

Глава 3. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЗЕМЛИ И ЕЕ ДОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ

3.1. Происхождение Солнечной системы

Важным вопросом происхождения звезд и окружающих их планетных систем является источник вещества, из которого эти системы формировались. В настоящее время эта проблема рассмотрена обстоятельно и подробно в специальных работах и обзорных монографиях по астрофизике и космохимии (Зельдович, Новиков, 1971, 1975; Шкловский, 1975, 1976; и др.). Общедоступное изложение этих интересных, но очень сложных проблем приведено, например, в монографиях А. Аллера (1976), Х. Альвена, Г. Аррениуса (1979), Р.Дж. Тейлера (1975, 1981), У. Кауфмана (1982) и др. Здесь же напомним лишь основные положения идеи, лежащей в основе гипотезы происхождения Солнца и планет Солнечной системы.

Согласно современным космогоническим представлениям, исходное газопылевое протосолнечно-протопланетное облако образовалось из межзвездного газа и скопления пыли, характерных для нашей и других галактик. Происхождение же вещества этих скоплений связано со взрывами крупных звезд (по массе превышающих в несколько раз массу Солнца), полностью прошедших свой эволюционный путь. Обычно финальные взрывы таких крупных звезд называют вспышками “сверхновых” звезд, поскольку на короткое время их светимость возрастает в миллиарды раз, они становятся наиболее яркими объектами в своих галактиках и воспринимаются нами как вспышки новых звезд на привычном фоне “старого” небосвода.

Напомним, что первоначально, в момент образования нашей Вселенной во время “Большого взрыва” около 20 млрд лет назад, пространство заполнялось только излучением и стремительно расширяющимся веществом – протонами, электронами, ядрами гелия (до 25%), нейтрино и некоторыми другими элементарными частицами. Все более тяжелые элементы в то время еще не успели образоваться (тогда их просто не существовало).

После возникновения на флуктуационных сгустках вещества первых протогалактик в них тогда же возникли и первые массивные, но примитивные водородно-гелиевые протозвезды. Под влиянием гравитационного сжатия этих протозвезд в их недрах поднялись температура и давление, что, в свою очередь, привело к возникновению ядерных реакций синтеза (ядерного “горения”). В результате в центральных областях таких звезд постепенно и последовательно стали образовываться все более тяжелые элементы вплоть до железа.

Как показывает теория, крупные звезды (превышающие массу Солнца в несколько раз) неустойчивы и заканчивают свою эволюцию гигантскими взрывами. Причем такая фатальная эволюция массивных звезд происходит тем быстрее, чем бóльшей была их исходная масса. Сами же взрывы “сверхновых” звезд возникают тогда, когда в их недрах полностью исчерпывается основной запас легких элементов и формируется ядро, состоящее только из железа и никеля, т.е. из элементов с наименьшей внутренней энергией ядерных связей протонов и нейтронов в атомных ядрах. Напомним, что потенциальная энергия связи ядерных частиц в атомных ядрах отрицательная, поэтому элементы с наименьшей внутренней ядерной энергией оказываются наиболее устойчивыми и стабильными. В результате в ядрах таких массивных звезд, прошедших свой эволюционный путь, полностью прекращаются все ядерные реакции, перестает генерироваться тепловая энергия, препятствующая их сжатию, и они под влиянием уже ничем не сдерживаемых сил тяготения начинают стремительно сжиматься (коллапсировать). Под влиянием гигантских давлений, возникающих в недрах массивных звезд во время их коллапса, электроны как бы “вжимаются” в ядра железа, превращая

протоны в нейтроны, а само ядро звезды – в сплошной “сгусток” нейтронов или даже в “черную дыру”.

Процесс гравитационного коллапса вещества звездного ядра должен сопровождаться столь же стремительным “обрушением” газовой оболочки звезды и как следствие этого возникновением в ней ударных волн с катастрофически резким возрастанием температуры и давления газа в оболочке. Но в противоположность железному ядру коллапсирующей звезды в ее оболочке еще сохраняется много водорода, гелия и других легких элементов (C, O, Mg, Si и др.), способных участвовать в реакциях ядерного синтеза. К тому же вещество звездной оболочки в это время должно интенсивно облучаться нейтронными потоками, излучаемыми коллапсирующим ядром звезды. Поэтому резкое повышение давления, температуры и нейтронных потоков в оболочке такой звезды приводит к столь же стремительному и лавинообразному ускорению протекания всех ядерных реакций синтеза с выделением за короткое время гигантской энергии. В результате за считанные минуты, а то и секунды в оболочке коллапсирующей звезды выделяется столько же энергии, сколько ее могло бы выделиться за многие миллионы лет эволюционного (спокойного) развития такой звезды. Это вызывает ускоренное протекание всевозможных реакций ядерного синтеза стабильных и радиоактивных элементов с образованием всей гаммы их изотопов, в том числе и более тяжелых элементов, чем железо. Выделение колоссальной энергии в нижних частях звездной оболочки приводит к ядерному взрыву звезды и к сбрасыванию ее оболочки в межзвездное пространство. Преобразованное вещество оболочки стремительно разлетается в стороны, а на месте бывшей “нормальной” звезды остается маленькая, но очень плотная ($\rho \geq 10^{14}$ г/см³) нейтронная звезда (пульсар) или даже “черная дыра”.

Рассеянное вещество от многих взорвавшихся звезд постепенно формирует в галактиках межзвездные газопылевые облака. Когда масса такого облака (в его сгустках) достигает некоторой критической величины, начинается процесс самогравитации облака, его уплотнения, разогрева и конденсации в новую звезду. За время существования Вселенной уже сменилось несколько поколений звезд, рассеявших свое вещество по межзвездному пространству. При этом исходным материалом для формирования каждой новой генерации звезд служило вещество, сброшенное предыдущим поколением сверхновых звезд.

Наша Солнечная система по сравнению с возрастом Вселенной (около 20 млрд лет) возникла сравнительно недавно – 4,7 млрд лет назад. Поэтому и суммарный состав вещества, послуживший основой для формирования нашей Солнечной системы, должен нести следы длительной истории развития Вселенной. Однако нахождение в метеоритах следов распада некоторых из короткоживущих изотопов элементов, например ²⁴⁴Pu, ¹²⁹I и ²⁶Al, говорит о том, что незадолго перед образованием Солнечной системы произошли взрывы, по крайней мере, двух сверхновых звезд, причем последний из этих взрывов, обогативший протопланетное вещество изотопами ²⁶Al и ¹²⁹I, скорее всего послужил толчком к началу формирования нашего Солнца и его планетной системы.

Происхождение планет Солнечной системы, включая Землю, неоднократно излагалось во многих статьях и монографиях (Сафронов, 1969; Рускол, 1975; Витязев и др., 1990), а также в популярных книгах (Шмидт, 1948; Кауфман, 1982; Фишер, 1990; и др.). Поэтому здесь на этом вопросе подробно останавливаться не будем, а дадим лишь общее описание процесса. Возникновение же и эволюцию системы Земля–Луна мы рассмотрим отдельно и более подробно.

Согласно современным космогоническим представлениям, заложенным О.Ю. Шмидтом еще в начале 40-х годов, планеты Солнечной системы, в том числе Земля и Луна, образовались за счет аккреции (слипания и дальнейшего роста) твердых частиц газопылевого протопланетного облака. Обычно исходная плотность межзвездных облаков бывает недостаточной для гравитационного сжатия и развития в них самопроизвольных

процессов звездо- и планетообразования. Однако взрывы сверхновых сопровождаются возникновением в межзвездной среде ударных волн. Если такие волны пересекают газопылевое облако, то на их фронте резко повышаются давление и плотность вещества, в результате чего могут возникнуть сгущения, способные в дальнейшем к сжатию уже за счет самогравитации. Поэтому взрывы сверхновых звезд не только поставляют новое вещество в космическое пространство, но и служат тем механизмом, который в конце концов приводит к формированию новых поколений звезд и окружающих их планетных систем.

По-видимому, именно такая ситуация возникла около 4,7 млрд лет назад в окрестностях протосолнечного газопылевого облака. Получив импульс начального сжатия и вращения, а также пополнившись новым веществом, это облако в дальнейшем начало необратимо сжиматься уже под действием собственного гравитационного поля. По мере сжатия давление и температура в центральной части облака стали быстро повышаться, и постепенно в этой зоне сформировался гигантский газовый сгусток – Протосолнце. Однако вначале, до “зажигания” ядерных реакций и выхода Протосолнца на главную последовательность развития звезд, его температура была сравнительно невысокой (не более 900–1000 °С), а излучение происходило главным образом в инфракрасном и красном диапазонах спектра.

Одновременно со сжатием протосолнечного облака под влиянием центробежных и гравитационных сил его периферийные участки постепенно стягивались к экваториальной плоскости вращения, превращаясь в плоский чечевицеобразный диск – протопланетное облако. Плотность вещества в протопланетном облаке быстро возрастала, особенно в экваториальной плоскости вращения, а траектории движения частиц в нем под влиянием все более частых соударений и турбулентного торможения постепенно приближались к круговым кеплеровским орбитам.

Межзвездные облака, как правило, состоят из смеси газов и пылевых частиц микронного размера. Среди газов преобладают водород и гелий, но заметную роль играют и такие летучие соединения, как H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , NH_3 , N_2 и некоторые другие газы. Состав пылевых частиц скорее всего соответствует смеси сравнительно тугоплавких окислов металлов и силикатов с самими металлами, их сульфидами и в меньшей степени с гидросиликатами и карбонатами. В космическом пространстве такие пылевые частицы могут расти только путем сорбции из газовой фазы атомов металлов и молекул их окислов или сульфидов на поверхности самих частиц. Но в связи с исключительно большой разреженностью межзвездного вещества процесс этот развивался крайне медленно.

Иная ситуация складывалась в начавшем сжиматься протопланетном облаке. С повышением в нем плотности вещества резко возрастала вероятность столкновения частиц и их слипания, в результате чего тогда появились первые, правда, еще очень рыхлые и мелкие (порядка сантиметров, а потом и метров) комки вещества, напоминавшие собой грязный снег. Дальнейшее уплотнение роя этих первичных комков способствовало их ускоренному росту с постепенным превращением в более крупные тела – зародыши будущих планет – планетезимали, поперечные размеры которых уже могли достигать многих километров. При этом у наиболее крупных планетезималей (первичных протопланетных тел), размерами до нескольких сотен километров, уже стали проявляться собственные заметные гравитационные поля, что еще более увеличивало их эффективные поперечные сечения захвата мелких тел. Поэтому мелкие тела выпадали на более крупные, увеличивая их еще больше, в результате чего крупные планетезимали росли быстрее мелких. Одно из таких наиболее крупных планетезимальных тел, расположенных во внутреннем поясе протопланетного облачного диска, в конце концов превратилось в зародыш нашей планеты.

Формирование Солнца как нормальной желтой звезды не очень больших размеров из сжимающегося первичного сгустка газов и пыли происходило значительно быстрее,

чем формирование планет, – всего за несколько миллионов или за первые десятки миллионов лет. При этом в самом начале “зажигания” в недрах молодого Солнца ядерных реакций синтеза гелия и перед выходом его на режим главной последовательности развития звезд наше Солнце должно было пройти через короткую стадию существования звезд типа Т-Тельца, характеризующихся быстрым вращением, сильными магнитными полями и очень высокой интенсивностью излучения звездного ветра.

Эти особенности эволюции молодого Солнца неизбежно должны были влиять на условия аккреции вещества в окружавшем его протопланетном облаке – диске. Во-первых, за счет исключительно сильного солнечного ветра (высокоэнергетического потока заряженных частиц), характерного для звезд, находящихся на стадии Т-Тельца, из околосолнечного пространства на далекую периферию Солнечной системы должны были выметаться все газовые и летучие компоненты исходного протопланетного облака.

Во-вторых, ионизирующее влияние солнечного ветра на окружающее вещество должно было привести к сильному взаимодействию магнитного поля Солнца с веществом протопланетного диска. По-видимому, именно в результате такого эффективного “зацепления” быстро вращавшегося молодого Солнца с окружающим его веществом, а также благодаря приливным взаимодействиям Солнца с молодыми планетами и произошло перераспределение момента количества движения от центрального светила к периферии протопланетного диска. После этого скорость осевого вращения Солнца уменьшилась, тогда как орбитальные скорости вращения планет вокруг него, наоборот, увеличились. Этот же механизм, вероятно, приводил и к заметной сепарации вещества в протопланетном облаке, поскольку все легкоионизирующиеся элементы под влиянием давления силовых линий магнитного поля как бы выметались из околосолнечного пространства на периферию протопланетного диска.

В-третьих, существенное влияние на химическую дифференциацию вещества в протопланетном облаке должен был оказывать и бóльший прогрев Солнцем центральных областей диска еще на стадии его сжатия и особенно после “зажигания” в Солнце ядерных реакций. По этой причине многие из легкоиспаряющихся элементов и соединений (например, сера и ее летучие соединения, вода, углекислый газ и др.) переходили в газообразное состояние, после чего давлением солнечного излучения они удалялись из этих областей на далекую периферию Солнечной системы.

В результате действия этих механизмов в центральных областях протопланетного диска преимущественно конденсировались тугоплавкие элементы и соединения с высокими потенциалами ионизации (тугоплавкие металлы, в том числе Fe и Ni, и окислы Al_2O_3 , CaO, MgO, Ti_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3 , FeO и др.), тогда, как средние концентрации легкоплавких и легкоионизирующихся элементов (Li, Na, K, Rb, Cs, In, Ba, элементов редкоземельной группы, Hg, Pb, Rn и др.) в этой части протопланетного облака оказались существенно заниженными. В несколько меньшей мере вещество планет земной группы оказалось обедненным серой, цинком, оловом и некоторыми другими элементами. Газообразные же компоненты H_2 , He и другие благородные газы, H_2O , CO, CO_2 , CH_4 , NH_3 , H_2S , SO_2 и SO_3 , HCl, HF были выметены из внутренних областей протопланетного облака практически полностью и сконцентрировались только на его периферии, где впоследствии сформировались планеты-гиганты с массивными и плотными газовыми оболочками. По-видимому, внутренние области этого облака также были обеднены гидросиликатами и карбонатами, диссоциировавшими под влиянием солнечного излучения с последующей потерей летучих.

Поэтому еще до начала процесса формирования планет исходное протопланетное газопылевое облако оказалось существенно дифференцированным. Этим явлением, вероятно, следует объяснять и явную зависимость плотности планет от их расстояния до Солнца (Меркурий – $5,54 \text{ г/см}^3$, Венера – $5,24$; Земля вместе с Луной – $5,49$; Марс – $3,94$; Юпитер – $1,33$; Сатурн – $0,67$; Уран – $1,3$; Нептун – $1,67 \text{ г/см}^3$). Об этом же

свидетельствует и тот факт, что только внешние планеты обладают массивными газовыми оболочками, а их спутники покрыты мощными панцирями водяного льда, серы и другими отвердевшими или сжиженными газами (CO_2 , CH_4 , NH_3 и др.).

Судя по составу и сравнительно небольшой массе атмосферы и гидросферы Земли, в сумме не превышающих $2,4 \cdot 10^{-4}$ массы планеты, Земля, как и другие планеты земной группы, формировались из вещества, почти полностью потерявшего все газовые составляющие. В земной атмосфере исключительно мало даже тяжелых первичных благородных газов. Кроме того, земное вещество резко обеднено гидросиликатами, карбонатами, серой и ее соединениями, а также заметно обеднено щелочными и другими легкоплавкими металлами.

Расчеты В.С. Сафронова (1969), одного из создателей современной теории планетообразования, показывают, что рост Земли продолжался около 100 млн лет и вначале происходил во все ускоряющемся режиме аккреции, но затем в связи с исчерпанием запасов твердого вещества в околоземном рое планетезималей вновь замедлился. Всего при аккреции Земли выделилось гигантское количество гравитационной энергии – около $23,2 \cdot 10^{38}$ эрг. Этой энергии более чем достаточно не только для расплавления всего земного вещества, но и для его полного испарения при температуре выше 30 000 °С. Однако бóльшая часть этой энергии аккреции выделялась в самых приповерхностных частях растущей Протоземли и вновь терялась с ее тепловым излучением. При этом, естественно, потери тепла оказывались тем большими, чем медленнее происходил рост самой Земли.

Этот важный для нас результат показывает, что Земля в процессе роста не только разогревалась от ударов падавших на нее планетезималей, но и успевала также остывать, излучая через поверхность бóльшую часть тепловой энергии аккреции. В результате за время роста Земли (около 100 млн лет) температура в недрах растущей Земли повсеместно оставалась ниже температуры плавления первичного, недифференцированного земного вещества, а следовательно, и сама Земля в то время оставалась еще однородной по составу планетой, лишенной ядра и земной коры.

Важно подчеркнуть, что описанная выше дифференциация первичного вещества в протопланетном облаке происходила достаточно быстро – всего за несколько миллионов или десятков миллионов лет (в основном еще при сжатии протопланетного газопылевого диска и во время прохождения молодым Солнцем стадии звезды Т-Тельца). Аккреция планет происходила после этого, когда планетезимали диска уже приобрели круговые орбиты, и продолжалась сравнительно долго – порядка 100 млн лет. Отсюда следует очень важный вывод, что аккреция планет в кольцевых зонах их питания (обладавших к тому же конечной шириной) в основном была гомогенной (однородной). Это значит, что средний химический состав растущих планет (при отсутствии в них процессов дифференциации) оставался примерно постоянным вдоль всего радиуса таких планет.

3.2. Образование двойной планеты Земля–Луна

Земля и Луна фактически представляют собой систему двойной планеты. Их влияние друг на друга сейчас невелико, хотя и вполне заметно, но на ранних этапах развития этой системы оно было исключительно сильным, приводило к катастрофическим последствиям и радикальным изменениям хода эволюции обеих планет. Поэтому рассмотрим происхождение Земли и Луны совместно. При этом, оправдывая повышенное внимание к Луне в данной работе, посвященной эволюции Земли и ее геодинамике, заранее отметим, что именно Луна как спутник нашей планеты послужила тем спусковым механизмом, который запустил и существенно активизировал тектоническое развитие молодой Земли в самом начале архея. Кроме того, Луна “раскрутила” нашу планету, определила своей орбитой захвата наклон оси ее вращения, а с этим явлением, как известно, связаны и вся климатическая зональность Земли, и происхождение ее

магнитного поля. Более того, сейчас определенно можно утверждать, что именно Луна, ускорив эволюционное развитие Земли, косвенно способствовала появлению на ее поверхности высокоорганизованной жизни, а следовательно, и нас с вами. Но все это чисто земные проблемы, разобраться с которыми, однако, без разработки адекватной теории развития двойной планеты Земля–Луна просто невозможно.

В отличие от предыдущего раздела здесь мы опишем не традиционные точки зрения на формирование системы Земля–Луна, а новую модель образования Луны за счет приливного разрушения на пределе Роша более массивной планеты – Протолуны. Эта модель, судя по всему, лучше других объясняет практически всю совокупность современных знаний о составе, строении и истории развития естественного спутника нашей планеты, а также объясняет происхождение осевого вращения Земли и реально существующего распределения моментов количества движения между Землей и Луной.

Одной из главных трудностей, встающих на пути построения адекватной теории образования Луны, по нашему мнению, является объяснение ее резкого обеднения железом, сидерофильными и халькофильными элементами. Действительно, судя по средней плотности Луны ($\rho_L = 3,34 \text{ г/см}^3$), она содержит лишь около 5% железоникелевой фазы (Рингвуд, 1982), или с учетом средней концентрации FeO в ее мантии – только около 13–14% тяжелой фракции. Это намного меньше, чем среднее содержание соединений железа в недифференцированном веществе углистых хондритов (28,6%) и тем более в земном веществе – около 37%. Кроме того, судя по изотопным отношениям свинца, Луна почти полностью потеряла весь первичный свинец, а входящий сейчас в ее породы свинец практически полностью радиогенного происхождения (т.е. образовался за счет радиоактивного распада урана и тория).

Учитывая эти различия, предлагались гипотезы образования Луны в других областях Солнечной системы, обедненных соединениями железа, с последующим ее захватом гравитационным полем Земли (Alfven, 1954, 1963; Urey, 1962). Все гипотезы этой группы страдают двумя недостатками. Во-первых, вероятность гравитационного захвата с далекой орбиты такого большого космического тела, как Луна, исчезающе мала и практически равна нулю. Во-вторых, совершенно непонятно, как в этом случае объяснить столь резкий дефицит железа в лунном веществе, если его содержание в наиболее примитивных углистых хондритах приблизительно в два раза выше. Кроме того, углистые хондриты обогащены летучими и легкоподвижными элементами, а Луна ими резко обеднена.

Сложность объяснения захвата Землей крупного спутника из далекой области Солнечной системы привела к появлению другой группы гипотез, согласно которым Луна образовалась в области формирования самой Земли, составив вместе с ней систему двойной планеты. Наиболее разработанной из гипотез такого рода является гипотеза Е.Л. Рускол (1960–1975). Близка к ней модель А. Харриса и В. Каулы (1975) о совместной аккреции Земли и Луны, начавшейся, еще когда у Земли была только 0,1 ее современной массы, причем Луна формировалась по этим гипотезам на расстояниях около 10 земных радиусов в течение большей части времени ее роста. Однако и эта группа гипотез, постулирующая возникновение наших планет из единого резервуара протопланетного вещества, не смогла объяснить дефицит железа и сидерофильных элементов на Луне. Кроме того, эти модели исходили из предположения, что осевое вращение Земли существовало изначально, происходило в ту же сторону, что и обращение спутника, но по угловой скорости собственного вращения превосходило угловую скорость орбитального обращения спутника. Интересна гипотеза Г. Герстенкорна (1955, 1977) о захвате Луны и дальнейшей приливной эволюции ее орбиты, при которой Луна подходила близко к так называемому пределу Роша, т.е. к наименьшему расстоянию между спутником и центральной планетой, ближе которого массивный спутник начинает разрушаться гравитационным полем планеты. Однако и в этой модели Луна оставалась неизменной от

рождения и до наших дней, а поэтому тоже не объясняла существующего дефицита железа в лунном веществе.

Наряду с отмеченной аномалией содержания железа в Луне, составы ее базальтов удивительно напоминают составы примитивных базальтов срединно-океанических хребтов Земли. Кроме того, данные по изотопам кислорода также говорят в пользу родственного происхождения Земли и Луны и отличного от них происхождения углистых и обычных хондритовых метеоритов. На этом основании А. Рингвуд (1982) сумел убедительно показать геохимическую общность лунного вещества с веществом земной мантии. Однако из этого факта А. Рингвуд делает совершенно экзотический вывод, будто Земля вскоре после своего образования и выделения у нее плотного ядра очень быстро раскрутилась и за счет возникшей благодаря этому ротационной неустойчивости от ее мантии оторвался крупный кусок вещества, превратившийся затем в Луну. Идея эта не нова и около ста лет назад высказывалась Дж. Дарвином – талантливым геофизиком, сыном гениального Ч. Дарвина, но, к сожалению, с механической точки зрения она оказалась неверной.

Рассматривая происхождение Луны, необходимо учитывать крайнюю степень дифференцированности ее вещества, приведшую к отделению силикатов от железа и к их значительному обеднению сидерофильными элементами. Такая полная дифференциация вещества могла происходить лишь в теле достаточно крупной и обязательно расплавленной планеты. Это важный вывод, и не считаться с ним нельзя. Об образовании Луны из первоначально расплавленной планеты, в частности, говорит и состав ее мощной анортозитовой коры (состоящей в основном из кальциевого полевого шпата – анортита), масса которой могла выделиться только из полностью расплавленного вещества более крупного, чем Луна, космического тела. По данным определения возраста лунных анортозитов, процесс этот развивался около 4,6–4,4 млрд лет тому назад, т.е. в период, близкий по времени к моменту образования самой системы Земля–Луна. Следовательно, можно ожидать, что Луна прошла стадию полного планетарного плавления и дифференциации еще во время своего образования.

Второй весьма примечательный факт, который обязательно необходимо учитывать при разработке гипотезы образования Луны, состоит в том, что суммарный момент количества вращения системы Земля–Луна в точности отвечает ситуации, при которой обе планеты в свое время находились на расстоянии предела Роша и обладали синхронной угловой скоростью вращения. Такое совпадение не может быть случайным, наоборот, оно свидетельствует о том, что при образовании Луна действительно находилась на пределе Роша и могла подвергнуться разрушению.

Учитывая приведенные данные и соображения, представляется наиболее вероятным, что Луна является остатком некой более крупной планеты – Протолуны, захваченной растущей Землей с соседней ближайшей орбиты (или образовавшейся вблизи самой Земли из околоземного протопланетного роя планетезималей) и разрушенной гравитационным полем Земли на пределе Роша. В качественной форме близкие идеи о двухэтапном образовании Луны за счет приливного разрушения более крупной планеты и последующего захвата ее частей ранее высказывали Дж. Вуд и Х. Митлер (1974), а также Е. Эпик (1961). По аналогии с этими идеями в наших работах предлагается гипотеза, согласно которой Луна образовалась за счет сохранения от разрушения в полости Роша лишь внешнего приливного горба предварительно расплавленной и прошедшей полную дифференциацию планеты – Протолуны.

Приливное взаимодействие планет. Прежде чем рассматривать процесс образования Луны, напомним в общих чертах механизм приливного взаимодействия. Это интересное явление природы изучалось многими исследователями, начиная с И. Ньютона, впервые объяснившего, что приливы и отливы в океанах вызываются притяжениями водной оболочки Луной и Солнцем. Над решением этой проблемы работали Д. Бернулли

и Л. Эйлер, но наибольший вклад в изучение природы приливных взаимодействий Земли с Луной и Солнцем внес математик П. Лаплас, который еще в конце XVIII в. сформулировал современную постановку задачи о приливах, и геофизик Дж. Дарвин (1898), предложивший ряд подходов к практическому решению этой задачи. Уже в наше время эволюцию приливных взаимодействий в системе Земля–Луна рассматривали Г. Макдональд (1964), П. Голдрайх (1966) и Е.Л. Рускол (1975).

Приливное взаимодействие Земли с Луной из-за ее более близкого расположения к Земле приблизительно вдвое сильнее, чем с Солнцем. Для простоты рассмотрим влияние на Землю только одной Луны. При этом будем считать орбиту Луны круговой и расположенной в плоскости экватора Земли. Последнее условие сейчас не выполняется, поскольку плоскость земного экватора наклонена к эклиптике (т.е. к плоскости обращения Земли вокруг Солнца) под углом примерно 23° , а плоскость лунной орбиты с эклиптикой составляет угол около 5° . Но на ранних этапах развития системы Земля–Луна, когда планеты располагались теснее друг к другу, компланарность орбиты Луны с земным экватором была почти полной.

Благодаря взаимному гравитационному притяжению планет в их телах возникают приливные деформации – вздутия или горбы. При этом у каждой планеты возникает два горба: один обращен к возмущающей ее “соседке”, а второй располагается с противоположной стороны (см. рис. 3.1). Причем такие возмущения в теле Земли возникают не только в океанах и морях за счет их “вздутия” (благодаря перетеканию в их подлунные участки воды из соседних акваторий), но и в “твердой” Земле.

В связи с тем что угловая скорость вращения современной Земли, совершающей один оборот вокруг своей оси за 24 ч, существенно превышает орбитальную угловую скорость движения Луны, один оборот которой происходит за 27,32 сут. = 655,7 ч, приливные горбы как бы “бегут” по земной поверхности вместе с видимым движением Луны по небосводу. Но вещество Земли, как мы уже видели, не является идеально упругим телом и обладает свойствами вязкой жидкости. Это приводит к тому, что деформации в приливных горбах не успевают рассасываться после прохождения ими точек кульминации с Луной и увлекаются земным вращением вперед, заметно опережая (примерно на $2,16^\circ$) движение самой Луны. При этом земному наблюдателю, наоборот, кажется, что максимальные приливы Земли всегда запаздывают и наступают на ее поверхности несколько позже момента кульминации Луны (рис. 3.1).

Дополнительные притяжения избыточных масс приливных горбов оказывают влияние на движение самих планет. Так, притяжения обоих приливных вздутий Земли создают пару сил, действующих как на саму Землю, так и на Луну. Однако влияние ближнего, обращенного к Луне вздутия несколько сильнее, чем дальнего. Абсолютные значения сил приливного взаимодействия между Луной и Землей сейчас малы, но накапливаясь в течение длительного времени их воздействия, приводят к заметному торможению вращения Земли и, наоборот, к ускорению орбитального движения Луны и к ее удалению от Земли.

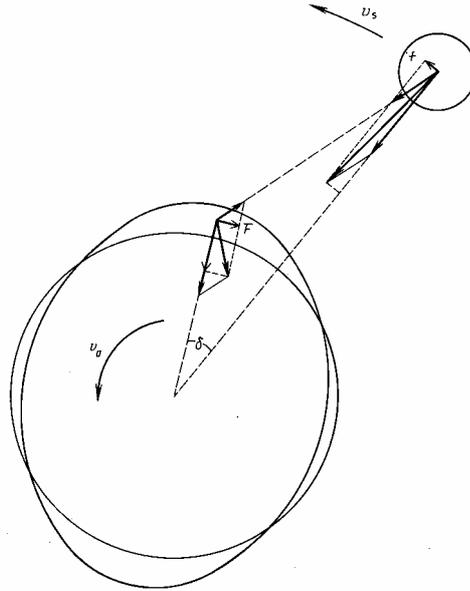


Рис. 3.1. Схема приливного взаимодействия Земли с Луной: F – приливная сила, тормозящая вращение Земли; f – приливная сила, ускоряющая орбитальное вращение Луны; δ – угол запаздывания приливов

Для определения эволюции взаимных расположений Луны и Земли необходимо использовать законы небесной механики (третий закон Кеплера) и закон сохранения количества движения (импульса) в системе, а также учитывать рассеиваемую в планетах энергию приливных деформаций. В несколько упрощенном варианте предположения об обращении Луны в экваториальной плоскости Земли закон сохранения количества движения можно записать в виде (Рускол, 1975)

$$I \cdot \Omega + \frac{M \cdot m}{M + m} L^2 \cdot \omega = K = \text{const} \quad (3.1)$$

где $I = 8,03 \cdot 10^{44}$ г·см² – момент инерции современной Земли; Ω – угловая скорость ее вращения вокруг собственной оси; ω – угловая скорость орбитального движения Луны вокруг Земли; $M = 5,977 \cdot 10^{27}$ г – масса Земли; $m = 7,35 \cdot 10^{25}$ г – масса Луны; L – расстояние между центрами тяжести Земли и Луны (современное значение $L = 3,844 \cdot 10^{10}$ см).

Третий закон Кеплера, как известно, записывается в виде

$$\omega^2 \cdot L^3 = \gamma \cdot (M + m) = \mu = \text{const} \quad (3.2)$$

где $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-8}$ см³/г·с² – гравитационная постоянная. Энергия собственного вращения Земли E_Ω и полная орбитальная энергия Луны E_ω определяются столь же простыми соотношениями

$$E_\Omega = I \frac{\Omega^2}{2} \quad (3.3)$$

$$E_\omega = -\gamma \frac{m \cdot M}{2L} \quad (3.4)$$

Современные значения энергии вращения Земли и Луны соответственно равны $E_\Omega = 2,12 \cdot 10^{36}$ эрг и $E_\omega = -0,38 \cdot 10^{36}$ эрг (напомним, что орбитальная энергия Луны по своей сути – потенциальная энергия и поэтому отрицательная)

Кроме приведенных уравнений для описания эволюции системы Земля – Луна необходимо еще оценить скорость диссипации энергии в этой системе. Такую оценку можно выполнить по диссипативной функции Q_μ^{-1} , где Q_μ – фактор механической добротности планеты. Диссипативная функция определяет собой долю $\Delta E/E$ рассеиваемой

в форме тепла энергии E упругопластических деформаций тела за один цикл колебательного процесса:

$$Q_{\mu}^{-1} = \frac{\Delta E}{2\pi \cdot E} \quad (3.5)$$

Приведенных уравнений (3.1)–(3.4) при условии, что нам известна диссипативная функция (3.5) или что ее можно оценить по геологическим данным, уже вполне достаточно для полного описания эволюции системы Земля – Луна.

Приливные взаимодействия перераспределяют моменты количества движения между планетами, но при этом суммарный момент количества движения системы всегда остается неизменным. Эти же взаимодействия приводят к “перекачке” энергии от одной планеты к другой, но, в отличие от момента количества движения, энергия вращательного движения в системе не сохраняется постоянной, поскольку она благодаря приливному деформациям постепенно переходит в тепло и рассеивается далее в космическом пространстве. В настоящее время вращательная энергия Земли передается Луне, благодаря чему происходит, с одной стороны, постепенное замедление осевого вращения нашей планеты, а с другой – одновременное с этим отодвигание Луны от Земли.

Из приведенных закономерностей вытекает важное следствие. Если спутник при своем образовании или захвате обладал собственным вращением с угловой скоростью, не равной скорости его обращения вокруг массивной центральной планеты, то на такой спутник обязательно должна была действовать пара приливных сил, тормозящих его осевое вращение. В результате такой спутник быстро переходил на синхронное вращение, при котором его угловые скорости осевого и орбитального вращения становились равными друг другу и он оказывался повернутым к центральной планете всегда одной и той же стороной, как это сейчас и наблюдается у Луны (один оборот вокруг своей оси Луна совершает за время ее полного оборота вокруг Земли).

Гипотетическая планета Протолуна. Вернемся теперь вновь к ранней истории системы Земля–Луна на той ее стадии, когда входящие в нее планеты правильнее еще называть Протоземлей и Протолуной. Предполагаемые события совпадают по времени с эпохой завершения формирования планет Солнечной системы за счет аккреции планетезималей и отстоят от нас примерно на 4,6 млрд лет.

События в те далекие времена могли развиваться по следующим сценариям. Во-первых, Протоземля и Протолуна тогда могли образоваться по “классическому” механизму формирования двойной планеты: сначала Земля, а потом из оставшегося протоземного роя планетезималей – Протолуна, как это предполагает Е.Л. Рускол (1975). Популярны сегодня и модели образования Луны благодаря гигантскому касательному удару (мегаимпакту) по Протоземле некой планеты марсианского размера. Однако все эти гипотезы совершенно не объясняют упоминавшуюся выше специфику химического состава Луны и геохимию ее пород, а также соответствие момента количества вращения системы случаю нахождения Луны на пределе Роша от Земли.

По этим и некоторым другим причинам нам представляется, что наиболее вероятным сценарием является гравитационный захват растущей Протоземлей с соседней (ближайшей) орбиты также растущей, но уже достаточно крупной Протолуны. В противоположность захвату спутника с далекой орбиты (вероятность которого практически равна нулю) вероятность перехода спутника с ближайшей гелиоцентрической орбиты на орбиту вокруг растущей планеты (т.е. планеты с увеличивающейся массой) может быть конечной, как это принимают, например, С. Зингер (1972), Х. Альвен и Г. Аррениус (1972, 1979). Гораздо более эффективным механизмом захвата, считают В. Каула и А. Харрис (1973), могли служить столкновения пролетающего спутника с телами околопланетного планетезимального роя, еще вращавшегося вокруг растущей планеты. Благодаря таким столкновениям скорость пролета захватываемого

спутника должна была заметно тормозиться, в результате чего его траектория могла трансформироваться из гиперболической (по отношению к центральной планете) в эллиптическую, а затем и в круговую.

Проведенное недавно японскими учеными К. Отзуки и С. Ида (1998) прямое математическое моделирование гравитационных взаимодействий многих тел в неоднородном протопланетном диске вблизи растущей планеты показало, что гравитационные захваты космических тел вполне возможны. При этом, как и предполагалось ранее (Сорохтин, Ушаков, 1989), захват спутников всегда происходит только в одном, прямом направлении и является главной причиной раскручивания планет. К сожалению, в приведенном численном эксперименте не было проведено моделирование разрушения захваченных массивных тел на пределе Роша и раскручивание планеты до предельной угловой скорости, соответствующей ее синхронному вращению со спутником, находящимся на этом пределе. Поэтому авторы моделирования происхождения Луны по традиции также связывают либо с касательным ударом более крупного протопланетного тела, либо с аккрецией протоземного осколочного диска. А как же тогда объяснить происхождение многочисленных спутников внешних планет? Тоже предположением, что все они возникли за счет касательных ударов протопланетных тел о газовые оболочки этих планет?

Так или иначе, но Протолуна все-таки оказалась на околоземной орбите. Теперь, в отличие от классических гипотез образования Луны, предположим, что масса Протолуны первоначально была существенно большей, чем масса современной Луны, например в четыре раза, но по-прежнему все же оставалась значительно меньшей, чем масса Протоземли. Кроме того, учтем, что собственное вращение Протоземли, приобретенное ею только за счет выпадения на нее планетезималей из смежных (внутреннего и внешнего) поясов протопланетного облака, благодаря статистической компенсации воздействий их ударов, происходивших тогда с разных сторон ее орбиты, было очень медленным и скорее всего было направлено в сторону, противоположную современному направлению осевого вращения Земли (как у лишенной спутников Венеры).

При таких условиях оказывается, что первоначально угловая скорость орбитального обращения Протолуны (вне зависимости от механизма ее образования) была существенно более высокой, чем угловая скорость собственного осевого вращения Протоземли. Более того, из закона сохранения момента количества движения следует, что если Протолуна была захвачена на орбиту со средним радиусом, превышающим приблизительно в шесть раз радиус самой Протоземли, то у последней осевое вращение действительно должно было быть обратным. Например, если произошел захват Протолуны (с массой равной четырем массам современной Луны) на среднюю орбиту с радиусом, в 12 раз превышающим радиус Земли, то первоначально Протоземля должна была бы вращаться вокруг своей оси в противоположную сторону с периодом около 11 ч, что мало вероятно. Поэтому примем для определенности, что Протолуна была захвачена на орбиту со средним радиусом, приблизительно равным шести радиусам Земли ($6370 \text{ км} \times 6 \approx 38,2 \text{ тыс. км}$), и обращалась вокруг Протоземли с периодом около 20 ч. При этом можно считать, что Протоземля почти не обладала собственным осевым вращением (при другой массе Протолуны получится и другой радиус захвата, отвечающий отсутствию собственного вращения Протоземли).

Из условия превышения угловой скорости орбитального движения спутника над угловой скоростью вращения центральной планеты и закона сохранения момента количества движения системы также с неизбежностью следует, что в процессе приливного взаимодействия планеты и спутника орбитальный момент Протолуны постепенно передавался Протоземле, тем самым ускоряя ее собственное вращение в сторону движения спутника. Одновременно с этим Протолуна, теряющая свой момент

количества движения, столь же неизбежно и неудержимо должна была приближаться к Протоземле.

При захвате Протолуны на околоземную орбиту ее первоначальный эксцентриситет должен был быть очень большим – приближающимся к единице (напомним, что эксцентриситет эллиптической орбиты равен разности между ее большой и малой осями, деленной на величину большой оси). Это условие позволяет оценить среднее значение приливной энергии, выделившейся в спутнике, после его перехода на почти круговую орбиту. Соответствующие оценки показывают, что благодаря переменным приливному деформациям после захвата Протолуны в ее теле должно было выделиться около $1,5 \cdot 10^{37}$ эрг или $1,5 \cdot 10^{30}$ Дж тепловой энергии, что эквивалентно выделению 1200 кал тепла на 1 г вещества Протолуны. Учитывая, что теплота плавления большинства магматических пород примерно равна 100 кал/г, а их теплоемкость около 0,3 кал/г·град, легко найти, что выделившегося таким путем тепла было бы вполне достаточно для полного расплавления Протолуны и подъема температуры ее вещества почти до 3700 °С. К этому теплу следует добавить еще и дополнительную энергию гравитационной дифференциации Протолуны, которая неизбежно должна была произойти после ее расплавления. Это прибавило еще около 10^{36} эрг тепловой энергии и дополнительный разогрев на 250 °С.

Время эволюции системы от момента захвата Протолуны до ее перехода на круговую орбиту было сравнительно коротким (около 10 тыс. лет). Поэтому, даже несмотря на интенсивное поверхностное охлаждение, она еще долгое время оставалась полностью расплавленной и сильно перегретой планетой. Расплавление и перегрев Протолуны должны были привести к существенной гравитационной дифференциации ее вещества по плотности и к почти полной потере ею всех летучих элементов и соединений. В связи же с малой массой Протолуны и последующим ее разрушением, эти летучие компоненты не смогли сохраниться в атмосфере спутника.

Диссипация приливной энергии, естественно, происходила и в Протоземле. При этом выделявшаяся в центральной планете тепловая энергия приливного взаимодействия со спутником черпалась из энергии его орбитального движения. Часть этой энергии уходила на “раскрутку” Протоземли (плоскость вращения Протолуны тогда совпадала с экваториальной плоскостью Протоземли), а часть – на разогрев планеты. Можно определить, что за счет приливного взаимодействия Протолуны с Протоземлей (от момента захвата массивного спутника до его перехода на предел Роша) в теле последней должно было выделиться около $1,25 \cdot 10^{37}$ эрг тепловой энергии. Этого тепла хватает для подъема средней температуры Протоземли приблизительно на 180 °С, но еще далеко не достаточно для начала ее расплавления.

Катастрофа Протолуны и рождение Луны. С приближением массивного спутника к центральной планете его тело все более деформируется приливыми силами и вытягивается вдоль продольной оси, соединяющей центры тяжести планет. Начиная с некоторого расстояния от центральной планеты до орбиты спутника, известного как предел Роша, приливная сила, действующая на спутник, становится больше силы его самогравитации. Для разрушения твердого спутника необходимо, чтобы разность этих сил превысила предел прочности пород спутника на разрыв, так как только в этом случае спутник теряет свою устойчивость и начинает разрушаться. Следовательно, для разрушения твердого спутника он должен как бы погрузиться в полость Роша на ту глубину, при которой притяжение со стороны центральной планеты превышает собственную силу тяжести спутника на величину, равную прочности его пород. В противоположность этому разрушение жидкого спутника путем перетекания его вещества на планету, начинается, как только спутник переходит на орбиту, равную пределу Роша. В астрофизике явления перетекания звездного вещества от меньшей по массе звезды к

бóльшей в тесных двойных звездных системах известны довольно широко (Физика космоса, 1986).

На пределе Роша угловые скорости вращения планеты и ее спутника совпадают. Для Земли и Луны эта скорость приблизительно равнялась одному обороту за 6 ч. Для Луны радиус сферы Роша вокруг Земли был примерно равен 17150 км и превышал радиус нашей планеты всего в 2,7 раза. Исходный радиус Протолуны составлял приблизительно 2560 км, тогда как благодаря приливным деформациям на пределе Роша большая полуось спутника вытягивалась в 1,5 раза, т.е. до 3840 км. Средний радиус Протоземли и тогда уже приблизительно равнялся радиусу современной Земли (6370 км), с учетом же быстрого вращения Земли ее экваториальный радиус тогда достигал 6720 км. Отсюда можно подсчитать, что в момент перехода Протолуны на орбиту предела Роша она нависала над земной поверхностью на высоте всего около ... 6590 км (можно только догадываться, какое впечатление могло производить такое сближение планет!).

Разрушение жидкой и расслоенной (прошедшей дифференциацию) Протолуны при ее переходе на орбиту критического предела с последующим постепенным погружением в сферу Роша должно было происходить за счет стекания расплавленного вещества внутреннего (обращенного к центральной планете) приливного вздутия в сторону Протоземли. Сорванное с поверхности Протолуны силикатное вещество в форме небольших застывших “брызг” – лапиллий и “вулканических” бомб – должно было по широкой спирали устремляться к центральной планете, формируя вокруг Протоземли (в ее экваториальной плоскости) достаточно плотные кольца раздробленного метеоритного материала вроде современных колец Сатурна, также возникших за счет разрушения одного из спутников Сатурна на пределе Роша (рис. 3.2).

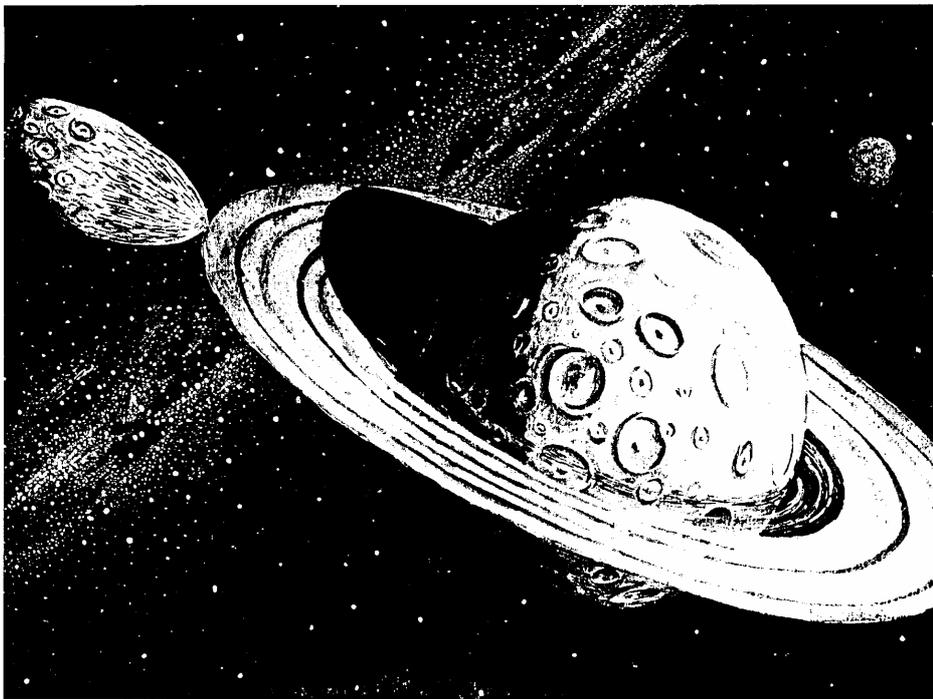


Рис. 3.2. Картина разрушения Протолуны на пределе Роша Земли

На первых этапах разрушения Протолуны осколки ее внутреннего приливного горба неизбежно должны были выпадать на поверхность Протоземли, непосредственно передавая ей момент количества движения спутника. В дальнейшем выпадение осколков из плотных метеоритных роев на Протоземлю, по-видимому, происходило уже под влиянием возмущающего действия самого спутника на потоки осколочного вещества в

кольцах и процессов столкновения в них отдельных частиц. Это, в свою очередь, должно было приводить к турбулизации потоков осколочного вещества, к гашению кинетической энергии их движения и к выпадению осколков на поверхность центральной планеты. В результате угловая скорость осевого вращения Протоземли повышалась, а скорость погружения остатков Протолуны в сферу Роша уменьшалась.

Многие черты развития катастрофы Протолуны определялись скоростью ее погружения в сферу Роша. Изучение этого процесса и выполненные нами оценки показывают, что скорость сближения наших планет тогда была достаточно большой: за один оборот Протолуны с периодом около 6 ч она погружалась в сферу Роша приблизительно на 24–35 м, а за год – на 35–51 км.

Как видно из приведенных оценок, сближение Протолуны с Протоземлей действительно происходило стремительно. При такой скорости погружения Протолуны в сферу Роша даже расплавленное, но все-таки вязкое протолунное силикатное вещество из внутреннего приливного выступа спутника просто не успевало стекать с его поверхности в сторону Протоземли. В результате Протолуна в те трагические для нее времена, могла погружаться в сферу Роша значительно глубже, чем это допускается теорией, не учитывающей конечную вязкость вещества разрушаемого спутника.

Задача разрушения расслоенного спутника с маловязким (единицы пуаз), но плотным (около 8 г/см^3) ядром и более вязкой (порядка 10^{10} П), но легкой (около $3,3 \text{ г/см}^3$) оболочкой при быстром его погружении в сферу Роша строго еще не решена. Качественное рассмотрение этой проблемы показывает, что ситуация, по-видимому, должна была резко измениться, как только приливное ускорение со стороны Протоземли превысило ускорение силы тяжести на поверхности протолунного ядра. После этого момента, при быстром погружении спутника в сферу Роша, в большей части его ядра должны были возникнуть значительные растягивающие напряжения. В таких условиях после преимущественного разрушения внутреннего приливного горба Протолуны могло произойти быстрое “выливание” маловязкого расплавленного железа из ее ядра на земную поверхность.

Если катастрофический разрыв расплавленного железного ядра Протолуны действительно произошел достаточно быстро и большая часть его вещества вместе с остатками внутреннего приливного вздутия устремилась к Земле, то внешний приливный горб, менее всего пострадавший от разрушения и почти лишенный остатков “ядерного” железа, должен был испытать инерционную отдачу и перейти на более удаленную орбиту, т.е. покинуть опасную зону предела Роша.

К этому времени, как показывают расчеты, благодаря выпадению на Протоземлю большей части протолунного вещества ее масса возросла до массы современной Земли, а угловая скорость осевого вращения за счет приливных взаимодействий с Протолуной увеличилась до критического значения, равного угловой скорости орбитального обращения спутника на пределе Роша (один оборот приблизительно за 6 ч.). Благодаря инерционной “отдаче” остатки Протолуны, которые теперь уже можно называть Луной, должны были перейти на орбиту с меньшей орбитальной скоростью ее обращения вокруг Земли. В результате после этого приливные взаимодействия планет поменяли свой знак на противоположный и молодая Луна начала отодвигаться от Земли, что и спасло ее от окончательного разрушения, а собственное осевое вращение Земля стало тормозиться (продолжается этот процесс и сейчас).

Начиная с этого момента можно говорить об образовании на околоземной орбите настоящей Луны – вечного и верного спутника нашей планеты. Но образовалась она около 4,6 млрд лет назад ценой разрушения более крупной материнской планеты – Протолуны, захваченной несколько ранее гравитационным полем растущей Земли с соседней близкой орбиты.

3.3. Природа осевого вращения планет и происхождение метеоритов

Рассмотрим теперь, насколько уникальна судьба системы Земля–Луна по сравнению с другими планетами. Не является ли механизм возникновения этой пары планета – спутник более универсальным, приемлемым для всех планет, вращающихся в прямом направлении и обладающих собственными спутниковыми системами? Такие вопросы вполне правомерны, поскольку при формировании планет лишь за счет прямого выпадения на них планетезималей, движущихся по кеплеровским круговым гелиоцентрическим орбитам, может возникнуть только обратное вращение планет, т.е. в том же направлении, в котором вращается лишенная спутников Венера. Напомним, что при взгляде на эклиптику (т.е. на плоскость вращения планет вокруг Солнца) со стороны Полярной звезды все планеты обращаются вокруг Солнца против часовой стрелки, при этом собственное вращение планет считается прямым, если они как бы “катятся” по своим орбитам вокруг Солнца, т.е. если их осевое вращение также происходит против часовой стрелки. Гравитационный же захват спутников с соседних (близких) круговых орбит, как правило, происходит только в прямом направлении (Альвен, Аррениус, 1979), и, следовательно, их приливные взаимодействия с центральной планетой должны раскручивать ее также только в прямом направлении. Об этом же говорят и результаты математического моделирования самого процесса захвата планетой вещества из неоднородного (гетерогенного) протопланетного диска (Ohtsuki, Ida, 1998).

В последние годы стала модной гипотеза так называемых мегаимпактов, согласно которой планеты приобретают осевое вращение за счет соударений с ними по касательной других планет меньшей массы, после чего центральная планета раскручивается, а планета-“снаряд” либо полностью с ней сливается, либо ее остаток превращается в спутник. При этом, правда, остается не совсем ясно, почему все-таки большинство планет Солнечной системы приобрело прямое вращение: ведь при таком механизме “раскручивания” планет равновероятны удары и с той и другой стороны. Кроме того, с точки зрения этой гипотезы непонятно, почему практически все незаторможенные приливами планеты обладают угловыми скоростями осевого вращения, близко совпадающими с угловыми скоростями орбитального вращения спутников на их пределах Роша (рис. 3.3). Ведь при мегаимпактном механизме “раскрутки” планет скорости их осевого вращения должны были бы распределяться по законам статистики, т.е. наряду с прямо и быстро вращающимися планетами существовали бы обратно раскрученные и медленно вращающиеся планеты, во всяком случае скорости их осевого вращения так дружно не совпадали бы со скоростями обращения спутников на пределах Роша (из рассмотрения следует исключить Меркурий и Венеру, поскольку их осевые вращения сильно заторможены приливами со стороны Солнца).

Учитывая сказанное и очевидную несостоятельность мегаимпактной гипотезы, попытаемся придать нашей модели становления системы Земля–Луна более универсальный характер и предположить, что помимо Земли и другие вращающиеся в прямом направлении планеты были раскручены захваченными ими с ближайших орбит спутниками. В этом случае при захвате спутника его угловая скорость орбитального обращения в прямом направлении всегда оказывается большей, чем начальная угловая скорость осевого вращения планеты, приобретенной ею еще в процессе своего образования за счет выпадения на ее поверхность планетезималей. В результате благодаря приливным взаимодействиям такие спутники должны были последовательно приближаться к своим центральным планетам, разрушаться там на пределах Роша и выпадать на поверхность планет, передавая им свои орбитальные моменты количества движения и тем самым раскручивая их. Такие процессы, естественно, могли развиваться только до момента достижения центральной планетой предельной (критической) угловой скорости собственного вращения, определяемой скоростью обращения спутника на пределе Роша. Если в дальнейшем такие планеты не испытывали существенного

приливного торможения со стороны еще оставшихся на орбитах спутников, то их угловые скорости осевого вращения должны были и далее оставаться близкими к критическим значениям. Если же такое приливное торможение было достаточно сильным, как, например, в системе Земля – Луна, то его всегда возможно учесть и без особого труда восстановить исходные значения угловых скоростей вращения планет в момент образования их системы.

Пользуясь законами механики, можно рассчитать теоретическую зависимость удельного момента количества вращения A планет от массы для случая их раскручивания с предельной скоростью, определяемой обращением спутников на пределе Роша:

$$A = J \cdot R_e^2 \cdot \Omega, \quad (3.6)$$

где J – безразмерный момент инерции планеты; R_e – ее экваториальный радиус; Ω – угловая скорость собственного осевого вращения планеты.

Зависимость (3.6) была построена для планет Солнечной системы, самой Солнечной системы и быстровращающихся массивных звезд (рис. 3.3) и сопоставлена с теоретической зависимостью A от массы вращающихся небесных тел M (Сорохтин, Ушаков, 1989):

$$A = J \left[\frac{\gamma}{K^3 (4\pi \cdot \bar{\rho}_0 / 3)^{1/3}} \right]^{1/2} \cdot M^{2/3}, \quad (3.7)$$

где $K \approx 2,44(\bar{\rho}_0 / \bar{\rho}_s)^{1/3}$ – коэффициент, определяющий собой относительные размеры сферы Роша у данной планеты; ρ_0 – средняя плотность центральной планеты (или звезды); ρ_s – средняя плотность спутника; $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{с}^2$ – по-прежнему гравитационная постоянная.

Теоретические расчеты показывают, что удельные моменты осевого вращения планет и звезд, раскрученных до предельной скорости приливыми взаимодействиями со своими спутниками, всегда пропорциональны массе рассматриваемого космического тела в степени $2/3$. Такой же закон распределения удельных моментов количества вращения известен по эмпирическим данным для быстровращающихся внешних планет Солнечной системы и некоторых классов вращающихся звезд (см. рис. 3.3). На эту же зависимость хорошо ложится молодая Земля при условии, что Луна тогда находилась на ее пределе Роша, да и само Солнце до его торможения электромагнитным взаимодействием с первичным протопланетным газопылевым облаком (т.е. еще до образования планет).

Как видно из сопоставления приведенных данных для всех этих небесных тел, отличающихся по своим массам на 7 порядков, выведенная из приливной гипотезы “раскрутки” планет (и звезд) теоретическая зависимость их момента осевого вращения от массы действительно очень неплохо аппроксимирует найденную ранее эмпирическую закономерность. Вряд ли такое совпадение можно признать случайным. Скорее всего оно свидетельствует о широком распространении явления раскручивания планет за счет приливного разрушения их спутников на пределах Роша. Такие события часто могли происходить во всяком случае на этапах образования самих планетных систем.

Однако механизм этот, по-видимому, не является универсальным, поскольку существуют планеты, явно отклоняющиеся от рассмотренной закономерности. Так, например, Венера вращается очень медленно и в обратную сторону. Возможно, это было связано с процессом формирования Венеры только за счет аккреции и прямого выпадения на нее планетезималий без гравитационного захвата спутников на ее околопланетные орбиты. К тому же вращение Венеры сейчас явно заторможено солнечными приливами и она оказалась даже захваченной приливыми взаимодействиями с Землей в резонансное состояние второго рода. Говорить что-либо определенное о былом вращении Меркурия вообще невозможно, так как он полностью заторможено солнечными приливами и его

орбитальное вращение строго резонансное – он всегда одной и той же стороной обращен к Солнцу (вероятно, еще с момента своего образования).

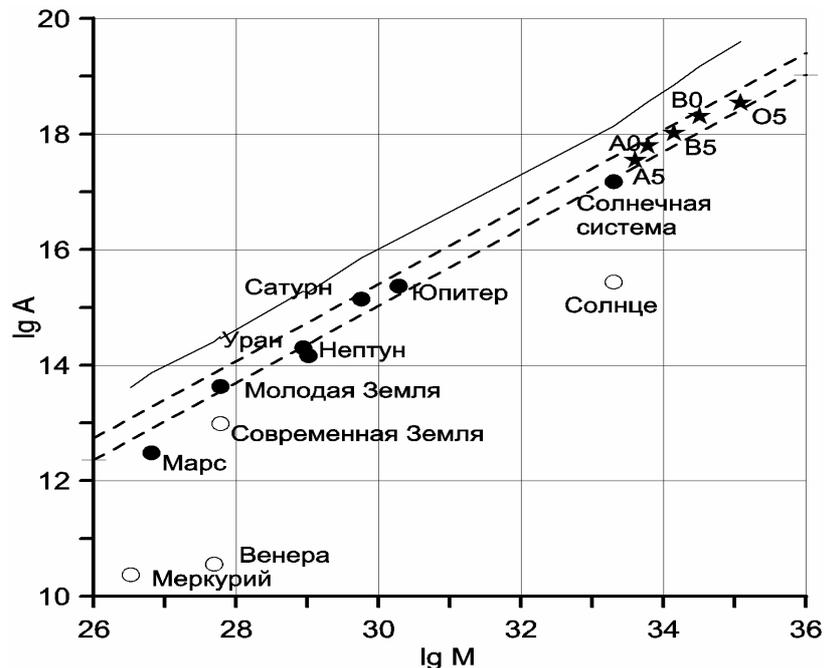


Рис. 3.3. Зависимость удельного момента осевого вращения планет Солнечной системы и некоторых классов быстро вращающихся звезд от их массы. Черными кружочками показаны не заторможенные объекты; светлыми – заторможенные объекты; звездочками – звезды. Пунктиром показаны теоретические значения удельного момента A при раскручивании планет и звезд до угловой скорости вращения спутников на пределе Роша, рассчитанные по выражению (3.7) в зависимости от значения массы центральной планеты (звезды), ее плотности и плотности разрушаемых на пределе Роша спутников. Тонкой сплошной линией показаны предельные значения момента A для случая ротационной неустойчивости тех же планет и звезд. (Данные для

расчета моментов осевого вращения планет и звезд взяты из справочника “Физика космоса”, 1986)

Ситуация с Марсом пока не совсем ясна. Скорее всего из-за малой массы на его околопланетные орбиты было захвачено мало крупных спутников, и поэтому за время существования он просто не успел раскрутиться до предельной скорости Роша. Об этом же, в частности, говорит факт расположение его ближайшего спутника Фобоса на пределе Роша. В этом случае судьба Фобоса предрешена – он неизбежно будет разрушен или целиком выпадет на Марс, немного ускорив тем самым его осевое вращение. Более того, судя по системе борозд на поверхности Фобоса, напоминающих следы схода снежных лавин в горах, этот процесс разрушения спутника, срыва с него верхних слоев и отдельных скал уже начался.

Из приведенного на рис. 3.3 сопоставления теоретических расчетов с эмпирическими данными и их неплохого совпадения друг с другом следуют два важных теоретических вывода. Во-первых, этим совпадением косвенно подтверждается предположение Х. Альвена и Г. Аррениуса (1976) о возможности и конечной вероятности гравитационного захвата растущими планетами своих спутников с ближайших к ним гелиоцентрических орбит. Ведь при раскрутке крупных планет “косыми” (по касательной к их поверхностям) соударениями планетезималей или других планет, т.е. так называемыми мегаимпактами, как сейчас принято говорить, со случайными распределениями самих ударов по поверхности “цели” просто невозможно ожидать выполнения изображенного на рис. 3.3 закона. Кроме того, как уже отмечалось выше, такие мегаимпакты, скорее, приводили бы к возникновению обратных, а не прямых направлений вращения планет. Без привлечения идеи гравитационного захвата растущими

планетами (т.е. планетами с увеличивающейся массой) невозможно объяснить и возникновение самих околопланетных роев первичных тел и планетезималей, из которых по традиции стараются “создавать” спутники планет.

Во-вторых, отсюда следует, что большинство метеоритов и астероидов скорее всего представляют собой мелкие осколки прошедших дифференциацию и затем разрушенных приливными возмущениями спутников и даже планет, оказавшихся в “глубинах” сферы Роша более массивных планет. Особенно это относится к классам дифференцированных метеоритов, например к железоникелевым метеоритам, вещество которых прошло полную и глубокую сепарацию элементов по их сидерофильным свойствам (т.е. химической близости к железу). Анализируя химический состав таких метеоритов, просто трудно обойтись без привлечения гипотезы о разрушении некой достаточно крупной и расслоенной планеты с металлическим ядром типа гипотетического Фазтона. Фазтон – предполагаемая планета, разрушение которой якобы породило множество осколков, образовавших затем пояс астероидов между Марсом и Юпитером. Эта “планета” названа так по имени сына греческого бога Солнца, Гелиоса, взявшего у своего отца огненную колесницу, но не умевшего ею управлять, за что и был поражен, т.е. как бы разрушен, молнией Зевса.

Помимо железоникелевых метеоритов к таким осколкам Фазтона (или “Фазтонов”), по-видимому, следует относить мезосидериты (железокаменные метеориты), обычные хондриты “мантийного” состава и ахондриты базальтового состава. Многие из этих метеоритов несут на себе следы интенсивных пластических деформаций и быстрого остывания горячего вещества (таково, вероятно, происхождение и загадочных образований – сферических гранул или хондр). Если это действительно так, то оказывается, что большинство каменных метеоритов несет в себе характерные признаки катастрофического разрушения дифференцированных тел планетных размеров.

Механизмом для выбрасывания осколков таких тел за пределы гравитационного поля разрушившей их планеты может служить механизм инерционной отдачи, срабатывающий, например, при прохождении космическим телом приблизительно лунных размеров через сферу Роша значительно более массивной планеты со скоростью, близкой к параболической. В этом случае, как показал Дж. Вуд, часть образовавшихся обломков переходит на эллиптические орбиты вокруг центральной планеты, а другие осколки ускоряются до гиперболических скоростей и навсегда покидают ее пределы, превращаясь в вечных скитальцев Солнечной системы. В период формирования планет, т.е. около 4,6 млрд лет назад, такие события, по-видимому, могли происходить достаточно часто. Вот почему и первичные возрасты подавляющего большинства всех классов метеоритов соответствуют именно этому времени их образования.

В свете изложенных идей, представляется вероятным, что остатками первичных планетезималей, из которых происходило формирование планет Солнечной системы (да и то только их внешних членов), являются кометные тела. Даже углистые хондриты, как и другие метеориты, вероятно, не являются остатками исходного (первичного) протопланетного вещества, а скорее всего возникли на периферии Солнечной системы за счет приливного разрушения внешних (богатых подвижными и летучими элементами) и слабодифференцированных протопланет.

Отсюда, в частности, следует, что состав Земли и других планет земной группы нельзя просто так прямо определять по составам известных нам метеоритов. Необходимо помнить, что метеориты не являются остатками первичного протопланетного вещества, а представляют собой осколки разрушенных некогда планет и планетоподобных тел, прошедших иногда глубокую дифференциацию. При определении среднего состава исходного земного вещества, мы еще раз обратим внимание читателя на этот вопрос.

3.4. Эволюция системы Земля–Луна

Энергия приливных взаимодействий планет сильно зависит от расстояния между их центрами тяжести и возрастает обратно пропорционально шестой степени этого расстояния! Это означает, что любое сближение планет приводит не только к значительному увеличению самих приливов, но и к стремительной интенсификации всех связанных с приливами процессов. Так, при захвате Протолуны на близкую околоземную орбиту процесс сближения спутника с Протоземлей, включая его разрушение на пределе Роша, занимал всего около 15–20 тыс. лет, причем само разрушение Протолуны заняло не более 80–100 лет. Столь же быстро произошло раскручивание и самой Земли – приблизительно за 100 лет скорость ее собственного вращения увеличилась более чем в два раза: с одного оборота за 14–15 ч до одного оборота за 6 ч. С точки зрения геолога, привыкшего оперировать миллионами и даже миллиардами лет, это очень короткие промежутки времени, просто мгновение.

Приведенному приросту количества вращения Земли, с учетом кинетической энергии выпавших на земную поверхность осколков разрушенной Протолуны соответствует огромная энергия $3,8 \cdot 10^{37}$ эрг, часть из которой, около $1,1 \cdot 10^{37}$ эрг, перешла в тепло. Если бы эта энергия равномерно распределилась по всему объему Земли, то ее средняя температура возросла бы приблизительно на 160 °С. Однако фактический разогрев земного вещества оказался существенно меньшим, поскольку основное воздействие со стороны обрушившегося на земную поверхность потока мелких обломков Протолуны приходилось в основном только на экваториальную зону Земли. В моменты ударов этих частиц о земную поверхность, естественно, происходили тепловые взрывы и даже расплавления ее приповерхностных слоев, но они быстро остывали, отдавая в виде излучения почти все свое тепло открытому космосу. Поэтому катастрофа Протолуны хоть и значительно раскрутила нашу Землю, а также и несколько разогрела ее за счет приливных деформаций, но все же на ее внутреннем тепловом балансе сказалась не столь радикально, как это могло бы показаться с первого взгляда. По-видимому, вклад разрушившейся Протолуны и выпавших на земную поверхность ее осколков в энергетику Земли нужно еще относить к энергетическим эффектам аккреции нашей планеты, но эти эффекты в общей форме учитываются в современной теории планетообразования, подробно изложенной, например, в работах В.С. Сафронова, А.В. Витязева, Х. Альвена, Г. Аррениуса и др.

Эволюция расстояния между Луной и Землей. Существенное влияние на приливное взаимодействие планет оказывает эффективная механическая добротность Q центральной планеты. Напомним, что под фактором добротности понимается степень приближения реологических свойств реальных тел к идеальной упругости: чем выше механическая добротность тела, тем его свойства ближе к идеально упругим материалам и, наоборот, чем ниже фактор добротности, тем это тело больше проявляет свои вязкие свойства. Ярким примером тела с высокой добротностью может служить долго звучащий бронзовый колокол, если же такой колокол сделать из пластилина, то вообще никакого звучания не будет, так как в этом случае вся энергия удара полностью переходит в пластические деформации. Численно безразмерный фактор добротности равен отношению общей энергии, затрачиваемой на деформацию тела (например, за счет приливных взаимодействий планет), к той ее части, которая благодаря процессам внутреннего трения в материале этого тела, превращается в тепло.

Теория приливных взаимодействий планет показывает, что если угловая скорость осевого вращения центральной планеты превышает угловую скорость орбитального обращения спутника (как это и наблюдается в системе Земля–Луна), то благодаря таким взаимодействиям осевое вращение центральной планеты будет тормозиться, а спутник будет от нее отодвигаться. При этом скорость удаления спутника от центральной планеты оказывается пропорциональной его массе, обратно пропорциональной фактору добротности центральной планеты и расстоянию между ними в степени 5,5.

Таким образом, для расчета эволюции системы Земля–Луна и определения зависимости расстояния между планетами от времени предварительно необходимо выяснить, как менялась эффективная механическая добротность Земли Q , определяемая выражением (3.5), за всю историю ее развития. Задача эта непростая, однако, в первом приближении, на уровне оценок вполне решаемая.

Молодая Земля сразу же после своего образования была холодным космическим телом, и в ее недрах температура еще нигде не превышала температуру плавления вещества. Об этом, в частности, свидетельствует полное отсутствие на Земле изверженных (да и любых других) пород старше 4 млрд лет. Об этом же говорят изотопно-свинцовые отношения, показывающие, что процессы дифференциации земного вещества начались значительно позже образования самой Земли и (в противоположность Луне) протекали без существенного плавления. Кроме того, на земной поверхности тогда не было ни океанов, ни атмосферы. Поэтому эффективная механическая добротность Земли в тот ранний период ее развития, который в дальнейшем будем называть катархейским, была сравнительно высокой. По сейсмическим данным, в развитой океанической литосфере, т.е. в холодном земном веществе мантийного состава, фактор добротности находится в пределах от 1000 до 2000, тогда как в частично расплавленной астеносфере под океанами его значение снижается до 100. В холодной верхней мантии Луны этот фактор приблизительно равен 5000, а в более прогретой средней мантии снижается до 1500 (Жарков, 1983).

В отличие от современных условий молодая Земля, как уже отмечалось, была существенно холоднее, лишена астеносферы и ядра, и даже могла характеризоваться отрицательным градиентом температуры в нижней мантии (рис. 3.8). Поэтому в те далекие времена механическая добротность Земли в ее глубинных недрах скорее всего существенно превышала фактор добротности современной литосферы. Однако следует учитывать, что на приливное взаимодействие планет в основном влияют слои с наименьшими значениями фактора добротности. Учитывая сказанное и для определенности расчетов, примем, что в течение всего катархея, т.е. от момента образования Земли, приблизительно 4,6 млрд лет назад, и вплоть до начала развития в ней геологических процессов в самом начале архея, около 4 млрд лет назад, значение приливного фактора добротности Земли равнялся 1500.

Приведенная оценка фактора добротности Земли в катархее позволяет определить, что за этот период Луна благодаря приливному взаимодействию с Землей оказалась отброшенной от предела Роша (около 17 тыс. км) на расстояние до 160 тыс. км (рис. 3.5). При этом отодвигание Луны от Земли было неравномерным: вначале очень быстрым, а затем более спокойным.

Количественная модель изменения фактора добротности Земли в остальные периоды геологического времени может быть рассчитана с привлечением эмпирических данных. В частности, средние значения фактора добротности в фанерозое и протерозое могут быть определены по палеонтологическим данным, позволяющим найти для некоторых моментов времени этих эпох число дней в году или, что то же, угловую скорость собственного вращения Земли. Так, по суточной микрослоистости девонских кораллов Дж. Уэллс (1963) показал, что в среднем девоне год состоял приблизительно из 400 сут., а продолжительность суток не превышала 22 ч. В дальнейшем аналогичные определения были выполнены и для других периодов фанерозоя, а также для строматолитов – отложений бактериальных и микроводорослевых пленок раннего протерозоя (рис. 3.7).

Зная современное расстояние Луны от Земли (384,4 тыс. км), далее удастся уже рассчитать среднее значение фактора добротности в фанерозое, т.е. за последние 600 млн лет. Оно оказалось приблизительно равным 12. Полученная оценка неплохо совпала с независимым определением приливного фактора добротности Земли около 13,

выполненным Г. Макдональдом (1964) на основании обработки данных по современным приливам в океанах и морях. Низкие значения приливного фактора добротности в фанерозое объясняются широким развитием в эту геологическую эпоху мелководных эпиконтинентальных морей, покрывающих сейчас на шельфах около 30% континентальной коры. Но именно в мелководных морях и происходит основное рассеивание энергии приливов за счет трения приливных течений о дно мелководных бассейнов.

Аналогичным путем по суточной микростроистости строматолитов в раннем протерозое возрастом около 2,2 млрд лет Г. ПANNELЛА (1972) определил, что тогда в году было 445 сут., а продолжительность самих суток была менее 20 ч (рис. 3.7). Откуда удастся определить, что в протерозое фактор приливной добротности Земли равнялся приблизительно 75. Повышенное значение фактора добротности в протерозое вполне понятно, поскольку в ту далекую эпоху уже образовался глубокий океан, а мелководных эпиконтинентальных морей тогда еще почти не существовало. Но диссипация приливной энергии в глубоком океане мала, поскольку в этом случае не возникают сильные придонные течения – основная причина приливного торможения Земли.

В архее приливная добротность Земли, как и в фанерозое, должна была быть достаточно низкой по двум причинам. Во-первых, тогда сами океаны еще были мелкими и в них рассеивалась значительная часть приливной энергии и, во-вторых, в архее уже происходило расплавление верхней мантии (во всяком случае на низких широтах) с существенным ее перегревом. Учитывая теперь неразрывность процесса отодвигания Луны от Земли и связывая его воедино в катархее, архее, протерозое и фанерозое, можно определить, что в архее фактор приливной добротности Земли в среднем равнялся 26.

Итак, полученная упрощенная модель изменения фактора добротности Земли Q , основанная на комбинации теоретических соображений с расчетами по эмпирическим данным, выглядит следующим образом: в катархее (от 4,6 до 4,0 млрд лет назад) $Q = 1500$; в архее (от 4,0 до 2,6 млрд лет назад) $Q = 26$; в протерозое (от 2,6 до 0,6 млрд лет назад) $Q = 75$; в фанерозое (приблизительно от 600 млн лет назад до настоящего времени) $Q = 12$. Реальное распределение фактора добротности по времени, безусловно, могло меняться по более сложному закону, но основные его черты в приведенном распределении, по-видимому, определены все-таки правильно.

Уточнить приведенную модель возможно, если учесть, что результирующая приливная добротность Земли определяется суммой диссипативных функций мантии и гидросферы, а сами эти функции обратно пропорциональны факторам добротности рассматриваемых геосфер. Кроме того, следует отдельно учитывать приливные диссипативные функции для мантии под океанами ($Q \approx 150$) и континентами ($Q \approx 500$), а также для глубоких океанов и мелководных эпиконтинентальных морей, при этом факторы добротности для них можно считать пропорциональными содержащимся в них массам воды. В предыдущих работах (Сорохтин, Ушаков, 1991, 1993) были рассчитаны массы континентальной коры, воды в океанах и средние глубины океанов для всех прошлых геологических эпох. Это позволило нам рассчитать количественную модель зависимости фактора добротности Земли от времени, причем отдельно для гидросферы, мантии и всей Земли в целом. При этом принималось, что в архее и протерозое еще не существовало мелководных эпиконтинентальных морей, происхождение же архейских мелководных морских бассейнов на океанической коре просто объясняется малыми количествами воды в океанах того времени. Объемы эпиконтинентальных морей фанерозоя были оценены по палеорекострукциям континентов и площадям распространения морских осадков на континентах.

Построенная по этим условиям уточненная кривая распределения фактора добротности во времени приведена на рис. 3.4. Рассчитанная по этой модели зависимость расстояния между центрами тяжести Земли и Луны от времени приведена на рис. 3.5.

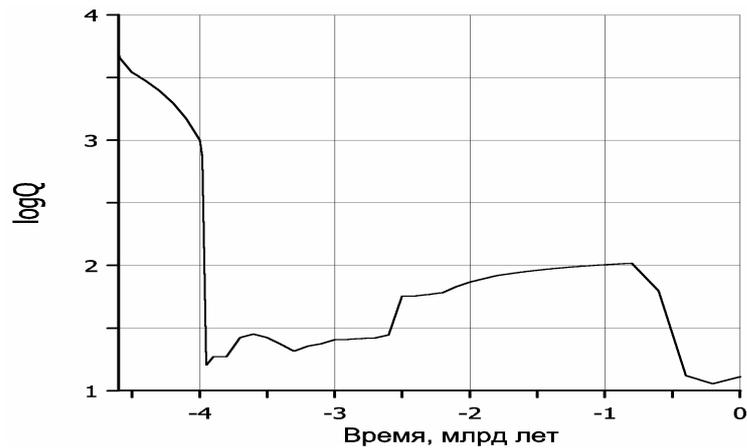


Рис. 3.4. Зависимость фактора приливной добротности Земли от времени, построенная с учетом данных по накоплению воды в океанах и по распространению эпиконтинентальных морей в фанерозое

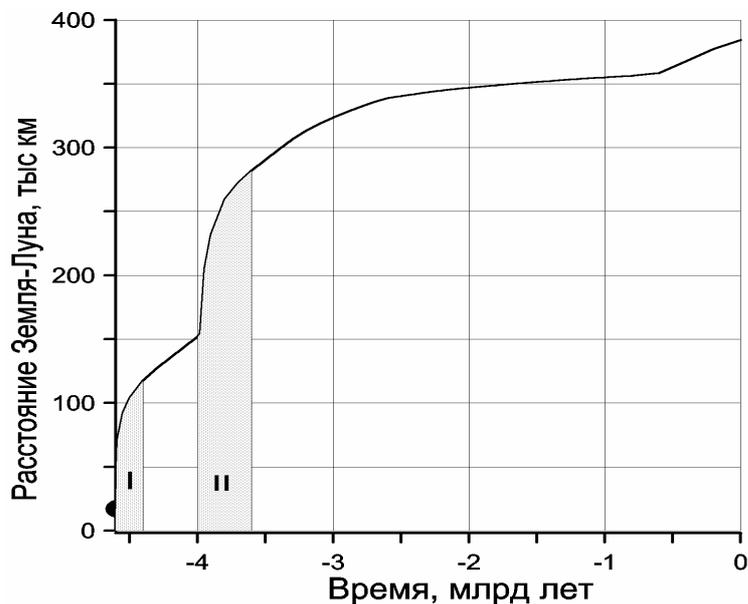


Рис. 3.5. Эволюция расстояния между Луной и Землей. Интервал I — время развития на Луне анортозитового магматизма; интервал II — время развития базальтового магматизма на Луне (пояснения в тексте)

Первое, на что следует обратить внимание в рассматриваемой модели, это совпадение времени эволюции лунной орбиты с возрастом самих планет. Такой вывод сегодня представляется естественным, но не следует забывать, что классические модели приливного взаимодействия Луны с Землей обычно приводили к слишком короткой продолжительности их нормальной эволюции (около 1,8 млрд лет). Связано это было с тем, что в таких моделях современное низкое значение фактора добротности распространялось на всю историю развития Земли. В результате для выхода из явного противоречия с возрастом образования нашей планетной системы авторам таких гипотез приходилось прибегать к весьма экзотическим представлениям. Так, немецкий ученый Г. Герстенкорн (1955, 1967) считал, что Луна первоначально вращалась в обратном направлении и около 1,8 млрд лет назад подходила к Земле почти на расстояние предела Роша, но затем, после перехода через полярную орбиту, когда ее вращение стало прямым, вновь начала удаляться от Земли.

Известный американский геофизик В. Манк (1968) образно описал развитие гипотетического “события Герстенкорна”. По его оценкам, в короткий период наибольшего сближения Луны с Землей океанские приливы должны были достигать высоты 1 км, и каждые 3 ч они обрушивались бы на континенты, приводя к их

выравниванию. В это время диссипация (рассеивание) энергии лунных приливов была бы столь высокой, что все земные океаны вскипели бы и испарились, образовав вокруг Земли мощную атмосферу из водяного пара. При этом с учетом парникового эффекта температура у поверхности Земли поднялась бы до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, погубив тем самым любые проявления жизни. К этой страшной картине добавим еще, что при столь высоких температурах произошла бы почти полная диссоциация (распад) карбонатов – известняков и доломитов с выделением в атмосферу огромных количеств углекислого газа. В результате в земной атмосфере, подобно Венере, возник бы необратимый парниковый эффект с подъемом приземной температуры до $500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ со всеми вытекающими последствиями.

Безусловно, описываемая катастрофическая ситуация оставила бы свой неизгладимый след в летописи геологической истории Земли, однако таких следов нигде не обнаружено, да и мы живем в комфортабельных климатических условиях, а не в “паровом котле”. Это убедительно говорит о том, что “событие Герстенкорна” вовсе не существовало, а начало нормальной эволюции системы Земля–Луна совпадает по времени с моментом их образования как системы двойной планеты около 4,6 млрд лет назад, когда океанов на Земле еще не существовало.

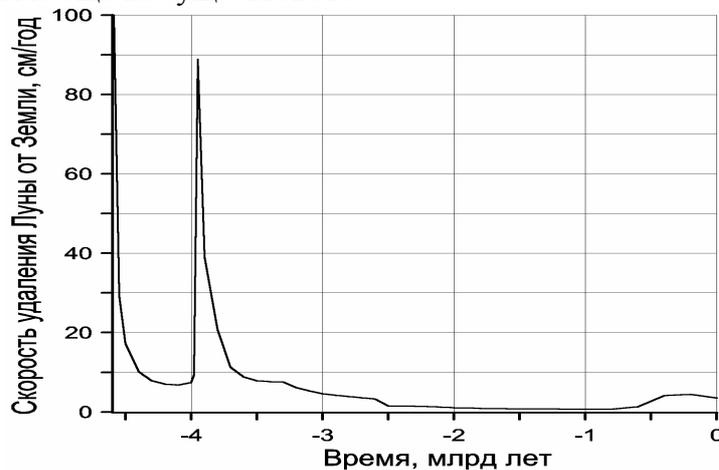


Рис. 3.6. Скорость удаления Луны от Земли, см/год. Масштаб рисунка не позволил привести максимальные значения этой скорости: около 4,6 млрд лет назад она достигала $12 \cdot 10^6$ см/год, или около 12 км/год, однако уже через 1 млн лет она снизилась до 9,64 м/год, а через 10 млн лет – до 1,37 м/год; в настоящее время Луна отодвигается от Земли со средней скоростью около 3,4 см/год

Второе обстоятельство, на которое следует обратить внимание, – это неравномерность отодвигания Луны от Земли (рис. 3.6). С наибольшими скоростями (около 12 – 10 км/год) Луна отодвигалась от Земли в самом начале своего эволюционного пути (сразу же после разрушения ее материнской планеты – Протолуны), около 4,6 млрд лет назад. Однако скорость отодвигания Луны от Земли тогда быстро уменьшалась и уже через 1 млн лет она снизилась до 9,64 м/год, а еще через 10 млн лет она упала до 1,37 м/год. К концу катархея, около 4 млрд лет назад, скорость удаления Луны от Земли уже не превышала 4,3 см/год. Второй значительный импульс резкого увеличения скорости отодвигания Луны (до 90 см/год) возник на рубеже катархея и архея около 3,9 млрд лет тому назад. Наконец, третий период относительного ускорения отодвигания Луны от Земли, правда, с существенно меньшими скоростями (около 3,4 см/год), приходится на фанерозой. При этом только первый импульс стремительного удаления спутника от планеты был связан с малым исходным расстоянием их образования (напомним, что скорость отодвигания Луны от Земли обратно пропорциональна расстоянию в степени 5,5). Природа же второго и третьего импульсов ускорения была вызвана чисто земными событиями. Архейский пик был связан с началом формирования тогда астеносферы и океанов на Земле, а фанерозойское увеличение скорости отодвигания Луны от Земли – с

подъемом поверхности растущего океана до среднего уровня континентальных шельфов, после чего на континентальной коре возникли многочисленные мелководные эпиконтинентальные моря, в которых и рассеивается основная часть приливной энергии.

Интересно теперь сопоставить полученные результаты с имеющимися эмпирическими данными. Такие данные предоставляет нам палеонтология (о чем уже было сказано выше). Результаты теоретического расчета эволюции числа дней в году, проведенного по несколько сглаженной модели фактора добротности Q , показаны на рис. 3.7. На этот же график нанесены все эмпирические данные по определению числа дней в году, полученные на основании изучения микрослоистости кораллов и строматолитов (Шопф, 1982). Как видно из сопоставления теоретической кривой с такими определениями, получено неплохое совпадение теории с экспериментом. Это придает уверенность в том, что наши расчеты приводят в основном к верным результатам.

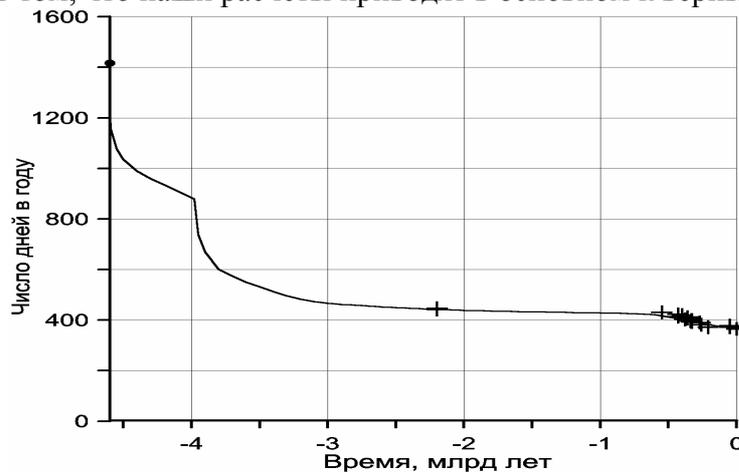


Рис. 3.7. Изменение числа дней в году в связи с эволюцией расстояния между Землей и Луной. Крестиками показаны эмпирические определения числа дней в году по микрослоистости коралловых построек в фанерозое и строматолитов формации Ганфлинт (2,2 млрд. лет назад) в протерозое (Panella, 1972)

Эволюция положения лунной орбиты. Из рассмотренного выше механизма образования Луны следует, что плоскость ее орбиты вначале должна была лежать строго в плоскости экватора Земли и составлять с эклипстикой угол около 23° . При малых расстояниях между планетами такая ситуация эффективно поддерживалась в устойчивом состоянии гравитационным притяжением Луны с центробежным экваториальным вздутием Земли (так как в этом случае при любом отклонении орбиты Луны от экваториальной плоскости Земли возникала пара сил притяжения, стремящаяся вернуть Луну обратно в эту же плоскость). Тем не менее сейчас, как известно, лунная орбита наклонена к эклиптике примерно на 5° . Это связано с тем, что по мере удаления Луны от Земли влияние земного экваториального вздутия на лунную орбиту прогрессивно уменьшалось (обратно пропорционально шестой степени расстояния между Луной и Землей) и, следовательно, заметнее становилось приливное взаимодействие Луны с Солнцем. Действующий же со стороны Солнца на лунную орбиту момент сил, стремящийся повернуть ее в плоскость эклиптики, при этом возрастал с увеличением размеров лунной орбиты пропорционально пятой степени ее радиуса. Поэтому начиная с некоторого критического радиуса лунной орбиты действующий на нее момент сил со стороны Солнца уже стал превышать момент сил, создаваемый экваториальным вздутием Земли.

По расчетам П. Голдрайха (1966), такое критическое расстояние приблизительно равно 17 радиуса Земли, тогда как современное удаление Луны от нашей планеты равно 60,3 радиусам Земли. В результате действия этого эффекта после перехода лунной орбиты через критическую точку приблизительно 4,5 млрд лет назад ее плоскость стала последовательно отклоняться от плоскости земного экватора и постепенно приближаться

к эклиптике Земли. С этой точки зрения наблюдаемое сегодня отклонение орбиты Луны на 5° от плоскости эклиптики является просто “воспоминанием” о той далекой эпохе, когда она еще вращалась вокруг Земли строго по экваториальной орбите, хотя это и продолжалось только в течение первых 100 млн лет существования Луны.

Геохимия Луны. Рассмотренная модель образования Луны объясняет главную геохимическую особенность спутника нашей планеты – резкое обеднение лунного вещества железом. После полного расплавления, дифференциации и разрушения Протолуны на пределе Роша бóльшая часть железа была потеряна в результате выпадения на Землю протолунного железного ядра, последовавшего сразу же за разрушением ее внутреннего приливного горба. Благодаря этому же процессу Луной оказалась потеряна основная часть сидерофильных, т.е. тяготеющих к железу (Ni, Cu, особенно Au, Se, As, Sb), и халькофильных или легко соединяющихся с серой (Ag, Cd, Tl, Pb, Zn), элементов, перешедших в протолунное ядро еще на стадии расплавления и дифференциации этой планеты (до ее разрушения).

В этом отношении очень показателен свинец. После полетов космонавтов и автоматических станций на Луну мы достаточно хорошо знаем состав и геохимию лунных пород. Оказалось, что отношения радиогенных изотопов свинца с атомными весами 206, 207 и 208, образовавшихся за счет распада урана 238, 235 и тория 232, к нерадиогенному (первичному) свинцу с атомным весом 204 в лунных породах экстремально высокие: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \approx 250$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \approx 130$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \approx 270$. Для первичного же свинца из железных метеоритов эти изотопные отношения соответственно равны: 9,5; 10,4 и 29,5. Приведенные соотношения показывают, что почти весь свинец лунных пород имеет радиогенное происхождение, тогда как первичный свинец из них был куда-то удален еще до того, как Луна сформировалась в виде спутника Земли.

С точки зрения описанного здесь механизма формирования Луны отмеченные выше аномалии распределения сидерофильных и халькофильных элементов, включая свинец, вполне понятны. Действительно, протолунное ядро сформировалось только после полного расплавления всего вещества Протолуны. В результате жидкое железо в сплаве с сидерофильными элементами и тяжелые сульфидные расплавы халькофильных элементов (включая PbS) в процессе плотностной дифференциации расплавленного вещества Протолуны под влиянием силы тяжести просто стекали к центру этой планеты, формируя там тяжелое протолунное ядро. После же приливного разрушения Протолуны и выпадения на Землю почти всего ее ядра оставшееся лунное вещество (преимущественно силикатного состава) оказалось резко обедненным всеми рассматриваемыми элементами, в том числе и первичным свинцом с изотопным весом 204. При этом в оставшееся силикатное вещество Луны перешли все литофильные (т.е. тяготеющие к алюмосиликатам) элементы, в том числе уран и торий, распад которых и привел к накоплению в лунных породах радиогенных изотопов свинца ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb .

Планетарное расплавление Протолуны, сопровождавшееся существенным перегревом ее вещества и возникновением в мантии интенсивных конвективных движений, могло привести к усиленной дегазации протолунных (и лунных) недр и как следствие этого процесса к потере лунным веществом летучих элементов и соединений. По мнению специалистов, изучавших лунные породы, такое обеднение Луны летучими элементами является второй характерной и примечательной особенностью лунных пород. Так, эти породы оказались предельно сухими: содержание воды в них колеблется от 0,015 до 0,046%; углерода в базальтах содержится около 0,006–0,007%; азота – 0,003; фтора – 0,015; хлора – 0,0014% и т.д.

Помимо аномалий содержания железа, сидерофильных и халькофильных элементов в Луне, другой наиболее примечательной геохимической особенностью лунного вещества является высокая концентрация в нем титана – от 4,3 до 7,4%, что примерно на порядок превышает его концентрацию в земных океанических базальтах.

Помимо Ti в лунных породах наблюдается повышенная концентрация Cr, Zr, и Y, т.е. типично литофильных элементов. Такое интересное явление, по-видимому, можно объяснить только тем, что масса Протолуны, в недрах которой происходила магматическая дифференциация первичного вещества, значительно превышала лунную массу, а сама Луна сформировалась только из внешнего приливного горба Протолуны, т.е. из ее внешней и обогащенной литофильными элементами части. Интересно отметить, что А. Рингвуд (1979) и ряд других исследователей, анализируя распространенность в лунных породах сидерофильных и халькофильных элементов, а также фосфора и вольфрама, еще ранее пришли к выводу, что процессы дифференциации лунного вещества развивались в недрах другого значительно более массивного тела, в котором возможно было образование крупного железного ядра, составлявшего не менее 26% от массы планеты и поглотившего в себя все эти элементы. Только А. Рингвуд предполагал, что таким космическим телом являлась Земля (правда, предлагая для этого совершенно нереальные механизмы отделения Луны от Земли), а в рассматриваемой модели таким космическим телом была Протолуна.

Поскольку Земля и Луна возникли на близких исходных орбитах в виде двойной планеты, в общем кольцевом поясе пылевого облака Солнечной системы и черпали свое вещество из единого источника однородного по составу протопланетного вещества, то, как показал А. Рингвуд, тесная генетическая связь по главным петрогенным элементам между лунным и земным веществом сохранилась достаточно четко (кроме титана, о чем уже говорилось выше), даже несмотря на различные пути дифференциации этих планет. Особенно это видно при сравнении лунных базальтов, из состава которых вычтен весь избыточный ильменит, с толеитовыми базальтами срединно-океанических хребтов Земли. С рассматриваемых позиций их тесное генетическое родство по основным породообразующим окислам объясняется тем, что и те и другие возникли благодаря близким процессам химико-плотностной дифференциации планетных недр одинакового исходного состава. Только в лунных недрах такая дифференциация протекала благодаря полному плавлению вещества и за исключительно короткое время (всего за несколько тысяч лет), а на Земле этот процесс развивался при частичном плавлении мантийного вещества только в астеносфере и растянулся приблизительно на 4 млрд лет.

Однако резкое различие в скоростях дифференциации планетных недр, в частности, четко отразилось в специфике калий-урановых и калий-ториевых отношений в лунных и земных базальтах. Так, судя по результатам анализов лунных пород из моря Спокойствия, лунные базальты характеризуются заметно более низкими отношениями $K/U \approx 2,3 \cdot 10^3$ и $K/Th \approx 0,72 \cdot 10^3$, чем их современные земные аналоги, – соответственно $(8,3-16,6) \cdot 10^3$ и $(2,1-2,8) \cdot 10^3$. Связано это с тем, что за долгую историю дифференциации земного вещества, происходившего одновременно с процессом формирования континентальной земной коры, торий и уран, как более подвижные элементы, в большей мере, чем калий, переместились из мантии в земную кору. Лунные же базальты унаследовали исходные отношения K/U и K/Th с наименьшими искажениями и менялись со временем только в зависимости от разной скорости распада элементов U и Th.

Эволюция лунного магматизма. Одновременно с Протолуной и до этого в околоземное пространство должно было быть захвачено множество более мелких планетезималей и космических тел, сформировавших вокруг Земли рой более мелких спутников, также вращавшихся вместе с Протолуной вокруг Протоземли. Поэтому весьма вероятно, что в те далекие времена, подобно внешним планетам Солнечной системы, у Земли на ее геоцентрических орбитах еще вращались многочисленные рои мелких и средних спутников, независимо сформировавшихся в околоземном пространстве. Все эти спутники и микролуны, окружавшие тогда Землю, как и сама Луна, должны были испытывать на себе влияние земных приливов. Но поскольку после образования Луны максимальная угловая скорость вращения во всей геоцентрической планетно-спутниковой

системе была только у Земли, то начиная с этого времени все спутники системы, большие и малые, стали отбрасываться приливными взаимодействиями в сторону от центральной планеты. При этом, как уже отмечалось, скорость удаления спутника от Земли пропорциональна его массе, поэтому массивные спутники, и прежде всего Луна, отодвигались тогда от Земли быстрее мелких.

Это приводило к “выметанию” большими спутниками из околоземного пространства более мелких космических тел, неизбежно выпадавших на поверхность своих более массивных соседей при сближениях и пересечениях их орбит. Естественно, что Луна как самая массивная планета-спутник “выметала” все содержимое околоземного спутникового роя эффективнее всех остальных его объектов, особенно в периоды своего наиболее стремительного удаления от Земли на заре развития системы в катархее и в раннем архее. Отсюда следует, что основное количество столкновений Луны с телами такого роя должно было происходить только в течение двух сравнительно коротких промежутков времени от 4,6 до 4,4 и от 4,0 до 3,6 млрд лет тому назад (см. рис. 3.5).

Поскольку одновременно с Луной расширялись орбиты и остальных тел околоземного спутникового роя, причем со скоростями, пропорциональными их массам, то к моментам столкновения таких тел с Луной более массивные спутники успевали отодвинуться от Земли на большие расстояния, чем мелкие. Поэтому вначале (т.е. в катархее) должны были происходить соударения Луны с телами малой или средней массы, тогда как на втором этапе удаления Луны от Земли (т.е. в раннем архее) – с наиболее крупными и массивными из оставшихся спутников, также успевших к этому времени вырасти за счет поглощения ими более мелких тел спутникового роя. Посмотрим теперь, к каким последствиям для Луны могли приводить такие “бомбардировки” ее поверхности.

Так, по рассматриваемой гипотезе Луна сформировалась из расплавленного и сильно перегретого вещества внешнего приливного горба разрушенной на пределе Роша первоначально более крупной планеты – Протолуны. Поэтому лунные недра еще долго оставались перегретыми и расплавленными, а в ее центральных областях первичные расплавы, по-видимому, сохраняются и до наших дней. Полное расплавление Луны привело к эффективной гравитационной дифференциации лунного вещества, при которой ее верхний слой толщиной около 80 км оказался сложным наиболее легкими породами – анортозитами ($\rho \approx 2,7 \text{ г/см}^3$). Глубже должны были располагаться слои расплавленного базальта ($\rho \approx 2,9 \text{ г/см}^3$), подстилаемые снизу расплавами ультраосновного (коматиитового) состава, а в центре Луны могли сохраниться еще и остатки железоникелевого ядра. Кроме того, надо учитывать, что у молодой Луны была еще сравнительно тонкая литосфера, однако с течением времени благодаря ее остыванию толщина лунной литосферы постепенно увеличивалась и к настоящему времени она превышает 500 км.

Только за первый миллион лет своего существования Луна отодвинулась от Земли с расстояния около 17 до 63 тыс. км, т.е. на 46 тыс. км. Однако в это время толщина лунной литосферы еще не превышала 6 км, и поэтому все падавшие на нее метеоритные тела приблизительно километровых размеров легко раскалывали и пробивали первозданную лунную литосферу, открывая тем самым доступ подлитосферным расплавам к ее поверхности. Но, как уже отмечалось, верхний слой расплавов тогда состоял из наиболее легких дериватов первичного вещества, т.е. из анортозитовых магм. Именно они тогда и изливались на поверхность Луны.

Дальнейшее удаление Луны от Земли также сопровождалось одновременным и постепенным увеличением мощности лунной литосферы. В результате со временем могли ее раскалывать и пробивать только все более крупные космические тела астероидного размера (в поперечнике более нескольких десятков километров). Большинство же мелких

тел бывшего околоземного спутникового роя оставляли на ее поверхности только следы своего падения, испещряя, подобно оспе, лунную поверхность бесчисленными ударными воронками разного размера.

Большей интенсивности анортозитового магматизма на первых этапах существования Луны способствовало и быстрое изменение формы ее поверхности. Так, вблизи предела Роша форма Луны еще представляла собой существенно вытянутый эллипсоид, длинная (направленная к Земле) ось которого в два раза превышала поперечные размеры спутника. Следовательно, приливные горбы Луны тогда достигали 1300 км! По мере же удаления Луны от Земли ее форма быстро приближалась к сфероидальной, и уже примерно через 200 млн лет амплитуда приливных горбов уменьшилась до 0,5 км. Столь сильное и резкое изменение кривизны лунной поверхности за сравнительно короткое время неизбежно должно было приводить к интенсивному растрескиванию и разламыванию ее молодой литосферы. По этим трещинам и расколам на поверхность Луны тогда в изобилии поступали более легкие подлитосферные расплавы, т.е. все те же анортозитовые магмы. Поэтому на ранних этапах развития Луны, как заметил А. Рингвуд (1979), буквально бушевал анортозитовый магматизм. Судя по изотопным методам определения возраста коровых пород Луны, эти события развивались около 4,6–4,4 млрд лет тому назад.

Приблизительно через 200 млн лет после образования Луна уже удалилась от Земли на расстояние приблизительно 140 тыс. км. К этому времени мощность ее литосферы увеличилась до 85 км и практически весь верхний слой анортозитовых расплавов оказался охлажденным и полностью раскристаллизованным, превратившись тем самым в твердую анортозитовую или так называемую “материковую” кору Луны. В это время около 4,4 млрд лет назад практически полностью прекратился и лунный анортозитовый магматизм, хотя снизу лунная кора еще по-прежнему продолжала подстилаться “магматическим океаном”, но теперь уже только базальтового состава.

Второй импульс лунного магматизма 4,0–3,8 млрд лет назад совпал по времени со вторым периодом ускоренного отодвигания Луны от Земли. На этот раз усиление приливных взаимодействий между планетами, как уже отмечалось выше, было связано только с земными событиями – с возникновением в Земле астеносферы, началом ее тектонической активности и формированием еще мелководных морских бассейнов. