

II. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

4

Земля как планета. Земля в ряду других планет^{*}

Леонид Ефимович Гринин

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»;
Институт востоковедения РАН

В настоящей статье мы рассмотрим, в чем Земля сходна с другими планетами Солнечной системы, а чем отличается от них. В статье немало сказано о газовых гигантах (Юпитере, Сатурне) и их спутниках, а также об Уране и Нептуне. Однако наибольшее внимание будет уделено сравнению Земли с каменистыми планетами земной группы. Такое сравнение, сделанное систематически, дает очень многое для понимания общего в строении, функционировании, истории и эволюции планет Солнечной системы. При этом многие явления, которые мы привыкли считать чисто земными, имеют место и на некоторых планетах. В то же время такое сравнение хорошо оттеняет особенности Земли, частью проявившиеся с самого начала, а частью ставшие результатом ее эволюции.

Ключевые слова: Солнечная система, планетная система, Земля, планеты земной группы, экзопланеты, гидросфера, криосфера, атмосфера, рельеф, антиподальность, самоорганизация, дифференциация, энтропия.

В настоящей статье мы рассмотрим, в чем Земля сходна, а чем отличается от других планет (подробно об этом см.: Гринин 2020; см. также: Grinin 2025a; 2025b: appendix; 2026b). Стоит отметить, что время от времени выясняется: то, что ранее считалось специфическим лишь для Земли, имеет место и на других планетах Солнечной системы. Так, наличие воды и тем более гидросферы ранее считалось свойственным только Земле. Однако воду нашли во многих местах, даже на Луне в виде льда, а на Марсе обнаружилось существование в древние периоды океанов. Ранее считалось, что рифтогенез – специфическое земное явление. Однако затем структуры

^{*} **Для цитирования:** Гринин Л. Е. 2025. Земля как планета. Земля в ряду других планет. *Эволюция: Грани эволюции* / Отв. ред. Л. Е. Гринин, А. В. Коротаев. Волгоград: Учитель. С. 79–115. DOI: 10.30884/978-5-7057-6518-8_04.

For citation: Grinin L. E. 2025. Earth as a Planet. Earth among Other Planets. *Evolution: Edges of Evolution* / Ed. by L. E. Grinin, A. V. Korotayev. Volgograd: Uchitel. Pp. 79–115 (in Russian). DOI: 10.30884/978-5-7057-6518-8_04.

рифтогенного типа обнаружили на других планетных телах, в первую очередь на Марсе, а также на Венере, некоторых спутниках Юпитера и пр. Выяснилось, таким образом, что рифтогенез представляет собой не специфически земное явление, а процесс, осуществлявшийся на различных стадиях эволюции планет Солнечной системы. Поэтому, хотя никаких свидетельств существования внеземной жизни не имеется, все же полностью отрицать ее вероятность вне Земли мы не можем (Brack *et al.* 2010).

1. ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Прежде считалось, что наличие планетной системы – достаточно редкое свойство звезд. И это было одним из важнейших аргументов в пользу уникальности нашей Солнечной системы и Земли в частности. Но за последние 30 лет это мнение изменилось кардинально. Теперь понятно, что оно не столь редкое, как представлялось, даже напротив. В настоящее время существование планет надежно подтверждено прямыми наблюдениями. Уже на начало 2006 г. удалось доказать наличие планетных систем более чем у ста звезд в нашем ближайшем окружении (Zucker 2007; Савченко, Смагин 2006: 246). К 2024 г. было открыто огромное количество планет (4 тыс.) и планетных систем. Судя по всему, планеты есть практически у всех звезд класса F (немного тяжелее Солнца) и более легких, вплоть до самых мелких красных карликов. Но наиболее распространенным типом планет являются газовые планеты, точнее газовые гиганты, подобные нашим Юпитеру и Сатурну или даже больше. Но и планеты земного типа (силикатно-каменистые) вовсе не редкость. Похожих на Землю, Марс или Венеру планет открыто 164 (Карасева 2024), однако по многим параметрам они сильно отличаются от планет Солнечной системы¹.

Интересно отметить, что типы планетных систем настолько разнообразны, что невозможно ввести понятие типичной планетной системы. Таким образом, они ждут будущего систематизирования. Но пока требуется накопление данных.

Большая часть открытых экзопланет состоит из тех же элементов, что и планеты Солнечной системы. Отличаются только комбинации и соотношение: на некоторых больше воды и льда, на других – железа и углеро-

¹ Помимо этих типов открыты также планеты непунианского типа. По размеру они похожи на Нептун или Уран в нашей Солнечной системе. Но в отличие от газовых планет, состоящих главным образом из водорода и гелия, они, вероятно, имеют смешанный газосиликатный состав, в который входят также льды разного происхождения (об атмосферах на экзопланетах см.: Richardson, Seager 2007). Они имеют внешнюю атмосферу с преобладанием водорода и гелия и каменное ядро. Также имеют место мини-Нептун – планеты меньше Нептуна, но больше Земли. Планет такого размера и типа в нашей Солнечной системе не существует. Известны и суперземли – это, как правило, планеты земной группы, которые могут иметь атмосферу или не иметь ее. Они массивнее Земли, но легче Нептуна. Есть и мини-земли. Выделяют также подтипы (горячий Юпитер или Нептун, холодный Юпитер или Нептун, водный гигант, ледяной гигант и целый ряд других).

да. Однако – и это очень важно – нет ни одной планеты, которая была бы идентична Земле или другим телам Солнечной системы (Карасева 2024). Тем не менее выделяются несколько десятков планет, возможно, пригодных для жизни.

Исследование экзопланет позволит нам многое узнать как о нашей Солнечной системе, так и о Земле, поскольку только сравнение в большом ряду объектов позволит более глубоко понять, в чем состояла уникальность Земли и насколько возможны такие случаи во Вселенной. Однако в настоящей статье мы сравним Землю с ее «родственниками» из Солнечной системы, в первую очередь с каменистыми планетами земной группы.

2. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛИ

Земля, как известно, третья планета от Солнца, расположена в среднем на расстоянии примерно 149,6 млн км от него, и это расстояние принято в астрономии за 1 астрономическую единицу (а. е.)². Энергия, попадающая на Землю от Солнца, огромна: так, полная энергия, которую Земля получает от Солнца даже за один час (в ватт-часах), почти равна всей энергии, потребленной человечеством за год. Средняя скорость движения вокруг Солнца – 30 км/с. Ось вращения Земли наклонена по отношению к плоскости орбиты на 23,5 градуса, что является причиной смены времен (сезонов) года (Савченко, Смагин 2013: 11–12; см. также: Jet Propulsion Laboratory 2008). Земля имеет почти сферическую форму, слегка сплюснута с полюсов и состоит из трех основных концентрических слоев или сфер: ядро (точнее, внешнее и внутреннее ядра), мантия и кора. Около 70 % поверхности Земли покрыто водой, включая обе полярные ледяные шапки (подробнее о структуре Земли см.: Гринин 2025 в настоящем выпуске).

Средний радиус Земли – 6371 км, средняя плотность – 5517 кг/м³, масса – $5,973 \times 10^{24}$ кг, на гидросферу приходится около $1,4 \times 10^{21}$ кг (чуть менее 0,025 %) и на атмосферу – $5,16 \times 10^{18}$ кг (около 1/1000000 полной массы). Интересно отметить, насколько малые доли занимают гидросфера и особенно атмосфера от всей массы Земли, однако они очень важны для эволюции (об огромной роли земных оболочек еще будет идти речь ниже; см. также: Гринин 2025). А поскольку основные эволюционные изменения (в биосфере и социосфере) происходят на поверхности Земли, также наглядно видна зависимость скорости эволюции от сокращения ее фронта³.

² Это расстояние не является постоянным, так как орбита Земли имеет форму эллипса. В перигелии, когда Земля ближе всего к Солнцу (в январе), расстояние составляет примерно 147,1 млн км. В афелии, когда Земля находится в самой дальней точке от Солнца (в июле), расстояние составляет около 152,1 млн км.

³ Закон зависимости скорости эволюции от сокращения ее фронта говорит, что при сужении области действия эволюции повышаются возможности появления новых ее уровней и скорость ее изменений. Ведь для эволюции не столь больших объектов требуется меньше энергии, соответственно возможности эволюции повышаются. Это правило подтверждает-

3. СРАВНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ (МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ И ПР.)

Некоторые общие характеристики всех планет. Каждая планета имеет шарообразную форму⁴, однако особенности вращения вокруг своей оси и некоторые другие вещи так или иначе искажают эту форму⁵. 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. Все планеты обладают сходством в строении: они имеют ядро, мантию, а силикатные планеты – оболочку; планеты-гиганты имеют атмосферу, которая является частью их строения.

Планеты земной группы. Земля относится к группе планет земного типа, или каменно-силикатных. Другие планеты земной группы – Меркурий, Венера, Марс и Луна⁶ – представляют собой твердые шары, состоящие в основном из минералов, наиболее распространенными среди которых являются силикаты (соединения, особенно оксиды кремния / силициум – Si). Поэтому планеты земной группы часто называют силикатными, или каменными⁷. Другая группа планет Солнечной системы – планеты-гиганты. Юпитер и Сатурн в основном состоят из газов водорода, гелия, а Уран и Нептун – также еще из метана, льдов разной природы и каменных пород.

Размеры и вращение. Среди четырех планет земной группы Земля самая большая. Венера по размеру и массе приближается к ней (соответственно 95 % и 82 %). Марс намного меньше Земли, и это выдвигается исследователями как важнейшая причина замедления его эволюции, так как эта планета стала довольно быстро остывать, хотя ее эволюция в отличие от Меркурия и Луны продолжается. Меркурий – самая маленькая планета. Он остыл примерно 3 млрд лет назад (л. н.), и с этим прекратилась его ак-

ся при переходе от Универсума к Солнечной системе, от этой системы к отдельным планетам, от геологической и биологической эволюции к социальной. На планетах потенциально возможности эволюции возрастают благодаря меньшим температурам и невозможности разогреться до исчезновения молекул или атомов (см.: Гринин 2017: 167–168).

⁴ Сферическая форма является наиболее энергетически экономичной, она минимизирует поверхностную энергию объекта и создает условия для более устойчивого существования в космосе.

⁵ 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.

⁶ Для удобства в этой статье мы часто причисляем к планетам и Луну, чтобы лишний раз не оговариваться, что это спутник.

⁷ Дело в том, что силикаты образуют мощные залежи в виде гранитов, гнейсов, базальтов, то есть каменных горных пород.

тивная геологическая эволюция⁸. Меркурий и Луна в раннюю эпоху имели атмосферу, но потеряли ее, так же как и магнитное поле. Земля имеет самое сильное магнитное поле среди планет земной группы. У Венеры оно для ее массы неожиданно слабое, что может быть связано и с поразительно медленным вращением Венеры вокруг своей орбиты. У Марса магнитное поле также слабое (Ксанфомалити 2012е), что, возможно, связано с неполной дифференциацией этой планеты и формированием у нее маленького ядра. Интересно отметить, что суточное время Марса очень близко к земному. Неясно, всегда ли это время у Марса было одним и тем же. Это вполне вероятно, однако напомним, что земные сутки в ранние периоды истории Земли были намного короче. Постепенно они удлинялись за счет того, что расстояние между Землей и Луной увеличивалось и вращение Земли вокруг своей оси замедлялось. Например, 4 млрд л. н. Луна находилась на расстоянии всего 20 радиусов Земли, а земные сутки длились 5–6 часов, то есть обращение Луны вокруг Земли было очень быстрым (Ryder *et al.* 2000; Arbab 2009; Жарков 2013: 354).

