

Глава 3. Планеты Солнечной системы. Некоторые общие характеристики и сравнения

В этой главе мы рассмотрим планеты Солнечной системы с точки зрения некоторых важных аспектов. Глава посвящена современным характеристикам планет, их историческим особенностям в ней уделено небольшое внимание (истории планет посвящена вторая часть книги). Будут представлены различные сведения о планетах. Они, с одной стороны, дадут читателю представление о телах Солнечной системы, а с другой – составят основу для рассуждений об эволюционных правилах и особенностях тех или иных небесных тел, позволят нам произвести сравнения, высказать различные идеи и дать комментарии. Словом, как и во всей данной книге, здесь мы ставим перед собой двуединую задачу: 1) дать читателю общее представление о планетах Солнечной системы; 2) показать состояние данных планет в эволюционном аспекте.

Несмотря на то что белых пятен в изучении планет очень много, в настоящее время о них накоплено огромное количество сведений, поэтому в настоящей работе нет возможности представить сколько-нибудь системное описание всех планет (но часть сведений помещена в таблицах в *Приложении 1*). Невозможно систематично сравнивать все планеты друг с другом, тем более что имеющиеся сведения распределены очень неравномерно: об одних телах их относительно много, о других – чрезвычайно мало. Таким образом, мы сможем коснуться только некоторых, на наш взгляд, наиболее важных фактов и характеристик.

В данном случае важно, что мы исходим из следующего: все планеты являются элементами одной системы, имеют единое происхождение и общий субстрат вещества, из которого они образовались (но элементы этого вещества распределились крайне неравномерно). Одно из фундаментальных свойств природы – способность формировать группы из объектов близкого масштаба с определенным родственным набором качеств (Павлов 2006: 50). Планеты Солнечной системы являются одной из таких групп, одновре-

менно имеющих и генетическое родство, и структурно-функциональное сходство. То, что у каждого из тел имеются индивидуальные признаки, легко объясняется их местом в Солнечной системе, историческими особенностями формирования (сочетанием особенностей места, времени, условий и случайностей) и другими обстоятельствами (речь об этом пойдет во второй части книги). Это тоже *очевидная закономерность: среди одновременно возникших (или родственных) объектов заметны бóльшие или меньшие различия*. Природа и эволюция одновременно стандартизируют объекты, однако не терпят полного единообразия. Всегда имеются индивидуальные особенности, которые соответствуют только уникальному объекту и индивиду. Это характерно для всех миров – от микромира до гигантских звезд и галактик. Даже в рамках однотипных атомов и молекул между мириадами этих частиц есть различия, поскольку в природе нет веществ, у которых все частицы имеют одинаковые свойства, а приток энергии в систему неизбежно делает ее неоднородной (Мелихов 2018: 9–11). На первый взгляд, это некоторое расточительство. Почему бы, скажем, близнецам не иметь полностью совпадающие рисунки папиллярных линий (по которым различают отпечатки пальцев) или радужную оболочку глаз? Зачем эти различия? Но в действительности это один из мощнейших механизмов разнообразия, создающий некий континуум вариаций, по сути, бесконечную вариативность. Можно было бы говорить о *правиле единства стандартизации и индивидуализации* (которое представляет одну из реализаций закона единства и борьбы противоположностей). Кроме того, это создает возможности для структурирования, конкуренции и отбора в данных процессах.

Например, в нанопроцессах в насыщенных средах в процессе образования зародышей кристаллов и т. д. при зарождении имеет место молекулярный отбор. Между молекулами среды действуют силы притяжения, под воздействием которых в среде образуются группировки сближенных молекул (кластеры). При этом молекулы конкурируют за возможность присоединить к себе другие молекулы. Конкуренция же между группами приводит к тому, что в среде формируется множество кластеров, каждый из которых «собирает» молекулы из своего ближайшего окружения. При столкнове-

нии кластеров с молекулами среды и друг с другом часть из них укрупняется, а часть распадается, причем вероятность укрупнения кластеров возрастает, а вероятность распада уменьшается по мере увеличения их размера. Вызвано это тем, что у крупных кластеров больше «посадочных мест», где могут закрепиться новые молекулы, а для отрыва молекулы от крупного кластера ей нужно преодолеть силу притяжения к большему числу атомов, чем при отрыве от мелкого. В результате этого в коллективе кластеров, где каждый то присоединяет молекулы среды, то отдает их среде, постепенно накапливаются укрупненные частицы, у которых вероятность присоединения молекул оказывается намного больше вероятности распада. Такие частицы, с учетом того, что каждая из них превратится в кристалл, можно считать зародышами твердого вещества (Мелихов 2018: 24). Процесс поразительно напоминает не только начальные фазы образования планетезималей, о которых мы подробно говорили (Гринин 2017), но и процесс образования коллективов (стаи, стад и т. д.) животных и птиц, а также процессы формирования политических организмов в истории. И отдельным индивидам становится очень сложно обособиться от этих образований. Таким образом, перед нами *паттерн кластеризации в результате разнообразия, конкуренции и отбора*.

Но характерно, что это, казалось бы, беспорядочное движение взаимной борьбы в итоге приводит к самоорганизации и порядку.

«При этом если сила действия молекул среды на частицы агрегатов соизмерима с силой их взаимного притяжения, то в системе происходит накопление упорядоченных форм с минимальным зазором и разрушение неупорядоченных форм, у которых зазор больше, а следовательно, сила притяжения меньше» (Мелихов 2018: 28). Похожие процессы происходят в процессе формирования планет из планетезималей или создания государств из мелких политий. Таким образом, *порядок оказывается энергетически выгодным вопреки идее, что энтропия всегда доминирует*.

3.1. Общие сведения о планетах и планетных группах

Общие сведения о планетах Солнечной системы. В настоящей работе мы нередко для удобства изложения будем называть планетами не только восемь больших планет и так называемые карликовые, которых в настоящее время насчитывается пять вместе с Плутоном (Церера, Хаумеа, Макемаке, Эрида), но также крупные спутники больших планет. Крупнейших спутников семь: Луна, четыре спутника Юпитера (называемые галилеевыми, так как они были открыты Г. Галилеем), два – у Сатурна. Стоит отметить, что наши знания о карликовых планетах существенно более скудны, чем сведения о крупных спутниках.

Карликовая планета, согласно определению XXVI Ассамблеи Международного астрономического союза в 2006 г., – это небесное тело, которое: вращается по орбите вокруг Солнца; имеет достаточную массу для того, чтобы, в отличие от малых тел Солнечной системы, под действием сил гравитации поддерживать близкую к сферической форму; не является спутником планеты; не может, в отличие от планет, расчистить район своей орбиты от других объектов¹⁶. Четыре из пяти карликовых планет находятся в транснептуновой зоне (то есть за орбитой Нептуна). Там располагается много других объектов, но из-за удаленности большинство из них очень плохо изучены, размеры их неизвестны, орбиты тоже. Вот почему ведутся разговоры о том, что, возможно, по меньшей мере еще 40 из известных объектов в Солнечной системе принадлежат к этой категории. Также есть предположения, что в поясе Койпера и за его пределами могут быть обнаружены сотни, а то и тысячи карликовых планет.

В Солнечной системе существуют сотни тысяч так называемых малых планет (тел) самой разной формы. Малые планеты – это тела естественного происхождения, вращающиеся вокруг Солнца по собственным орбитам; они имеют

¹⁶ Все карликовые планеты, кроме Хаумеа, имеют близкую к сферической форму. Точная форма Хаумеа неизвестна, но она, скорее всего, эллипсоид, похожий на вытянутое яйцо. Очевидно, что из-за формы она не полностью подходит под указанные критерии карликовой планеты. Это самое быстро вращающееся тело диаметром больше 100 км, которое оборачивается вокруг своей оси меньше чем за четыре часа. Несмотря на относительно малые размеры (диаметр немногим больше 1000 км), эта планета обладает всем набором, характерным для планет-гигантов: двумя спутниками и системой колец.

размер более 50 метров и не относятся к планетам и карликовым планетам. Кроме того, они не должны быть кометами. Это в основном астероиды из пояса астероидов и пояса Койпера. Наиболее крупные из них находятся в поясе астероидов: это Паллада (диаметр 490 км; имеет форму, приближающуюся к сфере) и Веста (диаметр 385 км; имеет неправильную форму).

Спутник – небесное тело, обращающееся по определенной траектории (орбите) вокруг другого объекта в космическом пространстве под действием гравитации. Стоит обратить внимание, что спутники есть у некоторых карликовых и малых планет, но у спутников свои спутники не обнаружены, поскольку в большинстве случаев приливные силы главного тела сделали бы такую систему неустойчивой (однако полностью такая вероятность не исключена). Количество спутников за пределами земной группы, то есть вокруг планет-гигантов, велико. Получается, что чем крупнее планета, тем больше у нее спутников (*по принципу концентрации вещества вокруг более крупных центров*, который, как мы только что видели, действует и в микро-, и в макромирах). В земной группе планет, повторим, ситуация со спутниками загадочная, так как крупный спутник имеет только Земля, а спутники Марса небольшие (скорее всего, захваченные из пояса астероидов). Венера и Меркурий спутников не имеют.

Крупнейшие спутники Солнечной системы, такие как Ганимед (спутник Юпитера, диаметр 5268 км) и Титан (спутник Сатурна, диаметр 5152 км), намного превосходят крупнейшую карликовую планету Плутон и по размерам, и по массе (по массе даже Луна превосходит Плутон, в основном состоящий из льда). Но несмотря на вышесказанное, по своему статусу Плутон и данные тела существенно отличаются. Главное различие состоит в наличии у Плутона собственной орбиты вокруг Солнца. Однако даже крошечные малые планеты имеют собственную орбиту. Таким образом, различия становятся системными. Спутник – это часть более сложной системы, центром которой является планета, вокруг которой он вращается; а планета (любая: большая, карликовая или малая) – это тело, которое вращается вокруг Солнца.

По размеру восемь крупных планет делятся, как мы видели в *Главе 1*, на две группы по четыре планеты в каждой: небольшие планеты земной группы и планеты-гиганты. Но по своему составу

они делятся на три группы. Причем в последние входят не только большие, но и карликовые планеты и спутники (об этом подробнее будет сказано во втором подразделе данной главы).

1. К силикатным (или каменным) относятся планеты земной группы, Луна, а также некоторые галилеевы спутники Юпитера (Ио, Европа) и некоторые карликовые планеты, такие как Церера¹⁷.

2. К газовым (состоящим из водорода и гелия) относят Юпитер и Сатурн. Но вернее говорить, что они газовой-жидкие, так как в результате давления на определенной глубине газ превращается в жидкость.

3. К ледяным относят Уран и Нептун (хотя в составе этих планет-гигантов также много водорода и гелия), их спутники, многие из спутников Юпитера, в том числе такие крупные, как Ганимед, Каллисто (Бусарев 2015); многие спутники Сатурна, а также Плутон, его спутник Харон и другие транснептуновые малые планеты. Отметим, что на ледяных планетах есть не только водяной, но и иного состава лед (в том числе из аммиака, углекислого газа).

Основные вещества, из которых состоят тела Солнечной системы, также можно условно разделить на три группы. Во-первых, это твердые вещества, минералы, в целом похожие на земное вещество (с той, однако, разницей, что количество минералов на Земле во много раз больше такового на Луне и других планетах и телах). Тем не менее практически на всех телах с похожим на Землю составом основными минералообразующими элементами являются кремний, железо, алюминий, магний и титан в окисленном состоянии, то есть при значительном включении кислорода в химические соединения (соответственно, эти вещества и минералы можно отнести к группе «земного вещества»)¹⁸. Во-вторых, это летучие вещества, главными из которых являются углерод, азот, кислород и в меньшем количестве – водород, входящий в некоторые химические соединения. В виде газов эти элементы образуют атмосферы отдельных планет или крупных спутников. Но чаще летучие компоненты вещества Солнечной системы существуют в виде льда

¹⁷ Но Церера, по-видимому, состоит на 20–30 % из водяного льда, вероятно, у нее каменное ядро и ледяная мантия (McCord, Sotin 2005). Таким образом, при отнесении того или иного объекта к определенной группе часто возникают проблемы пограничных состояний.

¹⁸ В составе земной коры кислород составляет почти половину массы (47 %), кремний – 27,5 % (подробнее см. в *Главе 10*).

(соответственно, их можно отнести к группе льдов). В-третьих, это такие газы, как водород и гелий, наиболее обильно встречающиеся на Солнце, с небольшими примесями неона, аргона и некоторых других элементов (Шевченко 2014). Приведем также полезную гистограмму (см. Рис. 1), которая примерно показывает относительное содержание перечисленных групп вещества в химическом составе основных тел Солнечной системы. Группа 1 («земное вещество») на 99 % и более образует планеты земного типа, астероиды и отдельные спутники (например, Луну). Большая часть спутников, относящихся к системам планет-гигантов, состоит в основном из «льдов» (группа 2) с некоторой примесью «земного вещества». Те же составляющие, но в другой пропорции, характерны для комет. Юпитер и Сатурн в основном состоят из «солнечного вещества» (группа 3) с примесями «льдов» и «земного вещества». Для Урана и Нептуна основным веществом, их образующим, являются «льды»¹⁹.

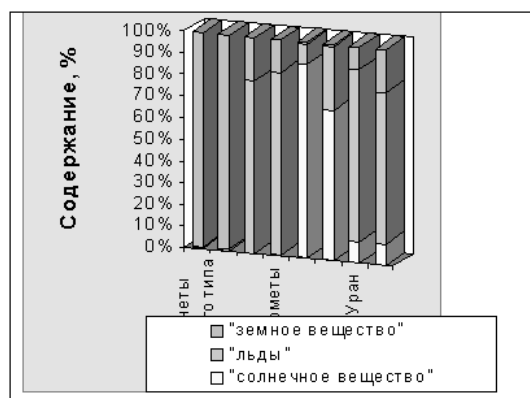


Рис. 1. Относительное содержание различных типов вещества в телах Солнечной системы

Источник: Шевченко 2014: рис. 6.

¹⁹ Это условные «льды», поскольку если рассматривать их в недрах планет, то там они находятся в жидком и горячем состоянии. «Льдами» принято называть метан, аммиак и воду, то есть три соединения четырех широко распространенных в космосе элементов (водорода, кислорода, углерода, азота). «Льдами» эти соединения называются потому, что на уровне видимого облачного слоя большинства планет-гигантов все они превращаются в реальные льды (см.: Ксанфомалити 1997: 195–196).

Некоторые общие характеристики всех планет. Каждая планета имеет шарообразную форму, однако особенности вращения вокруг своей оси и некоторые другие вещи так или иначе искажают эту форму²⁰. Каждая планета имеет собственную орбиту, которая у крупных планет благодаря мощной гравитации расчищена от других объектов. Спутники имеют собственную орбиту вокруг планеты. Все крупные и карликовые планеты вращаются вокруг своей оси. В отношении спутников ситуация несколько иная, так как они находятся в соответствии со своими планетами, к которым обычно обращены одной стороной. Строение большинства (но не всех) планет имеет общие черты. У них есть ядро – металлическое, каменное или иное (например, металлосиликатное). Мантия может быть силикатной, газовой-жидкой, ледяной, состоящей из воды и др. Что касается коры, то в отношении газовых гигантов и даже ледяных планет о коре говорить трудно (но у некоторых ледяных планет ее подобием является их ледяная оболочка). Поскольку с глубиной повышается давление, ядро обычно тяжелее (плотнее) мантии, но размер ядер весьма значительно варьирует (например, у Луны это 2–3 % от общей массы, у Земли – более 30 %). Недра ряда планет и некоторых крупных спутников, как предполагается, горячие (см. ниже).

Жидкое металлическое ядро, как правило, является источником магнитного поля планеты, которое также зависит от угловой скорости вращения. Но не у всех планет ядра металлические, у некоторых ядро твердое, застывшее, поэтому не все из них имеют заметное магнитное поле. У планет земной группы, кроме Земли, магнитные поля слабые или почти отсутствуют. Но у планет-гигантов и отдельных их спутников (например, у Ганимеда) сильные магнитные поля.

Здесь уместно заметить, что в отношении характеристик планет почти всегда можно говорить о едва ли не непрерывном континуу-

²⁰ Чем медленнее вращается планета, тем больше ее форма приближается к шару, тем меньше у нее выражено сжатие, под которым понимается отношение разности экваториального и полярного радиусов планеты к экваториальному радиусу. У очень медленно вращающихся планет – Меркурия и Венеры – объемную форму приближенно можно считать шарообразной, а не эллипсоидной, как у других планет.

ме (большом вариативном ряде²¹). Так, можно сказать, что Луна не имеет атмосферы, а можно сказать, что имеет, но ее атмосфера на четырнадцать порядков более разреженная, чем у Земли. Ясно, что такая атмосфера практически равна ее отсутствию, но все же следует иметь в виду, что никогда качество не отсутствует полностью. То же касается и магнитных полей.

Некоторые общие характеристики планет земной группы и силикатных спутников. Планеты земной группы представляют собой твердые шары, состоящие в основном из минералов, наиболее распространенными среди которых являются силикаты (соединения кремния). Поэтому планеты земной группы часто называют силикатными, или каменными²². У всех четырех предполагается присутствие железного или железно-никелевого ядра того или иного размера. По ряду характеристик (например, наличие минералов) близки к планетам земной группы не только Луна (что естественно), но и ряд крупнейших спутников Юпитера (Ио, Европа) и Сатурна (например, Энцелад), а также некоторые карликовые планеты, такие как Церера²³. Правда, у указанных спутников силикатными являются только ядра, а мантии ледяные или водно-ледяные. Однако некоторые спутники планет-гигантов могут иметь весьма схожую структуру с планетами земной группы. Так, Европа состоит в основном из силикатных пород, а в центре содержится железное ядро. Металлическое ядро имеет и Ганимед.

У Земли ядро подразделяется на внешнее (жидкое) и внутреннее (твердое). Жидкое ядро, вероятно, есть также у Меркурия, у Марса оно, возможно, частично жидкое. Ядро – наиболее плотная часть планетных недр ($12,5 \text{ г/см}^3$ в центре Земли), кора – наименее плотная (для Земли $2,8 \text{ г/см}^3$), плотность мантии – промежуточная. Мантия Земли делится на три слоя, причем в нижней мантии температура близка к точке плавления.

²¹ В какой-то мере в отношении континуума объектов можно использовать *правило континуума эволюционных состояний и характеристик*. Оно гласит, что резких переходов между эволюционными уровнями нет. Между крайними формами число переходных велико, порой огромно. В то же время всегда существует и некоторая дискретность (как проявление закона перехода количества в качество).

²² Дело в том, что силикаты образуют мощные залежи в виде гранитов, гнейсов, базальтов, то есть каменных горных пород.

²³ Силикатными являются и многие астероиды, в том числе крупнейшие из них, такие как Веста.

Силикатные планеты так или иначе имеют какую-либо кору, состоящую из различных пород (в некоторых случаях изо льда; либо представляющую вечную мерзлоту, как на Марсе, то есть грунт, смешанный со льдом). Некоторые планеты земной группы имеют силикатный состав своих наружных оболочек, которые частично могут быть перекрыты водой в жидкой или твердой фазе (это Земля и Марс). На некоторых спутниках имеется поверхностная жидкость, но вместо воды там что-то другое. Например, в случае с Ио это сера и лед SO_2 (Евсюков 1997: 46), в других случаях – жидкий метан. Так, на Титане обнаружены сотни озер из метана. Толщина коры варьируется в зависимости от места на планете и возраста самой коры. У планет земной группы она варьируется как между планетами, так и на самих планетах от 10 до 100 км (Тебиева 2015: 92). Интересно, что у Луны кора существенно толще земной. Толщина мантии и у планет земной группы варьируется от 1000 до 3000 км (Там же).

У планет земной группы, кроме Меркурия, и у спутника Сатурна Титана есть относительно тонкие газовые атмосферы, но они значительно различаются по плотности и составу. Однако интересно, что основу атмосфер Земли и далекого Титана составляет азот.

Стоит добавить, что существуют сходства в разных аспектах и между отдельными планетами (о чем будет сказано далее). Часто говорят о схожести пейзажей поверхностей Меркурия и Луны, испещренных кратерами и покрытых так называемым реголитом²⁴.

Общие черты планет-гигантов. Помимо того что эти планеты – Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун – во много раз больше по объему и массе, чем планеты земной группы, они имеют и характерные особенности в строении и составе. Ведь они представляют собой огромные газовые шары и состоят в основном из газообразных, жидких компонентов, то есть не имеют твердой поверхности, которая есть у планет земной группы. В отличие от последних у газовых планет мантия не твердая, а газовой-жидкая, так как газ на определенной глубине под давлением начинает превращаться в жид-

²⁴ Это особый минерал, сформированный в результате взрыхления поверхности планет мелкими метеоритами и влиянием солнечного ветра. Характерно, что на Земле реголит отсутствует. Дело в том, что он представляет собой смесь собственного материала и материала падавших планетезималей и астероидов, чего нет на планетах с атмосферой (Язев 2018: 48–49).

кость. Но, как мы увидим, у Юпитера и Сатурна, с одной стороны, и Урана и Нептуна – с другой, есть различия в составе и строении как мантии, так и ядра. У планет первой группы в связи с тем, что в них намного больше водорода и гелия, мантия, как уже было сказано, газовой-жидкая, у вторых – включает большое количество льда. Соответственно, у всех ядра, по предположениям, твердые. У Юпитера и Сатурна они составляют небольшую часть каждой планеты по массе, однако в абсолютных величинах они огромны, превосходят Землю в несколько раз. У Урана и Нептуна ядра пропорционально больше (см. ниже). У первой группы планет они, скорее всего, состоят из металлизированного водорода и силикатных материалов, у второй – частично из металлов, но большей частью каменно-ледяные. Но в целом ядра планет-гигантов по составу отличаются от таковых у планет земной группы.

У всех планет-гигантов есть и атмосферы, однако это не тонкие атмосферы планет земной группы, а необычайно мощные, состоящие в основном из водорода и гелия. Кроме того, роль атмосфер отличается и в структурном плане. Дело в том, что атмосфера газовой-жидких планет одновременно является и частью структуры планеты, то есть верхним слоем, заменяющим твердые оболочки у планет земного типа, и собственно атмосферой, поскольку в ней происходят многие явления, характерные именно для атмосфер планет земной группы: вихри, перемещения, ветра и т. п. Соответственно, граница между тем, что можно считать аналогом атмосфер планет земного типа, и атмосферой – газовой оболочкой планеты практически неразличима. У всех планет-гигантов, как мы упоминали, сильные магнитные поля.

Ледяные планеты. К ледяным планетам относятся, как уже было сказано, спутники Нептуна и Урана, многие из спутников Юпитера (но такие, как Европа и Ганимед, могут быть отнесены также и к силикатным планетам) и Сатурна, а также Плутон, Харон²⁵, другие транснептуновые карликовые планеты и крупные объекты (например, Эрида, Кварвар, Седна и др.). Многие из них со-

²⁵ Харон – необычный спутник. Он вдвое меньше Плутона, поэтому есть точка зрения (но не принятая официально), что это не карликовая планета со спутником, а двойная карликовая планета (см.: Язев 2018: 3). Впрочем, сейчас у Плутона обнаружены уже не один, а три спутника, поэтому система выглядит гораздо более сложной.

стоят из водяного льда с небольшими примесями (Язев 2018: 15). Но возможно, что внутри них есть и скальные породы, как на открытой в 2005 г. Санте (Объекты... 2005). Для ледяных планет (их также называют ганимедовой группой) характерен ледяной состав их наружных оболочек, иногда загрязненных вблизи поверхности метеоритным или органическим веществом (Евсюков 1997: 46). К ледяным планетам в некоторых аспектах можно отнести и планеты-гиганты Уран, Нептун (хотя в них есть также водород и гелий).

Влияние параметров планет на их особенности. Очень важными характеристиками планет, которые позволяют их индивидуализировать и сравнивать, являются: объем, масса, плотность, расстояние от Солнца; величина, геометрические характеристики орбиты вокруг Солнца и временная длительность орбитального пути; скорость вращения вокруг своей оси; наклон оси и ряд других. В настоящей главе мы в основном их касаться не будем, кроме некоторых сравнений, которые показывают огромное разнообразие условий на планетах, но все же и сходство между ними. О некоторых характеристиках (например, внутренних источниках энергии) мы еще будем говорить в *Главах 7 и 8* (см. также *Приложение 1*).

Различия в этих параметрах между планетами разнообразны и велики. Они влияют на геометрические характеристики формы планет, количество энергии, получаемой планетой от Солнца (как в целом, так и различными ее частями), климат планеты, смену времен года на ней и на ее полушариях, возможность иметь атмосферу и гидросферу, многие другие важные моменты. В частности, поскольку планеты обращаются вокруг Солнца не по круговым орбитам, а по эллиптическим, расстояние от них до Солнца все время меняется. Соответственно, в течение года изменяется и величина солнечной энергии, которую получает планета. И чем больше эксцентриситет орбиты у планеты²⁶, тем большие колебания в этом плане происходят, соответственно, это влияет на колебания климата. Большое значение для колебаний климата и температурного режима поверхности планет имеет величина наклона оси вращения к орбитальной плоскости. У некоторых планет, таких как Меркурий или Юпитер, ось почти перпендикулярна к орбитальной плос-

²⁶ Числовая характеристика орбиты небесного тела, которая характеризует «сжатость» орбиты.

кости. Соответственно, колебания температур и погодных условий в этом случае небольшие и на планете отсутствуют сезоны в течение года. Зато у планет с большим наклоном оси вращения сезоны года выражены резко. У Земли наклон оси вращения составляет $23,5^\circ$.

Понятно, что чем дальше планета от Солнца, тем дольше длится ее год (так как орбитальный путь становится длиннее), тем меньше солнечной энергии она получает. Однако есть и менее очевидные взаимосвязи. В частности, расстояние от Солнца и наличие/отсутствие атмосферы сильно влияет на перепады температуры, а это отражается, например, на химическом составе грунта. Так, на Луне температура днем повышается до $+130^\circ\text{C}$. Соответственно, все летучие вещества в лунном грунте давно испарились. В то же время на полюсах Меркурия довольно много льда, принесенного кометами. А на спутниках Юпитера и Сатурна водяной лед и оксид серы испаряются довольно медленно, поэтому они лежат там на поверхности. У дальних планет (например, спутников Нептуна и Плутона) лед (водяной, метановый и из молекулярного азота) вообще стабилен.

В то же время нередко не прослеживается взаимосвязь между теми или иными параметрами. Так, нет связи между величиной планеты и скоростью ее вращения вокруг своей оси.

Например, у Юпитера экваториальная скорость наибольшая, она составляет 43 000 км/час. Если такую экваториальную скорость придать Земле, то наша планета делала бы полный оборот вокруг оси не за 24 часа, а всего за 56 минут. У планет внутренней группы – Меркурия, Венеры, Земли, Марса и Луны – скорость вращения значительно меньше, и установить какую-либо закономерность в их вращении не удастся. Правда, Земля – самое крупное тело из внутренних планет – по сравнению с Юпитером вращается с меньшей скоростью (более чем в 25 раз медленнее), но значительно быстрее других планет внутренней группы. Почти равная Земле по величине планета Венера, наоборот, имеет минимальную скорость вращения. Полный оборот вокруг оси она совершает за 247 земных суток, в то время как на облет Солнца ей требуется около 225 суток. Это означает, что ее год длится меньше ее же суток. Марс во много раз меньше Венеры, но вращается вокруг оси в 100 раз быстрее. Мерку-

рий почти в два раза меньше Марса, а вращается более чем в 50 раз медленнее. На полный оборот вокруг оси Меркурий затрачивает 58,65 земных суток, а год у него продолжается 88 суток (Тебиева 2015: 201–202).

Зато со скоростью вращения планеты связана ее объемная форма (см. выше). Чем медленнее вращается планета, тем больше ее форма приближается к шару, тем меньше выражено у нее сжатие, под которым понимается отношение разности экваториального и полярного радиусов планеты к экваториальному радиусу. У очень медленно вращающихся планет – Меркурия и Венеры – объемную форму приближенно можно считать шарообразной, а не эллипсоидной, как у других планет. Рекорд сжатия принадлежит Сатурну, для которого эта величина представлена отношением 1:10; у Земли сжатие в 30 раз меньше – 1:298,2. С формой планеты связана специфика распределения по ее поверхности поступающей солнечной радиации (Там же: 201).

3.2. Подробнее о структуре планет

Как уже было сказано, у всех планет имеется похожая структура, которая состоит из ядра, мантии и коры, но пропорции и характеристики каждого элемента структуры значительно различаются. Однако нам удастся сказать только об отдельных особенностях некоторых планет.

Меркурий и Луна. Наиболее пропорционально крупное ядро у самой маленькой планеты Солнечной системы – Меркурия. Считается, что его железное ядро имеет радиус 1800 км, что составляет 3/4 радиуса планеты! Толщина коры может составлять 50–100 км, а остальное (700 км) приходится на мантию. Эта картина резко отличается от Земли, где большую часть радиуса занимает мантия. Соответственно, масса ядра Меркурия предположительно составляет около 62 % массы этой планеты, а его объем занимает около половины ее объема (Язев 2011: 47). Для сравнения, далеко не маленькое ядро Земли составляет только 16 % от ее объема. Меркурий объединяет в себе некоторые черты разных планет (Ксанфомалити 2012б: 107), в частности Земли (крупное ядро и высокая плотность), Луны (отсутствие атмосферы, схожесть поверхности за счет влияния астероидов; см. ниже) и даже Марса (имеется лед на полюсах; см. далее).

Ядро Луны составляет только 4 % ее объема (Шевченко 2014). Существует целый ряд гипотез (некоторые из них см.: Гринин 2017), объясняющих различия в составе Земли и Луны. Одна из них предполагает, что Луна образовалась из выбитых частей земной мантии, соответственно, поэтому она обеднена железом.

Венера. Считается, что внутреннее строение Венеры должно быть похожим на строение Земли. Толщина ее коры – около 60 км (Сиротин 2009). Силикатная мантия простирается на глубину порядка 3300 км до границы с железным ядром (Там же; Галанин 2012). Ее ядро составляет в радиусе приблизительно 3000 км и занимает 12 % объема, тогда как у Земли – 16 % объема; соответственно, 25 % и 34 % массы планет (Сиротин 2009; Ксанфомалити 2012а; Галанин 2012). Однако у Венеры отсутствует магнитное поле, что существенно отличает ее не только от Земли, но и от Марса. Как уже было сказано, его сила зависит от скорости вращения планеты. Последняя у Венеры низкая, и это объясняет слабость магнитного поля, однако не полностью. Показатели его силы, полученные измерениями, оказались в 10 раз меньше расчетных. То есть фактически магнитного поля нет, что непременно требует объяснений (Ксанфомалити 2012а).

