

Глава 8. Некоторые процессы в истории отдельных планет

В эти первые сотни миллионов лет истории Солнечной системы на планетах и других телах проходили и другие очень важные процессы. Их следы во многих случаях не сохранились, но кое-что все же становится известным. Кроме того, некоторые процессы можно реконструировать, среди них: мощные вулканические и магматические процессы; газовые процессы, которые приводили к формированию (и потере) атмосфер; появление на некоторых планетах гидросферы; изменение энергетических потоков; формирование и изменение магнитных полей и пр. О них по возможности мы скажем в данной главе, но, поскольку эти процессы далеко не всегда можно разделить по фазам, а также потому, что даже гипотезы касаются только некоторых планет, их придется излагать в рамках более длительных процессов.

8.1. Энергетические процессы

Эти процессы являются базовыми, во многом определяющими все остальные.

Рост светимости Солнца. Начать следует с того, что когда Солнце вышло на главную последовательность (для звезд такой массы это примерно 50 млн лет или несколько больше, то есть время формирования планет), его светимость как очень молодой звезды была около 0,7 от нынешней, то есть примерно на 30 % меньше, чем сегодня (Громов 2012: 30; Хейзен 2015: 76; Язев 2018: 300; см. также: Николис, Пригожин 2003: 51). С тех пор она медленно, но неуклонно возрастала, значительно приблизившись к сегодняшним показателям к моменту окончания Поздней тяжелой бомбардировки, но все еще не достигая ее. Потребовалось примерно 1,5 млрд лет, чтобы светимость Солнца приблизилась вплотную к современной. Таким образом, последние 3 млрд лет оно обладает почти одинаковой светимостью (Холщевников 2012a: 61; Кацова, Лившиц 2014: 74; Хейзен 2015: 76; см. также: Синицын 2010: 69).

Однако могли быть и иные параметры, которые отличали молодое Солнце от современного в пользу того, что разница в светимости не была столь высокой. Во-первых, сравнивая Солнце с группой молодых звезд, мы не можем исключить, что излучение внешней атмосферы тогда было существенно выше (Кацова, Лившиц 2014: 74). Во-вторых, есть и иные данные. Так, сравнивая изотопный состав отложений этих веществ в реголите с изотопным составом солнечного ветра, можно сделать заключение о том, что количественные соотношения изотопов в солнечном ветре существенным образом не изменились за последние 2,5–3 млрд лет. Это свидетельствует о том, что представление об эволюции Солнца как стабильной звезды главной последовательности в основном подтверждаются с точки зрения следов в лунном реголите. Однако соотношение некоторых летучих, в частности ксенона, заметно меняется со временем, а это указывает, что поток древнего солнечного ветра (~4–3,5 млрд л. н.) был в 2–3 раза выше. Особенно стабильно проявлено изменение соотношения изотопов азота в сторону увеличения на величину порядка 15 % за каждый миллиард лет. К сожалению, этот феноменальный результат до сих пор не имеет объяснения, но предполагается, что увеличение данного соотношения тоже является указанием на увеличение потока солнечного ветра древнего Солнца. Предполагается также, что солнечный ветер был и более энергетичным (Синицын 2010: 69).

Будем исходить из того, что на первой и второй фазах эволюции Солнечной системы энергия, поступающая от Солнца, была меньше, а следовательно, внутренняя энергия являлась более важной, чем сегодня, по крайней мере, для части планет.

Внешние и внутренние источники энергии. Основным внешним источником энергии, помимо Солнца, была энергия ударных явлений. На первых фазах истории Солнечной системы роль этой энергии была очень большой. Как говорилось выше, имеются предположения, что только с ее помощью планеты (их поверхности) превращались в горячие или даже огненные. Однако со временем поток астероидов и метеоритов сократился, поэтому и данный источник энергии примерно с 3,2 млрд л. н. (или раньше) утратил былое значение. Кроме того, планеты, которые приобрели атмо-

сферы, сжигали в ней значительную часть метеоритов⁷³. Нельзя, конечно, забывать и об энергии гравитации, благодаря которой тела вращаются, а также оказывают друг на друга влияние.

Можно также сказать об энергии приливов (вызванной гравитацией), которая, однако, играет роль только на некоторых планетных телах. На Земле и на Луне приливы имеют значение, но их трудно назвать наиболее важным источником энергии. Иное дело – спутник Юпитера Ио, где под влиянием огромного притяжения близкого Юпитера выделяется много тепла, приводящего к мощной вулканической активности, далеко превосходящей все, что есть в Солнечной системе. Приливная энергия планет-гигантов также влияет на водный баланс спутников. В частности, приливный эффект Юпитера не только вызывает выделение тепла в недрах его более далекого спутника Европы, но и, вероятно, повлиял на существование у этого спутника грандиозного подледного океана. Аналогичные эффекты (таяние льда снизу под влиянием полученной от гравитации энергии) привели к появлению подледного океана на спутнике Сатурна Энцеладе (Язев 2018: 39–40).

