

## Глава 7. Общие эволюционно-исторические процессы и фазы на планетах и телах Солнечной системы

### 7.1. Формирование планет и другие процессы

Говорить об общих фазах истории и эволюции планет с учетом различий в их составе, а также слабой изученности большинства планет и тел, конечно, можно только очень условно.

**Формирование планет.** Начнем с повторения того, о чем шла речь в книге «Большая история развития мира: история и эволюция Солнечной системы» (Гринин 2017). Как мы упоминали, согласно разным гипотезам, формирование первичной планетной системы могло занимать от нескольких миллионов лет (Элкинс-Тантон 2017: 95), то есть происходить довольно быстро по астрономическим меркам, до 50 или даже 100 млн лет, когда, по представлениям ряда ученых, окончательно сформировались планеты земной группы (Лин 2008). В этот период имели место процессы столкновений будущих планет с крупными и средними планетезимالياми и очень крупными неудачными кандидатами в планеты (иногда их называют зародышами планет). Это был период ранней бомбардировки (когда растущие планеты испытывали многочисленные удары планетезималей), а также предполагаемых рядом гипотез катастроф, включая столкновение Протоземли с крупным протопланетным телом, в результате чего образовалась Луна, а само столкновение оказало влияние на процесс формирования Земли. Произошло это, согласно гипотезе, между 30 и 100 млн лет после формирования Солнца, то есть примерно 4,5 млрд л. н. (Canup, Asphaug 2001: 708)<sup>64</sup>.

---

<sup>64</sup> Существует также красивая теория, предложенная еще в 1975 г. Уильямом Хартманном и Дональдом Дэвисом, согласно которой рядом с Протоземлей миллионы лет вращалась протопланета Тейя (Тея). В конце концов планеты столкнулись. Считается, что столкновение произошло почти по касательной и на относительно низкой скорости. Поэтому часть вещества земной мантии и Тейи были выброшены на околоземную орбиту. Из этих обломков и сформировалась Луна, которая начала обращаться по круговому пути.

При этом относительно очередности образования планет также существует много гипотез, предполагающих, что они образовались одновременно либо неодновременно. Но среди тех, кто придерживается второй точки зрения, одни считают, что сначала образовались планеты земной группы, а потом гиганты, другие полагают, что земная группа образовалась последней. В настоящее время все больше исследователей приходят к выводу, что первым образовался Юпитер, захватив наибольшее количество вещества, затем Сатурн и другие гиганты (Батыгин и др. 2016; Batygin, Brown 2016). Спутники сформировались либо одновременно с планетами, либо вскоре после них (но некоторые из них были захвачены гравитацией существенно позже; таковы, в частности, спутники Марса).

Первичные кольца планет образовались на более поздней стадии формирования планет. В ближней к планете зоне приливные силы препятствовали возникновению спутников, остатки материи были собраны в небольшие тела (до ста метров). В дальнейшем гравитационное взаимодействие колец и спутников привело к структурированию колец и сообщило им динамическую устойчивость (Холщевников 2012б: 321). Но пока не установлено время формирования главных, наиболее плотных и устойчивых колец из крупных частиц. Некоторые ученые считают, что главные кольца – реликтовые образования, содержащие частицы многомиллиардного возраста. Другие склоняются к тому, что продленный спутниками период полураспада кольца занимает менее миллиарда лет, мы наблюдаем пылевые комплексы, частицы которых значительно моложе планет и спутников (Там же).

Приведенные примеры показывают, что материал погибших объектов становится исходным или дополнительным материалом для формирования новых. Это знаменует *круговорот вещества и энергии в природе* и одновременно своего рода *процесс передачи эволюционной эстафеты*. Последняя обеспечивает возможность воспользоваться плодами длительных процессов, в частности накопления тяжелых элементов (Гринин 2013: 118, 140; об этом еще будет сказано в *Главе 10*). Мы также видели, как обогатилась Солнечная система различными тяжелыми элементами за счет остатков взрывов сверхновой (Гринин 2017), что свидетельствует о миграции вещества на огромных пространствах галактик и Вселенной.

**Кометы и планеты.** Есть интересная точка зрения о важной роли комет в процессе формирования планет. Благодаря высокой температуре центральной части протопланетного облака летучие вещества уходили на его периферию, где конденсировались, образуя вместе с пылью и более крупными частицами ядра комет. Когда протопланеты набрали достаточную массу, взаимодействие комет с ними, прежде всего с Протоюпитером, приводило к нескольким возможным сценариям, из которых наиболее существенны: 1) захват комет и поглощение их Юпитером; 2) ускорение в его поле тяготения (естественный гравитационный маневр) и уход на очень далекие орбиты за пределами зоны планет; 3) ускорение и последующий уход из Солнечной системы; 4) отклонение траектории кометы во внутреннюю часть планетной системы и возможное столкновение ее с Землей или другой планетой. Кометы, которые развивались по второму сценарию, образовали огромный сферический клубок, «облако Оорта», в котором сосредоточено  $10^{12}$ – $10^{13}$  комет (то есть триллионы комет!), обращающихся вокруг Солнца на расстоянии от 3000 до 160 000 а. е., что составляет 2 световых года или половину расстояния до ближайших звезд (Ксанфомалити 1997: 243).

В отношении комет, которым выпал последний вариант, есть версии, что они сыграли важную роль в жизни Земли (и в какой-то мере других планет). Так как Земля формировалась из сухого материала, именно кометы принесли на нее основные запасы воды, то есть существуют предположения, что именно им мы обязаны красотой земных морей, океанов, озер и рек (Там же; см. также: Зеленый и др. 2009: 131). Насколько это соответствует истине, сказать сложно. Однако это не является невероятным. В частности, известно, что благодаря кометам возникли ледники на Меркурии (планете, ближайшей к Солнцу!), который получил из комет триллионы тонн снега (Язев 2018: 51). Мало того, лед обнаружен и на Северном полюсе Луны, в кратерах (Сиротин, Лебедев 2001: 22; Hartmann 1997), причем, по некоторым оценкам, там находится не меньше 600 млн метрических тонн водяного льда (NASA... n.d.).