Местоположение Земли оказалось более удачным для зарождения жизни, чем у Венеры, которая находится близко к Солнцу, в результате чего температура там очень высокая, а также чем у Марса, температура на котором низкая из-за большей удаленности от Солнца. Тем не менее месторасположение Марса могло не быть фатальным. Там, как известно, обнаружили следы гораздо более теплого климата, чем сейчас, а Венера, не имея она столь плотной атмосферы, была бы существенно холоднее. Как известно, и на Земле без атмосферы средняя температура была бы намного ниже: -23°C (Тебиева 2015: 204).

Луна. Совершенно очевидная особенность Земли – наличие у нее крупного спутника Луны, игравшей большую роль в развитии Земли, в том числе, как предполагается, в зарождении жизни. В то же время Луна, будучи намного ближе к Земле, чем сейчас, создавала на Земле через короткие интервалы мощнейшие приливы и отливы, в том числе и приливы твердого вещества, что дополнительно разогревало Землю (и Луну тоже)⁹.

⁸ Возможно, впрочем, что дату прекращения активной геологической деятельности Меркурия сдвинут на более позднее время, так как время прекращения активной деятельности Луны постоянно сдвигается на более позднее время, а Луна по массе намного меньше Меркурия.

⁹ В настоящее время приливы «твердой» Земли достигают приблизительно 30 см, в ранний период приливы были в десятки и сотни раз выше (Сорохтин, Ушаков 2002). Поэтому, по мнению некоторых исследователей, роль твердых приливов (коры), вызванных Луной, могла быть существенной и повлиять на ускорение тектонической эволюции Земли (Ryder *et al.* 2000; Сорохтин, Ушаков 2002), особенно с учетом того, что расстояние между Луной и Землей не увеличивалось монотонно, а удаление могло сменяться временным приближением. Эти приливы в сочетании с конвекцией могли играть заметную роль в геодинамике и способны объяснить тектоническую цикличность и цикличность в развитии трансгрессии и регрессии Мирового океана (Авсюк 2001; Хаин 2010).

4. СТРУКТУРА ЗЕМЛИ. СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ ПЛАНЕТАМИ

4.1. Общие характеристики структуры

Структура Земли. В самом первом приближении Земля состоит из ядра, мантии и коры. Но каждая из этих геосфер (геооболочек) имеет достаточно сложное строение. Внутри Земли установлены три глобальные сейсмические границы, разделяющие земную кору и мантию, верхнюю и нижнюю, нижнюю мантию и внешнее ядро (Короновский 2002). Между геосферами имеются промежуточные слои, такие как астеносфера, которые играют очень важную роль. Ведь чем больше в структуре пограничных и промежуточных слоев, тем важнее их роль для отделения частей (в данном случае геосфер), а также в качестве каналов для прямой и обратной связи; тем более сложной и саморегулируемой выступает система. В современных геотектонических представлениях астеносферному слою отводится роль своеобразной смазки, по которой могут перемещаться выше лежащие слои мантии и коры. Очень важен также слой D", который лежит между нижней мантией и внешним ядром (последнее начинается с глубины 2900 км), то есть это самая нижняя часть нижней мантии толщиной примерно 150–300 км, возможно, местами и более (Кузьмин, Ярмолюк 2011).

Основные геосферы по толщине и массе сильно неоднородны. Так, доля коры в общем объеме Земли равна 1,5 %, мантии – 82,3 %, а ядра – 16,2 %. Однако при объеме 16 % в ядре находится 32 % массы Земли (Короновский 2002: 42; Rott *et al.* 2015). Соответственно, наименьшей плотностью обладает кора, а наибольшей – ядро. О коре будет сказано в отдельном разделе, о мантии и ядре – ниже в этом разделе.

Помимо основных структурных геооболочек, Земля имеет еще целый ряд оболочек, которые относительно Земли невелики по массе, а некоторые и вовсе не имеют массы, но весьма важны для саморегулирования геологических и особенно биологических процессов, а также для круговорота веществ. Это гидросфера, атмосфера (тропосфера и стратосфера), криосфера (сфера льда), ионосфера, плазмосфера и биосфера. Каждая из этих оболочек отличается свойственным ей фазовым состоянием, химическим составом и внутренней динамикой (Пушаровский Д. Ю., Пушаровский Ю. М. 1998). Существуют также оболочки, которые облекают всю нашу планету и даже распространяются за ее пределы, – это магнитосфера (Хаин 2010: 754).

О первых трех геооболочках ниже будет сказано подробнее.

Структура планет. 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. Наличие ядра (ядер) в Земле и не-

которых планетах позволяет нам относить их к многочисленному ряду систем и образований, наделенных центром (Kump *et al.* 2010), который в разных системах играет разную роль, но всегда значимую¹⁰.

Некоторые общие характеристики планет земной группы и силикатных спутников. У всех четырех планет имеется железное или железоникелевое ядро того или иного размера. По ряду характеристик (например, наличие минералов) к планетам земной группы близки не только Луна (что естественно), но и ряд крупнейших спутников Юпитера (Ио, Европа) и Сатурна (например, Энцелад), а также некоторые карликовые планеты, такие как Церера¹¹. 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. Поскольку с глубиной повышается давление, ядро обычно тяжелее (плотнее) мантии, но размер ядер весьма значительно варьируется (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).

4.2. Мантия

Мантия Земли (от 10 до 2900 км) занимает место между корой и внешним ядром, то есть она начинается от первых десятков километров земной коры, достигая глубины 2900 км. Мантия в основном состоит из твердых, преимущественно силикатных пород, то есть минералов, оливина и др., в состав которых входит кремний (силиций, Si). Но в ней много и иных элементов и веществ, а также есть вода (ее во много раз больше, чем в Мировом океане), другие жидкости, расплавы (см. ниже). Температура повышается с глубиной, поэтому в нижней мантии температура близка к точке плавления, а сменяет мантию уже жидкое внешнее ядро.

Мантия состоит из пород ультраосновного состава. Химически она образована магнием (Mg, 12,7 %), железом (Fe, 34,6 %), кремнием (Si, 15,2 %) и кислородом (O, 29,5 %), а минералогически – оливином, пироксеном, гранатом и др. (Габдуллин и др. 2012: 203; Пущаровский Д. Ю., Пущаровский Ю. М. 1998). Мантия подразделяется на верхнюю (до глубины около 410 км), среднюю, или переходную (до глубины около 670 км), и нижнюю (до 2900 км). Таким образом, литосфера (твердый слой) и астеносфера (слой пониженной вязкости) фактически и составляют верхнюю мантию.

¹⁰ Можно констатировать универсальность структуры и организации с центром, который играет свою роль начальной основы, упорядочивающей сердцевину и конечной вершины (Ретеюм 1988).

¹¹ Силикатными являются и многие астероиды, в том числе крупнейшие из них, такие как Веста.

Мантии планет. Толщина мантии и у планет земной группы варьируется от 1000 до 3000 км (Тебиева 2015: 92). В целом мантии планет менее сложны, чем Земля, как по структуре, так и по минералогическому составу. Это объясняется тем, что дифференциация у планет была завершённой, так и тем, что некоторые планеты остыли. У Земли минералогический состав верхней и нижней мантии сложен из разных минералов. И вообще число минералов на Земле значительно превосходит то, что есть на других планетах (Garrels, Christ 1965; Hazen *et al.* 2008; Hazen, Sverjensky 2010; Hazen, Wong 2024; Гринин 2020). А меньшее разнообразие повсеместно ведет и к меньшей сложности, и к меньшему эволюционному потенциалу.

Последние исследования с помощью сейсмометра аппарата «Инсайт» обогатили науку беспрецедентными знаниями о марсианской коре, мантии и ядре и в отношении марсианской мантии показали ее упрощенный состав и структуру по сравнению с земной. Это еще раз подтверждает, что эволюция Марса во многом проходила иначе, чем на Земле. Литосфера Марса толстая, что частично объясняет, почему у него нет тектонических плит. Очень толстую литосферу чрезвычайно трудно сломать (Miller, Simon 2025). Впрочем, и у Земли литосфера не тонкая. Толщина литосферы на континентах и под океанами различается и составляет вместе с земной корой в среднем соответственно под континентами 25–200 км и под океанами 5–100 км. Однако, во-первых, под литосферой Земли есть более мягкая астеносфера, которая позволяет плитам двигаться (см. выше), а во-вторых, основные движения плит происходят в океанах, где литосфера намного тоньше.

Мантии у планет земной группы твердые, в основном силикатные. У Меркурия она небольшая, толщиной примерно 700 км. Это объясняется не только меньшим объемом этой планеты, но и его громадным ядром (см. ниже). Зато у Луны мантия занимает основную часть объема за счет очень маленького ядра (см. ниже). Считается, что внутреннее строение Венеры должно быть похоже на строение Земли. Силикатная мантия простирается на глубину порядка 3300 км до границы с железным ядром (Сиротин 2009; Галанин 2012; Vidmachenko, Kuznetsova 2025), что примерно соответствует земным 2900 км до внутреннего ядра. Все это в очередной раз показывает, насколько разнообразны объекты даже одного происхождения. Каждая планета уникальна.

У газовых планет мантия не твердая, а газовой-жидкая, так как газ на определенной глубине под давлением начинает превращаться в жидкость. Но у Юпитера и Сатурна, с одной стороны, и Урана и Нептуна – с другой, есть различия в составе и строении мантии. 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.

4.3. Ядра

Ядра Земли. У Земли выделяется два ядра – внешнее и внутреннее. Оба состоят в основном из железа и некоторого количества никеля¹². Внешнее ядро (2900–5120 км) – жидкое. И это обеспечивает создание магнитного поля Земли. Это поле обладает интересной способностью периодически менять Северный и Южный полюс местами. Эти периодические инверсии запечатлены в горных породах в виде линейных магнитных аномалий, что позволяет получать дополнительные сведения об истории развития Земли с помощью так называемого магнитостратиграфического метода в геологии. Механизм таких инверсий не получил пока однозначного объяснения.

Если бы магнитное поле у Земли не появилось, то зарождающаяся на нашей планете жизнь (тогда существовавшая лишь в океане в виде бактерий и простейших) подверглась бы гораздо большей дозе солнечной радиации, особенно в результате вспышек на Солнце (Buis 2021), в результате чего развитие жизни могло бы пойти другим, менее продуктивным путем. Все это показывает, во-первых, мощнейшую взаимосвязанность различных структур Земли, во-вторых, роль счастливых (и, соответственно, несчастливых) случайностей в эволюции.

Внутреннее ядро твердое (5120–6370 км). По размерам оно сопоставимо с размером Плутона, который ранее считался планетой. Оно возникло позже внешнего, как предполагают, в результате перехода (стекания) жидкого железоникелевого вещества внутреннего ядра в твердое. Внутреннее ядро продолжает постепенно расти за счет внешнего ядра. Таким образом, внутреннее ядро находится внутри расплавленного внешнего ядра, в котором бурлящий металл генерирует магнитное поле планеты. Как и почему у Земли появилось внутреннее ядро – один из главных вопросов геологии.

Ядра планет. 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.

Жидкое ядро, вероятно, есть также у Меркурия, что и позволяет этой планете иметь магнитное поле и магнитосферу за счет так называемого эффекта динамо (вращения за счет циркуляции жидкости). Считают, что из-за выраженного эксцентриситета орбиты планеты (его орбита не круглая, а эллиптическая) и близости к Солнцу возникает чрезвычайно силь-

¹² Некоторые считают, что во внутреннем ядре, помимо железоникелевых сплавов, должны присутствовать и более легкие элементы, такие как кремний и сера, а возможно, кремний и кислород (Бойко, Прокатень 2014: 38).

ный приливный эффект. Он поддерживает ядро в жидком состоянии (Spohn *et al.* 2001). У Марса ядро, возможно, частично жидкое, но слабое магнитное поле пока сложно объяснимо. Все это показывает, что судьбы и эволюция объектов, родившихся в одно время и в сходных условиях, очень различны, что, собственно, проявляется повсюду в эволюции и природе.

Наиболее крупное ядро (если рассматривать в пропорции к объему всей планеты) у самой маленькой планеты Солнечной системы – Меркурия (Ксанфомалити 2012б; Hille 2019). Недавно считалось, что его железное ядро имеет радиус 1800 км, что составляет 3/4 радиуса планеты! Соответственно, масса ядра Меркурия предположительно составляет около 62 % массы этой планеты, а его объем занимает около половины ее объема (Язев 2018). Для сравнения: далеко не маленькое ядро Земли составляет только 16 % от ее объема. Однако, согласно современным данным, металлическое ядро Меркурия еще больше, чем ранее предполагалось. Оно близко к размеру внутреннего ядра Земли, что может составить 85 % от всего объема Меркурия (Hille 2019).

Зато у Луны ядро 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.

Ядро Венеры 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.

Средняя плотность Земли 5510 кг/м^3 . У Земли, Меркурия и в меньшей степени у Венеры 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 (от $3,3$ до $5,5 \text{ г/см}^3$). Однако у Марса плотность ядра удивительно низкая, она составляет всего 6 г/см^3 . Это гораздо меньше, чем можно было бы ожидать от центра планеты с высоким содержанием железа. Исследователи считают загадкой, почему ядро такое легкое (Miller, Simon 2025).

У газовых планет Юпитера и Сатурна, с одной стороны, и Урана и Нептуна – с другой, есть различия в составе и строении ядра. У планет первой группы – в связи с тем, что в них намного больше водорода и гелия. 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 водоро-

да (который от огромного давления металлизирован)¹³ и силикатных материалов, у второй – частично из металлов, но большей частью каменно-ледяные. Однако в целом, как мы видим, ядра планет-гигантов радикально отличаются по составу от таковых у планет земной группы (подробнее см.: Ксанфомалити 2012а, 2012б, 2012в; Miguel, Vazan 2023).

5. КОРА ЗЕМЛИ: СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ ПЛАНЕТАМИ

Кора Земли. Верхняя оболочка Земли – кора – имеет толщину от 5–10 до 70 км. Кора сложена магматическими, метаморфическими и осадочными породами с преобладающим химическим составом от основного до кислого. Земная кора неоднородна. Она включает верхний (осадочный) слой, а также нижнюю кору. Иногда выделяют также среднюю кору. Эти слои отличаются своим минеральным составом. Верхний осадочный слой состоит из продуктов разрушения коренных пород (в частности, горных или перенесенных водными потоками, а также биологических и т. д.). Далее идет гранитный, или гранито-метаморфический, а за ним базальтовый слой.

По строению и составу выделяют океаническую и континентальную кору. Океаническая кора выплавилась из мантии и сложена породами базальтового состава. Континентальная кора имеет преимущественно андезитовый («средний») состав, так как она образована широким рядом пород – от базальтового (более древнего) до гранитного слоя. Важную роль играют метаморфические, то есть преобразованные в результате магматизма, горообразования и других процессов породы. В переходной зоне от материка к океану развиты типы коры промежуточного строения (Габдуллин и др. 2012: 202). Кору часто объединяют с верхней частью мантии, и эту внешнюю «каменную» оболочку Земли толщиной 20–300 км называют литосферой.

Роль коры огромна, она задерживает раскаленное тепло глубин Земли, создает многообразие рельефа и других параметров, здесь взаимодействуют различные оболочки Земли, включая биосферу, накапливается почва и т. д. и т. п. Без коры эволюции Земли в нынешнем понимании быть просто не могло. Вообще роль оболочек исключительно высока в эволюции (см.: Гринин 2017; 2020; 2025).

Кора планет земной группы. Планеты земной группы, Луна, а также некоторые другие спутники имеют кору, состоящую из различных пород (в некоторых случаях изо льда; либо представляющую собой вечную мерзлоту, как на Марсе, то есть грунт, смешанный со льдом)¹⁴. Толщина коры различна в зависимости от места на планете и возраста самой коры. У планет земной группы она варьируется как между планетами, так и на

¹³ Некоторые геологи высказывают предположение, что и внутри земного ядра есть металлизированный водород.

¹⁴ Что касается газовых гигантов и даже ледяных планет, то в их отношении о коре говорить трудно (но у некоторых ледяных планет ее подобием является их ледяная оболочка).

самых планетах от 10 до 100 км (Тебиева 2015: 92). В целом толщина коры планет земной группы довольно велика и кое-где даже превосходит толщину земной коры. В частности, у Луны кора существенно толще земной. Толщина коры Меркурия может составлять 50–100 км, что тоже больше, чем у Земли, а в пропорции к объемам Меркурия и Луны объем их коры заметно больше земного. Возможно, это объясняется тем, что Луна и Меркурий – остывшие планеты. Толщина коры Венеры – около 60 км (Сиротин 2009; Jiménez-Díaz *et al.* 2015), но, по более поздним данным, кора Венеры может иметь толщину 30–90 километров в зависимости от местоположения (Solomatov, Jain 2025; Vidmachenko, Kuznetsova 2025).

Естественно, все измерения очень приблизительные. Они исправляются и будут исправляться. Так, считалось, что толщина коры Марса достигает 110 км, но измерения с помощью сейсмометра аппарата «Инсайт» показали, что среднее значение толщины коры максимально составляет 72 км (Miller, Simon 2025). Но и это много, несколько больше, чем у Земли. Однако при этом плотность коры Марса меньше, чем на Земле. Исследователи полагают, что его кора состоит из двух или трех слоев. Самый верхний слой толщиной 10 км. Он, согласно измерениям «Инсайт», оказался неожиданно легким, что может объясняться тем, что он состоит из раздробленной породы, оставшейся после воздействия метеоритов. Но при этом марсианский грунт оказался, согласно данным, полученным от китайского марсохода «Чжужун», прочнее лунного реголита (см. ниже) и достаточно липким. Правда, его высадка произошла на равнине Утопия, где рельеф местности сформирован за счет физического и химического выветривания горных пород, в том числе с участием воды (Ding *et al.* 2022; Войтюк 2022). Американские же исследователи отмечали, что некоторые породы на фотографиях напоминают затвердевший озерный ил (Miller, Simon 2025), поэтому весьма вероятно, что грунт на Марсе далеко не везде липкий. Слой, идущий за легким 10-километровым, опускается в глубину еще примерно на 20 км. Что лежит ниже – кора или мантия, пока неясно (*Ibid.*).

Такого осадочного слоя, как на Земле, где на его развитие влияют живые организмы, как понятно, на планетах земной группы нет. Но в том или ином виде осадочный слой, конечно, существует, поскольку он образовывается за счет разрушения рельефа. В частности, на поверхности Меркурия и Луны много так называемого реголита. Это особый минерал, сформированный в результате взрыхления поверхности планет мелкими метеоритами и влияния 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).

Асимметрия и антиподальность на планетах земной группы. В отношении планет земной группы имеет смысл говорить об очень интерес-

ной особенности, скорее даже закономерности. Она установлена достаточно давно, но, во-первых, установлена только эмпирически, а теоретического объяснения нет. Во-вторых, о ней редко говорят не только в популярной, но и в научной литературе (Kovalyov *et al.* 2018). Мы бы назвали это аналогами деления земной коры на материковую и океаническую на планетах земной группы. Дело в том, что даже на безводных планетах поверхность (кора) делится на материки и океаны¹⁵. Это явный аналог земного разделения на толстую материковую и тонкую океаническую кору (подробнее см.: Кац и др. 1984; Гринин 2020), но почему это произошло, пока остается крайне интригующей загадкой.

Прежде всего отметим, что на всех планетах отсутствует симметрия в отношении полушарий (как западно-восточных, так и южно-северных). Более того, присутствует то, что на Земле называли антиподальностью (то есть противоположностью – от слова *антипод*, которое активно использовалось в географии с Нового времени для обозначения лежащих на противоположной стороне Земли земель). Это касается и деления коры на Земле на материковую и океаническую. Последняя занимает две трети поверхности Земли. Как сказано выше, океаническая кора в разы тоньше. Это касается и распределения массы материков между Северным и Южным полушариями на Земле.

Было установлено, что асимметрия поверхности планет играет важную роль, поскольку такая асимметрия (антиподальность) в виде разделения коры на материковую и океаническую по неясным причинам возникла у целого ряда планет на ранних стадиях их развития. Конечно, это произошло явно не случайно и объясняется какими-то общими причинами. Показатель антиподальности континентов и океанов на Земле таков, что это не может быть случайным процессом (Harrison 1966). Поэтому шанс, что антиподальность могла образоваться на нескольких планетах случайно, совсем небольшой. А если это неслучайно, тогда можно говорить о нескольких следствиях. Это, во-первых, свидетельствует о глубоком сходстве в геологическом строении коры планет, несмотря на то что гидросфера есть только у Земли, а во-вторых, показывает, что для таких сходств также имеются и существенные планетологические (геологические) основания, как мы увидим ниже в специальном разделе, посвященном этой теме.

¹⁵ Об этом свидетельствует тот факт, что только $\approx 14,7$ % поверхности суши антиподальны другой суше, что соответствует приблизительно 4,4 % поверхности Земли (Kovalyov *et al.* 2018). Конечно, 100 % антиподальной симметрии никогда не имеет места, некоторые авторы предпочитают говорить о почти антиподальной симметрии (*Ibid.*). В дополнение к антиподальной симметрии М. Ковалев с соавторами также указывают, что почти антиподальная симметрия проявляется себя в сейсмической активности и географической локации вулканов, кратеров и рифтов (*Ibid.*).

6. ГИДРОСФЕРА И КРИОСФЕРА

Гидросфера и криосфера на Земле. Земля единственная из всех небесных тел Солнечной системы, где имеется жидкая гидросфера на поверхности.

Роль гидросферы в жизни Земли, ее климате, формировании и распространении жизни, круговорота веществ, влиянии на геохимию и многом другом в целом общеизвестна (см.: Hazen *et al.* 2008; Hazen, Sverjensky 2010; Hazen, Wong 2024; Brack *et al.* 2021; Гринин 2020; Grinin 2023, 2026a, 2026b). Когда именно появилась гидросфера на Земле и в результате каких процессов – вопрос дискуссионный. Наиболее вероятный промежуток времени – 4,4–3,9 млрд л. н. (Хаин, Короновский 2007: 66). Но, на наш взгляд, это произошло скорее ближе к началу указанного периода, чем к его концу. Большие объемы воды имеются также внутри Земли, в частности в мантии, причем этим резервуарам воды миллиарды лет (Sobolev *et al.* 2019). По некоторым предположениям, глубинные подземные воды могут составлять почти половину всей гидросферы или даже больше (Хаин, Короновский 2007: 66–70; Sobolev *et al.* 2019)¹⁶. Но в отношении воды в недрах планет Земля отнюдь не уникальна, так же как и в отношении гляциосферы и криосферы (сферы льдов)¹⁷. Поэтому по запасам воды Земля может и уступать некоторым спутникам (см. ниже), но ее уникальность в том, что она обладает открытой и сложной гидросферой, обеспечивающей целый ряд необходимых для эволюции планеты и существования жизни функций.