Юпитер. У Юпитера за атмосферой, толщина которой принята в 1500 км, находится слой газово-жидкого водорода толщиной около 7000 км (это его мантия). Ядро этой самой крупной планеты в процентном отношении к его объему небольшое. Однако в абсолютных размерах на него приходится не менее 5 масс Земли, и по диаметру оно вдвое больше Земли, диаметр которой составляет почти 13 тыс. км (то есть ядро Юпитера – 25 тыс. км). По составу ядро металло-силикатное, но вместо реальных металлов в нем жидкий металлизированный водород. Ядро может также включать в себя воду, аммиак и метан. Предполагается, что внутреннее ядро может быть окружено слоем гелия или слоем растворов гелия (Ксанфомалити 1997: 151; 2012в: 223). Температура внутри Юпитера достигает 20 тыс. градусов (Там же; Савченко, Смагин 2013: 11).

Сатурн, Нептун, Уран. Похожее строение и у Сатурна, но температура в его ядре (как и давление) ниже – 17 тыс. градусов (Ксанфомалити 1997: 151; 2012в: 223). В любом случае за счет огромного давления в недрах планет-гигантов происходят весьма

активные процессы. Как говорилось выше, планеты-гиганты довольно четко делятся на две группы: Юпитер – Сатурн и Уран – Нептун. У последних ядра большие. Так, у Урана оно составляет 30 % объема, а у Нептуна на долю ядра приходится 25 % всей массы планеты (Ксанфомалити 2012a: 253; 2012b: 262). Это сближает их с планетами земной группы. Ядра, как сказано, металлосиликатные с заметным добавлением метана, аммиака и воды.

Представления о внутреннем строении планет – это результат моделирования, в котором должны найти объяснение их основные параметры. Согласно этим расчетам, Уран имеет довольно большое ядро (около 0,3 радиуса планеты), состоящее из тяжелых элементов – металлов и силикатов, а также так называемых «льдов». Ядро окружено толстой оболочкой из водорода и гелия с условной внешней границей около 0,7 радиуса планеты. Глубина водородно-гелиевой атмосферы Нептуна от 3 до 5 тыс. км. Ниже слоя атмосферы находится жидкий океан из так называемых «льдов» аммиака, воды и метана (как видим, если у Урана «льды» находятся в ядре, то у Нептуна – в мантии). Глубина этого внутреннего океана может составлять от 1 тыс. до 15 тыс. км. Под увеличенным давлением и повышенной температурой жидкий «лед» способен переходить в твердое состояние. На долю такой горячей «ледяной» мантии может приходиться до 70 % массы. Ядро твердое, в нем должны присутствовать оксиды кремния, магния и железа, а также сульфиды последнего (Язев 2018: 244).

Таким образом, индивидуальных особенностей у планет-гигантов много (и по мере более глубокого изучения становится больше). Есть и загадки. Например, Нептун излучает в пространство в 2,7 раза больше тепла, чем получает от Солнца, что свидетельствует о какой-то его мощной внутренней энергии (Там же; Алексеев 2019: 224). Но источник этой внутренней энергии неясен. И вообще, если вдуматься в приведенные здесь и ниже цифры, сравнить их с известными нам по Земле, не устает поражаться масштабам. Внутренний океан составляет от 1000 до 15 000 км, тогда как глубина известных нам земных океанов – максимум 8–11 км²⁷. Толщина наружного слоя льда – 450 км (см. ниже), тогда

²⁷ Правда, существует пока ничем не подтвержденная гипотеза о внутреннем водном океане на Земле.

как ледники в Антарктиде или Гренландии толщиной в 2–3 км поражают воображение. Вот уж поистине космические масштабы!

Спутники и ледяные планеты. Некоторые спутники имеют весьма интересное, сложное и необычное (тем более для спутников) строение. Например, у Титана, крупнейшего спутника Сатурна, оно таково: есть силикатное ядро (радиус примерно 1750 км), покрытое слоем льда высокого давления (толщиной примерно 450 км). А надо льдом находится океан воды толщиной до 300 км. Причем недавние исследования космического аппарата «Кассини» показали, что вода может быть не пресной, а соленой. Океан покрыт ледяной корой до 70 км, а надо льдом находится атмосфера протяженностью до 400 км (Язев 2018: 220–221).

У Тритона, крупнейшего спутника Нептуна, тоже есть интересные особенности. У него возможно существование силикатного ядра, причем оно должно быть самым мощным, самым массивным среди всех спутников планет-гигантов каменным ядром, до 70 % от полной массы, а более легкие вещества тела составляют только 30 % (пропорция даже больше, чем у Меркурия). На начальном этапе формирования за счет ударных явлений спутник имел больше энергии, что усиливало нагрев вещества. Соответственно, Тритон сформировал мощное ядро (за счет дифференциации, что усиливало нагрев), покрытое жидкой мантией (океаном растворенных солей с примесями аммиака и метана). По мере остывания океан покрылся ледяной корой, панцирем, до 180 км, а глубина океана достигает 190 км (Там же: 250–251).

Хотя строение карликового Плутона выглядит достаточно типичным, интересно, что лед разной природы входит во все части этой планеты. Предполагается, что у Плутона есть ядро, состоящее из силикатов с водяным льдом. Далее идет мантия из водяного льда, покрытая оболочкой из замерзших азота и метана (Ксанфомалити 1997: 195–6).

3.3. Рельеф и вулканическая деятельность

Факторы, влияющие на рельеф внешней оболочки. Очевидно, что о рельефе можно говорить, имея в виду только планеты с твердой поверхностью. При этом ледяные планеты тоже имеют определенный рельеф, но лед все-таки существенно сглаживает его. На рельеф влияет множество факторов: проявление деятельности

атмосферы и гидросферы, приливные силы, ударные силы астероидов и метеоритов, солнечный ветер и др. Существенное влияние оказывают и внутренние факторы, такие как гравитационные сжатия планет и особенно вулканическая деятельность, связанная с извержением магматических пород из поверхностных слоев мантии²⁸. При этом там, где подобная деятельность активна, налицо новый рельеф планеты (от старого порой не остается никаких следов). Поэтому для Земли, Венеры, некоторых районов Марса, где вулканическая деятельность имела место относительно недавно, речь идет о новом рельефе.

Ударные кратеры и бассейны. С другой стороны, там, где вулканическая деятельность давно прекратилась (например, на Луне, Меркурии и в ряде районов Марса, а также на некоторых спутниках), хорошо виден старый рельеф, возрастом вплоть до начала – последней трети 5-го миллиарда л. н. (то есть не осталось явных следов рельефа только за первые 200–400 млн лет существования планет). Соответственно, там наблюдается много ударных кратеров²⁹.

Отсутствие атмосферы особенно сильно влияет на число таких кратеров и их величину. Совпадение этих двух условий сделало поверхности Меркурия и Луны наиболее кратерированными. Однако внешний вид меркурианских кратеров несколько отличается от лунных, что объясняется разным составом пород и силой тяжести. Для сравнения планет используется подсчет плотности кратеров величиной более 10 кв. км каждый на 1 млн кв. км. По этому показателю лидирует Луна – на ней 392 таких кратера на каждый миллион кв. км, на Меркурии их чуть меньше – 360, на Марсе – 210. На Венере же с ее сверхплотной атмосферой всего 2 крупных кратера на 1 млн кв. км. Тем не менее и на Венере в целом сохранилось достаточно много кратеров ударного происхождения диаметром от 10 до 300 км. Яркий пример – импактный кратер Клео-

²⁸ Вероятно, оказывала влияние также сейсмическая деятельность, но ее следы обнаружить сложнее. Тем не менее в 2019 г. французский сейсмограф впервые зафиксировал землетрясение на Марсе в виде очень слабых толчков.

²⁹ В целом метеоритные кратеры – наиболее распространенная форма рельефа на поверхности спутников Марса – Фобоса и Деймоса, спутников Юпитера – Ганимеда, Каллисто, Европы, спутников Сатурна – Дионы, Мимаса, Тетиды, Реи и, вероятно, почти всех тел Солнечной системы, имеющих достаточно разреженную атмосферу и твердую поверхность (Тебиева 2015: 95).

патра с диаметром внешнего вала 100 км, находящийся в 300 км от самой высокой вершины гор Максвелла. Следы достаточно крупных ударных кратеров находят и на Земле³⁰.

Безатмосферная Луна вся испещрена ударными кратерами. Только на ее видимой стороне их 15 тыс. На Луне расположены 300 тыс. кратеров размером более 1 км (Язев 2018: 156), здесь же находится и крупнейшее во всей Солнечной системе ударное образование – кратер Южный полюс – Эйткен (ЮПЭ). Он имеет фантастические размеры – 2400×2050 км.

Природа и происхождение этого уникального образования остаются одной из наиболее важных проблем в современных исследованиях Луны. Общий перепад высот в бассейне ЮПЭ достигает значительной величины – более 16 км (Шевченко 2015: 64), при этом некоторые детали рельефа продолжают меняться в течение значительного периода времени после момента образования ударного кратера.

Очень крупные области столкновений с планетезиμαлиями и астероидами на планетах образуют бассейны – приблизительно круглые низменности, заполненные застывшей лавой. Они имеют диаметр от нескольких сотен до тысячи и более километров. Наиболее четко бассейны выражены на Луне, но имеются также на Марсе и Меркурии. Многие из них образовались в результате падения крупных планетезиμαлей около 4 млрд л. н. При таких падениях кора растрескивалась, гигантские кратеры заполнялись лавой. Лунные моря являются типичным примером таких бассейнов (Гебиева 2015: 95–96).