Основными внутренними источниками энергии на планетных телах являлись (являются): а) энергия, выделяемая при дифференциации вещества в недрах планет, тоже, по сути, за счет гравитации; б) энергия, выделяемая при распаде радиоактивных элементов; в) энергия, связанная с мощным давлением внутри планет, особенно на Юпитере и Сатурне. Благодаря этим источникам (степень вклада каждого из них не до конца понятна), а также внешним источникам энергии (прежде всего импактам) на планетах и планетных телах образовались жидкие ядра, которые у части планет застыли, а у некоторых (как на Земле) сохранились до сих пор. В некоторых случаях энергия выделялась за счет сжатия планеты. Так, есть мнение, что для планет-гигантов основным источником их нагрева является гравитационное сжатие. Данный фактор все еще продолжает действовать на этих планетах, за исключением наименее массивного Урана (Жарков, Трубицын 1980; Евсюков 1997).

⁷³ Напомним, что у Меркурия средняя плотность кратеров (мест ударов метеоритов размером более 10 км) 360 на 1 млн кв. км, а у Венеры всего два таких объекта на 1 млн кв. км (Язев 2018: 46, 66). Огромная разница. И все благодаря атмосфере.

Важно также помнить, что сама по себе энергия «не работает», если один вид энергии не переходит в другой. Именно при таких превращениях она и стимулирует экзогенные процессы, формируя природную обстановку (Тебиева 2015: 203). В более широком, философском плане источники энергии – это всегда движение материи, переход ее из одного состояния в другое, распад вещества и выделение энергии, переход энергии в разные формы при сохранении ее общего баланса согласно первому закону термодинамики. В связи со сказанным следует учитывать перенос энергии при конвекции, что особенно важно для геологических процессов, в частности изливания магмы. Так, по современным представлениям, механизм переноса тепла в недрах Луны, Меркурия и Марса в основном происходил в виде конвекции (Шевченко 2014), что проявлялось в переносе расплавленной магмы из мантии в кору и приводило к изменениям последней и формированию вторичной, третичной и т. д. коры.

Тепловыделение планет и потеря ими энергии. Происходила постепенная потеря планетами энергии, но с очень разной скоростью. Высокий уровень тепловыделения сохранялся на Меркурии с 4 до 2,5 млрд л. н., дольше, чем на Луне (однако, по другим данным [Язев 2018: 45], активность в виде вулканической деятельности и лавовых потоков на планете прекратилась 3,5 млрд л. н.). Для более крупных планет – Земли и Венеры – достижение максимального энерговыделения пришлось на период примерно 3,6–3,4 млрд л. н. (Евсюков 1997: 49). Современный процесс потери эндогенного тепла на Венере, по-видимому, подобен лунному, то есть происходит с использованием теплопроводности пород мантии и коры. Но природа более раннего механизма этих процессов остается неизвестной (Шевченко 2014). По некоторым данным, на Марсе тепловая эволюция шла более медленно, максимальное тепловыделение пришлось на период 2,5–0,5 млрд л. н. (Евсюков 1997: 48), что существенно дольше, чем на Луне и Меркурии (см. также: Шевченко 2014).

Исследование поверхности спутников планет-гигантов позволяет сделать довольно необычное заключение: по-видимому, на ранних стадиях эволюции планеты-гиганты излучали в космос огромные потоки энергии. Даже сегодня Юпитер излучает почти в два раза больше энергии, чем получает от Солнца. То же касается

и Сатурна (Язев 2018: 204; Алексеев 2019: 224). При этом источники энергии полностью неизвестны, на этот счет существуют разные гипотезы (см. выше о сжатии и величине метеорного потока). В частности, называют фантастическую цифру энерговыделения Юпитера. Мощность, которую он мог излучать в космос на ранней стадии своей эволюции, достигала 1/10 полной солнечной радиации (Ксанфомалити 1997: 171). Спутники Юпитера, расположенные несравненно ближе к центральной планете, чем к Солнцу, на единицу площади получали больше энергии, чем Меркурий от Солнца. В этом случае в лучах Юпитера должны были плавиться льды на поверхности всех его спутников, хотя этих лучей было недостаточно, чтобы вызвать плавление поверхности Каллисто, удаленного от планеты почти на 2 млн км (Там же: 170). Исходя из этого, высказывается идея, что природа гигантских «морей» на поверхности Ганимеда связана с этим энергетическим влиянием. Впрочем, имеется и другая точка зрения, заключающаяся в том, что аккреционная энергия и последующий радиоактивный нагрев сыграли решающую роль в дифференциации Европы и Ганимеда, в результате чего произошла сепарация льда, скального материала и металлического сплава (Кусков и др. 2009: 514).

Таким образом, несмотря на то, что Солнце еще не достигло своей полной силы, за счет мощных энергетических процессов, связанных с бомбардировкой, и внутренних процессов планет ранние периоды последних, вероятно, были теплее, чем последующие. Ниже мы увидим «климатическую трагедию» Марса. Наличие мощного внутреннего тепла и другие процессы обеспечили сильнейшую вулканическую деятельность и магматические излияния, которые значительно изменили рельеф планет земной группы.

Остывание и потеря магнитного поля некоторыми телами. В конце 4-го млрд л. н. на Луне вместе с остыванием ядра происходят и ослабление магнитогидродинамических процессов генерации собственного селено-магнитного поля, и вымирание поля. Предполагается (но не всеми исследователями), что в раннюю эпоху Луна обладала довольно сильным магнитным полем. Оно было еще весьма заметным в эпоху от 3,6 до 3,8 млрд лет назад (Шевченко 2015: 41). Затем это поле ослабело, но еще 1–2,5 млрд л. н. оно оставалось заметным (примерно 1/10 от силы первоначального

магнитного поля Луны), затем практически исчезло (Язев 2018: 98–99).

Как мы уже говорили, наличие у нее магнитного поля – это важный показатель, свидетельствующий о существовании у нее железного ядра. У Марса слабое глобальное магнитное поле (есть локальные магнитные поля, что еще больше затрудняет создание теории магнетизма этой планеты, которой пока не существует) (Он же 2011: 48; 129). Соответственно, неясно, связано ли отсутствие заметного магнитного поля у Марса с неполной дифференциацией вещества или с остыванием планеты.

Предполагается, что такое малое тело (по сравнению с Землей), как Меркурий, должно было остыть уже 3–2 млрд л. н. Соответственно, у него не должно быть магнитного поля. Но поле зафиксировано, хотя и слабое, напряженностью менее 1 % земного. Однако удалось выявить и остаточную намагниченность планеты, что дало следующие сведения: Меркурий обладал магнитным полем с самого начала своего образования, в ранний период оно было приблизительно в сто раз сильнее и примерно равнялось современному земному (Он же 2018: 44).

Как и многое другое, существование нынешнего магнитного поля Меркурия выглядит загадочным. И, как и во многих случаях, есть целый ряд объясняющих это гипотез.

Одна из гипотез предполагает присутствие серы в железоникелевом ядре Меркурия, которая могла снизить температуру затвердевания сплава и надолго сохранить его в жидком состоянии. Есть версия, допускающая увеличенное количество радиоактивных элементов, выделяющих тепло, в недрах планеты. Однако эти гипотезы требуют специального объяснения того обстоятельства, почему именно на Меркурии оказалось повышенное по сравнению с другими планетами содержание серы либо радиоактивных элементов. Еще одна гипотеза допускает периодическое подплавление внешней части ядра и внутренней части мантии на определенных участках орбиты планеты (например, вблизи перигелия) за счет разогрева, который может создаваться приливным влиянием со стороны Солнца (Он же 2011: 48–49).

Попутно заметим, что крупнейший спутник Солнечной системы Ганимед также имеет собственное магнитное поле.

8.2. Газообмен. Атмосферные изменения. Потеря атмосфер

Все планеты и планетные тела Солнечной системы, как мы уже не раз отмечали, можно делить по наличию – отсутствию атмосфер. При этом те, что имеют атмосферу, имеют и историю ее изменения, хотя она не всегда известна. Важно иметь в виду, что у Земли и, не исключено, у Венеры состав атмосферы менялся, то есть были первичные и вторичные (и, вероятно, третичные) атмосферы.

Модели образования атмосфер у планет земной группы. Проблемы образования атмосфер (как и гидросфер) для планет земной группы до конца не решены. *При этом важно понимать, что образование атмосфер и гидросфер тесно связано.* Имеется несколько моделей возникновения атмосфер: 1) постепенная дегазация планет в течение всей жизни в результате вулканической деятельности; 2) катастрофическая дегазация в период первоначальной аккреции или вскоре после нее под воздействием высокой температуры молодых планет; 3) захват газов непосредственно из протопланетной туманности. Возможно, все три процесса участвовали в образовании атмосфер, но значение каждого процесса в присутствии того или иного газа могло быть различным. Например, нерадиоогенные (не являющиеся продуктами радиоактивного распада) изотопы инертных газов на Венере могли быть захвачены прямо из протопланетной туманности, в то время как химически активные газы (CO_2 , N_2) были ею получены в составе твердых частиц (адсорбированными). Для Земли прямой захват газов из протопланетной туманности сыграл довольно небольшую роль, а для Марса – еще меньшую (Тебиева 2015). При этом важно, что в составе атмосфер был и водяной пар. Таким образом, атмосферы и гидросферы образовывались, возможно, вместе. В то же время не исключено, что гидросферы имели и самостоятельное происхождение (см. выше о кометах).

Первая модель образования атмосфер. Согласно современным представлениям, атмосфера и гидросфера возникли в результате дегазации магмы, выплавляющейся при вулканических процессах из верхней мантии и создающей кору. В отношении Земли многие исследователи придерживаются именно такой точки зрения (см., например: Павлов 2006; Монин 1980; Хаин и др. 1997; Габдуллин 2005). Здесь исходят из того, что в момент формирования Земли

все элементы ее будущей атмосферы и гидросферы находились в связанном виде в составе твердых веществ. Бомбардировка поверхности Земли планетезиμαлями в то время могла приводить к выделению летучих веществ, но вода, углекислый газ, «кислые дымы» и другие активные вещества должны были поглощаться раздробленными породами, так что первичная атмосфера на этом этапе состояла, по-видимому, лишь из небольшого количества азота, аммиака и инертных газов (Монин 1980; Хаин и др. 1997). То есть атмосфера была сильно разреженной, и только мощная бомбардировка и разогрев постепенно формировали ее.

