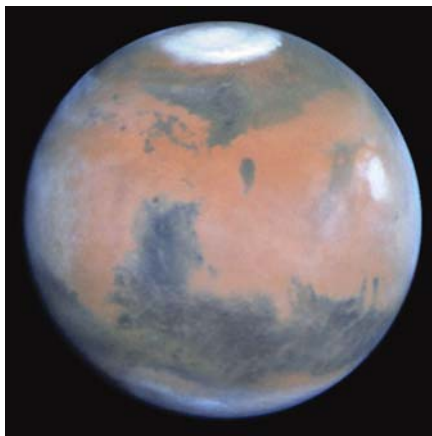


Рис. 4.35. Марс. Фото космического телескопа «Хаббл», февраль 1996 г.

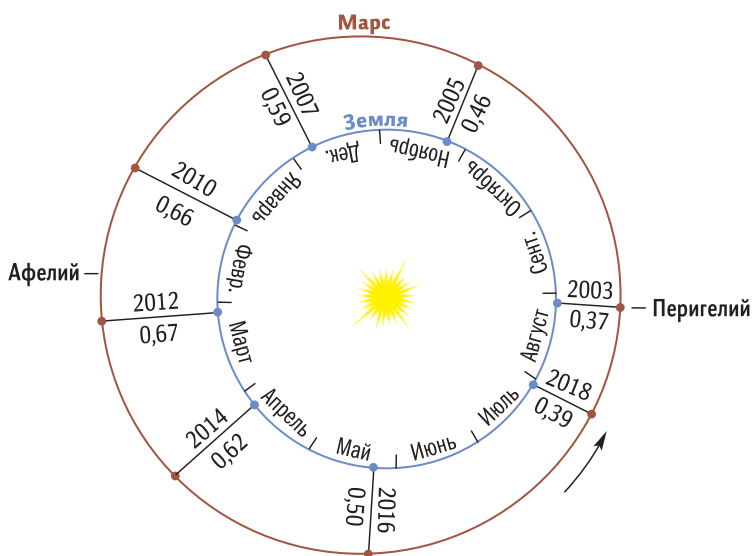


Рис. 4.36. Противостояния Марса.

ные шапки рождают мысль о наличии воды, а атмосфера — о возможности дыхания. И хотя на Марсе с водой и воздухом не всё так благополучно, как кажется на первый взгляд, эта планета давно привлекает исследователей.

Раньше астрономы изучали Марс в телескоп и поэтому с нетерпением ожидали моментов, называемых *противостояниями Марса*. Что же чему в эти моменты противостояит?

С точки зрения земного наблюдателя в момент противостояния Марс оказывается по одну сторону от Земли, а Солнце — по другую. Понятно, что именно в эти моменты Земля и Марс сближаются на минимальное расстояние, Марс виден на небе всю ночь и хорошо освещен Солнцем. Земля делает свой оборот вокруг Солнца за год, а Марс — за 1,88 года, поэтому средний промежуток времени между противостояниями занимает немногим более двух лет. Последнее противостояние Марса наблюдалось в 2016 г., правда, оно было не особенно близким. Орбита у Марса заметно эллиптическая, поэтому максимальные сближения с ним Земли случаются, когда Марс находится в районе перигелия своей орбиты. На Земле (в нашу эпоху) это конец августа. Поэтому августовские и сентябрьские противостояния называют «великими»; в эти моменты, наступающие раз в 15–17 лет, наши планеты сближаются менее чем на 60 млн км. Такое было в 2018 г.

А супертесное противостояние состоялось в 2003 г.: тогда до Марса было всего 55,8 млн км. В связи с этим родился новый термин — «величайшие противостояния Марса»: такими теперь считают сближения менее чем на 56 млн км. Они происходят 1–2 раза в столетие, однако в нынешнем веке их будет даже три — ждите 2050 и 2082 гг.

Но даже в моменты великих противостояний в телескоп с Земли на Марсе мало что видно. Вот (рис. 4.37) рисунок астронома, который смотрит на Марс в телескоп. Неподготовленный человек посмотрит и разочаруется — вообще ничего не увидит, лишь маленькую розовую «капельку», но опытный глаз астронома



Рис. 4.37. Рисунок Марса при наблюдении в телескоп с Земли.