Гляциосфера на Земле в основном располагается в Антарктиде, Гренландии, Арктике, а также в горах (горных массивах и цепях). За геологическую историю как гидросфера, так и гляциосфера много раз меняли свои объемы, временами отступая перед сушей, временами сильно наступая на нее.

Вода и льды в Солнечной системе. Вода, помимо Земли, достаточно распространена и на других телах Солнечной системы. В основном, правда, в виде пара или водяного льда. Она теперь найдена даже на Луне в виде льда. Поразительно, но лед на полярных шапках есть даже на Меркурии, несмотря на его близость к Солнцу. На целом ряде небесных тел существует гляциосфера, то есть ледяная оболочка, в которой есть и водяной лед. В отдельных местах, в частности на спутниках Юпитера и Сатурна (Европе, Энцеладе, Каллисто и др.), вода находится и в виде

¹⁶ Международная научная группа под руководством российских геохимиков из Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН установила, что огромные запасы воды, находящиеся в переходной зоне мантии Земли, превосходящие по массе воды всего Мирового океана, образовывались еще в палеоархее (более 3,3 млрд л. н.) за счет погружения в мантию на глубину 410–660 км океанической коры, обогащенной морской водой (Sobolev *et al.* 2019; Стрекопытов 2019).

¹⁷ Гляциосфера – это часть криосферы, которая охватывает те части поверхности Земли, где вода находится в твердом состоянии.

крупных водоемов, целых океанов, правда, подледных (прикрытых очень мощной толщей льда). Толща льдов и океанов на них чрезвычайно 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 которого 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).

Гидросфера и криосфера на планетах земной группы. Есть предположения, что на некоторых планетах (на Венере – короткое время и на Марсе – длительно) имелась и гидросфера. 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 уже 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 Аравия. Не исключено даже, что на поверхности крутых склонов могут эпизодически происходить выплески грунтовых вод (см.: Митрофанов 2015: 158).

Теперь установлено, что более 3–3,5 млрд л. н. на Марсе была в большом объеме жидкая вода и, возможно, даже океаны. Но смена теплого климата на холодный уничтожила эту гидросферу. На Земле неоднократно были похолодания и оледенения (даже полное оледенение в последнем периоде протерозоя), но никогда климат не менялся так радикально, как на Марсе¹⁸.

Недавние данные радиолокационного зондирования, выполненного георадаром марсохода Perseverance, подтвердили предположение о том,

¹⁸ Так, в период 740–580 млн л. н. на Земле наступила ледниковая эра со средней температурой около –45 °С и мощным ледниковым панцирем толщиной до 1,5 км. Эта эра получила название «Земля – снежок, или снежный ком» (Snowball Earth). Распространено мнение, что Земля была полностью покрыта льдом, включая экваториальный пояс (см., например: Hyde *et al.* 2000). Однако другие полагают, что в экваториальных океанах все же не было льда (Runnegar 2000). Еще одна гипотеза – «слякотная Земля» (the “Slushball”): в теплом поясе планеты могли оставаться большие проталины. В другой гипотезе – «тонкого льда» (“thin ice sheet”) – утверждается, что, несмотря на глобальный характер оледенения, лед в океане был тонким, поэтому он пропускал свет и жизнь под ним не прекращалась (Pollard, Kastings 2005; Gang Wang *et al.* 2025). См. также: Чумаков 2015; Ястребов 2016; Галимов 2019.

что в марсианском кратере Езеро когда-то (в первой половине четвертого миллиарда л. н.) было озеро (Raïge *et al.* 2024; Стрекопытов 2024).

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, поэтому «электрический ветер» выбрасывает из атмосферы Венеры водород и кислород (Язев 2018: 63; Collinson *et al.* 2016).

Краткий обзор гидросфер и криосфер на планетных телах Солнечной системы продемонстрировал нам целый веер разных их форм, вплоть до абсолютно уникальных.

7. АТМОСФЕРЫ

Атмосфера Земли. Атмосфера Земли делится на несколько оболочек. 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 становится 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 °C. Но выше она начинает подниматься и у границы со стратопаузой становится равной 0 °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 °C), а потом падает до –68 °C у границы 70 км. Ионосфера имеет высокую температуру, которая поднимается с высотой и вырастает до 700–1500 °C (Язев 2018).

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 (Bais *et al.* 2019). 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.

Атмосферы тел Солнечной системы. 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. Как правило, атмосферы, с одной стороны, ослабляют поток солнечной радиации, 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. Газовый состав сильно различается, наиболее распространены углекислый газ, метан, на газовых планетах – водород и гелий. Но интересно отметить, что есть планеты, где в атмосфере господствует азот (Земля, Титан). Метан присутствует в атмосфере ряда планет, например Урана. Но кислородную атмосферу не имеет ни одна из них. Впрочем, кислородная атмосфера – это уже позднейшее эволюционное приобретение Земли, и зарождение жизни с ней не было связано – только ее эволюция. Однако кислород все же встречается в атмосферах некоторых спутников газовых планет, хотя происхождение его иное, чем на Земле (Шематович 2015: 272–274).

Газовые планеты. Атмосферы у четырех планет-гигантов 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 газово-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 очень большая. Так, на Юпитере скорости в глобальной системе восточных и западных ветров достигают от 50 до 150 м/с. А на Сатурне скорость зональных ветров в районе экватора и вовсе достигает 400–500 м/с, что в четыре раза выше, чем на Юпитере. Нептун – также планета очень сильных ветров в Солнечной системе. Местами скорость ветра достигает 300 м/с (Тебиева 2015). Атмосферы планет-гигантов состоят главным образом из водорода и гелия, но также включают аммиак, другие газы и водяной пар. Определенное количество H_2O обнаружено в атмосферах Сатурна, Нептуна и Урана, а CO_2 – в атмосфере первых двух (Feuchtgruber *et al.* 1997). На некоторых планетах, в частности на Юпитере, наблюдаются кучевые облака, которые, как и на Земле, вероятнее всего, являются скоплениями водяных паров.

Характерной чертой атмосфер планет-гигантов являются огромные пятна (в этом смысле планеты 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. Атмосфера Юпитера вращается неоднородно в разных широтах. У него скорость вращения газовой оболочки отличается от скорости вращения остальной части планеты (которая и сама вращается неодновременно). Это и неудивительно с учетом скорости вращения Юпитера – менее 10 часов.

Спутники планет-гигантов. 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).

Атмосферы планет земной группы. Атмосферы планет земной группы наиболее исследованы. Силикатные планеты можно разделить на две группы. Первая – те, где атмосферы играют реальную роль в жизни планеты (в ее защите от астероидов и метеоритов, солнечного ветра; в формировании климата и т. п.). Это Венера и Земля. И вторая – те, где разреженные атмосферы не играют существенной роли в жизни планеты, поскольку их практически нет. Среди планет земной группы такими являются Меркурий и Луна¹⁹. Считается, что сразу после образования они имели какую-либо реальную атмосферу, но затем ее потеряли. Две основные причины могли повлиять на потерю атмосферы: близость к Солнцу и их малая масса. Близость к Солнцу (как у Меркурия) затрудняет удержание атмосферы из-за влияния солнечного ветра. А чем дальше от Солнца, тем

¹⁹ Строго говоря, у первого атмосфера примерно на 10 порядков менее плотная, чем земная, у второй – на 14 порядков (Шевченко 2015: 44).

меньше тепловая скорость молекул, поэтому меньшему телу легче удерживать атмосферу. Малая масса не позволяет держать молекулы газов за счет гравитации. 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 на атмосферу влияет больше факторов.

Марс. Марс занимает промежуточное положение, атмосфера у него есть, но сильно разреженная, ее плотность в 160 раз меньше, чем у Земли. В то время как плотность атмосферы Венеры, напротив, в 90 раз больше земной (Язев 2018: 80; Савченко, Смагин 2013: 10). Несмотря на то что слой атмосферы на Марсе тонок, марсианские ветры дуют с огромной скоростью и легко поднимают сильнейшие пыльные бури по всей планете (Сиротин 2009; см. также: Hille 2023). В атмосфере Марса постоянно содержится аэрозоль, который включает несколько компонентов. Но в целом можно считать ее очень тонкой пылью, которая даже в спокойные периоды в два раза уменьшает количество солнечной радиации, достигающей поверхности. 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 их зарождения и развития 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-полтора 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 телах, например на Плутоне).

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 многоки-

лометровой атмосферы давление на поверхности такое, какое на Земле в океане достигается на глубине около 1 км (Сиротин 2009). Эта плотность атмосферы наряду с тем, что 97 % атмосферы состоит из двуокиси углерода (CO₂), создает чудовищный парниковый эффект (Фишер 1990; Савченко, Смагин 2013: 10; Snels *et al.* 2014; Vidmachenko, Kuznetsova 2025). В результате температура на поверхности почти 500 °С. 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 °С.

У плотной венерианской атмосферы есть очень интересные особенности. У ее поверхности ветры довольно слабые. Но с высотой 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 чем 240 земным суткам. Существует четырехсуточный период вращения облачного слоя, который совпадает с периодом циркуляции атмосферы. Удовлетворительного объяснения, почему у планеты, делающей всего один оборот в течение 243 суток, существует столь быстрое движение атмосферы, нет. Одно из объяснений этого см.: Horiguchi *et al.* 2020).

8. КЛИМАТЫ И РЕЛЬЕФЫ

8.1. Климат

Климаты Земли разнообразны, они имеют зональный характер, так как климатические зоны меняются в зависимости от количества получаемого тепла от Солнца (чем ближе к экватору, тем больше). Это справедливо и для некоторых планет. Климат на Земле многократно менялся в течение ее истории, менялся он и на других планетах, по крайней мере для Марса это доказано.

Естественно, что климаты на планетах колоссально различаются. На них, как и на рельеф, влияют многие факторы. Это расстояние от Солнца и альбедо 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. 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.

У планет, у которых есть атмосферы, они (подобно одежде) в значительной мере создают климат благодаря *парниковому эффекту*. При отсутствии атмосферы средняя температура поверхности Земли (так называемая равновесная) составляла бы -23°C , а фактически за счет парникового эффекта она на 38°C выше, то есть равняется $+15^{\circ}\text{C}$. (Тебиева 2015: 204; WMO 2025). Оранжерейный эффект разреженной атмосферы Марса, естественно, намного меньше. Он повышает температуру планеты всего на 4°C при равновесной температуре -57°C . Фактическая же средняя температура марсианской поверхности -53°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°C . Вместо равновесной в $+44^{\circ}\text{C}$ действительная средняя температура поверхности Венеры $+460^{\circ}\text{C}$ (Тебиева 2015: 204).

Что касается поступающего солнечного тепла, то тут важно, какая часть этой энергии задерживается и способна влиять на экзогенные процессы на планете, трансформируясь в другие виды энергии и формируя природную обстановку (Там же: 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°C при перпендикулярном падении солнечных лучей. Но когда эта точка окажется в полночь в диаметрально противоположном положении, то может охладиться до -180°C (NASA 2025). Таким образом, максимальная амплитуда колебания температуры на поверхности Меркурия – примерно 700°C , что является своеобразным рекордом. Полная противоположность тому, как атмосферы могут значительно смягчать температурные колебания.

