

## **Глава 9. Геологические процессы и некоторые исторические факты, связанные с формированием рельефа**

### **9.1. Геологические эпохи и факты, связанные с формированием рельефа. Общие замечания**

В настоящее время успехи исследования планет и планетных тел позволяют создавать грубые схемы геологической эволюции отдельных тел, прежде всего, конечно, планет земной группы. Наиболее подробно изучены Луна, Марс, в меньшей степени Меркурий и хуже – Венера. Сопоставляя их историю с геологической историей Земли, уже можно говорить о непрерывной, еще очень неточной, но геологической истории. Естественно, вариантов периодизации довольно много. Очевидно, что на планетах, имеющих атмосферу, по сравнению с безатмосферными важную роль в формировании рельефа играют процессы выветривания (Язев 2018: 119).

Каждая планета вносит свой вклад в развитие планетологии. Планеты, на которых эволюция происходила дольше, демонстрируют разные ее пути, те развилки и преграды, которые на нем встречаются. Планеты, где активность завершилась рано, открывают нам возможность увидеть ранние фазы эволюции. В этом смысле Луна представляет больший интерес для проблемы происхождения, чем Земля, Венера и Марс, то есть планеты, на которых процессы эрозии стерли следы ранней истории (Жарков 2013).

Как уже было сказано, ударные процессы и структуры играли (и все еще играют) очень важную роль в формировании рельефа планет. Для безатмосферных планет их роль резко возрастает. Напоминаем, что по плотности кратеров более 10 кв. км на 1 млн км первое место занимает Луна, за ней следует Меркурий, далее

Марс, уступая Луне почти вдвое<sup>77</sup>. Нет ничего удивительного, что рельеф Меркурия похож на рельеф Луны (хотя их внутреннее строение радикально отличается). Оба тела испытали тяжелую метеоритно-астероидную бомбардировку, которая оставила страшные следы на их поверхности (как оспа на лице переболевших ею людей). Но похожи в этом плане и другие силикатные тела – спутники гигантов. Сегодня считается твердо установленным, что подавляющая часть лунного, меркурианского и марсианского кратерного рельефа, а также рельеф большинства спутников планет-гигантов образован ударно-взрывными процессами. Об этом говорит характер мелких частиц реголита, так называемых брекчий. При этом мощные удары могли способствовать магматическим процессам. Так, разрушение грунта на большую глубину при ударах метеоритов могло облегчать жидкой лаве путь к поверхности (Ксанфомалити 2012б: 115).

На поверхности Меркурия и Луны можно увидеть похожие кратеры (с радиальными лучами и цепочками вторичных кратеров вокруг крупнейших из них), разломы и сбросы, а также горы (до 4 км высотой) и узкие долины. На обоих телах есть обширные равнины, названные бассейнами (на Луне они также называются морями).

Но, конечно, рельеф вулканических структур полностью не отражает многообразие развития структурных форм, так как показывает только тектонические деформации в виде впадин и возвышенностей поверхности планет. Рельефообразующее значение эндогенных процессов компенсируется экзогенными процессами в течение длительных этапов развития планет. Воздействие экзогенных факторов (выветривание, обрушение, накопление и др.) на структуру поверхности рельефа планет весьма значительно (Пугачева, Шевченко 2015: 209).

В завершение этого подраздела напомним о том, о чем уже шла речь в *Главе 5*. Уже на ранних стадиях формирования литосферы

---

<sup>77</sup> Еще раз напомним некоторые данные. На Луне 392 крупных (от 10 км) ударных кратеров на 1 млн км площади; на Меркурии – 360; на Марсе – 210. На Луне только на видимой стороне находится 15 тыс. кратеров (Язев 2018: 156). Как полагают, история первых ~700 млн лет существования Луны как небесного тела отмечена образованием на ее поверхности 43–45 ударных бассейнов диаметром более 300 км (Шевченко 2015: 54).

планет земной группы и Луны возникали огромные депрессионные формы, занимающие примерно 1/3 их поверхности (то есть «океанические впадины»). Такое явление можно связать с некоторым дефицитом вещества, возникшим вследствие образования первозданных континентов. Впоследствии этот дефицит компенсировался базальтовыми излияниями (Кац и др. 1984).

## **9.2. Геологические эпохи на отдельных планетах: Земле, Луне, Меркурии**

### **9.2.1. Земля**

В этой работе мы не ставили задачу сколько-нибудь подробно описывать геологическую историю Земли (это будет сделано в книге, посвященной непосредственно данной проблеме). Выше было дано некоторое представление о первых этапах ее геологического развития (см. также Таблицу хронологических событий Солнечной системы в *Приложении 2*). Добавим, что, по некоторым предположениям, в период 4,35–4,25 млрд л. н. имело место образование первичной массы осадочных пород. А уже в районе 4,0–3,5 млрд л. н. произошли рециклинг первичной и вторичной коры и образование микроконтинентов (третичной коры), а также зарождение тектоники литосферных плит (Сиротин, Лебедев 2001: 21). Но другие исследователи относят эти события к более позднему периоду, особенно начало тектоники литосферных плит (в интервал 3–2 млрд л. н.). Начало действия механизма тектоники плит могло привести к еще большему вулканизму и интенсивному росту континентальной коры (гранитного типа), так как в зонах субдукции в мантию стало поступать много воды. Начиная с глубокой древности важнейшую часть истории нашей планеты составляли изменения соотношений на ее поверхности литосферы и гидросферы, поскольку океаны то занимали огромную часть планеты, то отступали.