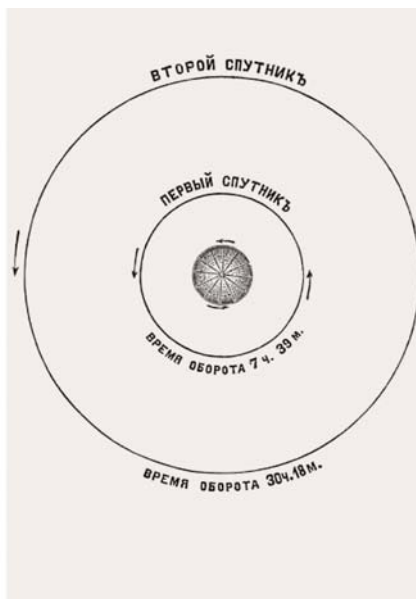
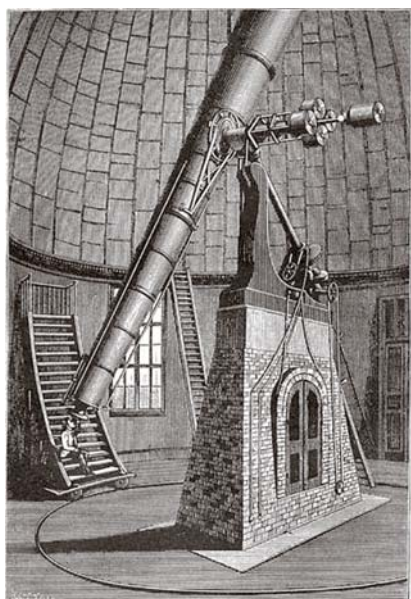


Рис. 4.38. Большой экваториал Вашингтонской обсерватории, с помощью которого были открыты спутники Марса, и рисунок из книги Асафа Холла (1877).



Рис. 4.39. Джованни Скиапарелли.

в тот же самый телескоп видит больше. Полярную шапку астрономы заметили давно, еще столетия назад. А также — темные и светлые области. Темные по традиции назвали морями, а светлые — континентами.

Повышенный интерес к Марсу возник в эпоху великого противостояния 1877 г.: к тому времени уже были построены хорошие телескопы и астрономы сделали несколько важных открытий. Американский астроном Асаф Холл обнаружил спутники Марса Фобос и Деймос, а итальянский астроном Джованни Скиапарелли зарисовал загадочные линии на поверхности планеты — марсианские каналы. Конечно, Скиапарелли не был первым, кто увидел каналы: некоторые из них замечали и до него (например, Анджело Секки). Но после Скиапарелли эта тема на многие годы стала доминирующей в изучении Марса.

Наблюдения деталей поверхности Марса, таких как «каналы» и «моря», положили начало новому этапу в изучении этой планеты. Скиапарелли считал, что «моря» Марса действительно могут быть водоемами. Поскольку соединяющим их линиям нужно было дать название, Скиапарелли назвал их «канала-