Вторая модель образования атмосферы и расхождение эволюционных путей планет земной группы. Сторонники данной модели также исходят из того, что атмосфера Земли, как и ее гидросфера, образовалась благодаря дегазации мантии – процессу, происходящему всегда, но развивавшемуся наиболее интенсивно на ранних этапах существования Земли. Но сам процесс представляется как гораздо более интенсивный.

В первой фазе истории Солнечной системы, когда, согласно многим ученым, имело место расплавление внешней сферы планет, происходило также массовое выделение газов и воды, которая при очень высокой температуре поверхности существовала в виде пара. Предполагается, что в этой фазе все планеты внутренней группы – Меркурий, Венера, Земля, Луна и Марс – обладали атмосферами, которые одновременно содержали в себе в парообразном состоянии и всю гидросферу. При этом судьба атмосферы и гидросферы на планетах была различна. Крупные планеты (Земля и Венера) благодаря большой массе и, соответственно, силе притяжения удержали выделявшиеся из недр газы и парообразную гидросферу, из которых в последующем могли сформироваться атмосфера и гидросфера (Тебиева 2015: 194, 195). Однако процесс не был гладким, даже в отношении Земли (см. ниже).

Меньшие по размерам Луна и Меркурий из-за недостаточности у них силы притяжения имели неустойчивые атмосферы, водяные пары и газы из них непрерывно улетучивались в космос. Когда поступление газов из недр прекратилось, вся временная нестабильная атмосфера как Луны, так и Меркурия исчезла, и они превратились

в безатмосферные планеты⁷⁴. Марс как планета промежуточной массы (между Землей и Венерой, с одной стороны, и Меркурием и Луной – с другой) в фазу расплавления имел сравнительно плотную атмосферу. Но по мере прекращения поступления газов она все сильнее разрежалась и продолжает разрежаться (Тебиева 2015: 196).

Завершение фазы расплавления связано с охлаждением поверхности и переходом ее из жидкого состояния в твердое. Но температура ставшей уже твердой поверхности продолжала оставаться очень высокой, поэтому вся вода с поверхностей мгновенно испарялась. Вся гидросфера планет, у которых она была, продолжала оставаться в атмосфере в виде пара. Так продолжалось до тех пор, пока температура поверхности планет не охладилась до 100 °С. С этого времени природная обстановка на планетах с гидросферами коренным образом изменилась – на поверхности появилась жидкая вода, сформировался сток, возникли водоемы (Там же). Таким образом, температура 100 °С является рубежом, после которого эволюционные пути планет земной группы разошлись. Луна и Меркурий, лишенные атмосферы и гидросферы, эволюционировали (относительно) очень медленно (Там же: 195). Позже, однако, Венера и Марс потеряли воду, которая образовала (по некоторым предположениям) океаны на этих планетах. Об этом мы подробнее расскажем в следующей главе.

⁷⁴ Для удержания атмосферы масса планеты играет очень большую роль. Однако это не всегда является препятствием для сохранения атмосферы. Последнее мы видим на примере Титана, самого крупного спутника Сатурна и второго по массе (после спутника Юпитера Ганимеда) в Солнечной системе. Это единственный спутник с атмосферой, причем плотной. Хотя по размерам он больше Меркурия, однако масса его меньше. Характерно, что давление атмосферы выше, чем на Земле, масса атмосферы больше, чем на Земле, атмосфера простирается до 400 км (Язев 2018: 217–218). Неизвестно, что именно произошло в истории Титана, что позволило ему иметь такую прекрасную атмосферу. Атмосфера Титана в чем-то похожа на атмосферу Земли, так как в основном (на 90 %) она состоит из азота. На остальные 10 % приходится метан, незначительное количество аммиака, аргона и этана. Еще более эта атмосфера похожа на атмосферу древней докислородной Земли (Кусков и др. 2009: 485). Выяснилось, что атмосфера Титана, помимо азота и метана, содержит сложные органические соединения, образовавшиеся в результате фотолиза метана (Там же: 510). Понять генезис метана и других летучих в атмосфере этого спутника Сатурна представляется одной из важнейших задач современной космохимии, а изучение состава атмосферы и органических соединений чрезвычайно важно с точки зрения понимания физико-химических процессов, протекавших на ранней стадии эволюции Земли (Там же: 514).

Модель 3 мы рассматривали в (Гринин 2017). Согласно этой точке зрения, первичная атмосфера Земли была захвачена гравитационным полем нашей планеты непосредственно из протопланетного облака еще в процессе аккреции планет. Однако никаких геологических следов существования у Земли столь экзотической атмосферы не обнаружено, а они должны были сохраниться в ее летописи.