Так, в мезоархее от 3,2 до 2,8 млрд л. н. практически всю поверхность планеты занимал неглубокий океан. К началу протерозоя (2,5 млрд л. н.) поверхность Земли разделилась на суперконтинент Пангею-0 и Мировой океан Панталассу. В конце раннего протерозоя (1,6 млрд л. н.) возник новый гигантский материк – Пангея-1. В следующие сотни миллионов лет Пангея-1 испытывала растяжение и деструкцию, а в позднем рифее (700–650 млн л. н.) раскололась

на две части: северную – Лавразию и южную – Гондвану. Гондвану и Лавразию разделяет море Тетис. Можно упомянуть и суперконтиненты (о которых выше мы уже говорили), состоявшие почти из всех имевшихся континентальных масс: 1,75 млрд л. н. – Колумбия, 1 млрд л. н. – Родиния (Габдуллин и др. 2012: 209–210).

### 9.2.2. Луна. Геологические эпохи развития Луны

После Земли Луна является наиболее изученным космическим объектом. Тем не менее в отношении ее истории, особенно ранних эпох, очень много неясного и, соответственно, очень много гипотез и точек зрения. Одна из распространенных точек зрения состоит в том, что на Луне нет и, видимо, никогда не было плотной атмосферы и гидросферы и что Луна с самого начала была горячей.

В данном разделе геологические эпохи Луны представлены по В. Н. Жаркову (2013: 353–355).

**Первый период** в жизни Луны продолжался около 110 млн лет (примерно с 4510 млн л. н. до 4400 млн л. н.)<sup>78</sup>. Это был период формирования макроструктуры лунных недр, то есть формирования ее первичных оболочек в результате частичной дифференциации ее вещества.

**Второй период** в развитии Луны длился дольше, примерно 400 млн лет (с 4400 млн л. н. до 4000 млн л. н.). В начале периода завершилась кристаллизация верхней мантии, что связывается с началом образования круговых морей, выбросы из которых практически завершили формирование макроструктуры материков. В этот период на Луне протекали разнообразные процессы, которые привели к ее стабилизации как планетного тела. Это был период активной вулканической деятельности, интенсивной бомбардировки лунной поверхности метеоритами, в результате чего возникли лунные горные породы (брекчии) и происходил ударный метаморфизм древних пород. При этом дальнейшая эволюция недр определялась медленным остыванием наружного слоя Луны, увеличением толщины лунной литосферы, а соответственно, вытесне-

<sup>78</sup> Надо учитывать, что В. Н. Жарков не дает исходной даты начала образования Луны, но дата 4,51 млрд л. н. в целом более или менее близка к предположениям других ученых. Хотя эта дата, как и время образования Земли, может иметь колебания в пределах нескольких десятков миллионов лет.

нием зоны конвекции (астеносферы) к центральным областям Луны. Но формирование поверхностных пород ранней Луны заметно осложнялось падениями крупных астероидов, что приводило к подъему на поверхность вещества из глубин в десятки километров и его разбрасыванию.

К этому следует добавить, что в описанной и предыдущей фазах геологической истории Луны на нее существенно влияло воздействие Земли, так как Луна была намного ближе к Земле, чем сейчас. В какой-то степени это могло повлиять на асимметрию в плане толщины коры на видимой и обратной сторонах Луны.

Очевидно, что в периоды, когда Земля и Луна были сближены, приливное воздействие Земли было гораздо более значительным. Расчеты показали, что при расстоянии Луны от Земли, составляющем одну треть от современного, гравитационное воздействие на видимой стороне могло быть в 10 раз больше, чем на обратном полушарии Луны, а при сокращении расстояния до 1/10 эти различия возрастали в 10 тыс. раз. Гравитационное воздействие Земли должно было способствовать созданию глобальной тектонической асимметрии с формированием океанического сегмента именно на видимой стороне. Гравитационное воздействие Земли, несомненно, проявлялось на самых ранних стадиях формирования Луны, усиливая ее первичную неоднородность, а также образование более мощной коры на обратной стороне (Кац и др. 1984).

**Третий период** в эволюции Луны длился приблизительно 100 млн лет (с 4000 до 3900 млн л. н.). Он связан с ударным образованием круговых бассейнов (Море Дождей, Море Восточное, Море Ясности, Море Кризисов и др.). Выбросы из кратеров будущих круговых морей образовали насыпные горы и некоторые формации (например, Фра Мауро в Океане Бурь), в значительной степени стерли следы предыдущей истории лунной поверхности и завершили формирование материков. В *Главе 3* мы рассказывали о крупнейшем ударном образовании в Солнечной системе, бассейне Южный полюс – Эйткен на Луне, который, по-видимому, образовался в период 4 млрд л. н. (Шевченко 2015: 54), то есть относится к данному или предыдущему периоду.

Следующий, **четвертый, период** был весьма продолжительным (от 3,9 млрд л. н. до 3,16 млрд л. н., то есть длился почти 750 млн лет)<sup>79</sup>. Данный период также называют морской фазой, поскольку он связан с заполнением базальтовой лавой лунных морей и завершением образования неоднородностей, вызываемых гравитационными аномалиями, так называемых масконов. Таким образом, мы приходим к важному пониманию, что события образования ударных кратеров круговых морей (в районе 4 млрд л. н., см. выше) и заполнения их лавой разделены заметным интервалом в сотни миллионов лет. В это время также шел процесс формирования вторичной коры Луны в результате плавления пород верхней и средней мантии (Шевченко 2014). Лавы морских базальтов покрывают 17 % площади Луны, и они завершили формирование облика видимого полушария нашего спутника.

Хотя четвертый период в эволюции Луны называют «морским», его более фундаментальной особенностью является затухание тектонической активности планеты<sup>80</sup>. В этот же период происходит ослабление и исчезновение магнитного поля. Лунный вулканизм прошел два пика активности: 3,2 и 3,7 млрд л. н. (Бережной, Сурдин 2012: 100).

**Пятый – «послеморской» – период** длится до сих пор. Следовательно, он наиболее длительный. Он оказался таким бесконечным (более 3 млрд лет), потому что активные процессы прекратились и состояние Луны стабилизировалось. На Земле геологические периоды становились все более дробными, на Луне геологическая история почти замерла. В этом наглядно проявляется разница между живой и мертвой планетами. Конечно, происходило падение на Луну метеоритов и образование кратеров. Таким образом, эрозия лунной поверхности в последние  $3 \times 10^9$  лет обусловлена только метеоритной бомбардировкой. Эта бомбардировка, по существу, не стерла главных событий в жизни Луны, о которых сказано выше.

---

<sup>79</sup> Этот период в данных хронологических рамках выделяется почти всеми исследователями (см., например: Тебиева 2015: 205).

<sup>80</sup> Многие исследователи отмечают, что в районе 3 млрд л. н. вулканическая активность исчезла или резко сократилась, но есть и другие взгляды. Например, В. В. Шевченко (2014) считает, что эта деятельность прекратилась 2,5 млрд л. н. Некоторые предполагают, что вулканическая деятельность закончилась 500 млн л. н. (Язев 2018: 101).

Данную периодизацию может хорошо дополнить и периодизация по фазам активизации падения метеоритов и астероидов (хотя должно быть понятно, что такое падение по времени было очень неравномерным).

Для Луны выделяется пять периодов (систем) формирования кратерированной поверхности (которая является результатом метеоритной [импактной] бомбардировки): 1) до-нектарисовая (4,5–3,92 млрд л. н.); 2) нектарисовая (3,92–3,85 млрд л. н.); 3) имбрианская (3,85–3,15 млрд л. н.); 4) эратосфенская (3,15–1,0 млрд л. н.); 5) коперниканская (1,0 млрд л. н. – до настоящего времени) [Сиротин 2013: 1081].

### **9.2.3. Меркурий**

Меркурий, как уже говорилось, в ряде моментов похож на Луну, в том числе и своей историей. Но в отличие от Луны Меркурий мало исследован, поэтому выделить для него геологические эпохи пока затруднительно. Напомним, основными рельефообразующими факторами на Меркурии были ударные события и магматические процессы. В частности, они повлияли на формирование внутренних и внешних равнин планеты. Так, возможно, гладкие равнины сформировались в результате интенсивной бомбардировки 4,2–4,0 млрд л. н. А более молодые лавовые затопления внутренних и внешних равнин Меркурия связаны с бассейнами, сформированными ударами метеоритов около 3,8 млрд л. н. (Пугачева, Шевченко 2015: 205). При этом на Меркурии (как, впрочем, и на Луне, и на Марсе) имел место особого типа вулканизм, так называемый эффузивный, когда лава медленно выходит и растекается на большие площади, а на Земле – эксплозивный вулканизм, с извержениями (Язев 2018: 45). Эффузивный вулканизм для планет земной группы оказывается более типичным, чем эксплозивный, характерный для Земли.

Крупнейший бассейн на Меркурии носит название Калорис, или равнина Жары, его диаметр равен 1200–1300 км, валы достигают 2 км (Ксанфомалити 2012б: 116). Это ударная структура, которая образовалась 3,9 млрд л. н. (то есть в конце эпохи Поздней тяжелой бомбардировки) в результате падения весьма крупного тела. Последствия такого удара предполагаются очень значительные. Удар был настолько сильным, что, возможно, происхождение рельефа противоположной стороны планеты также связано с образова-

нием равнины Жары. Предполагается, что мощные сейсмические волны, которые возникли в момент столкновения, прошли сквозь всю планету и сфокусировались в ее диаметрально противоположной точке. В результате этого сейсмического удара возникли трещины, поверхность раскололась и вздыбилась хаотическим нагромождением многокилометровых блоков на высоту 1–2 км. Возможно, в это же короткое время возникли крупные кратеры (Ксанфомалити 2012б: 116–117).

Интересно, что равнину Жары на самой близкой к Солнцу планете вполне возможно сравнить с дальним спутником Юпитера – Каллисто. Его поверхность представляет собой насыщенный метеоритными кратерами рельеф, сохранившийся со времени образования системы Юпитера, возрастом около 3,5 млрд лет. На ней запечатлелись следы колоссального столкновения с относительно большим телом: трещины вокруг одного из метеоритных кратеров образуют более десяти концентрических колец диаметром до 2600 км. Образование получило название Вальхалла. Два мира – мир глубокого холода Каллисто и раскаленного (в полдень) Меркурия – роднят одинаковые по происхождению и сходные по масштабам и очертаниям кольцевые структуры на Каллисто и валы равнины Жары на Меркурии (Он же 1997: 171).

Однако, как уже было сказано, активная вулканическая и магматическая деятельность на планете прекратилась давно, 3,5 млрд л. н. (Язев 2018: 45), а ударные процессы стали более редкими. С тех пор изменения рельефа были менее существенными. Тем не менее Меркурий претерпел небольшие гравитационные сжатия, которые, как мы уже писали, привели к возникновению довольно уникальных образований, так называемых эскарпов, – выступов высотой 2–3 км, которые разделяют два района поверхности. Они, вероятно, образовались в результате растрескивания, сдвигов и напоззаний участков коры друг на друга в процессе гравитационного сжатия планеты (Там же: 48). Несмотря на прекращение вулканической деятельности и сравнительную редкость крупных астероидов и метеоритов (по сравнению с древними периодами), определенное изменение рельефа Меркурия имеет место (либо, по крайней мере, имело относительно недавно). Об этом говорят эскарпы, а также ямы и грабены. Самые молодые эскарпы имеют возраст всего 50 млн л. н. (Там же: 119). Но, конечно, по активности эти



изменения несравнимы не только с Землей, но даже с Марсом и Венерой.