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. Еще более интересной выглядит гипотеза, что Марс влияет на колебания климата на Земле (вероятно, и наоборот, но на Марсе это проверить пока невозможно)²⁰. Впрочем, о влиянии космических (галактических) факторов на ис-

²⁰ Это было обнаружено в результате исследования глубоководных течений в океанах Земли. Обнаружилось, что они ослабевали и усиливались в течение климатических циклов продолжительностью 2,4 млн лет. Было предложено лишь одно возможное объяснение: эти циклы связаны с циклами взаимодействий Марса и Земли при вращении вокруг Солнца. Обе планеты влияют друг на друга посредством явления под названием «резонанс», когда два вращающихся тела оказывают друг на друга гравитационное воздействие – иногда его называют своего рода гармонизацией далеких планет. В результате меняется форма их орбит, влияя на то, насколько они близки к круговым, а также на их расстояние от Солнца. Для Земли это взаимодействие с Марсом приводит к периодам повышенной солнечной активности (что означает более теплый климат). Эти более теплые циклы как раз и корре-

торию Земли говорят довольно много. Но о влиянии планет исследований встречается мало.

8.2. Рельефы. Бомбардировки и вулканические процессы

Рельеф. Рельеф Земли, как известно, очень разнообразен, влияние рельефа на климат, циркуляцию атмосферы, круговорот воды и прочее исключительно велико. Понятно, что на рельеф Земли влияют как факторы, общие для всех планет (вулканизм, влияние температур и т. п.), так и те, которые отсутствуют на других планетах, в частности гидросфера, деятельность биосферы, а также тектоника плит.

Однако следы от метеоритов на Луне, Меркурии и Марсе существенно отличаются рельеф этих планет от Земли. В частности, на Луне находится и крупнейшее во всей Солнечной системе ударное образование – кратер Южный полюс – Эйткен (ЮПЭ). Он имеет фантастические размеры – 2400×2050 км. Общий перепад высот в бассейне ЮПЭ достигает значительной величины – более 16 км (Шевченко 2015: 64).

Как и другие планеты, Земля в первые сотни миллионов лет своей истории испытала последствия бомбардировки планетезималями и в более поздний период метеоритами (так называемая поздняя тяжелая бомбардировка, см. о ней: Bottke *et al.* 2012; Gomes *et al.* 2005; Abramov *et al.* 2012; Johnson, Melosh 2012; Workshop... 2012; Гринин 2017: 121–122; Grinin 2018). Но те планеты (особенно Меркурий и Луна, однако в значительной мере и Марс), которые остыли относительно скоро, по сравнению с Землей сохранили очень многочисленные следы таких столкновений. На Земле же благодаря различным процессам, в том числе постоянным изменениям земной коры, трансгрессиям и регрессиям океанов, осадконакоплению и т. п., следы древних столкновений отсутствуют (некоторые остаточные явления на поверхности указывают на то, где были последние крупные столкновения, самому раннему из которых примерно 3 млрд лет [В Гренландии... 2012])²¹. В этом плане Земля и Венера похожи: на Венере почти не сохранились следы столкновений ранее 500 млн л. н., когда практически вся поверхность планеты была покрыта лавовыми извержениями венерианских вулканов.

лируют с более сильными океанскими течениями, утверждается в исследовании (Paddison 2024).

²¹ Первый миллиард лет (в этот период входят два крупнейших эона: гадей/катархей и частично архей) на Земле известен хуже всего. Парадоксально, но на других планетах дело обстоит наоборот. Хотя мы в целом о них знаем не так много, но более древние периоды для некоторых планетных тел нам известны лучше, чем позднейшие. Это объясняется как раз тем, что там, где планеты остыли рано (Меркурий, Луна, в меньшей степени Марс), сохранились следы древних трансформаций, в частности на Луне найдены породы возрастом 4,4 млрд лет.

Тем не менее рельеф Земли имеет немало общего с рельефом других планет. На всех планетах есть горы или плоскогорья, территории, лежащие ниже уровня «моря», расселины и выступы, крупные возвышенности и низменности (то, что на Земле называется грабенами и горстами). В коре всех планет и Луны установлены системы разломов. Отчетливо видны трещины растяжения, приведшие к образованию на Земле, Марсе и Венере рифтовых систем. Как известно, самые высокие горы находятся на Марсе. Так, 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. Перепады высот на этой планете просто выдающиеся – они достигают 35 км (Язев 2018: 119), что намного больше, чем на Земле, где наибольший перепад составляет менее 20 км. То, что на Марсе горы в два раза превосходят по высоте земные, связано с меньшей силой тяжести, чем на Земле. 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.

Благодаря тектонике плит на Земле вдоль границ тектонических плит сформировались гигантские горные цепи. Таких горных массивов на других планетах нет. Однако выясняется, что есть и исключения. 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».

Ландшафт Марса 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 текших рек (Пугачева, Шевченко 2015: 196).

Вулканические процессы на Земле. Вулканы и вулканические процессы играли очень большую роль в истории Земли, влияли на ее атмосферу, климат, ландшафт, включая горообразование. Деятельность вулканов приводит к образованию и движению магмы. В зависимости от характера движения магмы различают магматизм интрузивный и эффузивный. Если магма не выходит на поверхность земной коры, то это интрузивный магматизм. При этом магма активно внедряется во вмещающие породы, частично расплавляя их, а также поднимает кору и меняет ландшафт. Если магма выходит на поверхность (тогда она называется лавой), то это эффузивный магматизм. Соответственно потоки лавы сильно меняют поверхность Земли.

Существует также два типа вулканической активности – взрывная и эффузивная. В первом случае извержение имеет «взрывной» характер, то есть происходит активный выброс магмы, пепла и обломков вулкана. Если извержение эффузивное, то лавовые потоки разливаются медленно и относительно спокойно. На Земле представлены оба вида вулканической активности, в то время как на Венере – только эффузивный вулканизм, который очень сильно изменил поверхность этой планеты. Вулканические процессы на нашей планете играют важную роль и сегодня, однако меньшую, чем раньше. Молодая же Земля была охвачена вулканическими процессами. В этом плане Земля не слишком отличалась от других планет земной группы, где также мощно шли вулканические процессы, которые весьма сильно меняли поверхность планет. Однако о ранних вулканах Земли практически ничего не известно, мы не можем судить, какого точно типа они были.

Вулканические процессы на планетах. Эти процессы на планетах земной группы в настоящее время активно имеют место только на Земле и Венере. Вулканическая деятельность на Луне и Меркурии прекратилась давно. Вулканическая деятельность на Марсе несильная, в целом она затухает. Однако извержения горы Олимп на этой планете, возможно, были еще сравнительно недавно, 2 млн л. н.

Высказывалось мнение, что на Венере пик вулканической деятельности прошел примерно 300 млн л. н. или раньше. Однако и сегодня вулканическая активность Венеры очень значительна. Обнаруженные сильные изменения концентрации сернистого газа SO_2 в 2006–2007 гг. и наблюдения с борта космического аппарата «Венера-экспресс» четырех «горячих пятен» с температурой 830 °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 тектонических 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).

Венера – горячая планета не только снаружи, но и внутри. Температура на поверхности, как уже сказано выше, достигает 465 °C и более, а на ее вулканах и других особенных поверхностях видны явные признаки плавления. Планета испещрена десятками тысяч вулканов, действующих и спящих. В 2023 г. Пол Бирн опубликовал атлас, включающий 85 000 вулканов Венеры. Последние данные также говорят о том, что Венера геологически может быть более активной, чем считалось ранее (Solomatov, Jain 2025).

Значительная часть поверхности Венеры геологически сравнительно молода (порядка 500 млн лет), около 90 % ее поверхности покрыто ба-

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

9. НЕКОТОРЫЕ СИСТЕМНЫЕ СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ

9.1. Антиподальность

Антиподальность на Земле. Продолжим разговор об антиподальности. Она проявляется в распределении океанов и континентов между Западным и Восточным полушариями, а также в том факте, что северная полушара является преимущественно континентальной, тогда как южная – океанической. Антиподальная природа означает, что каждому континенту или группе континентов соответствует океан или его часть на другой стороне земного шара (Дунаев 2008: 210). Таким образом, в структуре литосферы Земли отчетливо проявлены признаки симметрии и асимметрии. В глобальном аспекте Земля тектонически асимметрична. Асимметрию ей придает впадина Тихого океана со средней глубиной около 4 км, занимающая примерно 1/3 общей площади поверхности. Таким образом, ей свойственна не просто глобальная структурная неоднородность, но антиподальность, то есть противоположность. Вполне оправданно обособление на Земле двух сегментов: Тихоокеанского и противоположного ему – Атлантического. Сегмент, включающий Тихий океан и обрамляющий его Тихоокеанский тектонический пояс, характеризуется высокой степенью подвижностью и проницаемостью литосферы. И другой сегмент – где сосредоточены все древние платформы, геосинклинально-складчатые пояса, их разделяющие, и вторичные (по происхождению) океаны²². Из такого противопоставления следует, что обе эти части должны были развиваться отличными путями чрезвычайно длительное время (Кац и др. 1984).

Рассмотрим аналогичную земной антиподальность на Луне и планетах земного типа.

Асимметричность коры и мантии Луны. Естественный спутник Земли тоже асимметричен и разделяется на два различных по структуре сегмента. Полушарие, обращенное к Земле, характеризуется распространением лунных морей, тогда как на обратной стороне морей почти нет, и там простирается материковая поверхность, усеянная многочисленными кратерами.

В целом проявляется аналогия в строении впадин лунных морей и земных океанических впадин. Примечательно, что впадины на Луне занимают примерно одну третью часть ее поверхности, что близко к соотношению Тихоокеанского и Атлантического сегментов Земли.

²² Первичные, такие как Тетис, Япетус, давно закрылись.

Гравитационные и сейсмические данные показали неоднородность в строении коры и мантии Луны. В пределах океанического сегмента мощность коры сокращена до величины порядка 60 км, тогда как для обратной стороны Луны с континентальным строением допускается толщина коры в 100–150 км. При этом мощность базальтового выполнения лунных морей оценивается величиной всего в несколько километров, что близко к мощности базальтового слоя океанической коры на Земле (Кац и др. 1984).

С точки же зрения эволюции наиболее интересно и интригующе, что возраст базальтов, выполняющих впадины Луны, показывает, что на Луне глобальная тектоническая асимметрия возникла еще на ранних стадиях ее эволюции.

Асимметрия Марса и Меркурия. Асимметрия Марса имеет свои очень интересные особенности. При этом можно выделить общие ее черты с Землей. В частности, «для Земли и Марса характерна антиподальность их основных планетарных морфоструктур. Действительно, Северное полушарие Земли занято преимущественно материками, Южное – океанами, в то время как на Марсе соотношение обратное: более возвышенные области поверхности планеты – так называемые “материки” – расположены главным образом в южном полушарии, а более пониженные – сложенные базальтами “океаны” – преобладают севернее экватора» (Каттерфельд, Шмуратко 1983: 62).

Можно говорить не просто об антиподальности, но – шире – о дихотомии, то есть резком различии между северным и южным полушариями Марса. Помимо различий между океанической и материковой зонами, в южном полушарии больше ударных кратеров. В частности, там хорошо сохранилось огромное количество древних ударных кратеров, включая гигантские ударные бассейны, например равнина Эллады в восточном полушарии – глубокое (до 7 км от среднего уровня поверхности) округлое понижение диаметром более 1500 км – или равнина Аргир на юге западного полушария, тоже, очевидно, ударный бассейн несколько меньших размеров (Язев 2018: 138–139). Промежуточное положение экваториального пояса Марса между океаническим и континентальным сегментами (Сиротин 2009: 84) с проявлениями вулканизма и тектонических деформаций позволяет сопоставлять его с Тихоокеанским поясом Земли (Кац и др. 1984).