Другие версии. Есть и другие версии появления атмосфер и гидросфер. В частности, С. А. Язев (2018: 320) пишет: примерно 4,3 млрд л. н. на Землю выпадают массы, сравнимые с корой (по объему или массе); каменные метеориты, содержащие воду (1 % их массы), которые привнесли необходимую массу воды и летучих веществ, из них сформировались океан и новая атмосфера. Таким образом, согласно этой модели, на первых этапах процессы на Земле в основном определялись космическими факторами (но дифференциация была внутренним фактором), однако постепенно росло значение внутренних факторов.

Атмосферы Юпитера и Сатурна, других планет-гигантов образовались вместе с планетами. И существует мнение, что в дальнейшем они не изменялись. Однако, скорее всего, это не так. В частности, измерения показали, что на Юпитере содержание водяных паров не превышает 0,2 %, то есть не отличается от солнечной нормы, что создает полное впечатление чрезвычайно «сухой» атмосферы. В то же время было установлено, что содержание кислорода на Юпитере может в 5–10 раз превышать солнечную норму. Этот результат находился в полном согласии с другой гипотезой, предполагающей, что наблюдаемый в настоящее время на Юпитере уровень содержания кислорода, азота и углерода обусловлен многочисленными падениями комет, которые еще в ранний период существования Солнечной системы изменили первоначальный состав юпитерианской атмосферы (Шевченко 2014).

Об эволюции атмосферы Земли. Со времени первого полумиллиарда лет существования планеты в первозданном виде не сохранилось ни одного из летучих соединений. Почти весь азот и углерод, сера и вода претерпели бесчисленное количество изменений (Хейзен 2015). Можно предположить, что в первые десятки и сотни миллионов лет Земля теряла первичные атмосферы. Могли быть срывы атмосферы на ранней Земле при крупных столкновениях,

и тогда она формировалась заново. А влияние молодого Солнца могло способствовать и полному уходу возможной водородной оболочки (Язев 2018: 319–320), как это было на других планетах (см. *Главу 9*). Как мы видели выше, существуют разные взгляды на происхождение атмосферы Земли. Есть и такие исследователи, которые считают, что атмосфера образовалась спустя уже значительное время (полмиллиарда лет или даже более). Например, О. Г. Соколов и С. А. Ушаков (2002: 273–274) пишут, что хотя происхождение атмосферы они связывают с дегазацией земных недр, но, в отличие от наиболее популярных моделей, начало этого процесса они относят не к моменту формирования Земли – около 4,57 млрд л. н., а к началу ее тектонической активности – приблизительно 4 млрд л. н. Кроме того, по их модели, развитие этого процесса в начале геологической истории Земли было менее бурным, чем предполагалось ранее.

Обычно считается, что первичная атмосфера состояла из паров воды, углекислого газа и других газовых фракций (H_2S , CO , H_2 , N_2 , CH_4 , NH_3 , HF , HCl , Ar), то есть была восстановительной. Развитие атмосферы с освобождением газообразного кислорода происходило в основном благодаря фотохимическим реакциям в верхних слоях атмосферы и фотосинтезу появившихся еще в раннем докембрии сине-зеленых водорослей (Там же: 274). О появлении кислорода в атмосфере Земли см. далее.

Есть исследования, которые предполагают определенные фазы в развитии ранней атмосферы Земли. В частности, согласно одному из них (Кадик 2008), дегазация происходила в две стадии (первая стадия – 100 млн лет, вторая – 150–300 млн лет). И только на второй стадии увеличилось содержание воды и углекислого газа в атмосфере. Это происходило по причине того, что процессы фазовых превращений мантии привели к существенному повышению химического потенциала кислорода в теле планеты до тех значений O_2 , которые характерны для современной верхней мантии Земли и продуктов ее глобального плавления – базальтовых магм. Существенное изменение режима кислорода ранней мантии в процессе сегрегации металлической фазы и эволюции металлического ядра Земли позволяет предполагать изменение состава летучих соединений углерода и водорода, которые транспортировались магмами.

Но в целом – и в этом нет ничего удивительного – состав ранней атмосферы Земли до сих пор малоизвестен. Он зависел от таких факторов, как обилие металлического железа в период дегазации недр Земли, которое, в свою очередь, зависело в значительной степени от скорости дегазации. Предполагается, что ранняя атмосфера была весьма нейтральной, так как в этом случае создаются благоприятные условия для синтеза органических соединений, но разброс возможных составов первичной атмосферы очень велик. Конечно, вода и водород были важными компонентами атмосферы в составе некоторых соединений наряду с углеродом (CO_2 , CO или CH_4) и азотом (в виде N_2 или NH_3); ясно также, что свободного кислорода было чрезвычайно мало или даже не было вовсе (Фишер 1990: 232).

Мы мало знаем о прошлом земной атмосферы не только в первые сотни миллионов, но и в последующие миллиарды лет. Так, новейшие исследования американских ученых из Вашингтонского университета, которые анализировали пузырьки воздуха, сохранившиеся в породах древностью 2,7 млрд лет, показали, что тогдашняя земная атмосфера по плотности вдвое уступала современной. Открытие довольно трудно совместить с имеющимися представлениями о молодой Земле. Ранее считалось, что ее атмосфера была, напротив, значительно плотнее нынешней. Это ставит много вопросов о происхождении и эволюции жизни на Земле, а также о том, что в земной атмосфере должно было быть во много раз больше метана и углекислого газа. К тому же неясно, откуда могли взяться «лишние» газы, присутствующие в атмосфере теперь и отсутствовавшие тогда. Также выяснилось, что уровень азота в земной истории менялся так, как этого никто даже представить себе не мог (Ортега 2019). Впрочем, относительно азота и ранее высказывались различные версии, прежде всего потому, что только с появлением жизни на Земле увеличилось значение азотного цикла в формировании верхних слоев планеты. Углерод и сера также выдвинулись на заметные роли примерно 1–2 млрд л. н., когда жизнь и насыщенная кислородом атмосфера преобразовали земные реалии (Хейзен 2015). Поэтому, вероятно, Р. Хейзен (Там же) прав, утверждая, что ключ к пониманию превращения Земли из враждебной негостеприимной черной планеты в прохладный, обитае-

мый голубой мир следует искать в истории ее непоседливых летучих соединений. Правда, он вполне резонно добавляет, что четвертый компонент, вода, с самого начала стал определяющим для истории Земли.

Достаточно общепринято мнение, что на рубеже архея и протерозоя (то есть около 2,5 млрд л. н.), произошел крупнейший переворот в земной атмосфере, который Генрих Холланд назвал «Великим кислородным событием»⁷⁵ (появление примерно 0,1 % кислорода в атмосфере и последующее его накопление). Имеющиеся данные позволяли представить этот рубеж таким образом: начало деятельности фотосинтетических организмов, накопление кислорода в связи с ней и постепенное превращение планеты из восстановительной в окислительную (Наймарк 2014). Однако в последние 10–15 лет появился целый ряд данных, согласно которым изменение атмосферы на кислородную было связано не только с цианобактериями, но и с изменением вулканизма; имеются сведения, переносящие это событие на 800 млн лет назад (примерно 3,23 млрд л. н.); также высказываются предположения, что сначала жизнь изменила круговорот азота, что могло быть переходным этапом к кислородной атмосфере.

Работа, опубликованная в журнале *Nature* (Lyons *et al.* 2014), представляет гипотезу о том, что хотя фотосинтетические организмы, выделяющие кислород, зародились еще на заре архейской жизни (то есть примерно в четвертом миллиарде л. н.), свободный кислород на рубеже архея и протерозоя накопился благодаря не деятельности цианобактерий, а изменениям характера земного вулканизма. Другими словами, цианобактерии вырабатывали кислород, но никакого мощного ускорения метаболизма не было, а дело заключалось в том, что ранее выработанный ими кислород быстро расходовался на окисление каких-то продуктов. В архее, как указывают авторы статьи, этими продуктами были, вероятно, вулканические газы: сероводород, сернистый газ, метан и водород. Изменения в характере вулканизма уменьшили поступление этих газов, кислород в итоге стал накапливаться. Все вместе это свидетельствует о том, что «Великое кис-

⁷⁵ Также известного как кислородная катастрофа, или кислородная революция.

лородное событие» следует рассматривать как результат изменений вулканических процессов и геохимических соотношений, а не сдвигов биологической активности и метаболизма. Как это ни удивительно, но вслед за «Великим кислородным событием» на рубеже архея и протерозоя (хотя авторы, по сути, ставят под сомнение не только то, что это событие было великим, но и то, что оно вообще было) не последовало постепенного нарастания кислорода, как можно было бы ожидать при наступлении эры фотосинтетиков. Количество кислорода то снижалось, то вновь увеличивалось, планетные оледенения то наступали, то заканчивались... Так, около 2,08–2,06 млрд л. н. количество кислорода резко снизилось. Причины этих скачков пока неизвестны. Остается загадкой второй кислородный скачок, который произошел в конце протерозоя (приблизительно 550 млн л. н.). С ним связывается появление многоклеточной жизни (Наймарк 2014).

Геохимики из Висконсинского университета в Мэдисоне обнаружили свидетельства наличия кислорода в эпоху архея – 3,23 млрд л. н. – задолго до «Великого кислородного события», начало которого датируется ранним протерозоем (2,5 млрд л. н.). По их мнению, единственным источником такого количества кислорода могла быть только жизнедеятельность цианобактерий. Если это предположение верно, то способность к фотосинтезу возникла у бактерий на 600 млн лет раньше, чем считалось до сих пор (Кузнецов 2015).

Немецкие ученые обнаружили у бактерий неизвестный ранее вариант бескислородного фотосинтеза, при котором в качестве побочного продукта выделяются нитраты. Согласно выдвинутой ранее гипотезе, такой тип энергетического метаболизма мог быть переходным этапом на пути к становлению кислородного фотосинтеза. Открытие дополняет имеющиеся представления о круговороте азота в природе.