Это очень интересный пример накопления вещества путем, так сказать, «импорта». Он подтверждает, что имел и продолжает иметь место обмен вещества между разными и весьма отдаленными частями Солнечной системы. Действует он на всех планетах.

В свое время мы писали, что круговорот вещества в природе и в космосе идет на всех уровнях – как пространственных, так и эволюционных. Пример с кометами хорошо иллюстрирует это. При этом видно, что кометы – не непонятные в смысле системности Солнечной системы и ее эволюции элементы, они играют определенную роль в обмене веществ в рамках Солнечной системы и даже между нею и космосом, а значит, и с другими звездными системами, вносят свой вклад в эволюцию.

Кометы, возможно, играли очень важную роль и в происхождении атмосферы Земли. На начальных этапах наша планета была слишком горяча и потеряла значительную часть летучих веществ, включая воду. И только постепенно, в результате взаимодействия с кометами и планетезиμαлями с высоким содержанием льда, которые попадали на Землю или входили в ее состав, она вновь обрела атмосферу и океан. По некоторым оценкам, общая масса летучих, попавших на Землю из зоны питания планет-гигантов, в которой воды было много, составила  $2 \times 10^{24}$  г (Зеленый и др. 2009: 1131). Для сравнения, масса земных океанов примерно  $1,45 \times 10^{24}$  г; то есть масса принесенных летучих веществ была в полтора раза больше нынешней массы земных океанов.

Кроме того, данный пример иллюстрирует, что для совершения (или завершения) важного эволюционного процесса (в данном случае – формирования гидросферы) необходимы разнородные компоненты. Мы, в частности, говорили о *правиле необходимой разнородности компонентов в системе*. Для функционирования системы необходима соответствующая степень разнородности компонентов (например, архаичных и продвинутых, старых и молодых и т. п.), которые создают нужный баланс, но в то же время требуют определенного сосуществования и компромисса в системе.

## **7.2. Общее представление о фазах эволюции планет**

Даже если формирование планет заняло несколько десятков миллионов лет, то примерно с 4,5 млрд л. н. (плюс–минус 20–30 млн лет) в ранней Солнечной системе уже имелась система первичных планет. Далее можно выделить несколько крупных периодов эволюции Солнечной системы, что мы и сделали, опираясь на известные нам научные данные, но исходя из собственного понимания

процессов. Однако это выделение весьма условно с учетом того, что данные имеются только по меньшинству планет, а также того, что в связи с новыми фактами предшествующие выводы значительно меняются. Помимо этого, обобщения в основном делались на основе фактов по истории твердых планет, поскольку об эволюции газовых планет известно совсем мало.

**Фаза 1.** *Длительность: примерно 400 млн лет или более, с 4,52 млрд л. н. до 4,1–4,0 млрд л. н.* Этот период остается наиболее темным и спорным. На Земле это в основном так называемый *катархейский эон*, длившийся с 4560 млрд л. н. до 4000 млрд л. н., породы из которого неизвестны, поскольку не сохранились<sup>65</sup>. Что касается других планет, то и на них сохранились лишь какие-то пограничные по времени со следующей фазой породы возрастом максимум до 4,1–4,2 млрд л. н. Но на Луне, к счастью, обнаружены и более ранние породы (4,3 млрд л. н. или даже более ранние; см. ниже). Однако на Земле, как мы увидим в *Главе 11*, именно в этот период шла активная химическая эволюция. Вероятно, в какой-то мере химическая эволюция происходила и на других планетах. Она имела характер геохимической (планетохимической), когда формировались минералы, окислялись и восстанавливались породы, протекали различные крупномасштабные процессы формирования, переноса и трансформации вещества.

**Фаза 2.** *Длительность: примерно 300–400 млн лет, с 4,1–4 млрд л. н. до 3,8 млрд л. н.* Эта фаза связана с периодом так называемой *Поздней тяжелой бомбардировки*, точнее, *основной ее части* (иногда обозначаемой как лунная фаза 0; см. далее). Следы этой бомбардировки в виде гигантских кратеров остались на всех планетах земной группы, но особенно много их на Меркурии и Луне. В этот же период формировались структуры и породы, часть из которых просуществовали до наших дней. На безатмосферных планетах (таких как Луна и Меркурий) доля этих структур довольно заметная, на Венере их не обнаружено, на Земле если они

---

<sup>65</sup> По этому поводу высказывается множество предположений. Приведем одно из них. Поскольку в самом начале архея уже возникли осадочные породы, следует полагать, что в катархее происходил активный вулканизм, приведший к образованию первичных атмосферы, океана (к началу архея имевшего глубину и объем, по самой грубой оценке, в пять-десять раз меньше современных) и земной коры (вероятно, похожей на современную океанскую [Монин 1980: гл. 2]).

и остались, то как исключение<sup>66</sup>. Для этой фазы важно отметить, что на временной шкале преобразований ряда планетных тел, несмотря на различия объектов в их массе, существенные изменения приходятся на один и тот же период (около 4 млрд л. н.) и связаны с вулканизмом (Пугачева, Шевченко 2015: 208). Предполагается, что ударная энергия, которая выделялась при таких импактных событиях, была огромной, что вызывало мощные вулканические извержения. В отношении датировок и характеристик этой фазы несколько больше согласия, чем для первой, но также существуют расхождения и различные гипотезы. Везде эти периоды были связаны с формированием атмосфер, но некоторые тела, такие как Луна, быстро их утратили. На Земле и на Марсе, а возможно, и на Венере, формировалась гидросфера, в том числе океаны. Уже на этой фазе обозначается очень сильная диверсификация в истории планет (в частности, на Земле происходит быстрое развитие химической эволюции, абиогенной, то есть на уровне довольно сложных органических веществ, и уже обнаружены следы жизни, наиболее древние – в период и сразу после Поздней тяжелой бомбардировки). На Земле это конец периода позднего катархея и ранний архей (катархея: 4560–4000 млрд л. н.; архей – 4000–2500 млрд л. н., этой фазе соответствует геологическая эра эоархея – 4000–3600 млрд л. н.). На этой фазе (а по убеждению других исследователей, уже на самой первой фазе) происходит дифференциация вещества и формирования структур планет: ядро – мантия – кора. Но кора еще весьма непрочная, затем она заменяется.