### **9.3. Геологические эпохи на отдельных планетах: Марс и Венера**

#### **9.3.1. Марс. Геологические эпохи Марса**

Изучение поверхности Марса позволяет делить геологическую историю этой планеты на три крупнейшие эпохи (зоны). Их названия, как и большинство современных астрономических названий в Солнечной системе, связаны с мифическими героями<sup>81</sup>:

- 1) ранний эон, *нойский*, – примерно 4,5–3,8 млрд л. н.;
- 2) средний, *гесперийский*, – примерно 3,8–2,8 млрд л. н.;
- 3) поздний, *амазонский* (иногда пишется как амазонийский), – примерно 2,8 млрд лет – до настоящего времени<sup>82</sup>. При этом каждый эон делится на периоды (эпохи)<sup>83</sup>. Но у разных авторов существуют большие расхождения в датировках эонов.

*В течение первого – нойского – зона* (4,5–3,8 млрд лет) произошло много событий<sup>84</sup>, в частности дифференциация Марса на внутренние сферы и образование первичной марсианской коры.

Естественно, что сроки такой дифференциации можно указать только гипотетически, и здесь имеются большие расхождения. Как и в отношении Земли (см. выше), некоторые планетологи предполагают, что дифференциация Марса – образование ядра и выделение коры – произошла достаточно быстро, а именно – в течение первых 100 млн лет (Адушкин и др. 2008: 286). Дифференциация должна была дать дополнительную энергию. С другой стороны, мы помним, что дифференциация Марса оказалась незавершенной, в результате у исследователей осталось много вопросов относительно его ядра (в частности, существует ли оно). В лю-

<sup>81</sup> Датировки и описание эонов (кроме специально указанных ссылок) даются по: Сиротин 2009: 100–101.

<sup>82</sup> Соответственно, названы по имени библейского пророка Ноя; в честь героинь античного мира, сестер – хранительниц яблок бессмертия; в честь легендарного племени женщин-воительниц.

<sup>83</sup> Нойский эон подразделяется на нижненойский, средненойский и верхненойский; гесперийский – на раннегесперийский и позднегесперийский; амазонийский – на раннеамазонийский, среднеамазонийский и позднеамазонийский.

<sup>84</sup> По времени нойский период приблизительно совпадает с земными катархейским и ранним архейским зонами и донектарским периодом геологической истории Луны (4,5–3,92 млрд л. н.).

бом случае это ядро заметно меньше, чем у остальных планет земной группы, не более 5–7 % от массы планеты (Ксанфомалити 1997: 125). Это же повлияло и на очень слабое магнитное поле планеты. Зато у Марса чрезвычайно толстая литосфера (Там же).

В этом зоне должна была проявляться тектоническая и вулканическая деятельность Марса. Но поскольку первичная кора этой планеты во многом не сохранилась, выделить их рельефообразующую роль можно только по аналогии с Луной и Меркурием, например, сравнивая с возрастом базальтовых излияний, заполнивших лунные моря. В то же время, как мы помним, этот период включал в себя время Поздней тяжелой бомбардировки. В результате главную рельефообразующую роль сыграла именно бомбардировка Марса метеоритными телами. Все крупные ударные бассейны Марса: Эллада, Аргир, Исида, а также крупные кратеры Кассини, Скиапарелли, Гюйгенс и др., относятся к первому – нойскому – эону (было также сформировано плато Фарсида). Вероятно, в первой половине этого эона произошла планетарная структурная перестройка, которая создала дихотомию между южным и северным полушарием (о ней шла речь в *Главе 5*). Это привело к образованию высокого уровня южного полушария и низкого уровня северного полушария, которые разделял глобальный уступ.

Более всего интересны другие возможные крупные трансформации. В частности, предполагается (Сиротин 2009: 101), что дифференциация недр Марса привела к формированию значительно более плотной, чем в настоящее время, атмосферы<sup>85</sup>. Но особенно интригующе звучат высказывания о возможной первичной гидросфере марсианских океанов на месте равнин планеты, преимущественно в северном полушарии<sup>86</sup>. Таким образом, более низкое северное полушарие может являться дном марсианского океана. При

<sup>85</sup> Но по мере прекращения поступления газов она все сильнее разрежалась и продолжает разрежаться (Тебиева 2015: 196).

<sup>86</sup> Следует отметить сенсационные открытия, выполненные с помощью марсоходов «Spirit» и «Opportunity», доставленных на поверхность Марса (запущены в июне 2003 г., «MER-1» и «MER-2», США). Кроме открытия осадочных пород явно водно-осадочного происхождения, вне кратеров в местах посадки были обнаружены следы хлоридов и сульфатов, что указывает на существование первичных океанов (или крупных озер), по химическому составу отвечающих первозданным океанам Земли (Сиротин 2009: 101). В последние годы были некоторые свидетельства наличия подледных озер с жидкой водой на Марсе.

этом не исключено, что южное полушарие было покрыто огромными реками и озерами. В целом рельеф повсюду носит следы древнего присутствия воды (Язев 2018: 119). Также на Марсе обнаружены минералы с высоким содержанием химически связанной воды (Галимов 2008), эти гидратированные минералы образовались в эпоху раннего Марса, когда на дне природных водоемов накапливались слои осадочных пород (Митрофанов 2015: 158). Таким образом, в плане развития рельефа интересно отметить: на Марсе накапливались осадочные породы, что нехарактерно для других планет Солнечной системы (кроме Земли). Предполагается, что климат в это время был влажным и теплым (более подробно об этом мы расскажем далее).