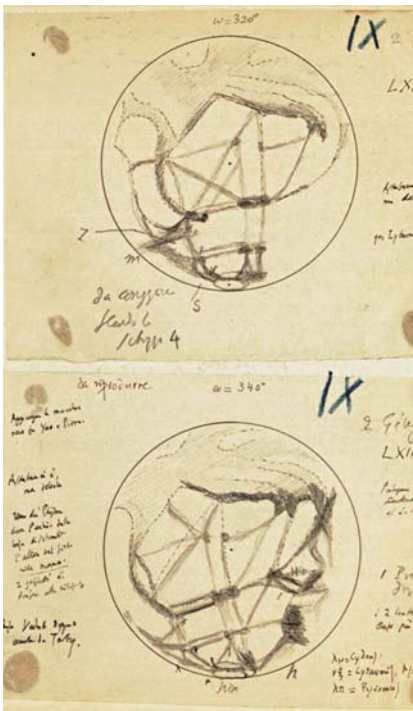
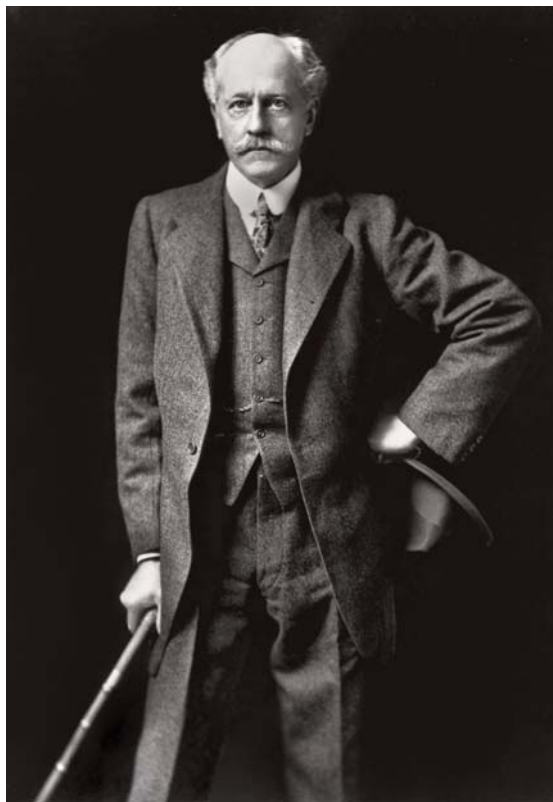


Рис. 4.40. Зарисовки каналов на Марсе, выполненные Дж. Скиапарелли.

Рис. 4.41. Персиваль Ловелл, американский бизнесмен, дипломат, путешественник и журналист, вдохновленный идеей о марсианских каналах, построил первоклассную обсерваторию для изучения Марса.



ми» (*canali*), подразумевая под этим морские проливы, а отнюдь не рукотворные сооружения. Он полагал, что по этим каналам в приполярных областях в период таяния полярных шапок действительно течет вода. После открытия на Марсе «каналов» некоторые ученые высказали предположение об их искусственной природе, что послужило основанием для гипотез о существовании на Марсе разумных существ. Но сам Скиапарелли не считал эту гипотезу научно обоснованной, хотя и не исключал наличия на Марсе жизни, возможно, даже разумной.

Однако мысль об искусственной системе оросительных каналов на Марсе стала укрепляться в других странах. Отчасти этому способствовало то, что итальянское *canali* было представлено на английском как *canal* (рукотворная водная магистраль), а не как *channel* (природный морской пролив). Да и на русском слово «канал» подразумевает искусственное сооружение. Идея о марсианах увлекла