Антиподальность и дихотомии поверхности полушарий есть и на других планетах. На снимках поверхности Меркурия вполне определенно выявляются основные особенности его тектоники. Подобно Тихоокеанской впадине Земли и обширной депрессии Океана Бурь на Луне, здесь также выделяется депрессия планетарного порядка – впадина Калорис (Равнина Жары). По периферии впадины намечается серия концентрических поднятий, которые могут быть сопоставлены с лунными Кордильерами и тектоническими сооружениями Тихоокеанского пояса Земли. Экстраполируя очертания впадины Калорис на всю поверхность Меркурия, получим ее

отношение ко всей площади – $1/3$, то есть то же соотношение, что и у других небесных тел (Кац и др. 1984). Вообще сохранение такого соотношения у ряда планет впечатляет, оно явно не может быть случайным, а составляет некую повторяющуюся особенность формирования планет. Кроме того, в южном полушарии Меркурия гораздо больше ударных кратеров, чем в северном (Язев 2018: 219). Причина этого неизвестна. Но также характерно, что по какой-то причине на одну сторону нескольких планет падало больше планетезималей, метеоритов и астероидов, чем на другую.

Что касается Венеры, то ее поверхность исследована недостаточно, но и на ней наиболее типичными формами в крупном масштабе являются континентальные блоки и океанические впадины (Тебиева 2015: 95).

Таким образом, мы видим важное сходство планет земной группы с Землей в виде противопоставления полушарий с толстой (континентальной) и тонкой (океанической) корой, несмотря на то что гидросферы на них нет, эта противоположность возникла на ранних стадиях.

9.2. Системность трансформаций, самоорганизация, дифференциация, энтропия

Системность. Каждую планету можно рассматривать как систему. Однако многие планеты представляют собой почти мертвые (это, в частности, остывшие Меркурий и Луна) или недостаточно отрегулированные системы. Отсюда можно говорить и о неполной самоорганизации и слабой саморегуляции многих планет. Если сравнивать Землю и другие планеты по уровню системности, по тому, как планета-система развивается, то, во-первых, Земля будет выглядеть намного сложнее, так как здесь больше оболочек, чем на других планетах. Причем некоторые из этих оболочек смягчают климат, обеспечивают круговорот веществ, оберегают жизнь и т. п. Во-вторых, саморегулирование на Земле намного выше. На некоторых планетах, как мы видели, нет магнитосферы, атмосферы, нигде нет гидросферы, не говоря уже о биосфере. Поверхность Земли постоянно обновляется. Минеральный состав на Земле за счет системных процессов и взаимодействия оболочек намного богаче, чем на других планетах. Вулканические процессы продолжаются только на отдельных планетах.

Сложное взаимодействие компонентов формируется в довольно сложную систему, где 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. Соответственно, большая сложность Земли давала ей и больше возможностей для рождения новых свойств системы.

Дифференциация и конвекция. Важно рассмотреть планеты и в плане дифференциации, так как дифференциация, собственно, и создает основу системности. Уже довольно давно многие геологи пришли к выводу об определяющем значении процессов дифференциации мантийного вещества

(Белоусов 1942; Беммелен 1960; Виньковецкий 1971: 19). Это действительно крайне важно, если исходить из идеи, что в общем случае показателем уровня эволюции системы можно считать степень ее дифференциации (Виньковецкий 1971: 7).

На Земле процессы дифференциации привели к созданию сложной структуры, образованию внутреннего и внешнего ядра, промежуточных слоев между геосферами и пр. На Марсе, Луне незавершенная дифференциация не позволила создать мощные ядра. Причина формирования огромного ядра Меркурия не до конца понятна, но ясно, что такой перекося привел к слишком маленькой мантии, что не могло не сказаться на недостаточной системности планеты.

По ряду показателей Венера выглядит как более завершенная система, где процессы ведут к самоорганизации и саморегуляции. В частности, как мы видели, вулканические процессы на Венере идут активно. Ее поверхность обновляется. Ее атмосфера сохраняет энергетику планеты. Интересные факты появились о конвекции на Венере (см. ниже).

Конвекция – это перемещение масс жидкости или газа вследствие разницы температур и плотности. Стоит отметить, что именно в планетах конвекция играет особо значимую роль, при этом ее роль в эволюции и саморегулировании Земли заметно выше, чем не только у остывших планет, но в целом и чем у планет с горячими недрами. Конвекция играет огромную роль в жизни Земли, являясь важнейшим способом взаимодействия геосфер. Ниже мы говорим в основном о конвекции в недрах Земли и планет. Но конвекция играет огромную роль в движении атмосферных масс. Собственно, именно разница в температурах создает воздушные течения, циклоны и антициклоны и прочие важнейшие климатические и погодные регулярности и особенности. При этом конвекция играет важную роль не только на Земле, но и в атмосферах тех планет, в которых они есть, в том числе и на Марсе. Огромную роль конвекция играет и в верхних слоях газовых гигантов. Конвекция также имеет чрезвычайно большое значение для гидросферы, в частности создавая течения и обеспечивая перемешивание и другие формы движения водных масс.

В отношении конвекции в глубинах Земли следует, в частности, отметить (но это только один из многих примеров), что наиболее вероятной причиной движения литосферных плит является тепловая конвекция в мантии Земли (Хаин 2003), то есть конвективные течения в мантии, вызываемые ее разогревом.

Конвекция очень активна в газовых планетах, но почти отсутствует на холодных планетах и, видимо, слаба на Марсе. Однако на Венере дело обстоит иным образом. Недавно была высказана идея о возможной конвекции в коре Венеры. Земная кора, толщина которой на континентах составляет до 40 км, а в океанических впадинах – до 6 км, слишком тонкая и холодная, чтобы поддерживать конвекцию. Но авторы предполагают, что

кора Венеры может иметь подходящую толщину (30–90 км в зависимости от местоположения), температуру и состав горных пород, чтобы поддерживать бесперебойную работу этого конвейера. Новые расчеты исследователей из Вашингтонского университета в Сент-Луисе показывают, что внешняя кора планеты может постоянно перемешиваться. Вопрос о том, как тепло из недр этой планеты может передаваться на поверхность, возник давно. Конвекция в коре может быть недостающим звеном механизма. Она может объяснить мощный вулканизм, влиять на тип и расположение вулканов на Венере и особенности венерианского ландшафта. Раньше никто всерьез не рассматривал возможность конвекции в коре Венеры. Но поскольку, согласно новым исследованиям, конвекция там не только возможна, но и более чем вероятна, это заставляет пересмотреть эволюцию планеты (Solomatov, Jain 2025; Павлов 2025).

Энергетические и энтропийные процессы. Конвекция и вулканическая деятельность – это проявление энергетических и энтропийных процессов. Когда мы говорим о Земле в целом как системе, мы подразумеваем, что она есть самоорганизующаяся система со способностью к воспроизводству антиэнтропийных состояний и с накоплением запаса потенциальной энергии. У Земли хорошие антиэнтропийные характеристики, связанные как с атмосферой, так и с другими параметрами. На Меркурии и Луне антиэнтропийная система почти отсутствует, там, как уже сказано, очень большие перепады температуры. На Марсе антиэнтропийная система в целом слабая. Зато на Венере она просто сверхмощная. Ее плотная углекислая атмосфера практически закупоривает теплообмен, в результате чего температура на ее поверхности достигает $+485^{\circ}\text{C}$, и она сильно не остывает: даже в горах разница температур не превышает 100°C . Безусловно, такая антиэнтропийная система не оптимальна.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ В ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ И ДРУГИХ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Теперь мы можем суммировать некоторые моменты.

Сходства. Если очень кратко перечислить некоторые сходства Земли и других планет, прежде всего планет земной группы, то мы получим:

1. Все планеты в результате аккреции, а также тяжелой бомбардировки аккумулировали огромные запасы внутренней энергии (хотя запасы эти оказались у ряда планет растраченными в первые миллиарды лет их эволюции).
2. Как и другие планеты, Земля в свой ранний период испытала последствия бомбардировки планетезималями и в более поздний период – метеоритами (так называемая поздняя тяжелая бомбардировка).
3. Все планеты были горячими и везде шли процессы остывания.
4. Везде происходила дифференциация вещества.

5. Везде сформировалась основная структура: ядро, мантия, кора.
6. Везде произошла дифференциация коры на «материковую» и «океаническую».
7. На всех планетах шли активные вулканические процессы.
8. Некоторые планеты имеют жидкое ядро и магнитосферу.
9. Многие планеты имели (и имеют) атмосферы, которые могут влиять на их климат.
10. Все планеты имеют в своем составе воду или водяной лед, некоторые планеты имели поверхностные гидросферы.

Различия. Поскольку каждая планета уникальна, то можно сначала выделить первичные преимущества Земли перед другими планетами, окончательно сформировавшиеся на самом раннем этапе возникновения. Это: месторасположение в отношении Солнца, обеспечившее оптимальные возможности получения энергии (не чрезмерные, но и не слишком маленькие), оптимальный размер и масса, разнообразный химический и минеральный состав, наличие спутника Луны. Спутники есть у планет – газовых гигантов Юпитера и Сатурна, их десятки²³. Но из планет земной группы спутники есть только у Марса, при этом они небольшие и не играют заметной роли в жизни этой планеты, в отличие от роли Луны для Земли²⁴. Однако есть гипотеза, что изначально Меркурий был спутником Венеры, но затем оторвался от нее и получил собственную орбиту (Язев 2018; см. также: Гринин 2017, 2020; Grinin 2018). Другие особенности появились на более поздних этапах эволюции Земли: гидросфера, тектоника плит, изменения в атмосфере.

Сформулируем еще некоторые эволюционные и системные различия.

1. Не все планеты смогли провести дифференциацию в той же мере, как Земля. Марс дифференцирован гораздо хуже.
2. Те планеты (особенно Меркурий и Луна, и в значительной мере Марс), которые остыли относительно скоро по сравнению с Землей, сохранили крайне многочисленные следы столкновений с метеоритами почти с момента образования планет.
3. Тектоника литосферных плит есть только на Земле. Ее наличие сильно отличает геологию Земли от геологии других планет.

Тектоника плит. Система тектоники плит отвечает не только за активную вулканическую деятельность, но также за многие изменения рельефа, обновление океанического дна и дрейф континентов. Она способствовала образованию и расколу суперконтинентов. В ее результате постоянно обновляются земная кора, очертания материков и океанов. Дело в том, что в процессе тектоники плит работает механизм омоложения коры (за счет

²³ Но крупнейших спутников в Солнечной системе всего семь: Луна, четыре спутника Юпитера (называемые галилеевыми, так как они были открыты Г. Галилеем) и два – у Сатурна.

²⁴ Спутники Марса (Фобос и Деймос) не имеют сферической формы, они, скорее всего, захвачены из пояса астероидов.

спрединга и субдукций), прежде всего океанической, вследствие круговорота веществ. Поэтому на дне океанов нет коры старше 180 млн лет. Может, на раннем этапе тектонические плиты и были на Марсе, но сейчас они определенно сомкнулись (Miller, Simon 2025).