*Второй – гесперийский – эон* (3,8–2,8 млрд л. н.) характеризуется интенсивной вулканической деятельностью. Это привело к покрытию лавовыми излияниями поверхности в пределах древнейших материковых местностей, а также к затоплению лавой крупных кольцевых структур, которые возникли в течение предыдущего эона. Основные следы вулканизма на Марсе этого и начала следующего эона представлены залитыми базальтами равнинами, которые сходны с лунными морями. Они сформировались около 3,5–2 млрд л. н. (Пугачева, Шевченко 2015: 204).

Грандиозность размеров марсианских щитовых вулканов предположительно связана с тем, что горячие мантийные потоки (плюмы), породившие вулканы, сотнями миллионов лет остаются фиксированными относительно поверхности. Оценка возраста окружающих Фарсиду разломов и трещин говорит о ее чрезвычайно древнем происхождении. Процессы ее формирования происходили 3,7 млрд л. н., а последнее извержение Олимпа было сравнительно недавно (возможно, всего 2 млн л. н.). Это означает, что за данный период кора Марса не сдвигалась, вулканический очаг продолжал действовать все это время, извергая огромное количество лавы, что и привело к гигантским вулканическим постройкам. На Земле смещение литосферных плит относительно вулканических очагов не позволяет формироваться вулканам таких размеров. Земные вулканы существуют более короткое время (Язев 2018: 122–124).

Это очень интересное различие в истории обеих планет. Вообще, повторимся, движение литосферных плит на Земле пока выглядит уникальным для Солнечной системы.

Примерно 3 млрд л. н. произошел катастрофический разрыв в марсианской коре, когда она «лопнула» под влиянием неких мощных внешних сил. С этим древним проявлением тектоники связано формирование грандиозного каньона – долины Маринера (Язев 2011: 141).

Уникальными были процессы, связанные с марсианской гидросферой. В начале этого эона (вплоть до 3,5 млрд л. н.) хорошо прослеживаются следы деятельности водных потоков. Даже существует мнение, что гесперийский период характеризуется катастрофическими наводнениями, в результате которых на поверхности образовались каналы оттока. Важно отметить, что гесперийский период является промежуточным и переходным в истории Марса: в это время климат изменился от влажного и теплого, свойственного первому (нойскому) периоду, до современного – холодного и сухого. Есть все основания считать, что и формирование полярных шапок началось с этого же рубежа (с 3,5 млрд л. н.). (Сиротин 2009: 102). Довольно активными были и ветровые (эоловые) геологические процессы (Там же).

*Следующий (третий) – амазонский – эон* (2,8 млрд л. н. – до настоящего времени) характеризуется довольно активной вулканической и тектонической деятельностью. В частности, тектоническая активность неоднократно возобновлялась в областях Тарсис и Элизий, а также в зоне глобального уступа (между полушариями). Продолжались обширные вулканические площадные излияния<sup>87</sup>. Именно к этому периоду относится образование гигантской рифовой зоны долины Маринер с Лабиринтом Ночи. Отдельные огромные вулканы, расположенные в экваториальной зоне Марса, сформировались примерно 2–1 млрд л. н. (Пугачева, Шевченко 2015: 204).

Однако в этом смысле амазонский этап неравномерен. Дело в том, что со временем интенсивность лавовых излияний постепенно затухала. Последнее мощное проявление площадного вулканиз-

---

<sup>87</sup> Не только на Тарсисе и Элизии, но и на равнине Большой Сирт и плато Гесперия, к юго-западу от Эллады и в ряде локальных мест материковой части Марса.

ма произошло не позднее 500 млн л. н. и завершилось формированием щитовых гигантских вулканов: сначала Арсии, затем Павлины и Аскрийи и, наконец, образованием самого молодого вулкана – Олимпа. Таким образом, возраст гигантских вулканов невелик – 300–400 млн лет (см.: Язев 2018: 122–23).

Как мы помним, это самые высокие горы в Солнечной системе<sup>88</sup>. Таким образом, на Марсе, по сравнению с Луной и Меркурием, глобальная эндогенная (внутренняя) активность имела место очень длительное время (Шевченко 2014).

Для данной главы важно, что расчеты вязкости лавы, выполненные для вулкана Арсия, показали: ее плотность меньше, чем у лунной лавы, и существенно меньше, чем у земной. А это значит, что в условиях невысокой силы тяжести на Марсе ( $3,72 \text{ м/с}^2$ ) эта лава растекалась на очень большие расстояния (до 1500 км), изменяя рельеф и заполняя древние ударные кратеры.

Важно отметить, что и в целом глобальный вулканизм на Марсе, несомненно, имел большое, даже решающее значение для переломных событий в его эволюции (Там же: 205). Однако в последние несколько сотен миллионов лет Марс не проявляет заметной тектонической и вулканической активности. Очевидно, это вызвано постепенным остыванием недр (Пугачева, Шевченко 2015: 204). Таким образом, красная планета прошла свой пик в области не только гидросферы (что отличает ее от всех остальных планет после Земли) и климата, но и вулканизма. Хотя Марс и Земля ровесники, но первый выглядит уже глубоким стариком, тогда как последняя еще молода. Однако недавние уточнения могут доказать, что Марс не так уж и стар, как казалось недавно. Дело в том, что более детальные исследования позволили определить эпоху последних извержений, приблизив их к нашему времени. Они могли иметь место в период от 115 млн л. н. до совсем недавнего по геологическим меркам времени – 4–2 млн л. н.

В отношении амазонийского эона следует добавить, что в нем активно продолжались ветровые процессы, влияющие на рельеф (Сиротин 2009: 102). Впрочем, по мнению специалистов, на Марсе ветровые (эоловые) процессы проявляются в течение всей истории

---

<sup>88</sup> Не можем еще раз не отметить, как расширяются наши представления. Мы уже имеем возможность говорить о горах, кратерах и т. п., самых больших не только на Земле, но и в Солнечной системе!

геологического развития планеты, несмотря на то, что в последнее время (в геологическом масштабе) газовая оболочка планеты становится все более незначительной (Пугачева, Шевченко 2015: 209). В *Главе 3* мы упоминали о том, какие мощные ветра господствуют на Марсе сегодня.

### 9.3.2. Венера

В отличие от Меркурия, Луны и Марса, поверхности которых сформировались миллиарды лет назад, современная поверхность Венеры имеет очень молодой возраст – всего лишь несколько сотен миллионов лет. Следы более древних формаций практически не сохранились, поскольку 95 % этих образований уничтожены поздними наслоениями (Шевченко 2014). Поэтому говорить о геологических эпохах Венеры пока сложно, хотя делаются некоторые предположения об изменении атмосферы и климата (см. ниже). Возраст поверхности Венеры ближе всего к возрасту земной поверхности. Однако, обладая иной тепловой историей, Венера сформировала принципиально другую среду – значительно отличающийся от земного химический состав атмосферы, высокие значения давления и температуры у поверхности (Там же). Вулканическая деятельность имела для Венеры большое значение (Пугачева, Шевченко 2015: 205).

На Венере, как мы уже говорили, несмотря на плотную атмосферу, сохранилось множество кратеров ударного происхождения диаметром от 10 до 300 км (см. ниже). Многие удары падающих космических тел явно сопровождались обильными излияниями лавы (Язев 2011: 72). Но наличие большого количества древних ударных кратеров, не разрушенных эрозией, а также другие данные позволяют утверждать, что поверхность планеты в основном мало изменилась за последние 300–500 млн лет. Хотя Венера в плане изменения поверхности больше похожа на Землю, все же в динамике процессов наблюдается большая разница. За 300 и тем более 500 млн лет на Земле произошло столько изменений, что их невозможно перечислить.

Напомним, что вулканы на Венере не похожи на земные. Там больше всего вулканов в форме конусов и куполов. Так, возле области Альфа обнаружены совершенно круглые образования с плоской или проваленной верхушкой и очень крутыми склонами диаметром до 65 км. Предполагается, что та-

кие «блины» сформировались при излияниях вязкой лавы, которая медленно растекалась и застывала. Считается, что область Бета представляет собой гигантский щитовой вулкан высотой 4–5 км с характерным размером основания около 1000 км. Радиальные лучи, расходящиеся от центра этой области, – это, видимо, следы грандиозных лавовых потоков, стекавших по пологим склонам вулкана (Язев 2018).

Таким образом, есть основания полагать, что вулканическая активность планеты была наиболее сильной 500–300 млн л. н. В это время на планете происходили грандиозные явления, связанные с обновлением ее поверхности в результате массового излияния лавы (Шкодзинский 2017: 72–73). Затем вулканическая активность снизилась, но не прекратилась до настоящего времени (см. об этом ниже), и это отличает Венеру от Луны, Меркурия и Марса.

#### **9.4. Климат и глобальные климатические катастрофы**

**Вода в Солнечной системе.** Мы уже касались вопроса о наличии воды в Солнечной системе. Помимо Земли она достаточно распространена и на других телах Солнечной системы, причем в самых разных формах. В основном, правда, в виде пара или водяного льда, но в отдельных местах и в виде крупных водоемов, целых океанов, правда, подледных (прикрытых толщей льда), в частности, на спутниках Юпитера и Сатурна (Европе, Энцеладе, Рее, Дионе). Толща льдов и океанов под ними очень велика, намного превосходит аналогичную на Земле (Кусков и др. 2009: 514). Таким образом, есть уникальные тела, которые по запасам воды могут превосходить Землю. Однако она обладает открытой и сложной гидросферой, обеспечивающей целый ряд необходимых для эволюции планеты и существования жизни функций, такого больше нигде не встречается.

В то же время имеется довольно устоявшаяся точка зрения, подтвержденная многочисленными фактами, что жидкая гидросфера была ранее и на других планетах, а не только на Земле, и особенно значима была гидросфера на Марсе. Рассмотрим эти данные.

**Венера.** Сегодня на Венере практически нет воды, кроме некоторого количества водяного пара. Относительно причин отсутствия воды существует много точек зрения, правота которых во многом зависит от того, каков был источник ее появления: сразу ли она

выделялась в процессе аккреции, либо уже в процессе расплавления массы планеты, либо позже, в процессе вулканической деятельности, и т. д. Одна из гипотез предполагает, что на том расстоянии от Солнца, где происходил процесс формирования Венеры в газопылевом облаке, изначально было недостаточно воды, соответственно, ее на планете и не должно было быть (это так называемая теория разгоняющегося парникового эффекта). Однако есть мнения, что в ранний период вода на Венере была (теория влажного парника). Согласно одной из гипотез, первоначально на Венере было не меньше воды, чем на Земле. Венера даже когда-то имела океаны, но лишилась их, потому что ее атмосфера у поверхности была чересчур горячей и влажной, а именно – относительная концентрация водяного пара составляла более 20 % по объему. Все это должно было привести к интенсивному испарению воды и насыщению атмосферы ее парами. Благодаря росту концентрации водяного пара во все более плотной атмосфере должен был усиливаться парниковый эффект, что приводило к дальнейшему росту температуры. В условиях Венеры (в отличие от Земли) вода получает условия для конденсации только на очень больших высотах, где вместо конденсации происходит ее диссоциация. А на больших высотах молекулы воды распадались на водород и кислород под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца, и легкий водород беспрепятственно улетучивался из горячей атмосферы в космическое пространство. Таким образом, вода быстро исчезла из атмосферы планеты, а ее остатки оказались связанными серной кислотой в высоких облаках.