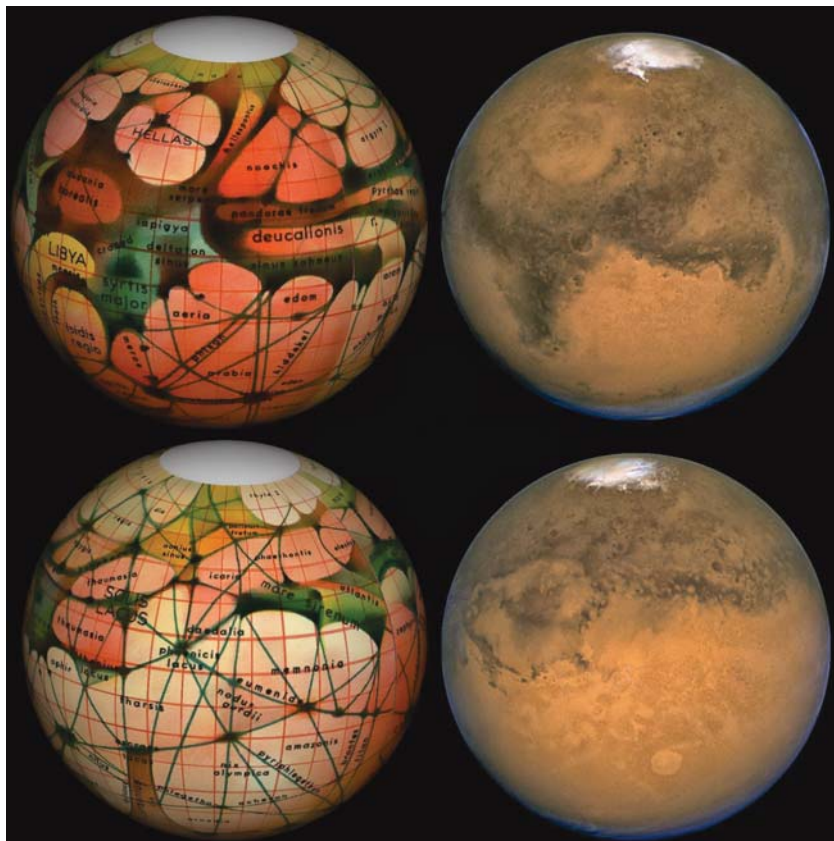


Рис. 4.44. Глобус Марса, сделанный на основе карт XX в, и современные снимки тех же полушарий планеты (космический телескоп «Хаббл»)

парелли о каналах, он увлекся Марсом и поверил в существование жизни и цивилизации на нем. В общем, он забросил все прочие дела и занялся изучением Красной планеты.

На деньги своего богатого семейства Ловелл построил обсерваторию и начал рисовать каналы. Заметим, что фотография тогда была в зачаточном состоянии, а глаз опытного наблюдателя способен заметить мельчайшие детали в условиях атмосферной турбулентности, искажающей изображения далеких объектов. Карты марсианских каналов, созданные в Ловелловской обсерватории, были самыми детальными. К тому же, будучи хорошим литератором, Ловелл написал несколько занимательнейших книг — «Mars and its canals» (1906), «Mars as the abode of life» (1908) и др. Только одна из них бы-

ла переведена на русский язык еще до революции: «Марс и жизнь на нем» (Одесса: Матезис, 1912). Эти книги увлекли целое поколение надеждой встретить марсиан. Зима — полярная шапка огромная, а каналов не видно. Лето — шапка растаяла, вода потекла, каналы появились. Они стали видны издали, поскольку по берегам каналов зазеленели растения. Убедительно?

Следует признать, что история с марсианскими каналами так и не получила исчерпывающего объяснения. Есть старые рисунки с каналами и современные фотографии — без них (рис. 4.44). Где каналы?

Что это было? Заговор астрономов? Массовое помешательство? Самовнушение? Трудно упрекнуть в этом ученых, отдавших жизнь науке. Возможно, разгадка этой истории ждет нас впереди.

А сегодня мы изучаем Марс, как правило, не в телескоп, а при помощи межпланетных зондов (хотя и телескопы до сих пор используются для этого и порой приносят важные результаты). Полет зондов к Марсу осуществляется по самой энергетически выгодной полуэллиптической траектории (см. рис. 3.7 на с. 61). С помощью третьего закона Кеплера легко вычислить длительность такого перелета. Из-за большого эксцентриситета марсианской орбиты время перелета зависит от сезона запуска. В среднем полет с Земли на Марс длится 8–9 месяцев.

Можно ли отправить пилотируемую экспедицию на Марс? Это большая и интересная тема. Казалось бы, для этого нужны лишь мощная ракета-носитель и удобный космический корабль. Достаточно мощных носителей пока ни у кого нет, но над ними работают американские, российские и китайские инженеры. Можно не сомневаться, что такая ракета в ближайшие годы будет создана государственными предприятиями (например, наша новая ракета «Ангара» в своем самом мощном варианте) или частными компаниями (Илон Маск — почему бы и нет).

А существует ли корабль, в котором космонавты проведут многие месяцы по пути к Марсу? Пока такого нет. Все существующие («Союз», «Шэньчжоу») и даже проходящие испытания (Dragon V2, CST-100, Orion) — очень тесные и пригодны лишь для полета на Луну, куда всего три дня пути. Правда, есть идея после взлета надувать дополнительные помещения. Осенью 2016 г. надувной модуль был испытан на МКС и неплохо себя показал.