Океанические впадины и горы. Несмотря на отсутствие воды на планетах земной группы, их внешняя кора, как и на Земле, делится на литосферную (материковую) и «океаническую». Этому очень интересному феномену, связанному с наиболее крупномасштабными элементами рельефа, мы еще уделим значительное вни-

³⁰ На Земле настоящих метеоритных кратеров почти не обнаружено, однако имеются кольцевые структуры – астроблемы, – слабо выраженные следы древних метеоритных кратеров. За все геологическое время на Земле сохранилось до настоящего момента около 150 следов таких импактных кратеров. Они распространены чрезвычайно неравномерно, большая их часть приходится на Северную Америку, Европу и Австралию. Самый молодой кратер Земли находится в штате Аризона (США). Возраст его оценивается в 50 000 лет, его диаметр – около 1,2 км, а глубина – около 200 м (Сиротин 2013: 1081).

мание в *Главах 4 и 5*. Литосферная кора на планетах намного или даже многократно толще океанической (на Земле толщина океанической коры 5–10 км, литосферной – 30–60 км, под горами – до 70 км). На Луне уже очень давно стали открывать «моря». И хотя реальных морей там нет, поверхность под этими «морями» отличается от «неморской». На Марсе же, возможно, когда-то действительно были моря или даже океан (рельеф повсюду имеет следы древнего присутствия воды; об этом мы подробнее расскажем в *Главе 9*).

На всех планетах есть горы или плоскогорья, расселины и выступы, крупные возвышенности и низменности (то, что на Земле называется грабенами и горстами)³¹. Но везде много своих особенностей. Так, на Марсе есть горы, но нет горных хребтов (Язев 2018: 118). Горные цепи, то есть складчатые пояса тектонического происхождения, хорошо выражены только на Земле. На Марсе имеются области так называемого хаотического рельефа, испещренные провалами, сформировавшимися, вероятно, в результате подсыхания грунтового льда. Сложными образованиями являются полярные шапки Марса, в которых выделяют сезонную и постоянную части (Тебиева 2015: 96). Долины тектонического происхождения («разломы») имеются на Земле, Венере и Марсе (Там же: 95).

В коре всех планет и Луны установлены системы разломов. Отчетливо видны трещины растяжения, приведшие к образованию на Земле, Марсе и Венере рифтовых систем. Только на Земле и Меркурии пока установлены структуры сжатия, и только на Земле выделяются гигантские сдвиги и шарьяжи (Кац и др. 1984).

На Меркурии есть так называемые эскарпы, которые, вероятно, возникли в результате небольшого гравитационного сжатия планеты. Это выступы высотой 2–3 км, которые разделяют два района

³¹ Грабен (нем. *Graben* – ров, канава) – участок земной коры, опущенный относительно окружающей местности по крутым или вертикальным тектоническим разломам. Длина грабенов достигает сотен километров при ширине в десятки и сотни километров. Горст (от нем. *Horst* – гнездо) – участок земной коры, резко приподнятый над окружающей местностью по вертикальным или крутонаклонным тектоническим разломам (сбросам и взбросам) до нескольких сотен и тысяч метров в высоту, длиной в десятки сотен километров при ширине в десятки километров с крутыми склонами, ограниченный и образовавшийся вследствие тектонических движений.

поверхности, в своем роде уникальные образования в Солнечной системе. На Меркурии больше скал, чем на Луне.

Полушария планет дихотомичны, то есть имеются асимметрии полушарий, связанные с большими различиями в их рельефе. Об этом мы расскажем в следующей главе.

Горы и вулканы Марса. Наиболее выдающиеся горы находятся на Марсе, ландшафт которого является очень разнообразным по выделяемым типам рельефа. Основные типы рельефа поверхности – это кратеры вулканического и ударного происхождения, вулканы, равнины, покрытые лавовыми потоками, материал вулканических выбросов, а также глубокие протяженные каньоны и русла некогда текущих рек (Пугачева, Шевченко 2015: 196). Но особенно впечатляет, что на Марсе находятся высочайшие горы в Солнечной системе, а также и перепады высот на этой планете просто выдающиеся – они достигают 35 км (Язев 2018: 119), что намного больше, чем на Земле³².

В то же время возвышенные плато на Марсе по своим размерам близки к земным континентам и высятся на 4–6 км над средним уровнем (средним радиусом) планеты. Если бы на Марсе существовала гидросфера, подобная океанам Земли, эти области оказались бы выше уровня моря, превратившись в материки. В западном полушарии Марса, вблизи западной оконечности каньона Маринера, расположено поднятие Фарсида высотой 5...7 км. Оно имеет огромную протяженность – 3000 км в широтном направлении и 4000 км в меридиональном. Здесь расположены три гигантских вулкана (гора Аскрийская, гора Павлина и гора Арсия). К северо-западу от них, вне Фарсиды, находится гигантский вулкан Олимп. Оценки высоты этих гор существенно различаются (в зависимости от уровня нулевой точки). Однако, как ни измеряй, это самые вы-

³² Впрочем, не исключено, что в Солнечной системе могут встретиться и еще большие перепады высот. Например, на небольшом спутнике Урана Миранде (диаметр 480 км) на фотографиях интересного образования, получившего условное название «шеvron» (трапеция в районе кратерного рельефа), обнаружен разлом глубиной 20 (!) км, а поскольку высота кратеров порядочная (на фото видны детали от 4,6 км и выше), то и перепад высот получается огромный. Вообще Миранда, несмотря на ее небольшие размеры, по образному выражению одного из геологов, представила коллекцию всех геологических форм, какие встречаются в Солнечной системе (Ксанфомалити 1997: 205–206).

сокие горы не только на Марсе, но и, по-видимому, в Солнечной системе.

Крупнейшая гора, а также и крупнейший вулкан Марса и всей Солнечной системы – Олимп. Диаметр ее основания – 550...600 км, максимальная высота – 22 км. Поскольку к западу от Олимпа находится протяженная равнина Амазония с отрицательными относительно нулевого уровня высотами, то по сравнению с ее уровнем Олимп возвышается на 26 км. То есть в зависимости от точки отсчета Олимп выше высочайшей точки Земли Эвереста в 2,5–3 раза! А по периметру основания вулкана Олимп прослеживается крутой уступ высотой в несколько (до 7...8) километров. То есть только высота уступа в основании Олимпа сопоставима с высочайшими вершинами на Земле. Для сравнения, крупнейший щитовой вулкан (то есть вулкан пологой формы с широким и довольно глубоким кратером, или кальдерой, в центре) на Земле – гора Мауна-Лоа на Гавайских островах – имеет диаметр основания на дне океана около 200 км и высоту 9 км. Его объем составляет лишь около 10 % от объема грандиозного марсианского вулкана.

Олимп относится к типу щитовых вулканов. Подобные образования 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 (Язев 2018: 122).

Три вышеуказанных вулканических конуса Фарсиды несколько меньше, но и они потрясающе велики и высоки. Высота горы Аскрийской – 18 км; Арсии – 18,2 км; гора Павлина меньше высотой, «всего» 14 км. Зато у нее наиболее глубокая кальдера (то есть котловина кратера) – 4,5 км при диаметре 45 км.

Примерно в 80° к западу от Олимпа, в восточном полушарии, на той же широте, посередине огромной равнины Элизий находится еще одна исполинская гора. Это вулкан Элизиум, сопоставимый по габаритам с конусами Фарсиды: диаметр основания – 500 км, высота – 14 км, диаметр кальдеры – 14 км. Это пятая в ряду самых высоких вершин в Солнечной системе (Там же: 122–124).

Стена Япета. Масштабы и высоты гор Марса потрясают, однако чудеса рельефа есть во многих местах Солнечной системы. Так,

на снимках третьего по величине спутника Сатурна Япета был обнаружен уникальный горный хребет, кольцом опоясывающий экватор спутника. Его высота достигает 13 км (в полтора раза выше, чем Эверест), ширина – 20 км, протяженность – около 1300 км. То есть это очень солидный горный хребет, получивший неофициальное название «стена Япета» (тогда как на Марсе хребтов нет). Из-за этого хребта Япет напоминает грецкий орех или целлулоидный мячик, склеенный из двух одинаковых половинок (хребет, напомним, проходит по экватору). Плотность спутника такая низкая, что он, согласно модели, должен весь состоять из льда. Поэтому происхождение хребта – настоящая загадка. Ученые считают, что он мог появиться в результате сжатия пород или прорыва материала из глубин спутника на его поверхность. В любом случае это должен был быть очень необычный процесс, возможно, как-то связанный с неоднородной окраской Япета.

Венера. Общее число вулканических объектов на этой планете больше 1600, при этом много очень крупных вулканов. Размеры более 150 таких объектов превышают 100 км в поперечнике. Вулканы на Венере не похожи на земные, поэтому для них введена специальная классификация. В числе вулканических объектов Венеры находятся так называемые венцы, или короны (концентрические валы в виде зубчатых овалов), арахноиды (от «арахнос» – паук; паутинные сети, включающие в себя радиальные структуры и концентрические валы), извилистые лавовые каналы протяженностью до 1000 км, тессеры и др.³³ Больше всего на Венере вулканов в форме конусов и куполов.

Значительная часть поверхности планеты геологически сравнительно молода (порядка 500 млн лет), около 90 % ее поверхности покрыто базальтовой лавой. Это свидетельствует об огромном количестве щитовых вулканов, которые изливались не мощными выбросами, а в виде растекающихся вулканических потоков длиной до сотен километров (Шкодзинский 2017: 12). Хотя на Венере очень заметны проявления вулканической деятельности, чего-либо похожего на признаки крупномасштабной тектоники плит (как на

³³ Возникновение арахноидов может объясняться опусканием литосферы на место излившейся лавы. Растрескивание застывавших верхних частей текущих лавовых потоков и надрывание друг на друга возникавших плитчатых обломков могли приводить к образованию тессеров – поверхностей, словно покрытых черепицей (Шкодзинский 2017: 12).

Земле) не обнаружено (сравнение тектонической эволюции планет земной группы см.: Head, Solomon 1981). Иными словами, кора Венеры более стабильна, чем кора Земли (Язев 2018: 66). Вообще важно отметить, что плиты с их тектоникой являются уникальной чертой земной литосферы (во всяком случае, на современном уровне знаний).

Вулканическая деятельность создала весьма необычный рельеф на Венере: русла лавовых «рек» и потоков и вышеупомянутых венцов.