**Фаза 3.** *Длительность: примерно 800–1000 млн лет, с 3,8 млрд до 3–2,8 млрд л. н.* Поскольку этот период известен лучше, здесь гораздо легче прослеживаются вариации по длительности на разных телах. Так, на Луне этот период датируется примерно до 3–3,16 млрд л. н. На Земле это почти весь так называемый архейский эон, кроме последнего его периода – неоархея (который длился с 2,8 до 2,5 млрд л. н.). От этого длительного периода осталось уже значимое число следов и остатков древнего рельефа. Так, на

---

<sup>66</sup> Ранее считалось, что первые осадочные породы на земле имеют возраст 3,8 млрд лет. Они найдены в Гренландии (Хаин и др. 1997: 428; Head, Solomon 1981: 70). Но затем были обнаружены и более древние породы возрастом 4 млрд лет, в частности, на западе Канадского щита, так называемые гнейсы Акаста (Хаин, Короновский 2007: 121).

Марсе это первая половина так называемого гесперийского периода (см. далее). Этот период можно назвать периодом активного вулканизма, формирования вторичного рельефа (соответственно, вторичной коры) и климата, которые позже в основном изменились (см. далее). На Земле (и на Марсе) это период активного развития гидросферы. Относительно дифференциации вещества и формирования ядер планет существует много разных мнений. У некоторых планет, как у Меркурия и Луны, в этот период ядра застывают, соответственно, внутренняя энергия исчезает. В отношении Земли, как мы увидим ниже, мнения серьезно расходятся. Но все согласны в том, что в этот период ядро Земли оказывается сформированным. На Земле также в данный период сформировался механизм тектоники плит, который более нигде не обнаружен, то есть является уникальным в Солнечной системе. Это означало, что и кора Земли также оказалась сформированной.

**Фаза 4.** *Длительность: 1,8 млрд лет, с 2,8 млрд л. н. до 1 млрд л. н.* Период окончательного расхождения эволюционных «дорожек». На Меркурии и Луне вулканическая активность в основном прекращается (на первом 3 млрд л. н., на второй – 2,5 млрд л. н.). Зато на Земле развиваются тектоника плит и кислородная атмосфера, появляются новые формы жизни (формируется третичная кора; вероятно, она же формируется и на Венере).

**Фаза 5.** *Длительность: 1 млрд лет, с 1 млрд л. н. до современности.* Это современный период, о котором свидетельствует довольно много фактических следов на разных планетах (Венера, Марс).

Ниже мы дадим описание этим периодам, приведем некоторые наиболее интересные относящиеся к ним факты (остальные факты приведены в Приложении 2).

### **7.3. Фаза 1. Первый период истории Солнечной системы и планетных тел (с 4,52 до 4,1/4,0 млрд л. н.)**

#### **7.3.1. Общая характеристика**

Как уже было сказано, это наиболее темный период, о котором имеются в основном гипотезы, хотя отдельные фактические свидетельства постепенно накапливаются. Считается, что светимость

Солнца в этот период была ниже, чем в последующие эпохи. Молодое Солнце в начале своей жизни было на 30 % менее ярким, но постепенно светимость его росла (см. об этом ниже). В отношении отдельных планет (Земли, Луны, Меркурия и других) в рамках этого периода выделяются подфазы (см. далее). В принципе большинство исследователей согласны (хотя в очень значительных деталях и датировках имеется множество расхождений), что в этот период проходили такие процессы:

а) как набирание массы планет и планетных тел, хотя последние доли процента они набрали уже позже (в период Поздней тяжелой бомбардировки, см. ниже);

б) изменения вещества (его физических и химических свойств) вследствие гравитации, ударных влияний, термоядерного распада, химической эволюции и других процессов;

в) первичная дифференциация вещества и формирование первичной структуры (образование ядер, мантий и др.);

г) появление первичной коры и формирование первичного рельефа под влиянием ударной энергии, расплавления вещества и разогрева и др.;

д) появление и изменение первичных атмосфер, воды в разном агрегатном состоянии и пр.;

е) также существует привлекающая все больше сторонников гипотеза о смене орбит большинства планет именно в этот период (см.: Гринин 2017: гл. 7, 8);

ж) есть предположения, что в этот период на силикатных планетах и планетных телах происходили довольно активные (а местами очень активные) вулканические процессы, о чем свидетельствуют особые породы (анортозиты)<sup>67</sup>.

Но все это были первичные процессы, которые в последующие эпохи раз за разом сменялись другими процессами, изменявшими поверхности, пока планеты, их структурные части и кора не достигли зрелости либо не застыли в развитии, превратившись в мертвые тела. Именно поэтому сохранилось мало следов данной

---

<sup>67</sup> И даже есть идеи, что огромные объемы магм на планетах возникли уже при их образовании и не связаны с поздними процессами частичного плавления, как обычно предполагается. Так, высказываются предположения, что в скором времени после образования планет появились магматические океаны, на Луне глубиной около 1000 км, на Земле – 250 км. А первичная кора, в частности на Луне, формировалась в результате всплывания определенных пород в магматическом океане (Шкодзинский 2017: 11).

фазы и, соответственно, очень сложно реконструировать процессы этого отдаленного времени.

Здесь уместно вспомнить *правило архаичности первичных систем*. Системы не формируются зрелыми, для обретения зрелости и устойчивости им обычно требуется несколько реконфигураций, в том числе циклов разрушения и нового формирования. Поэтому первичные системы не сохраняются. Они обычно являются весьма несовершенными и архаичными, а более совершенные образуются уже как вторичные или третичные. И это касается не только биологических или социальных систем, но и первичных планет или звезд. Более поздние системы имеют больше возможностей для саморегулирования, в то время как ранняя эпоха формирования часто бывает довольно бурной.

В целом ранняя стадия часто очень непохожа на другие. Но в данном случае она особенно непохожа на поздние на Земле, в меньшей степени различия прослеживаются для Марса, в еще меньшей – для Меркурия и Луны.

Для этой фазы также был особенно характерен катастрофизм (см. подробнее: Гринин 2017; см. далее), хотя он присутствует на всех стадиях.

### **7.3.2. Дифференциация вещества планет и формирование структуры**

**Было ли расплавление планет?** Относительно температурного состояния планет (особенно силикатных) в ранний период, а равно энергетических источников, которые влияли на это, мнения исследователей диаметрально противоположные. Продолжает существовать версия о том, что планеты были в основном холодными, а разогрелись внутри за счет дифференциации вещества и радиоактивных элементов, хотя сторонников у нее становится все меньше, особенно в отношении состояния Земли (см. о недостатках этой точки зрения: Кузнецов б. г.). Распространена точка зрения, согласно которой в этот период все планеты земной группы пережили фазу расплавления, что предполагает сплошное расплавление их внешних сфер или даже полное расплавление планетного вещества, то есть речь идет об огненных планетах. По мнению некоторых планетологов, этот этап соответствовал концу фазы аккреции, когда на планеты выпадало наибольшее количество самых крупных

метеорных тел – планетезималей и выделялось огромное количество тепловой энергии (Тебиева 2015: 194). Они считают, что фаза расплавления внешней сферы была впервые установлена для Луны, где формирующие поверхность породы сплошь магматические; изучение Меркурия и Марса также дает основание считать, что фазу расплавления прошли и другие планеты земной группы. Для Земли (и в еще большей степени для Венеры. – Л. Г.) можно говорить только о реконструкции по аналогии с этими планетами (Тебиева 2015: 194).

Существует промежуточная точка зрения (по крайней мере, в отношении Земли), которая заключается в том, что наша планета не была никогда ни «огненно-жидкой», ни «холодной».

Нагреваемая ударами падающих тел растущая планета временами имеет гигантские очаги расплавов – высокотемпературные пятна на общем фоне субсолидусных температур. В этих подземных гигантских, но все же локальных морях магмы должна происходить дифференциация. При определенных условиях, описываемых критерием «теплого взрыва», энергии гравитационной дифференциации становится достаточно, чтобы эта дифференциация перешла в глобальную (Адушкин и др. 2008: 286–287; Витязев и др. 1990; Витязев, Печерникова 1996).

Вопрос о состоянии планет напрямую связан с очень важными процессами и их скоростью: дифференциацией вещества на планетах, образованием на них первичной коры, формированием ядер и мантий, энергетическими процессами (в частности, величиной отдаваемого потока энергии) и др.

**Остывание и образование первичной коры.** Если исходить из расплавленного состояния (по крайней мере поверхности первичных планет), то остывание данных поверхностей и связанные с этим переход поверхности из жидкого состояния в твердое, а также образование коры произошли уже в рассматриваемый период или на рубеже со следующим периодом. Об этом свидетельствует, в частности, возраст формирующей поверхность Луны первичных пород – более 4,3 (до 4,5) млрд лет (Тебиева 2015: 194; см. также: Сиротин 2009: 50 и др.). Они оказались магматическими (анортозитами), то есть образовавшимися в результате застывания и кристаллизации магматического расплава. При этом расплавлен-

ные в раннюю стадию первичные поверхностные породы имеют сплошное распространение на Луне (Тебиева 2015: 195). Возможно, расплавленная внешняя кора Луны застыла около 4,3 млрд л. н., когда последний остаток системы первоначальной магмы раскристаллизовался (Сиротин 2009: 55)<sup>68</sup>. Неудивительно, что исследования лунных образцов в проблеме становления ранней коры на планетном теле, как полагают, играют определяющую роль (Жарков 2013: 335)<sup>69</sup>. Есть гипотезы, что и первичная кора Земли образовалась примерно в это же время, а именно 4,45–4,35 млрд л. н. (Сиротин, Лебедев 2001; Сиротин 2010). А уже через 100 млн лет образовалась вторичная кора.

Правда, существуют и иные, малораспространенные мнения, что кора на Земле образовалась поздно. Вследствие большого размера и длительного остывания Земли затвердевание верхней части ее океана магмы происходило относительно поздно. Поэтому последние крупные тела протопланетного диска во время захватившей все планеты гигантской метеоритной бомбардировки 4,5–3,8 млрд л. н. выпадали на еще покрытую расплавом поверхность, на которой импактные кратеры не могли возникать. Это объясняет казавшееся загадочным отсутствие на Земле следов той бомбардировки и пород древнее 4 млрд лет (Шкодзинский 2017: 11).

Наличие таких же пород на Меркурии и Марсе может свидетельствовать о том, что эти планеты также пережили фазу расплавления. Лишь для Земли никаких конкретных данных о ранних фазах ее развития нет. И чтобы выявить ее раннюю историю, приходится пользоваться сравнительными данными по другим планетам, хотя есть сообщения (но не вполне достоверные) о найденных

---

<sup>68</sup> Есть мнение, что кора на Луне образовалась еще раньше, сформировалась там в течение первых 100 млн лет, а затем эволюционировала под влиянием ударных и магматических процессов. По геологическим и космическим масштабам времени выплавление ранней лунной коры произошло очень быстро и датируется возрастом  $4460 \times 10^9$  лет (то есть 100 млн лет после образования Солнечной системы), определенным уран-свинцовым методом (Жарков 2013: 353).