Таким образом, техническая возможность перелета на Марс скоро появится. Так в чем же проблема? В человеке! На рис. 4.45 указа-

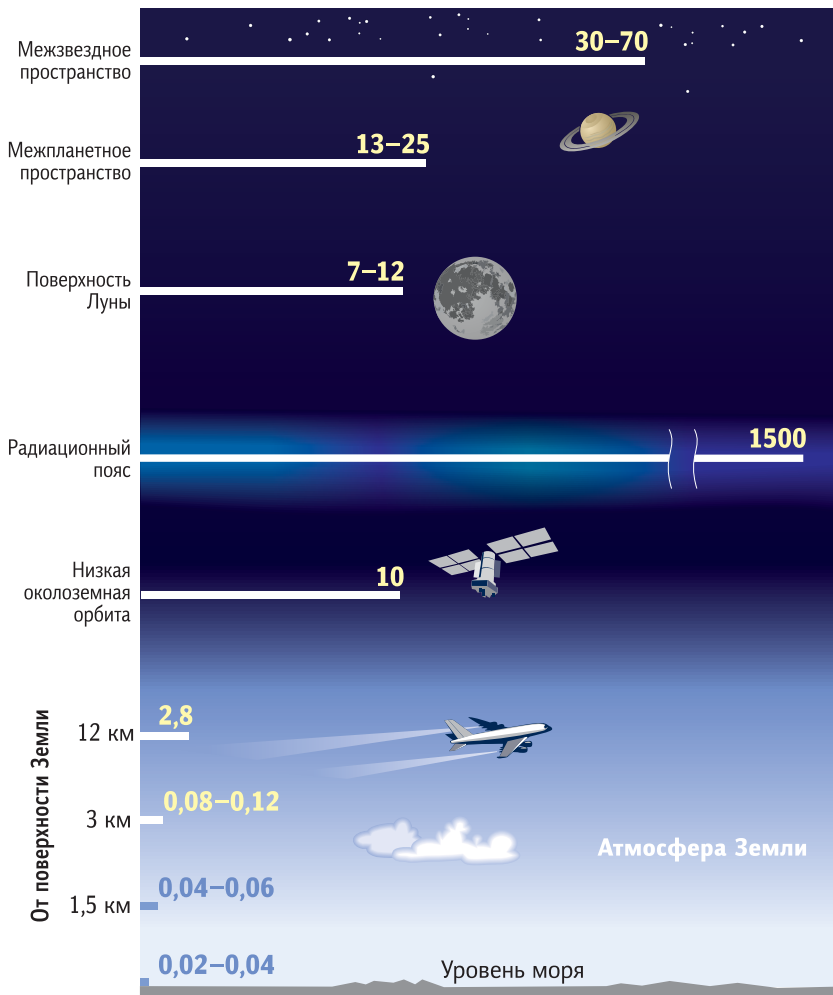


Рис. 4.45. Годовые дозы облучения (в бэр), которые получит человек на различном расстоянии от Земли.

на годовая доза облучения человека фоновой радиацией в разных местах – на уровне моря, в стратосфере, на околоземной орбите и в открытом космосе. Единица измерения – бэр (биологический эквивалент рентгена). Мы постоянно подвергаемся облучению естественной радиоактивностью земных пород, потоками космических частиц или искусственно созданной радиоактивностью. У поверхности Земли фон слаб: нас защищают, прикрывая нижнюю полусферу, магнитосфера и атмосфера планеты, а также ее тело. На низкой око-

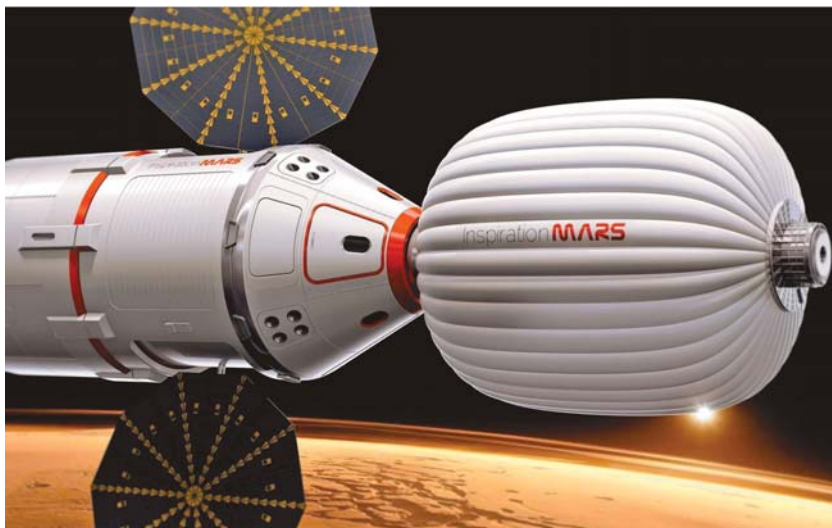


Рис. 4.46. Возможно, так будет выглядеть корабль для полета на Марс (проект «Inspiration Mars»).