И равнины, и тессеры пересекаются протяженными на тысячи километров желобами, образованными рядами тектонических разломов. По топографии и морфологии они похожи на так называемые рифтовые зоны Земли и, видимо, имеют ту же природу. На снимках обнаружены загадочные «русла» длиной от нескольких сотен до нескольких тысяч километров и шириной от 2–3 до 10–15 км. Они имеют типичные признаки долин, прорезанных течением какой-то жидкости, меандровидные извилины, расхождение и схождение отдельных «протоков», а в редких случаях – нечто вроде дельты. В начале самого длинного русла, названного долиной Балтис, протяженностью около 7 000 км при очень выдержанной (2–3 км) ширине, находится базальтовый вулкан поперечником около 100 км. Сначала считали, что по этим «руслам» течет горячая, долго не застывающая лава. Но расчеты показывают, что на пути длиной 7 000 км у потока базальтовой лавы не хватило бы запаса тепла, чтобы безостановочно течь и подплавлять вещество базальтовой же равнины, прорезая в ней русло. Возможно, потоки – это сильно перегретые коматиитовые лавы или еще более экзотические жидкости вроде расплавленных карбонатов или расплавленной серы. Можно предположить, что это глубокий тектонический разлом, заполненный горячей жидкой лавой, постоянно подогреваемой эндогенным теплом планеты.

Небольшие лавовые русла известны и у некоторых земных базальтовых вулканов. На Земле эти русла короткие – до нескольких десятков километров в длину. Они, видимо, родственны потокам на Венере. Есть такие русла и на Луне. Однако лавовые русла Земли и Луны существенно меньше русел Венеры, так что загадка происхождения последних остается пока нерешенной.

Кольцевое обрамление структур с поперечником от 150 до 1000 км состоит из систем трещин, широких или узких гряд с концентрическим или радиально-концентрическим рисунком. Часть этих структурных элементов моложе окружающих равнин, часть – древнее, что говорит о многоактном характере образования этих структур. Явные аналоги венцов Венеры на других планетах земной группы неизвестны. Оказалось, что часть выбросов из многих кратеров ведет себя как жидкотекучая субстанция, образуя направленные обычно в одну сторону от кратера обширные потоки длиной в десятки километров, а иногда и больше (Галанин 2012).

Вулканическая деятельность. Вулканическая деятельность на Луне и Меркурии прекратилась давно. В то же время на Марсе извержения Олимпа, возможно, были еще сравнительно недавно, только 2 млн лет назад. На Венере пик вулканической деятельности прошел где-то 300 или более миллионов лет назад. Но даже сегодня вулканическая активность Венеры, вероятно, не символическая. Обнаруженные сильные изменения концентрации сернистого газа SO_2 в 2006–2007 гг. и наблюдения с борта «Венера-экспресс» четырех «горячих пятен» с температурой $830\text{ }^\circ\text{C}$, по-видимому, являются прямым подтверждением современной вулканической активности Венеры. 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 (Язев 2018: 66–67).

Однако если не принимать во внимание возможное наличие действующих вулканов на Венере, то таковые в настоящее время имеются только на Земле и спутнике Юпитера Ио. На последнем идет непрерывная вулканическая деятельность. У крупных планет энергия для вулканизма создается за счет конвекции или других источников. Но у Ио источником разогрева недр являются другие силы. Наиболее распространенная гипотеза о возможных источниках энергии для этого – мощные приливы, вызванные гравитационным полем Юпитера. Ио испытывает мощные колебания (либрации), что приводит к очень сильным приливным деформациям литосферы из-за огромного притяжения близко расположенного Юпитера.

В результате в недрах Ио выделяется много тепла, что приводит к мощной вулканической активности. Но есть и предположение, что энергию дают электрические токи, возникающие при движении Ио в магнитном поле Юпитера (Тебиева 2015: 95). По силе вулканической активности Ио существенно превосходит Землю и, вероятно, является наиболее активным в плане вулканизма телом в составе Солнечной системы.

Весьма любопытно, что, помимо обычного вулканизма, когда результатом извержения является горячая лава (магма), есть и особого рода вулканизм на ледяных планетах, где господствуют очень низкие температуры. Это явление называется *криовулканизмом*, и в широком смысле к нему относится вулканическая деятельность, происходящая при так называемых криогенных температурах, то есть при температуре кипения жидкого азота ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) и ниже. При этом извергается не расплавленная горная порода, а вода, аммиак, смеси метана с углеводородами, азот и другие вещества как в жидком, так и в газообразном состоянии. Впервые явление криовулканизма обнаружено на спутнике Нептуна Тритоне, где он предположительно определяется солнечной энергией и в меньшей степени приливным воздействием гравитационного поля Нептуна. Есть заметные следы криовулканизма на Плутоне. О криовулканизме мы еще будем говорить в следующей главе.

3.4. Некоторые сведения об отдельных оболочках и особенностях планет

3.4.1. Атмосферы

Общие сведения. Безатмосферные планеты. Атмосферы есть не у всех планет и только у некоторых спутников. Состав атмосфер весьма различается, так же как их плотность и другие характеристики. В некоторых атмосферах есть водяной пар, в других его нет. Атмосферы планет-гигантов состоят большей частью из водорода и гелия. Чудовищно разреженная атмосфера Меркурия, кстати, тоже состоит из гелия, поставляемого солнечным ветром. У Марса и Венеры преобладающим компонентом (свыше 95 %) атмосферы является углекислый газ (Савченко, Смагин 2013: 10). Есть планеты, где в атмосфере господствует азот (Земля, Титан). Метан присутствует в атмосфере ряда планет, например Урана. Как правило, атмосферы, с одной стороны, ослабляют поток солнечной радиа-

ции, поступающей на поверхность планеты, а с другой – оказывают так называемый парниковый эффект, задерживая тепло, в результате чего климат на атмосферных планетах делается теплее. Сила такого влияния, конечно, зависит от химического состава, плотности и других параметров атмосфер. Об этом мы поговорим далее.

Все планеты можно разделить на две группы: там, где атмосферы играют реальную роль в жизни планеты (в ее защите от астероидов и метеоритов, солнечного ветра; в формировании климата и т. п.; среди планет земной группы это Венера и Земля); и там, где разреженные атмосферы не играют существенной роли в жизни планеты. Среди планет земной группы такими являются Меркурий и Луна (строго говоря, у первого атмосфера примерно на 10 порядков менее плотная, чем земная, у второй – на 14 порядков [Шевченко 2015: 44])³⁴. Считается, что сразу после образования они имели какую-либо реальную атмосферу, но затем ее потеряли. Две основные причины могут повлиять на потерю атмосферы: близость к Солнцу и малая масса. Близость к Солнцу затрудняет удержание атмосферы из-за влияния солнечного ветра. А чем дальше от Солнца, тем меньше тепловая скорость молекул, поэтому меньшему телу легче удерживать атмосферу. Малая масса не позволяет держать молекулы газов за счет гравитации (эти причины оказали влияние на ситуацию на Марсе и большинстве спутников). Но полностью это, конечно, не объясняет наличия или отсутствия атмосферы, ее мощности и многого другого. Вариативность в характеристиках атмосфер существенно больше, чем в структуре планет. Почему? Вероятно, по причине того, что структура формируется более жесткими влияниями (гравитацией), а атмосфера не является столь важной для планеты (иное дело – для жизни).

Марс занимает промежуточное положение, атмосфера у него есть, но сильно разреженная, ее плотность в 160 раз меньше, чем у Земли. В свою очередь, плотность атмосферы Венеры, напротив,

³⁴ Основной состав газовых частиц, насыщающих окололунное пространство, образуется атомами и ионами водорода, гелия, неона и аргона (Там же: 47). Данные прибора КА «Сервейер-7» показали, что каждым местным лунным утром огромное количество частиц перемещается в основном с запада на восток либо с востока на запад, а не сверху вниз или снизу вверх. Кроме того, их скорость была значительно ниже, чем должна была быть у частиц, выброшенных вследствие падения микрометеоритов. Этот экзотический «ветер» может вызываться электростатическими свойствами лунной поверхности. Дневная часть Луны заряжена положительно, ночная – отрицательно (Там же).

в 90 раз больше земной (Язев 2018: 80; Савченко, Смагин 2013: 10). Разреженные атмосферы обнаружены у галилеевых спутников Юпитера и у Тритона. Зато у Титана, самого крупного спутника Сатурна, есть плотная атмосфера. Пожалуй, это единственный спутник с мощной атмосферой высотой до 400 км, сквозь которую не видна его поверхность (так же, как и на Венере). Причем давление в атмосфере Титана выше, а масса атмосферы больше, чем на Земле. Благодаря этой атмосфере имеют место довольно сильные ветры (Язев 2018: 221). В атмосфере Титана отмечено несколько слоев неплотных облаков, в том числе на очень больших высотах.

Атмосферы планет земной группы наиболее исследованы. У планет, у которых они есть, атмосферы (подобно одежде) в значительной мере создают климат благодаря *парниковому эффекту*. При отсутствии атмосферы средняя температура поверхности Земли (так называемая равновесная) составляла бы $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, а фактически за счет парникового эффекта она на $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, то есть равняется $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оранжерейный эффект разреженной атмосферы Марса, естественно, намного меньше. Он повышает его температуру всего на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ при равновесной температуре $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$. Фактическая же средняя температура марсианской поверхности $-53\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но самый большой оранжерейный эффект у Венеры. Ее плотная атмосфера и густой облачный покров обуславливают перегрев нижних слоев воздуха и поверхности литосферы на $524\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вместо равновесной в $+44\text{ }^{\circ}\text{C}$ действительная средняя температура поверхности Венеры $+480\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Тебиева 2015: 204).

Земля. Атмосфера Земли делится на несколько оболочек. Если говорить кратко, ее нижний слой – тропосфера – пролегает от Земли до высоты от 8 до 18 км в зависимости от широты и времени года. Она вмещает в себя более 80 % всего воздуха, причем основная часть этих 80 % располагается в нижних слоях тропосферы. Далее идет стратосфера (от 15 до 55 км). Между тропосферой и стратосферой располагается так называемая тропопауза. За стратосферой идет мезосфера (от 55 до 80 км), а между ними располагается так называемая мезопауза. Как мы видим, слои атмосферы довольно явно разделены. Далее на многие сотни километров простирается так называемая ионосфера. Она имеет сложное строение (иногда в нее включают и мезосферу с мезопаузой, поскольку ионизация ста-

новится существенной уже на высоте 60 км). Иногда говорят о внешней водородной короне Земли (или экзосфере), которая тянется на многие тысячи километров (последние данные говорят о более чем 600 тыс. км) и имеет высокую температуру (Язев 2018: 81–82). Сразу возникают ассоциации с короной Солнца. Мы видим, что у существенно отличающихся тел возникают похожие явления.