Это открытие интересно еще и тем, что оно расширяет наши представления об участии микробов в круговороте азота. До сих пор не были известны фотосинтезирующие организмы, способные окислять соединения азота в отсутствие кислорода. Теперь эту возможность придется учитывать и при реконструкции ранних (бескислородных) этапов эволюции биосферы (Марков 2006).

Таким образом, история с появлением кислорода в земной атмосфере существенно усложняется и уточняется. Так или иначе, но все же все считается, что кислород появился в результате жизнедеятельности цианобактерий. Однако существуют интересные факты относительно Марса. На основе последних данных, собранных марсоходом «Spirit» в кратере Гусев в южном полушарии Марса, можно предположить, что атмосфера и недра Марса содержали в древности значительную долю кислорода (Пугачева, Шевченко 2015). Как же там образовывался кислород в отсутствие жизни?

8.3. Изменение скорости вращения планет и спутников и приливная эволюция

Вращение вокруг своей оси планет и спутников в настоящее время очень разнообразно по длительности и – в исключительных случаях – имеет разные векторы. Есть довольно обоснованное мнение, что первоначально планеты вращались вокруг своей оси примерно одинаковое время (если исходить из принципа изохронизма). При таком допущении начальные периоды вращения всех планет могли составлять 5–8 часов (Ксанфомалити 2012a: 129–130). В этом случае различия в скорости вращения вокруг своей оси есть результат особенностей исторического развития. Особенно загадочным является очень медленное вращение Венеры. Неясно, что стало причиной потери вращательного момента планеты: катастрофические события в ее прошлом или длительное воздействие слабых возмущений (Там же: 131). Есть разные точки зрения, в том числе гипотеза, о которой мы уже упоминали: Меркурий когда-то был спутником Венеры, а потом оторвался от ее притяжения. Эта гипотеза объясняет обе странности Венеры – очень медленное вращение и движение в обратную сторону (он и замедлил вращение Венеры, и «раскрутил» ее в обратную сторону). Еще один из фактов, который позволяет предположить, что Меркурий в прошлом был спутником Венеры и в этой системе из двух довольно массивных тел действовали мощнейшие приливные силы, – резонанс Меркурия и Венеры: солнечные сутки Венеры равны удвоенным звездным суткам Меркурия. Но возможно, что это солнечный прилив замедлил вращение внутренних планет (Меркурия и Венеры).

Таким образом, на вопрос, почему Меркурий, Венера, Солнце вращаются вокруг своих осей так медленно, пока однозначно отве-

тить нельзя. Несколько проще сказать, почему медленно вращаются спутники. Дело в том, что многие из них находятся сравнительно близко от планет: до Ио от Юпитера всего три радиуса последнего, до Фобоса – 6 радиусов Марса; от Земли до Луны – 69 земных радиусов. Соответственно, на вращение влияют приливы. На некоторых спутниках они гигантские (Холщевников 2012a: 62, 64). И на Земле в первых фазах приливы были заметно сильнее, ведь тогда Луна была намного ближе к ней. Например, 4 млрд л. н. она находилась на расстоянии всего 20 радиусов (Жарков 2013: 354). Приливные явления играют важную роль в жизни Земли (и тем более Луны), спутников планет-гигантов. Они являются также и источником энергии для ряда процессов, например, разогревают недра спутников и создают там мощную вулканическую активность (как на Ио). Одновременно они приводят планеты и спутники в синхронный режим вращения. Режим вращения системы «планета – спутник», называемый *синхронным*, является самым выгодным с точки зрения расходования механической энергии, поскольку минимизирует приливные процессы. Поэтому в Солнечной системе есть целый ряд примеров синхронных режимов вращения. Они сформировались за миллиарды лет существования Солнечной системы в тех случаях, когда приливные эффекты были особенно сильны. Один из ярких примеров синхронного вращения – движение Луны вокруг Земли (Язев 2011: 41). Таким образом шла «притирка» между планетами и спутниками, то есть выход на наиболее экономичный энергетический режим. Эта «притирка» начиналась, возможно, еще в процессе формирования планет и спутников. Так, асимметрия коры указывает на то, что уже на завершающей стадии роста Луна находилась в состоянии синхронного вращения, то есть была повернута к Земле полушарием с тонкой корой (Жарков 2013: 353). В итоге многие спутники вращаются вокруг своей оси с такой скоростью, что оказываются всегда повернуты к своей планете одной стороной. Луна существенно замедлила свое вращение и пришла в устойчивое состояние, Земля тоже стала вращаться медленнее, но более серьезное замедление ей еще предстоит в далеком будущем. Тем не менее долгие миллиарды лет происходило постепенное, но неизменное замедление вращения Земли вокруг своей оси (с примерно 6–8 часов до современных 24). Оно было связано со взаимным гравитационным влиянием Земли и Луны и отдалени-

ем их друг от друга. Этот процесс продолжается сегодня и будет идти еще много миллионов лет. Замедляется, хотя и очень постепенно, вращение даже гиганта Юпитера, а его спутники удаляются от планеты (Язев 2011: 219). На настоящий момент в Солнечной системе имеется всего одна пара, Плутон – Харон, которая пришла в конечное «вальсирующее» состояние. Эта пара закончила свою **приливную** эволюцию и достигла стационарного состояния, вращаясь синхронно (Холщевников 2012a: 63).