лезной орбите, где работают космонавты МКС, атмосфера уже не помогает, поэтому радиационный фон возрастает в сотни раз. В открытом космосе он еще в несколько раз выше. Это существенно ограничивает длительность безопасного пребывания человека в космосе. Отметим, что работникам атомной промышленности запрещается в год получать больше 5 бэр — это почти безопасно для здоровья. Космонавтам в год разрешают получать до 10 бэр (приемлемый уровень опасности), что и ограничивает длительность их работы на МКС одним годом. А полет на Марс с возвращением на Землю в лучшем случае (если не произойдет мощных вспышек на Солнце) приведет к дозе в 80 бэр, что обусловит большую вероятность онкологического заболевания. Именно это и есть главное препятствие для полета человека на Марс.

Можно ли защитить астронавтов от радиации? Теоретически — можно. На Земле нас защищает атмосфера, толщина которой по количеству вещества на 1 см^2 эквивалентна 10-метровому слою воды. Легкие атомы лучше рассеивают энергию космических частиц, поэтому защитный слой космического корабля может иметь толщину 5 метров. Но даже в тесном корабле масса этой защиты будет измеряться сотнями тонн. Отправить такой корабль к Марсу не под силу современной и даже перспективной ракете.

Некоторые варианты защиты от радиации в межпланетном полете

Вещество	Характеристики
Вода H_2O	Требуется слой толщиной 5 м. Масса резервуара составит около 500 т .
Полиэтилен $(CH_2)_n$	Содержание водорода выше. Резервуар не требуется, но масса вещества – не менее 400 т .
Чистый водород H_2	Легкий. Требуется массивный герметичный бак.

Ну хорошо, допустим, нашлись добровольцы, готовые рискнуть своим здоровьем и отправиться на Марс в одну сторону без радиационной защиты. Смогут ли они после посадки там работать? Можно ли рассчитывать, что они выполнят задание? Вспомните, как космонавты, проведя полгода на МКС, чувствуют себя сразу после посадки на землю: их выносят на руках, кладут на носилки, и две-три недели они реабилитируются, восстанавливая крепость костей и силу мышц. А на Марсе их никто на руках не вынесет. Там нужно будет самостоятельно выходить и работать в тяжелых пустотных скафандрах, как на Луне: ведь давление атмосферы на Марсе практически нулевое. Скафандр очень тяжелый. На Луне двигаться в нем было относительно легко, поскольку сила тяжести там составляет $1/6$ земной, а за три дня полета к Луне мышцы не успевают ослабнуть. На Марс же космонавты придут, проведя многие месяцы в условиях невесомости и радиации, а сила тяжести на Марсе в 2,5 раза больше лунной. К тому же и на самой поверхности Марса радиация почти такая же, как в открытом космосе: магнитного поля у Марса нет, и атмосфера у него слишком разреженная, чтобы служить защитой. Так что кинофильм «Марсианин» – это фантастика, очень красивая, но нереальная.

Как мы себе раньше представляли марсианскую базу? Прилетели, поставили на поверхности лабораторные модули, живем в них и работаем. А теперь вот как: прилетели, окопались, соорудили убежища на глубине минимум 2–3 метра (это достаточно надежная защита от радиации) и стараемся пореже и ненадолго выходить на поверхность. В основном сидим под грунтом и управляем работой марсоходов. Ну так ведь ими и с Земли можно управлять, даже еще эффективнее, дешевле и без риска для здоровья. Что и делается уже несколько десятилетий.

О том, что узнали о Марсе роботы, – в следующей лекции.