<sup>69</sup> Если раньше геологическая история Земли могла быть определенным ориентиром для предположения о геологическом развитии других планет (в какой-то степени это справедливо до сих пор), то теперь понятая ранняя геологическая история Луны и других планет дает шанс понять ранние стадии развития Земли, от которых практически не осталось следов (хотя постепенно какие-то следы обнаруживаются).

в Австралии и на севере Канады породах возрастом более 4 млрд лет (4,27–4,28 млрд лет [Наймарк 2008]).

Вопрос о датировках, как всегда, вызывает споры, но, по некоторым предположениям, около 4 млрд л. н. *первый этап геологического развития силикатных планет завершился формированием первичных анортозитовых кор* (то есть магматического происхождения) с рельефом, сформированным мощными ударными процессами и первичным магматизмом (Евсюков 1997: 48). Вполне очевидно, что лавовые излияния происходили одновременно с формированием поверхностей, которые кратерировались ударными процессами. Таким образом, в недрах планет уже имелись резервуары расплавленной лавы, вопрос в том, каковы были источники энергии (тепла) для них (Ксанфомалити 2012б: 123). Соответственно, если температура внешнего слоя была намного выше сегодняшней, то и магматизм был на порядок выше, чем в настоящий момент.

Первичная кора намного лучше сохранилась на Луне и Меркурии. На Марсе около половины поверхности позже было преобразовано эндогенными процессами. На Земле эта кора была преобразована полностью (Евсюков 1997: 48). Но и сегодня здесь есть кратеры, которые имеют возраст около 2 млрд лет (Язев 2018: 157).

Образование коры было исключительно важным рубежом, так как это изменило обмен энергией с окружающей средой и создало условия для дальнейшей эволюции. Неудивительно, что проблема становления ранней коры на планетном теле является фундаментальным вопросом современной науки (Жарков 2013: 335).

Кора всех планет земной группы, как мы уже видели, может быть подразделена на континентальную, океаническую и переходную. Однако существуют разные мнения по поводу того, когда произошло такое разделение, уже в первичной коре или позднее<sup>70</sup>. Тем не менее вполне вероятно, что эта асимметрия – антиподальность – сложилась в самой первой фазе.

**Дифференциация вещества, образование ядер и мантий.** Образование крупных планетных тел вело к тому, что они принимали форму шара (с теми или иными отклонениями, которые во

<sup>70</sup> Земная континентальная кора явилась результатом преобразования базальтовой коры (возможно, последняя уже была вторичной) под действием гидросферы, атмосферы и биосферы в осадочные породы, а затем в породы типа гнейсов. На Земле этот процесс был довольно долгим, он протекал в период 3,8–2,5 млрд л. н. (Евсюков 1997: 48).

многим зависели от состава планет и скорости вращения). Гравитация и после этого продолжала делать свою работу, но теперь в результате нее происходит дифференциация вещества, то есть более тяжелые вещества опускаются к центру, а более легкие – поднимаются. Таким образом начиналась геологическая история планет, которая включала гравитационную и геохимическую дифференциацию (Ксанфомалити 1997: 17). В результате дифференциации возникла модель строения планет, состоящая из ядра, мантии и коры. Ядро и мантия в современной Земле составляют 99,5 % по массе вещества и не менее по энергетике (Адушкин и др. 2008: 285). Но даже в рамках одной группы планет много вариаций как в размере этих частей, так и в веществе, которое их образует (мы это отмечали в *Главе 3*).

Представление о разделении вещества на более и менее тяжелое и образовании в результате этого структур планет (в частности, ядра и мантий) уже на ранней фазе достаточно общепринято. А некоторые считают, что этот процесс начался уже в период образования зародышей планет (см. ниже; об этом шла речь также в: Гринин 2017: гл. 5, 6; см.: Сиротин, Лебедев 2001: табл. 1). Поскольку сам факт дифференциации планет на оболочки доказан и не вызывает сомнения, а в течение всего последующего времени за фазой расплавления не было благоприятных условий для такого расслоения недр, следовательно, оно произошло в этой же ранней фазе (Тебиева 2015: 195).

Общий процесс дифференциации вещества внутри планет (по крайней мере, земной группы) таков. В начальном конгломерате, составляющем протопланету, присутствовали различные частицы – тяжелые (железо и никель) и более легкие (силикаты). Сила тяготения приводит к постепенному просачиванию тяжелых частиц к центру масс будущей планеты и вытеснению к поверхности легких частиц. В результате процесса дифференциации, а также нарастающего к центру давления плотность планеты оказывается неоднородной: в недрах концентрируется плотное металлическое ядро, а наиболее легкие породы формируют наружные слои (Язев 2011: 47–8). Соответственно, недра планет становятся очень горячими.

Но некоторые существенно иначе представляют процессы формирования оболочек планеты. Например, В. С. Шкод-

зинский считает, что ядра планет образовались уже в процессе аккреции последних. Он, в частности, полагает, что ядра планет сформировались даже раньше, чем их мантии. За счет того, что планеты подвергались мощным ударам крупных падающих тел, температура их поверхности была высокой – 800–3500 °С, планеты были огненными. Из этого Шкодзинский делает вывод, что температура в мантии на ранней стадии существования Земли и планет земной группы уменьшалась с глубиной, а не возрастала, как обычно предполагается. В самых верхних частях планет существовали глобальные океаны магмы. Относительно холодный и плотный нижнемантийный материал не мог всплывать в менее плотное и горячее вещество верхних мантий. Аккреция планет была гетерогенной, а не гомогенной, как обычно предполагается. Быстрое слипание в протопланетном диске намагниченных железных частиц привело к аккреции ядер планет из крупных глыб железа. Таким образом, железные ядра планет образовались раньше, чем силикатные мантии. Это объясняет существование скачка температуры на современной границе земного ядра и мантии примерно в 1000–2000 °С. Поэтому нижние мантии планет земной группы подогревались изначально горячими ядрами. Верхние же мантии и существовавшие на них магматические океаны охлаждались в результате излучения в космическое пространство (Шкодзинский 2017: 13–14).