Но есть спутники, которые за счет приливной энергии не удаляются, а приближаются к своим планетам. Это происходит потому, что они имеют обратное своим планетам вращение (например, Тритон у Нептуна, Феба у Сатурна и некоторые другие), либо это спутники, вращение которых опережает вращение планет. Таких довольно много, в том числе 10 внутренних спутников Урана и 5 внутренних спутников Нептуна (Там же: 63–64). В конце концов они могут упасть на планеты. Причем некоторые спутники предположительно могут окончить свое существование в относительно короткое по меркам существования Солнечной системы время. Так, анализ параметров орбиты Фобоса (одного из двух спутников Марса) привел исследователей к выводу, что высота спутника медленно уменьшается (на 9 м за 100 лет). Ориентировочно через 30–40 млн лет Фобос должен разрушиться, и его фрагменты упадут на Марс (Язев 2011: 153; Холщевников 2012a: 64). Можно предположить, что такие спутники могли существовать и ранее, а затем окончить свое существование, упав на планету, хотя вряд ли мы когда-либо об этом узнаем.

Взаимоотношения со спутниками увеличивают возможности для индивидуализации. А индивидуальность – способ увеличить эволюционное разнообразие.

Например, двойные системы звезд резко повышают вариативность индивидуальных судеб звезд, здесь, по выражению В. М. Липунова (2008: 252), получается «эволюция в квадрате». В этих системах на поздних этапах жизни звезд появляются совершенно новые, экзотические объекты, о существовании которых ученые раньше и не подозревали (Липунов 2008). Мало того, фактически можно вести речь о различиях в «поведении» звезд при индивидуальной жизни

и в «коллективе», поскольку взаимодействие двух, трех и более звезд в тесной системе ведет к очень существенным отличиям и невероятным результатам, которые не могут возникнуть в одиночной жизни. Собственно, так же происходит и на других уровнях эволюции, когда деятельность пары и коллектива особей дают принципиально иной результат, чем при изолированной индивидуальной жизни (Гринин 2013: 133, 144).

Таким образом, можно говорить о разных **видах индивидуальной эволюции небесных тел, в том числе и о приливной**. А также о том, что во взаимоотношениях планет и спутников очень наглядно отображено: космическая эволюция продолжается в течение миллиардов лет, спутники появляются, в том числе путем захватов, и исчезают, падая на планеты, или другим катастрофическим образом.

Вполне вероятно, что и так называемые резонансы между планетами (то есть определенные и четкие пропорции между длительностью вращения планет) связаны с такой «притиркой». Если это так, то перед нами пример классической эволюции, когда незначительные влияния в течение очень длительного времени приводят к крупным изменениям, и количество переходит в качество⁷⁶. Также налицо системное влияние, поскольку речь идет о *коллективном (резонансном) режиме колебаний*.

Приливные эффекты, судя по всему, являются основным механизмом, приводящим к возникновению так называемых резонансных соотношений между периодами вращения и движения разных тел Солнечной системы. Крайний случай резонанса – соотношение периодов 1:1 (синхронное вращение), общий случай – соотношение в виде небольших целых чисел. Так, резонанс Меркурия и Венеры 2:1, то есть солнечные сутки Венеры равны удвоенным звездным суткам Меркурия. Известны и резонансы орбитального движения: например, они присутствуют в периодах обращения вокруг Солнца у Юпитера и Сатурна (5:2), Сатурна и Урана (3:1), Нептуна и Урана (2:1), и это не полный список.

⁷⁶ Небезынтересно, что резонансное движение планет присуще многим экзопланетным системам (Емельяненко 2012: 349).

Резонансы в движениях соседних планет крайне сложно объяснить приливами, поскольку расстояния между ними огромны, и величина приливных воздействий оказывается исчезающе малой. Для примера можно привести величину амплитуды суммарного приливного эффекта, который все планеты Солнечной системы, выстроившись с одной стороны от Солнца, могли бы вызвать в его теле. Этот эффект не превышает 2 мм! Тем не менее версия, что состоящая из многих элементов Солнечная система за 4,6 млрд лет своего существования могла войти в *коллективный (резонансный) режим колебаний* благодаря слабым, но систематическим и действующим очень длительное время приливному эффектам, *не имеет на сегодня обоснованных альтернатив* (Язев 2018: 39–40).

Все это очень интересные явления (как резонансы, так и синхронное движение спутников вокруг своей планеты), в некотором роде «притирка» элементов системы для минимизации потерь энергии, в результате чего система саморегулируется путем корректировки скорости движения, вращения, расстояния и т. п.