Независимо от того, находилась ли ранняя атмосфера Венеры в состоянии разгоняющегося или влажного парника, она обязательно должна была прийти к современному горячему и сухому состоянию. После исчезновения океанов, если они были, прекратилось формирование карбонатов, и углекислый газ начал накапливаться в атмосфере.

Именно углекислый газ, а не расстояние от Венеры до Солнца определяет сегодняшнюю высокую температуру ее поверхности. До Венеры доходит в 1,9 раза больше солнечной радиации, чем до Земли, но ее кислотные облака отражают около 80 % солнечного света, и поэтому она поглощает значительно меньше солнечной энергии, чем Земля. В отсут-



ствии парникового эффекта Венера была бы холоднее Земли и лишь ненамного теплее Марса (Тебиева 2015: 209–210).

Еще более экзотическая версия предусматривает удар гигантского космического тела размерами не менее сотен километров, который мог сорвать насыщенную водяными парами атмосферу (Язев 2011: 66–67). Отметим еще раз, что катастрофы в планетной космогонии играют роль палочки-выручалочки: все неясное можно отнести на их счет.

**Марс.** Более интересно обстоит дело с красной планетой. Низкое атмосферное давление и низкие температуры на Марсе не позволяют воде существовать здесь в жидком состоянии. При существующем давлении 6,1 мбар вода кипит и быстро испаряется при любой температуре. В результате на планете невозможны водоемы в открытом виде: моря, озера, реки и т. д.

В то же время обнаружено великое множество признаков существования на Марсе значительного количества жидкой воды в прошлом. Сохранились сухие русла рек с притоками и долины, потеки на склонах кратеров и другие водно-эрозионные образования. Посадочные аппараты показали наличие минералов, которые образуются при обязательном участии воды. Многие плоскодонные древние кратеры, похоже, были когда-то заполнены водой. Расчеты показывают, что вся масса марсианского льда, будучи растопленной, могла бы образовать океан равномерным слоем порядка десятков (по некоторым оценкам, сотен) метров на всей поверхности планеты. На Марсе налицо огромные запасы воды в виде льда, накопленные в полярных шапках, а также в грунте в виде вечной мерзлоты. Содержание льда в поверхностном грунте достигает 50 %. Вероятно существование жидкой воды подо льдом в некоторых местах, а также грунтовых вод на глубине от 150 до 500 м, которые влияют на современные изменения рельефа планеты, в частности на формирование оврагов, оползни и сели (Ксанфомалити 2004). Современные космические исследования планеты показали, что ранний Марс был таким же влажным и теплым, как и ранняя Земля, и что вода во всех ее фазах – твердой, жидкой и газообразной – остается важной составляющей современной марсианской природной среды (Митрофанов 2015: 159).

Неизвестно, был ли в прежние времена на Марсе единый океан. Но существует мнение, что океан мог занимать Великую Северную

равнину, и его гипотетическое высыхание могло повлечь перераспределение масс на поверхности планеты (Язев 2018: 128–132). Имеется более однозначное мнение о том, что миллиарды лет назад так или иначе существовали многочисленные водоемы (моря, озера, реки, проливы). Словом, большинство исследователей склоняется к тому, что гидросфера на Марсе существовала, причем довольно длительное время.

Многочисленные факты свидетельствуют о том, что в далеком прошлом климатические условия на Марсе существенно отличались от современных, атмосферное давление и температура в более ранние периоды были значительно выше (Там же: 130). А некоторые исследователи (см., например: Павлов 2006: 90, 96) даже говорят о возможной температуре +30–50 °С благодаря атмосфере из углекислого газа и парниковому эффекту.

Отсюда вполне закономерный вывод: какая-то глобальная климатическая катастрофа существенно изменила условия на планете. Естественно, по этому поводу имеется множество гипотез. Основные из них связывают катастрофу с существенными изменениями параметров вращения планеты. Имеются три основные версии: изменение параметров орбиты Марса, изменение положения оси вращения Марса относительно самой планеты либо смещение всей коры Марса относительно нижележащих мантийных слоев (Язев 2018: 130–131). Первая гипотеза связывает изменение орбиты Марса с так называемыми циклами Миланковича<sup>89</sup>. Но она выглядит наименее убедительной, поскольку факты свидетельствуют о том, что климатическая катастрофа произошла на Марсе миллиарды лет назад, после чего, по крайней мере, в течение всего Амазонийского периода, климат радикально не менялся<sup>90</sup>. Если рассматривать вторую гипотезу, то климатическая катастрофа могла быть связана с очередным изменением оси вращения Марса, в результате чего водоемы оказались в зоне высоких широт и начали замерзать.

---

<sup>89</sup> Колебания достигающего Земли количества солнечного света и солнечной радиации на протяжении больших промежутков времени связаны с изменением в течение тысячелетий и десятков тысяч лет поворота земной оси, ее наклона и т. п. Соответственно, подобные явления и последствия могут быть отнесены и к другим планетам.