Когда появилась тектоника плит, неясно: возможно, не позднее 2,7 млрд л. н., возможно, несколько раньше или позже (подробнее см.: Кузьмин и др. 2021). Причины ее появления пока остаются большой загадкой. Но тектоника плит, формирование материков и океанов и их преобразование сыграли очень важную роль в эволюции Земли, рельефа, климата и биосферы. Тем не менее не исключено, что и тектоника плит может встречаться на других телах. Так, на снимках, сделанных в рамках миссии «Новые горизонты», в районе Равнины Спутника карликовой планеты Плутона были обнаружены примечательные многоугольные узоры, напоминающие границы тектонических плит на Земле. Эти многоугольники образованы медленными конвекционными потоками в слое твердого азотного льда толщиной 4 км. Плутон, возможно, является вторым после Земли планетарным телом в Солнечной системе, где конвекция, приводящая в движение тектонические плиты, отчетливо видна на поверхности (Павлов 2025).

* * *

Сказанное в настоящей статье помогает систематизировать сходства и различия в организации, функционировании и эволюции Земли и других планет. Однако, конечно, это не может объяснить загадку появления жизни на Земле и тех изменений, которые позволили развиваться биосфере. При этом чем глубже мы погружаемся в особенности, тем яснее понимаем, что какой-то одной характеристики, чтобы объяснить фундаментальный подъем эволюции на новый уровень именно на Земле, нет. И, скорее всего, она и не будет найдена именно в таком ключе. Тем более что по мере изучения Солнечной системы и Вселенной мы видим, что казавшиеся уникальными черты Земли могут и не быть таковыми.

Мы убеждены, что появление возможности перехода к новому – это всегда результат совпадения множества достаточно редких явлений и состояний, а в целом: а) параллельных (подготовительных) усилий эволюции, которые не увенчались успехом; б) складывания уникального комплекса условий в нужное время и в нужном месте. Последнее неизбежно происходит очень редко, и эта уникальность именно в сложной системности таких условий, а не в наличии одного компонента, который обладает такой силой, что может дать рост и в иных условиях. Нет, необходимо наличие нужных компонентов в нужной комбинации, в нужное время и в особых условиях среды. Тем не менее чем глубже возможность сравнения Земли и других планет, тем лучше мы понимаем особенности эволюции Земли и планетной эволюции в целом.

Библиография

- Авсюк Ю. Н. 2001.** Внеземные факторы, воздействующие на тектогенез. В: Пущаровский Ю. М., *Фундаментальные проблемы общей тектоники*, с. 437–444. М.: Научный мир.
- Белоусов В. В. 1942.** Миграция радиоэлементов и развитие структуры Земли. Известия АН СССР. Сер. географическая и геофизическая. № 6. М.: Изд-во Академии наук СССР.
- Беммелен Р. В. ван. 1960.** Системы течений в силикатной оболочке. В кн. *Вопросы современной зарубежной тектоники*. М.: Ин. лит-ра.
- Бойко С. В., Прокатень Е. В. 2014.** *Общая геология*. Красноярск: Изд-во Сибирского фед. ун-та.
- В Гренландии обнаружен древнейший кратер Земли. 2012.** URL: <https://igd.sfu-kras.ru/oldigd/751.htm>.
- Виньковецкий Я. А. 1971.** *Геология и общая теория эволюции природы*. Л.: Недра.
- Войтюк А. 2022.** Марсианский грунт оказался прочнее лунного реголита. URL: <https://nplus1.ru/news/2022/03/15/churong-60-sol>.
- Габдуллин Р. Р., Ильин И. В., Иванов А. В. 2012.** Геологическая история Земли. *Универсальная и глобальная история (эволюция Вселенной, Земли, жизни и общества)* / Ред. Л. Е. Гринин, И. В. Ильин, А. В. Коротаев, с. 232–249. Волгоград: Учитель.
- Галанин А. В. 2012.** *Строение и жизнь Вселенной. Вселенная живая*. Владивосток. URL: <http://ukhtoma.ru/universe1.htm>.
- Галимов Э. М. 2019.** Оледенения в истории Земли, биосфера и низкая светимость Солнца. *Природа* 6. *Геохимия, гляциология, климат*. URL: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/435255/Oledeneniya_v_istorii_Zemli_biosfera_i_nizkaya_svetimost_Solntsa.
- Гринин Л. Е. 2017.** *Большая история развития мира: история и эволюция Солнечной системы*. М.: Моск. ред. изд-ва «Учитель».
- Гринин Л. Е. 2020.** *Большая история развития мира: планеты Солнечной системы. Их история и эволюция. Химическая эволюция в космосе и на Земле*. М.: Моск. ред. изд-ва «Учитель».
- Гринин Л. Е. 2025.** Земля как сложная саморегулирующаяся система. *Эволюция: грани эволюции* / Отв. ред. Л. Е. Гринин, А. В. Коротаев, с. 116–167. Волгоград: Учитель.
- Дунаев В. А. 2008.** *Общая геология*. Белгород: Изд-во БелГУ.
- Жарков В. Н. 2013.** *Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику*. М.: Наука и образование.
- Карасева Л. 2024.** Что такое экзопланеты и как ищут жизнь во Вселенной. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/futurology/607f135e9a79474d800799b7?from=copy>.
- Каттерфельд Г. Н., Шмуратко В. И. 1983.** Планетологические различия и сходства Земли и Марса. *Известия АН Армянской ССР. Науки о Земле* XXXVI(6): 62–73.

- Кац Я. Г., Козлов В. В., Макаров Н. В., Сулиди-Кондратьев Е. Д. 1984. *Геологи изучают планеты*. М.: Недра.
- Короновский Н. В. 2002. *Общая геология*. М.: МГУ.
- Ксанфомалити Л. В. 1997. *Парад планет*. М.: Наука.
- Ксанфомалити Л. В. 2004. Горные потоки и бассейны Марса. *Марс: великое противостояние* / Ред.-сост. В. Г. Сурдин, с. 199–207. М.: Физматлит.
- Ксанфомалити Л. В. 2012а. Венера. *Солнечная система* / Ред.-сост. В. Г. Сурдин, гл. 5. М.: Физматлит.
- Ксанфомалити Л. В. 2012б. Меркурий. *Солнечная система* / Ред.-сост. В. Г. Сурдин, гл. 6. М.: Физматлит.
- Ксанфомалити Л. В. 2012в. Юпитер. *Солнечная система* / Ред.-сост. В. Г. Сурдин, гл. 7. М.: Физматлит.
- Ксанфомалити Л. В. 2012г. Уран. *Солнечная система* / Ред.-сост. В. Г. Сурдин, гл. 8. М.: Физматлит.
- Ксанфомалити Л. В. 2012д. Нептун. *Солнечная система* / Ред.-сост. В. Г. Сурдин, гл. 9. М.: Физматлит.
- Ксанфомалити Л. В. 2012е. Марс. *Солнечная система* / Ред.-сост. В. Г. Сурдин, гл. 10. М.: Физматлит.
- Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В. 2011. Глубинная геодинамика, или Как работает мантия Земли. *Семь веков российской истории* 42(6). URL: <https://scfh.ru/papers/glubinnaya-geodinamika-geodinamika-ili-kak-rabotaet-mantiya-zemli/>.
- Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В., Гладкочуб Д. П., Горячев Н. А., Деревянко А. П., Диденко А. Н., Донская Т. В., Кравчинский В. А., Оганов С. А., Писаревский А. Р. 2021. *Геологическая эволюция Земли: от космической пыли до обитали человечества*. Новосибирск: Гео.
- Кусков О. Л., Дорофеева В. А., Кронрод В. А., Макалкин А. Б. 2009. *Системы Юпитера и Сатурна: Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников*. М.: ЛКИ.
- Митрофанов И. Г. 2015. Вода и жизнь на Марсе. *Механика, управление и информатика* 7(3): 155–167.
- Павлов Д. 2025. Как связано обилие вулканов на Венере и конвекция венерианской коры: гипотеза планетологов. URL: <https://science.mail.ru/news/417-kak-svyazano-obilie-vulkanov-na-venere-i-konvekciya-venerianskoj-kory-gipoteza-planetologov/>.
- Пугачева С. Г., Шевченко В. В. 2015. *Древние вулканические типы рельефа Марса, Венеры, Меркурия и Луны. Происхождение, морфология, возраст*. М.: Наука.
- Пушаровский Д. Ю., Пушаровский Ю. М. 1998. Состав и строение мантии Земли. URL: <https://pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/668.html>.
- Ретеюм А. Ю. 1988. *Земные миры*. М.: Мысль, 1988.
- Савченко В. Н., Смагин В. П. 2013. *Концепции современного естествознания: в 2 т. Т. 2. Планетное, химическое, биологическое, эволюционное, философия и инструменты, мегаистория Вселенной*. Владивосток: Изд-во ВГУЭС.

- Сиротин В. И. 2009. *Сравнительная планетология (Очерки результатов исследования Земли, Солнечной системы и Космоса)*. Воронеж: ВГУ.
- Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. 2002. *Развитие Земли*. М.: Изд-во МГУ.
- Стрекопытов В. 2019. «Подземный океан» в переходной зоне мантии образовался более 3,3 млрд лет назад. URL: https://elementy.ru/novosti_nauki/433502/Podzemnyy_ocean_v_perekhodnoy_zone_mantii_obrazovalsya_bole_3_3_mld_let_nazad.
- Стрекопытов В. 2024. Озеро на Марсе. Было все как на Земле. Что обнаружил марсоход под слоем осадков. URL: <https://ria.ru/20240130/marsokhod-1924173034.html>.
- Тебиева Д. И. 2015. *Планетология*. Владикавказ: Изд-во СОГУ.
- Фишер Д. 1990. *Рождение Земли*. М.: Мир.
- Хаин В. Е. 2003. *Основные проблемы современной геологии*. М.: Научный мир.
- Хаин В. Е. 2010. Об основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики Земли. *Геология и геофизика* 51(6): 753–760.
- Хаин В. Е., Короновский Н. В. 2007. *Планета Земля. От ядра до ионосферы*. М.: КДУ.
- Чумаков Н. М. 2015. *Оледенения Земли: История, стратиграфическое значение и роль в биосфере*. М.: ГЕОС, 2015.
- Шевченко В. В. 2014. Наша уникальная Солнечная система. URL: http://sele-na.sai.msu.ru/Shev/Publications/Solar_System/Solar_System.htm.
- Шевченко В. В. 2015. Современные проблемы лунных исследований. *Исследования Солнечной системы: космические вехи. Материалы научной сессии, посвященной 80-летию академика М. Я. Марова* / Ред. А. В. Захаров, с. 37–70. М.: ИКИ РАН.
- Шематович В. И. 2015. Газовые оболочки ледяных спутников. *Исследования Солнечной системы: космические вехи. Материалы научной сессии, посвященной 80-летию академика М. Я. Марова* / Ред. А. В. Захаров, с. 270–310. М.: ИКИ РАН.
- Шкодзинский В. С. 2017. Природа различий планет земной группы. *Наука и техника в Якутии* 2(33): 10–15.
- Язев С. А. 2018. *Астрономия. Солнечная система: учеб. пособие для СПО*. 3-е изд., перераб. и доп. Иркутск: Иркутский гос. ун-т.
- Ястребов С. 2016. Кислородная революция и Земля-снежок. *Химия и жизнь* 9. С. 33–37.
- Abramov O., Kring D. A., Mojzsis S. J. 2012. *Early Solar System Impact Bombardment II: Program and Abstract Volume*. Houston: Lunar and Planetary Institute.
- Arbab A. I. 2009. The Length of the Day: A Cosmological Perspective. *Progress in Physics* 1: 8–11. URL: <https://web.archive.org/web/20220820051602/http://www.ptep-online.com/2009/PP-16-02.PDF>.
- Bais A. F., Bernhard G., McKenzie R. L., Aucamp P. J., Young P. J., Piyas M., Jöckel P., Deushi M. 2019. Ozone –Climate Interactions and Effects on Solar Ul-

- traviolet Radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences* 18: 602–640. DOI: 10.1039/c8pp90059k.
- Bottke W. F., Vokrouhlický D., Minton D., Nesvorný D., Morbidelli A., Brassier R., Simonson B., Levison H. F. 2012.** An Archaean Heavy Bombardment from a Destabilized Extension of the Asteroid Belt. *Nature* 485(7396): 78–81. DOI: 10.1038/nature10967.
- Brack A., Horneck G., Cockell C. S., Berces A., Belisheva N. K. et al. 2010.** Origin and Evolution of Life on Terrestrial Planets. *Astrobiology* 10(1): 69–76. DOI: 10.1089=ast.2009.0374.
- Buis A. 2021.** The Earth's Magnetic Field has been around for Almost as Long as the Earth Itself. It Protects Life on Our Planet from Harmful Cosmic Radiation. URL: <https://science.nasa.gov/science-research/earth-science/earths-magnetosphere-protecting-our-planet-from-harmful-space-energy/>.
- Collinson G. A., Frahm R. A., Glocer A., Coates A. J., Grebowsky J. M. et al. 2016.** The Electric Wind of Venus: A Global and Persistent “Polar Wind”-Like Ambipolar Electric Field Sufficient for the Direct Escape of Heavy Ionospheric Ions. *Geophysical Research Letters* 43(12): 5903–6672. DOI: 10.1002/2016GL068327.
- Ding L., Zhou R., Yu T., Gao H. 2022.** Surface Characteristics of the Zhurong Mars Rover Traverse at Utopia Planitia. *Nature Geoscience* 15: 171–176. DOI: 10.1038/s41561-022-00905-6.
- Feuchtgruber H., Lellouch E., de Graauw T., Bézard B., Encrenaz T., Griffin M. 1997.** External Supply of Oxygen to the Atmospheres of the Giant Planets. *Nature* 389: 159–162. DOI: 10.1038/38236.
- Gang Wang, Kun Zhao, Jingxuan Zhang, Shengxian Zhu, Chaochao Xing, Xian-guo Lang. 2025.** Glacial Fluctuations in the Cryogenian Marinoan Snowball Earth. *Gondwana Research Volume* 139: 1–15.
- Garrels R. M., Christ C. L. 1965.** *Solutions, Minerals, and Equilibria*. New York: Harper & Row.
- Gomes R., Levison H. F., Tsiganis K., Morbidelli A. 2005.** Origin of the Cataclysmic Late Heavy Bombardment Period of the Terrestrial Planets. *Nature* 435(7041): 466–469. DOI: 10.1038/nature03676.
- Grinin L. E. 2018.** Evolution of the Early Solar System in Terms of Big History and Universal Evolution. *Journal of Big History* 2(1): 15–26. URL: <http://lowellgustafson.com/2018/01/>.
- Grinin L. E. 2023.** Chemical Evolution in Big History. *Journal of Big History* VII (2): 97–105. DOI: 10.22339/jbh.v7i2.7208.
- Grinin L. 2025a.** Earth as a Planet, Earth among Other Planets. *Journal of Big History* VIII(3): 52–75. DOI: 10.22339/jbh.v8i3.8302.
- Grinin L. E. 2025b.** Geological Evolution: Some Preliminary Ideas. *Journal of Big History* VIII(1): 32–44. DOI: 10.22339/jbh.v8i1.8106.
- Grinin L. 2026a.** Chemical Evolution in Cosmos and Earth. *Complexity in Universal Evolution – A Big History Perspective* / Ed. by D. LePoire, L. Grinin, A. Korotayev (in print). Cham: Springer Nature.

- Grinin L. 2026b.** Geological Evolution: A Bridge between Cosmic and Earthly Development in Big History. *Complexity in Universal Evolution – A Big History Perspective* / Ed. by D. LePoire, L. Grinin, A. Korotayev (in print). Cham: Springer Nature.
- Harrison Ch. G. A. 1966.** Antipodal Location of Continents and Oceans. *Science* 153(3741): 1246–1248.
- Hazen R. M., Papineau D., Bleeker W., Downs R. T., Ferry F., McCoy T., Sverjensky D., Yang H. 2008.** Mineral Evolution. *American Mineralogist* 93: 1693–1720.
- Hazen R. M., Sverjensky D. A. 2010.** Mineral Surfaces, Geochemical Complexities, and the Origins of Life. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 2: a002162.
- Hazen R. M., Wong M. L. 2024.** Open-Ended versus Bounded Evolution: Mineral Evolution as a Case Study. *PNAS Nexus* 3(7): pgae248. DOI: 10.1093/pnasnexus/pgae248.
- Hille K. B. 2019.** A Closer Look at Mercury’s Spin and Gravity Reveals the Planet’s Inner Solid Core. URL: <https://www.nasa.gov/solar-system/a-closer-look-at-mercurys-spin-and-gravity-reveals-the-planets-inner-solid-core/>.
- Hille K. B. 2023.** The Fact and Fiction of Martian Dust Storms. URL: <https://www.nasa.gov/solar-system/the-fact-and-fiction-of-martian-dust-storms/#:~:text=The%20Fact%20and%20Fiction%20of%20Martian%20Dust%20Storms.>
- Horinouchi T., Hayashi Y.-Y., Watanabe S. et al. 2020.** How Waves and Turbulence Maintain the Super-Rotation of Venus’ Atmosphere. *Science* 368: 405–409. DOI: 10.1126/science.aaz4439.
- Hyde W. T., Crowley T. J., Baum S. K., Peltier W. R. 2000.** Neoproterozoic “Snowball Earth” Stimulations with a Coupled Climate/Ice-Sheet Model. *Nature* 405(6785): 425–429.
- Jet Propulsion Laboratory. 2008.** Planetary Physical Parameters. URL: https://ssd.jpl.nasa.gov/planets/phys_par.html.
- Jiménez-Díaz A., Ruiz J., Kirby J. F., Romeo I., Tejero R., Capote R. 2015.** Lithospheric Structure of Venus from Gravity and Topography. *Icarus* 260: 215–231.
- Johnson B. C., Melosh H. J. 2012.** Impact Spherules as a Record of an Ancient Heavy Bombardment of Earth. *Nature* 485(7396): 75–77. DOI: 10.1038/nature10982.
- Kovalyov M., Kovalyov S., Kovalyov N. 2018.** On the Global Aspects of the Almost-Antipodal Symmetry on Earth. *Journal of Geophysics* 22(1): 60–65.
- Kump L. R., Kasting, J. F., Crane R. G. 2010.** *The Earth System*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Miguel Y., Vazan A. 2023.** Interior and Evolution of the Giant Planets. *Remote Sensing* 15(3): 681. DOI: 10.3390/rs15030681.
- Miller K., Simon M. 2025.** Scientists Just ‘Looked’ Inside Mars. Here’s What They Found inSight and Perseverance have sent back Unprecedented Data on Everything from Marsquakes to the Red Planet’s Inner Layers. *Wired* July 22. URL: https://www.wired.com/story/scientists-just-looked-inside-mars-heres-what-they-found/#intcid=wired-homepage-right-rail_ce6b7bde-4a53-4fcf-a542-603cd7a1e7bf_popular4-1.
- Paddison L. 2024.** Mars could be Driving “Giant Whirlpools” in the Earth’s Deep Oceans, New Study Finds. URL: <https://edition.cnn.com/2024/03/12/climate/mars-earth-ocean-currents-climate-intl/index.html>.

- Paige D. A., Hamran S.-E., Amundsen H. E. F., Berger T., Russell P., Kakaria R., Mellon M. T., Eide S., Carter L. M., Casademont T. M., Nunes D. C., Shoemaker E. S., Plettmeier D., Dypvik H., Holm-Alwmark S., Horgan B. H. N. 2024.** Ground Penetrating Radar Observations of the Contact between the Western Delta and the Crater Floor of Jezero Crater, Mars. *Science Advances* 10(4). DOI: 10.1126/sciadv.adi8339
- Pollard D., Kasting J. F. 2005.** Snowball Earth: A Thin-Ice Solution with Flowing Sea Glaciers. *Journal of Geophysical Research* 110. DOI: 10.1029/2004JC002525.
- Richardson J., Seager S. 2007.** The Atmospheres of Extrasolar Planets. *Planetary Systems and the Origins of Life* / Ed. by R. Pudritz, P. Higgs, J. Stone, pp. 21–40. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rott C., Taketa A., Bose D. 2015.** Spectrometry of the Earth using Neutrino Oscillations. *Scientific Reports* 5: 15225. DOI: 10.1038/srep15225.
- Runnegar B. 2000.** Loophole for Snowball Earth. *Nature* 405(6785): 403–404. DOI: 10.1038/35013168.
- Ryder G., Koeberl Ch., Mojzsis S. J. 2000.** *Origin of the Earth and Moon*. Tucson: University of Arizona Press.
- NASA. 2025.** Mercury Facts. URL: <https://science.nasa.gov/mercury/facts/>.
- Snels M., Stefani S., Grassi D., Piccioni G., Adriani A. 2014.** Carbon Dioxide Opacity of the Venus' Atmosphere. *Planetary and Space Science* 103(15): 347–354. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032063314002268?via%3Dihub>.
- Sobolev A. V., Asafov E. V., Gurenko A. A., Arndt N. T., Batanova V. G., Portnyagin M. V., Garbe-Schönberg D., Wilson A. H., Byerly G. R. 2019.** Deep Hydrous Mantle Reservoir Provides Evidence for Crustal Recycling before 3.3 Billion Years Ago. *Nature* 571(7766): 555–559. DOI: 10.1038/s41586-019-1399-5.
- Solomatov V. S., Jain Ch. 2025.** On the Possibility of Convection in the Venusian Crust. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 361: 107332. DOI: 10.1016/j.pepi.2025.107332.
- Spohn T., Sohl F., Wiczerkowski K., Conzelmann V. 2001.** The Interior Structure of Mercury: What We Know, What We Expect from BepiColombo. *Planetary and Space Science* 49: 1561–1570. DOI: 10.1016/S0032-0633(01)00093-9.
- Vidmachenko A. P., Kuznetsova J. G. 2025.** Model of the Internal Structure and Characteristics of the Surface Relief of Venus. *The Influence of Volcanic Activity on the Formation of the Venus Surface* / Ed. by A. P. Vidmachenko, O. S. Ovsak, J. G. Kuznetsova, O. F. Steklov, pp. 44–70. Boston: Primedia eLaunch. DOI: 10.46299/979-8-89814-227-8.
- WMO. 2025.** The Sun's Impact on the Earth. URL: <https://wmo.int/suns-impact-earth>.
- Workshop on Early Solar System Impact Bombardment III. LPI Contribution No. 1826. 2012.** Houston: Lunar and Planetary Institute.
- Zucker Sh. 2007.** Observations of Extrasolar Planetary Systems. *Planetary Systems and the Origins of Life* / Ed. by R. Pudritz, P. Higgs, J. Stone, pp. 1–20. Cambridge: Cambridge University Press.