Исключительно интересно ведет себя температура – здесь не наблюдается простой линейной зависимости. В тропосфере она быстро снижается по мере набора высоты (все мы это знаем по опыту авиаполетов). В стратосфере до 25–30 км температура одинаковая, в районе $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но выше она начинает подниматься и у границы со стратопазузой становится равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Далее расположена мезосфера. В ней температура сначала поднимается (за счет разложения озона на молекулярный и атомарный кислород) и на высоте 50 км достигает так называемого температурного максимума ($+8\text{ }^{\circ}\text{C}$), а потом падает до $-68\text{ }^{\circ}\text{C}$ у границы 70 км. Но после мезопазузы ситуация меняется, температура вновь начинает расти. Ионосфера имеет высокую температуру, которая поднимается с высотой и вырастает до $700\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Там же).

Отметим, что в стратосфере формируется озоновый слой, наибольшая концентрация озона наблюдается на высоте 25 км. Озон, как известно, задерживает губительное для живого солнечное ультрафиолетовое излучение. Налицо положительная обратная связь. Для образования озона необходим свободный молекулярный кислород, который вырабатывает биосфера. А озоновый слой защищает биосферу. Если добавить, что и кислород появился благодаря биосфере, то система предстает очень своеобразной и удачной эволюционной находкой. Кроме того, в создании озона участвует само космическое излучение (ультракороткое), которое озоном же и поглощается. Это что-то вроде паттерна комплементарности (дополнительности) различных систем.

Марс. Несмотря на то, что слой атмосферы тонкий, марсианские ветры дуют с огромной скоростью и легко поднимают сильнейшие пыльные бури по всей планете (Сиротин 2006: 82). В атмосфере Марса постоянно содержится аэрозоль, который включает несколько компонентов. Но в целом можно считать это очень тонкой пылью, которая даже в спокойные периоды уменьшает количество солнечной радиации, достигающее поверхности, в два раза. Общее

количество пыли оценивается в массу, соизмеримую с количеством пыли во всей земной атмосфере. В итоге возникают глобальные пылевые бури, которые обычно начинаются весной или летом в субтропиках южного полушария. Механизм зарождения и развития их до сих пор неизвестен, но ясно, что в местах их зарождения в атмосфере развивается сильная неустойчивость, ветровые потоки поднимают пыль, которая повышает температуру атмосферы, что, в свою очередь, способствует усилению ветра. Достаточно быстро, в течение нескольких недель, реже в течение одного-полутора месяцев, вся планета окутывается пылевой бурей. Пыль поднимается до высоты в 50 км, то есть заполняет всю тропосферу и стратосферу Марса. Столь характерное для атмосферы этой планеты стремительное и кратковременное понижение атмосферного давления при резком усилении ветра и смене его направления вызывается прохождением ветровых смерчей. Весь комплекс явлений в атмосфере так или иначе увязан с пылевыми смерчами, или «пылевыми дьяволами», которые принимают активное участие в зарождении и развитии пылевых бурь.

На полюсах Марса имеются ледяные шапки, зимой они растут, летом – уменьшаются. Когда температура воздуха охлаждается до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, углекислый газ, находящийся в атмосфере, замерзает до твердого состояния и выпадает на поверхность белым снегом, образуя сухой углекислый лед (замерзание атмосфер есть и на других планетах, см. о Плуtone ниже).

Венера. Давление на поверхности планеты огромное, в десятки раз выше, чем на Земле, поскольку у поверхности атмосфера очень плотная, ее плотность всего в 14 раз меньше плотности воды. А за счет многокилометровой атмосферы давление на поверхности такое, какое на Земле в океане достигается на глубине около 1 км! (Сиротин 2006: 67.) Эта плотность атмосферы наряду с тем, что 97 % атмосферы состоит из двуокиси углерода (CO_2), создает чудовищный парниковый эффект (Фишер 1990). В результате температура на поверхности почти $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом в данных условиях перепады температуры днем и ночью практически отсутствуют, и даже в горах или на полюсах различия в температуре не превышают $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У плотной венерианской атмосферы есть очень интересные особенности. У ее поверхности ветры довольно слабые. Но с высо-

той картина резко изменяется, особенно в экваториальной зоне, где они достигают огромной скорости. Вихревые турбулентные потоки, особенно в зоне основного облачного слоя (то есть на высоте 48–71 км), достигают огромной скорости – до 100–140 м/с. Еще более интересным является тот факт, что ее атмосфера вращается во много раз быстрее, чем сама планета (так называемая суперротация атмосферы [Язев 2018: 60]). Как мы помним, Венера вращается вокруг своей оси очень медленно, ее сутки равны более 240 земных суток. Существует четырехсуточный период вращения облачного слоя, который совпадает с периодом циркуляции атмосферы. Нет удовлетворительного объяснения, почему у такой «ленивой» планеты, делающей всего один оборот за 243 суток, существует столь быстрое движение атмосферы (см.: Сиротин 2006: 67–68).

Газовые планеты. Атмосферы у четырех планет-гигантов, как уже было сказано, представляют собой не воздушную оболочку над твердью, как на внутренних планетах, а часть планеты, ее верхнюю оболочку (каковой на планетах земной группы выступает твердая оболочка). На определенной глубине атмосферы незаметно (точнее, нечетко) переходят в газовой-жидкую (или иного состава) мантию. Но, как и у планет земной группы, эти атмосферы имеют большую (в тысячи километров) высоту. Таким образом, атмосферы у этих планет делятся, грубо говоря, на поверхностную (оболочечную) и надповерхностную, где можно наблюдать облака. Но указать границу этого раздела не так просто. Как и положено в атмосферах, здесь нет спокойствия, напротив, бушуют ветры и ураганы, вихри и смерчи, наблюдаются воздушные течения и т. п. Более и менее нагретые воздушные потоки создают перепады давления и, соответственно, силу для воздушных движений, а также разную окраску фрагментов атмосфер. Сила ветров местами фантастическая. Характерной чертой атмосфер планет-гигантов являются огромные пятна (здесь они имеют некоторое внешнее сходство с Солнцем), природа которых связана с вихревыми потоками. При этом такие пятна имеют на каждой планете свою окраску. Наиболее известным является Большое Красное Пятно на Юпитере.

Юпитер. Потоки воздуха, выносящие внутреннее тепло к поверхности, внешне проявляются в виде светлых зон и темных поясов. Облака, образующие зоны, располагаются на более высоком уровне, а их светлая окраска объясняется повышенной концентра-

цией ярко-белых кристаллов аммиака. Располагающиеся ниже темные облака поясов состоят в основном из красно-коричневых кристаллов гидросульфида аммония и имеют более высокую температуру. Эти структуры представляют области нисходящих потоков. Зоны и пояса имеют разную скорость движения в направлении вращения Юпитера. Это явление выражается в существовании устойчивых зональных течений или ветров, постоянно дующих в одном направлении. Скорости в этой глобальной системе восточных и западных ветров достигают от 50 до 150 м/с. Самые мелкие светлые образования, наблюдающиеся на снимках, имеют поперечник в несколько десятков километров. Специалисты считают, что наблюдаемые детали по своей природе являются кучевыми облаками, хорошо известными нам на Земле как предвестники грозовых туч. Анализ данных показал, что по составу кучевые облака на Юпитере, как и на Земле, вероятнее всего, являются скоплениями водяных паров. В то же время поиски воды в атмосфере Юпитера дают самые противоречивые результаты.

Уже в течение последних 300 лет астрономы наблюдают огромное красное пятно эллиптической формы (намного больше диаметра Земли). Возможно, оно представляет собой свободно мигрирующий в атмосфере вихрь антициклонического типа. Однако его происхождение и длительное существование в качестве устойчивого антициклона в атмосфере Юпитера остается в значительной степени необъясненным (Шевченко 2014).

Атмосфера Юпитера вращается неоднородно в разных широтах. И, подобно тому, что мы видели у Венеры, у Юпитера скорость вращения газовой оболочки отличается от скорости вращения остальной части планеты (которая и сама вращается неоднородно). Это и неудивительно, с учетом скорости вращения Юпитера – менее 10 часов.

Сатурн. Атмосфера Сатурна во многом аналогична юпитерианской по строению и составу (это водород и гелий), но поверхность облаков выглядит более однородной, что, возможно, объясняется наличием протяженной надоблачной дымки. Подобно Юпитеру, Сатурн также имеет развитую систему поясов и зон. Однако они никогда не бывают видны так ясно, как полосы на Юпитере. Метеорология Сатурна и Юпитера сходна, но пояса и зоны Сатурна доходят до гораздо более высоких широт. Как и на Юпитере, обра-

зование вихрей определяется источниками энергии, находящимися глубоко в атмосфере. Скорость зональных ветров на Сатурне очень велика. В районе экватора она достигает 400–500 м/с, что в четыре раза выше, чем на Юпитере. По аналогии с Большим Красным Пятном Юпитера одно из вновь найденных гигантских овальных образований Сатурна названо Большим Коричневым Пятном (Ксанфомалити 1997: 176, 177).

Уран. Атмосфера Урана напоминает атмосферу Юпитера и Сатурна, вероятно, она характеризуется более высоким содержанием метана, чем у более массивных собратьев. Аммиак в атмосфере предположительно отсутствует или его значительно меньше, чем в атмосферах Юпитера и Сатурна (Сиротин 2006: 109). Из-за сильного поглощения в красной части спектра Уран имеет зелено-голубой цвет. Атмосфера этой планеты содержит 12 % гелия (как у Юпитера), остальное – главным образом водород. Заметная составляющая Урана – это метан, до 2,3 %. Но проблема происхождения и образования метана довольно сложна. Атмосфера Урана очень эффективно выравнивает (за счет циркуляции) температуру на всех широтах (Ксанфомалити 1997: 192, 194, 195).