<sup>90</sup> Но могли происходить отдельные потепления (глобальные или локальные вследствие крупных ударных явлений, вулканических извержений, гипотетических прорывов метана из мерзлого грунта) длительностью в сотни тысяч лет, сопровождавшиеся выходом на поверхность жидкой воды (Язев 2018: 133).

Уменьшение концентрации водяного пара в атмосфере должно было привести к лавинообразному похолоданию, формированию мощных полярных шапок, последующему вымерзанию атмосферного углекислого газа и дальнейшему уменьшению давления. Триггером могли послужить непрозрачные тучи из выброшенных в атмосферу вулканических аэрозолей, перекрывавших солнечным лучам путь к поверхности планеты.

Третья гипотеза предполагает катастрофические смещения полюсов планеты. Если такое смещение могло произойти в давнюю «теплую» эпоху существования Марса, теплые низкоширотные зоны водоемов могли неожиданно и быстро сместиться к полюсам и стремительно замерзнуть, начав лавинообразный процесс выхолаживания, который закончился осаждением сконденсировавшейся углекислоты на полярные шапки<sup>91</sup>.

Вероятнее всего, действовали многие факторы: циклические изменения положения оси вращения и параметров орбиты Марса, перераспределение масс на поверхности и в недрах планеты за счет вулканизма и импактов, возможные смещения коры при отсутствии стабилизирующего влияния крупного спутника (Язев 2018: 132).

**Заключительные рассуждения.** Из обсуждений гипотез о великих климатических катастрофах Марса и Венеры можно сделать вывод: подобно тому, как на Земле климат местности зависит не только от широтного положения места, но и от многих других вещей (рельефа, защищенности горами, близости к морю, направления воздушных потоков и т. п.), климат планет зависит не только от близости к Солнцу, но и от целого ряда других моментов (атмосферы и ее состава, размера, наклона оси, внутренних источников тепла и т. п.). Словом, перед нами закономерности первого, второго, третьего и т. д. порядка, но в конкретной ситуации не всегда закономерность первого порядка важнее закономерности третьего порядка (каким был, например, круговорот углекислого газа по сравнению с близостью к Солнцу).

---

<sup>91</sup> Высказанное 30 лет назад предположение, что шар Марса однажды повернулся, и полюса переместились так, что льды прежних полярных шапок оказались на экваторе, где они сохранились под слоями грунта и отложениями вулканического пепла, также объясняет, почему основные следы проточной воды обнаружены в восточной части равнины Амазония и восточной части Земли Аравия (Ксанфомалити 2004: 207).

Особенности происхождения планет земного типа не объясняют полностью их климата. Три «соседки» (Венера, Земля и Марс) когда-то были похожими во многих отношениях. Они состояли из одинаковых пород, имели атмосферы с примерно одинаковым газовым составом (углекислый газ и водяной пар) и были достаточно массивными, чтобы удерживать воду на большей части своей поверхности. Принципиально различный климат возник на них в основном из-за различий в круговороте углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) – обмене им между корой планеты и атмосферой. Углекислый газ является парниковым: он пропускает солнечный свет, но поглощает инфракрасное излучение (тепло) планеты и переизлучает часть этого тепла назад, к ее поверхности, где молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  подвергаются фотодиссоциации, а водород ускользает в космос. В ходе этого процесса менее чем за 30 млн лет может исчезнуть целый океан (Тебиева 2015: 207). Многие из тех механизмов отрицательной обратной связи, которые способствовали стабилизации земного климата на протяжении 4,5 млрд лет, возможно, действовали бы и на другой планете такого же размера, расположенной дальше от Солнца. Единственная причина, почему замерз Марс, состоит в том, что он слишком мал для существования на нем круговорота углекислого газа (Там же: 217)<sup>92</sup>. Впрочем, этот момент давно отмечался астрономами. Более 120 лет назад К. Фламмарин писал: «Наибольшая разница между Землею и Марсом заключается в незначительности его объема» (Фламмарин 2004: 21).

Но все же в конечном счете, если рассматривать крупный масштаб событий, закономерности первого порядка оказываются важнее (потому они и относятся к первому порядку).

Все эти рассуждения о роли химического состава земной атмосферы имеют значение при моделировании климатических изменений уже состоявшегося факта: «Земля имеет умеренный климат, пригодный для жизни». Главная причина формирования умеренного климата планеты, как показали расчеты, заключается в следующем. Если бы Земля образо-

---

<sup>92</sup> Но, естественно, процессы были гораздо более сложными. Как отмечают специалисты, проблема существования марсианской атмосферы тесно связана с таким явлением, как активный вулканизм на планете (Пугачева, Шевченко 2015: 202). А о марсианском вулканизме известно очень немного.

валась на 5 % а. е. ближе к Солнцу, то атмосфера стала бы настолько горячей, что океаны бы испарились (такой процесс известен как разгоняющийся парниковый эффект). Напротив, если бы планета сформировалась всего на 0,01 а. е. дальше от Солнца, она попала бы в условия разгоняющегося оледенения. Только возникнув в относительно узком поясе орбит – между 0,95 и 1,01 а. е., Земля получила исключительные преимущества, сумев избежать судьбы Марса или Венеры. Эта узкая полоса орбит была названа «непрерывно обитаемой зоной» (Тебиева 2015: 218).

В то же время одних закономерностей первого порядка для качественного эволюционного рывка недостаточно. В частности, примеры Марса и Венеры, а равно и других космических тел, показывают, что для зарождения жизни нужны были уникальные условия, а значит, закономерности разного порядка и, кроме того, целого ряда дополнительных вещей, в том числе и случайностей, о которых пойдет речь в третьей части книги.