Сама дифференциация, ее скорость и полнота зависят от ряда факторов: температуры вещества, особенностей вещества, процесса конвекции вещества и других. Поэтому вопрос о том, были ли планеты горячими или холодными, продолжает оставаться одним из самых важных. Также крайне важным является вопрос об источниках энергии, которые имели планеты. Эти проблемы остро дебатруются среди геологов, но, полагаем, они могут быть решены только на более широком – планетологическом – уровне. С другой стороны, исследование Земли дает ключ к пониманию процессов на разных планетах.

Есть авторы (вероятно, это мнение преобладает), которые полагают, что ядро Земли было сформировано уже в самые первые сотни миллионов лет (и хотя процессы дифференциации вещества идут все время, их роль уже иная). Можно привести следующие мнения. После формирования

большей части ядра (около 95 %) в течение первых 100 млн лет жизни Земли оно продолжало медленно расти, но уже за счет диспропорционирования FeO мантии согласно реакции:  $3\text{Fe}^{2+} + \text{O}$  (мантия) –  $\text{Fe}^0$  (ядро)  $\text{Fe}^{3+} + 2\text{O}_3$  (мантия). Вторая стадия продолжалась последующие 150–300 млн лет и при фазовых превращениях мантии, сопряженных с восходящими течениями ее вещества (Кадик 2008: 368). За первые 100 млн лет Земля набрала 90 % своей массы, в следующие 100 млн лет частота столкновений сократилась, шла первичная дифференциация Земли, за третьи 100 млн лет на Землю выпали массы, сравнимые с корой (по объему или массе); каменные метеориты, содержащие воду (1 % их массы), привнесли необходимую массу воды и летучих веществ, из которых сформировались океан и новая атмосфера. Земля набирала 0,999 % своей массы (Язев 2018: 320; см. также: Адушкин, Витязев 2007: 398).

Те, кто придерживается концепции холодных планет, в частности Земли, говорят о длительном процессе формирования структуры. По их мнению, процесс формирования земного ядра растянулся приблизительно на 1,5 млрд лет (от 4 до 2,6 млрд л. н.), поскольку прогрев относительно холодного вещества молодой Земли развивается достаточно медленно (Сорохтин, Ушаков 2002: 100).

Таким образом, относительно Земли до сих пор остается актуальным замечание (Флоренский и др. 1981), что общий уровень геологических знаний о первой половине истории Земли не позволяет сделать надежного вывода, так как оставляет слишком много места для произвольной экстраполяции. Поэтому как гипотеза, что оболочки Земли сложились в основном в догеологический период, а в последующее время происходила лишь незначительная перестройка этих оболочек, так и гипотезы, что первично-гомогенная Земля постоянно, вплоть до настоящего времени, перестраивается с непрерывным наращиванием коры, а кажущееся постоянство условий связано лишь с недостаточной чувствительностью методов наблюдения, имеют аргументы как за, так и против.

Относительно Меркурия также существуют разные мнения. Так, В. В. Адушкин и др. (2008: 286) утверждают, что он тоже прошел раннюю дифференциацию. А дифференциация Марса – образование ядра и выделение коры – произошла в течение первых 100 млн лет (Там же: 285). Но есть предположения, что формирование обширного железного ядра Мер-

курия заняло 1,5 млрд лет, примерно с 4,5–3 млрд л. н. (Евсюков 1997: 48).

По-видимому, первичные процессы дифференциации на Земле, Луне, Марсе, Меркурии все же прошли уже в первые 100–400 млн лет. И ударные процессы помогали этому, давая дополнительную энергию. Но то, что на Луне и Марсе эти процессы не завершились полностью, как на Земле и Меркурии (см. ниже), свидетельствует о том, что первичная дифференциация была далеко не полной.

В целом многие планетологи и астрофизики придерживаются мнения, что первичная дифференциация на ядро и мантию произошла у планет (по крайней мере, земной группы и, видимо, силикатных спутников крупных планет) достаточно рано, возможно, в первые 100 млн лет. В целом предполагается высокая скорость, с которой по крайней мере часть планетных тел прошли гравитационную дифференциацию, разделившую легкие и тяжелые компоненты.

**Особенности дифференциации.** Дифференциация вещества и формирование оболочек планет, естественно, происходили и на газовых (которые стали газом-жидкими), и на ледяных планетах (но там, возможно, дифференциация шла более медленно). Такое строение (ядро – мантия – кора), как мы видели, встречается и у малых планет, и у крупных спутников. Однако вариативность здесь очень велика, и некоторые случаи мы рассмотрим подробнее.

Существует мнение, что аккреционная энергия и последующий радиоактивный нагрев сыграли решающую роль в дифференциации Европы и Ганимеда, в результате чего произошла сепарация льда, скального материала и металлического сплава. Дифференцированные спутники – Европа и Ганимед – состоят из водно-ледяной оболочки мощностью 120–140 км для Европы и 800–900 км для Ганимеда, сухой силикатной мантии и железо-сульфидного ядра. Каллисто – частично дифференцированный спутник. Модель Каллисто с внутренним океаном состоит из ледяной коры, подледного океана, каменно-ледяной мантии из смеси льдов и скального материала и центрального железокремнистого ядра, не содержащего льда (Кусков и др. 2009: 514).

Дифференциация вещества и формирование оболочек планет имели существенные особенности и на планетах земной группы.

Они зависят от множества вещей: расстояния от Солнца, температуры, первоначального состава вещества. Повышение плотности вещества по мере движения к центру также наблюдается не всегда. Например, на Луне обнаружена неоднородность распределения масс в ее коре. Появилось новое понятие – «масконы». Оказалось, что внешние слои Луны до глубины нескольких сотен километров неоднородны. Масконы проявляют себя неоднородностями и в общем поле тяготения. Кроме того, если на Земле плотность оболочки (коры и мантии) в 2–3 раза меньше, чем во внутреннем ядре, то весь материал Луны имеет плотность, близкую к средней, –  $3,33 \text{ г/см}^3$ . Таким образом, если Луна и имеет ядро, оно очень маленькое, причем, по некоторым данным, имеет неправильную форму (Ксанфомалити 1997: 24–26).

У Марса, возможно, по каким-либо причинам не произошел полностью процесс гравитационной дифференциации, то есть разделение на железные и силикатные компоненты, которое приводит к образованию плотного металлического ядра и сравнительно легких каменных поверхностных оболочек. Дело в том, что железа на поверхности очень много. Важный показатель, свидетельствующий о существовании железного ядра у планеты, – наличие у нее магнитного поля. У Марса слабое глобальное магнитное поле. Есть локальные магнитные поля, что тем более затрудняет создание теории магнетизма этой планеты, которой пока не существует (Язев 2011: 48; 129). Таким образом, образование ядер происходило неодинаково и не везде (Ксанфомалити 2012a: 129).

### **7.3.3 Изменение орбит планет**

Как мы уже упоминали (Гринин 2017), процесс обретения планетами своих постоянных орбит был достаточно длительным. В целом он совпал с первой фазой, но, по некоторым гипотезам, даже вышел за ее пределы. Он занял несколько сотен миллионов лет. Так, например, по одной из гипотез, Юпитер и Сатурн вошли в резонанс (около 700–600 млн лет от начала формирования Солнечной системы), что создало мощнейшее влияние на Солнечную систему. Последняя вошла в гравитационное возбуждение, а это привело к тому, что Нептун и Уран поменялись местами и орбитами, так как ранее Уран находился дальше Нептуна. После этого (около

3850–3750 млн л. н.) планеты закрепились на своих орбитах (о сменах орбит см. также: Емельяненко 2011).

**О некоторых гипотезах, связанных с переменной орбит планет.** Уран не только обменялся орбитами с Нептуном, но и приобрел необычный наклон оси вращения. Существует гипотеза, что современное «лежащее» положение Урана, ось вращения которого наклонена к эклиптике на  $98^\circ$ , по-видимому, является результатом столкновения с достаточно крупным телом (Шевченко 2014)<sup>71</sup>. Если это так, то подобное столкновение (как и другие гипотетические столкновения, которых придумано довольно много), скорее всего, могло произойти только в ранний период. Что касается Нептуна, то для него тоже придумано немало гипотез. По одной из них Тритон является карликовой планетой, захваченной Нептуном из пояса Койпера (Сиротин 2009: 253), по другой – Нептун захватил крупное тело, которое столкнулось на орбите с массивным спутником, в результате чего обломки получили неожиданные орбиты (Там же: 252–253).

Вообще идея о необратимости каких-либо характеристик, например, орбиты, наклона оси и т. п., приобретенных в результате воздействий (приливных, ударных и иных явлений), требует осмысления на эволюционном уровне, это, очевидно, представляет собой паттерн или *правило необратимости приобретенных свойств*.

Одной из интереснейших проблем, связанных с Плутоном, является гипотеза, выдвинутая английским теоретиком Р. Литтлтоном, согласно которой планета является бывшим спутником Нептуна. Предполагалось, что Плутон покинул окрестности Нептуна после сближения («столкновения») с Тритоном. В результате этого столкновения Плутон был выброшен на свою чрезвычайно эксцентрическую и наклонную орбиту, а орбита Тритона также претерпела существенное изменение – из экваториальной она стала сильно наклоненной, движение по ней Тритона стало обратным. Гипотеза Литтлтона предполагает, что физические свойства Плутона и Тритона должны быть близки, так как они образовались

<sup>71</sup> Наклон оси вращения – угол отклонения оси вращения небесного тела от перпендикуляра к плоскости его орбиты. Другими словами, угол между плоскостями экватора небесного тела и его орбиты. При этом Меркурий и Юпитер, действительно, более или менее вертикальны, Земля, Марс, Сатурн и Нептун наклонены под углом примерно в  $25^\circ$ , а Уран – в  $98^\circ$ . В целом наклон осей вращения планет представляется довольно хаотическим (Алексеев 2019: 228).

рядом, у одной и той же планеты. Это обстоятельство можно проверить только с помощью космических исследований, когда будут получены более детальные данные об этих телах. Пока все это остается интереснейшей гипотезой. Открытие спутников у Плутона делает указанную гипотезу, вообще говоря, менее правдоподобной, и вопрос о происхождении странной двойной системы – Плутона и его спутника – на периферии Солнечной системы пока остается без ответа (Жарков 2013: 325).

#### **7.4. Фаза 2. С 4,1/4 – млрд л. н. до 3,8 млрд л. н. Эпоха Поздней тяжелой бомбардировки**

Изменение орбит Юпитера и Сатурна, вхождение их в резонанс и перемена орбиты Нептуна, вероятно, усилили процесс так называемой Поздней эпохи тяжелой бомбардировки и продлили ее (Bottke *et al.* 2012; Gomes *et al.* 2005; Early... 2012). В частности, существует гипотеза, что Нептун, погрузившись в афелии в пояс Койпера, изменил орбиты и направления многих ледяных тел, которые устремились во внутреннюю часть Солнечной системы, что и составило основу Поздней тяжелой бомбардировки (Язев 2018: 314). Косвенным доказательством этого является предположение, что сейчас в поясе Койпера остался только 1 % от того количества ледяных тел, что было изначально (Там же: 315). Но есть и обратные предположения: что объекты пояса Койпера сформировались во внутренней части Солнечной системы и вброшены в наблюдаемую зону мигрирующим Нептуном во время этапа нахождения этой планеты на орбите с большим эксцентриситетом (Емельяненко 2010: 30).

Поздняя эпоха тяжелой бомбардировки – это важный период в истории Солнечной системы, когда на каменистые планеты выпало огромное количество метеоритных осадков в результате вышеуказанных событий. Эту эпоху иногда называют лунной<sup>72</sup>. Не-

<sup>72</sup> Поскольку следы падения астероидов в виде кратеров впервые были изучены на Луне, где ударные кратерные формы составляют основной элемент рельефа. «Все планеты внутренней группы, в том числе и Земля, пережили “лунную” фазу, обусловленную метеоритной бомбардировкой, являющейся в то время господствующим рельефообразующим процессом. Ударные кратерные формы составляли основной элемент лунного рельефа. Другими словами, в то время поверхность каждой планеты напоминала современный рельеф поверхности Луны, откуда и произошло название фазы» (Тебиева 2015: 196). Попутно отметим, что далеко не все кратеры на Луне оставлены именно в этот период, большинство

редко даже говорят, что для первых сотен миллионов лет в истории Солнечной системы решающим фактором формирования планет и спутников была астероидная и кометная бомбардировка (Шевченко 2014; Тебиева 2015).

Следы Поздней тяжелой бомбардировки хорошо изучены на Луне, также они подтверждены на Меркурии и Марсе (см., например: Бережной, Сурдин 2012; Ксанфомалити 2012*б*; 2012*е*; Кац и др. 1984). Эти астероиды формировали рельеф, разогревали планеты и небесные тела, создавали новые минералы (как реголит на Луне и Меркурии). Обычно считается, что эпоха Поздней тяжелой бомбардировки длилась 300 млн лет (примерно с 4,1 млрд л. н. до 3,8 млрд л. н.). Однако относительно недавние исследования показали, что, возможно, она оказалась более длительной. Благодаря новым методикам исследования (Johnson, Melosh 2012) удалось установить, что Поздняя тяжелая бомбардировка закончилась не 3,8 млрд л. н., а 3,2 млрд л. н., то есть продолжалась почти миллиард лет. Следы Поздней тяжелой бомбардировки местами сохранились, но далеко не везде, так как рельеф менялся, поверхность стирала следы. Однако это время (с 3,8 млрд до 3,2 млрд л. н.) отнесено нами к следующей фазе.

Кроме того, не так давно было высказано предположение, что пояс астероидов в прошлом начинался на расстоянии 1,7 а. е. от Солнца вместо сегодняшних 2,1 а. е., то есть данный пояс благодаря гравитационным воздействиям был отодвинут (Bottke *et al.* 2012). И именно это продлило эпоху Поздней тяжелой бомбардировки, в результате чего период катастрофических столкновений с астероидами и их мощного падения на планеты земной группы продолжался довольно долго. Дело в том, что в результате миграции этого пояса и гравитационного воздействия со стороны планет-гигантов астероиды на границе пояса перешли на орбиты с большим наклоном. В итоге они начали сталкиваться с каменными планетами Солнечной системы позже, чем другие небес-

---

следов метеоритов на Луне имеет возраст 1–3 млрд лет (Бережной, Сурдин 2012), поскольку первичные кратеры были частично скрыты магмой в период вулканической активности на Луне. Но, несомненно, часть кратеров очень древняя, их возраст равен 4,4–3,8 млрд лет (Кац и др. 1984). Зато на Меркурии почти все эти кратеры образовались от падения крупных метеоритных тел в период формирования планеты – около 4 млрд лет назад (Ксанфомалити 2012*б*: 109).

ные тела. Некоторые из этих тел продолжали падать на Землю вплоть до 2 млрд л. н. (см.: Bottke *et al.* 2012; Глуховский, Кузьмин 2012).

**Поздняя тяжелая бомбардировка и газовые планеты.** Относительно этого периода в целом в предположениях полное согласие. На силикатных и даже ледяных телах, как уже было сказано, можно найти следы ударных событий этой эпохи. Газовая оболочка газово-жидких планет, конечно, в отличие от твердой (как на силикатных планетах), не сохраняет следов от столкновений с метеоритами. Однако это вовсе не означает, что Юпитер и Сатурн не подвергались такой бомбардировке. Скорее, напротив, будучи столь огромными, они получали львиную долю падавших астероидов (по принципу «большой получает больше»). И сегодня число метеоритов, которые падают на такие планеты, очень велико. Плотность метеорного потока в окрестностях Юпитера в 170 раз больше, чем в окрестностях Земли (Язев 2018: 182), соответственно, он имеет намного больше столкновений, что может дополнительно давать ему энергию. И, как мы увидим далее, вероятно, столкновения давали этим планеты еще больше энергии в раннее время. О том, что и указанные планеты пережили эпоху тяжелой бомбардировки, косвенно также свидетельствуют многочисленные кратеры на некоторых спутниках Юпитера.

Чуть ли не половину поверхности Ганимеда занимает рельеф, который, вероятно, можно считать наиболее старым. Размер участка  $19 \times 26$  км. Темная поверхность несет следы многочисленных метеоритных ударов, а на валах наиболее старых кратеров прослеживается сегментация, ориентированная в двух направлениях. Этот процесс сопутствовал выпадению темного метеоритного вещества на ледяную поверхность спутника. Ударные кратеры на поверхности Ганимеда и следующего спутника, Каллисто, образовались под действием выпадавших на их поверхность ледяных и силикатных обломков в эпоху последних стадий образования планет и спутников (Ксанфомалити 1997: 170).

Остальные фазы мы будем характеризовать в двух следующих главах.