Нептун. Так же как и у других планет-гигантов, атмосфера Нептуна состоит главным образом из водорода и гелия. Высота атмосферы может достигать 3–5 тыс. км, ее давление на дне довольно велико, но его недостаточно для перехода водорода в жидкое состояние, как на Юпитере и Сатурне (Там же: 208). Наиболее заметная структура в южном полушарии, обнаруженная «Вояджером-2», была названа Большим Темным Пятном. Это огромная система, хотя и в два раза меньше, чем Большое Красное Пятно Юпитера, но имеющая размеры примерно с Землю. В отличие от Большого Красного Пятна она оказалась недолговечной и к 1994 г. исчезла. Но космический телескоп «Хаббл» затем обнаружил новое темное пятно в северном полушарии. Согласно современным представлениям, темные пятна в атмосфере Нептуна – дыры в первом слое облаков, позволяющие увидеть более глубокие облачные слои. Отдельные белые перистые облака в тропосфере Нептуна быстро изменяются, часто образуясь и исчезая всего за несколько часов. Возможно, что Нептун – планета очень быстрых ветров в Солнеч-

ной системе. Местами скорость ветра достигает 300 м/с (Тебиева 2015).

Особые случаи. Кислород в атмосферах. Цвета атмосфер. Плутон имеет разреженную атмосферу, менее плотную, чем даже у Марса. Она в основном содержит азот. Атмосфера Плутона обладает уникальным свойством менять плотность и состав, и даже практически исчезать в зависимости от положения планеты на орбите вокруг Солнца. В определенные периоды она замерзает и выпадает в виде инея, а в другие восстанавливается (Язев 2018: 262). Любопытный случай представляет спутник Юпитера Ио. Выбросы водорода, серы и прочего из вулканов создают у него облака в виде тора (бублика), охватывающего его орбиту (Там же: 192).

Выше мы говорили о составе атмосфер. Кислород в атмосферах планет если и присутствует, то в очень небольшой пропорции. Земля единственная из всех планет, обладающая кислородной атмосферой (но следует помнить, что это уже результат развития жизни и коэволюции геологической и биологической эволюций). Первоначально земная атмосфера была иной (см. *Главу 8*). Однако кислород встречается в атмосферах некоторых спутников, и происхождение его иное, чем на Земле.

В частности, молекулярный кислород – это основная компонента в атмосферах галилеевых спутников Европы и Ганимеда, которые, напомним, относятся к ледяным планетам (см. выше). Так как молекулы H_2 легко покидают атмосферу ледяных спутников из-за слабости их гравитационных полей, но удерживаются в системе сильным гравитационным полем планеты-гиганта, то обычно они образуют нейтральные облака в форме тора. С другой стороны, молекулы O_2 характеризуются низким коэффициентом абсорбции к поверхности из водяного льда, следовательно, у галилеевых ледяных спутников Юпитера образуются преимущественно атмосферы из молекулярного кислорода, хотя исходно разбрызгивание льда сопровождается преимущественно выбросом водяного пара. Наблюдения показывают, что Ганимед окружен относительно плотной приповерхностной O_2 -доминантной атмосферой и разреженной протяженной

короной из атомарного водорода (Шематович 2015: 272–274).

Атмосферы придают разную окраску планетам и спутникам, подобно тому как голубой цвет присущ Земле, а желто-белый – Венере. Так, красно-оранжевый и желто-коричневый цвета преобладают у Юпитера и Сатурна, Титана. Для Нептуна характерна аквамариновая окраска еще более глубокого тона, чем у Урана. Это объясняется присутствием сильных метановых полос поглощения в красной части спектра (Ксанфомалити 1997: 209). У планет и спутников, не имеющих значительных атмосфер, также имеется своя окраска. Всем известен красный цвет Марса³⁵, желтый цвет Луны мы наблюдаем постоянно, Меркурий имеет серый цвет, а Плутон – светло-коричневый. Словом, здесь наблюдается полнейшая индивидуальность.

3.4.2. Вода и льды различной природы

Вода в Солнечной системе, помимо Земли, достаточно распространена и на других телах Солнечной системы. В основном, правда, в виде пара или водяного льда, но в отдельных местах и в виде крупных водоемов, целых океанов, правда, подледных (прикрытых очень мощной толщей льда), в частности на спутниках Юпитера и Сатурна (Европе, Энцеладе, Каллисто и др.). Толща льдов и океанов на них очень велика и намного превосходит Землю. Поверхность спутника Юпитера Европы покрыта толстым слоем водяного льда (60–200 км), а под корой имеется (за счет тектоники) подкорковая вода, даже океан жидкой воды, объем его близок к объему земного океана. Геофизически допустимая мощность водно-ледяной оболочки другого спутника Юпитера – Каллисто – оценена в 270–315 км; мощность ледяной коры составляет 135–150 км, а толщина подстилающего водного слоя – 120–180 км (Кусков и др. 2009: 514). Крупные спутники Сатурна Рея и Диона также могут иметь подледные океаны (Язев 2018: 217). Таким образом, по запасам воды Земля может и уступать некоторым спутникам, но ее уникальность в том, что она обладает открытой и сложной гидросферой, обеспечивающей целый ряд необходимых для эволюции

³⁵ Красноватый цвет многих пород и поверхности Марса обусловлен содержанием гидроокислов (Шкодзинский 2017: 12).

планеты и существования жизни функций. Интересно отметить, что содержание H_2O в галилеевых спутниках возрастает с увеличением расстояния от Юпитера – от нуля в безводной Ио и 6–9 % в Европе до 46–48 % в Ганимеде и 49–55 % в Каллисто (Кусков и др. 2009: 514). Как мы упоминали выше, есть предположение о гигантском внутреннем океане в недрах Нептуна, который частично состоит из воды.

Мы также видим в Солнечной системе потенциальные гидросферы, находящиеся в составе атмосферы, – до замороженной и спрятанной гидросфер. Как всегда, перед нами целый веер разных форм, вплоть до абсолютно уникальных.

Марс и Венера. Есть предположения, что на некоторых планетах (на Венере – короткое время и на Марсе – длительно) имелаась и гидросфера. Об этом подробнее будет сказано в *Главе 9*. В виде льда на Марсе воды довольно много и в настоящее время, несмотря на то, что Марс сегодня – холодная планета с сухой поверхностью. Во-первых, его полярные шапки образованы не только сухим льдом осажденной атмосферной углекислоты (как мы не раз говорили, лед образуется разными веществами), но и слоями водяного льда. Во-вторых, в приполярных районах, на севере и на юге планеты вещество поверхности содержит десятки процентов водяного льда (до 50 %), который покрыт тонким слоем относительно сухого грунта (немного похоже на вечную мерзлоту в наших приполярных районах). Есть предположения и о подземных источниках жидкой воды (Ксанфомалити 2004). Так, до 10 % воды по массе может присутствовать под поверхностью экваториальной области Арабия. Не исключено даже, что на поверхности крутых склонов могут эпизодически происходить выплески грунтовых вод (см.: Митрофанов 2015: 158).

Венера сегодня – сухая планета. Что же способствовало потере ею воды? Это солнечный ветер, который уносит водород из атмосферы. Если на Земле проникновению солнечного ветра препятствует сильное магнитное поле, то на Венере этого нет. Это способствовало тому, что водород из атмосферы уносится солнечным ветром, а остатки водорода и кислорода в верхних слоях атмосферы связываются с серной кислотой. Кроме того, на Венере присутствует в пять раз большее электрическое поле, чем на Земле, по-

этому «электрический ветер» выбрасывает из атмосферы Венеры водород и кислород (Язев 2018: 63).

Климат. Кое-что о климате уже было сказано, когда мы рассматривали атмосферы планет. Естественно, что климат на планетах очень различается. На него, как и на рельеф, влияют многие факторы. Это расстояние от Солнца и альbedo планеты (то есть сила отражения солнечных лучей; ведь очевидно, что лед сильнее отражает лучи, чем темный грунт), геометрия планеты, наклон ее оси, наличие атмосферы и гидросферы, а также внутренние источники энергии. Так, на спутнике Сатурна Титане, вероятно, есть криовулканизм с выбросом воды, аммиака и метана из недр спутника, что может приводить к сменам климата. Воздействие атмосфер мы рассмотрели. Большое влияние на формирование теплового поля поверхности планет оказывает гидросфера. Неудивительно, что когда она имела на Марсе, то и климат там был теплее, но она исчезла по не до конца понятным причинам (см. об этом в *Главе 9*).

Все это формируется в довольно сложную систему взаимодействия. Здесь можно говорить о том, что конечный результат не выводится из начальных условий, а зависит от взаимодействия компонентов (это известный *закон эмерджентности*, то есть несводимости свойств системы к сумме свойств ее элементов; у системы в целом появляются свойства, которыми ни один из ее компонентов не обладает). Выше мы, например, говорили о роли пыльных бурь на красной планете – Марсе, о том, что углекислота там сезонами замерзает; только что было сказано о роли воды там в прошлом и настоящем. Все это позволяет ученым сделать вывод, что климат Марса во многом определяется тремя основными циклами: CO₂, H₂O и пыли (Кораблев и др. 2009: 347; 2012: 347). В последние 100 лет на Марсе, как и на Земле, идет процесс потепления (Галанин 2012). Это весьма любопытно в связи с очень активными дискуссиями о причинах потепления на Земле. Возможно, оно имеет более широкий масштаб и связано с солнечными процессами.

В отношении климата важно иметь в виду, что энергия сама по себе «не работает», то есть не возбуждает природных процессов, если не переходит в другие виды энергии. В соответствии с этим ее свойством наблюдается такой кажущийся парадокс: активность

возбуждаемых на планете экзогенных процессов зависит не от обилия поступающей солнечной радиации, а только от той ее части, которая трансформируется в другие виды энергии. Именно при таких превращениях она и стимулирует экзогенные процессы, формируя природную обстановку (Тебиева 2015: 203). Отсутствие механизмов, влияющих на колебания температур и прочих факторов, делает эти колебания чудовищными. Например, каждая точка экваториальной зоны Меркурия (самого близкого к Солнцу тела) за длинный день (продолжительностью 88 земных суток) может нагреться почти до 500 °С при перпендикулярном падении солнечных лучей. Но когда эта точка окажется в полночь в диаметрально противоположном положении, то может охладиться до –180 °С. Таким образом, максимальная амплитуда колебания температуры на поверхности Меркурия – примерно 700°, что является своеобразным рекордом. Зато, как мы видели, атмосферы могут значительно смягчать температурные колебания.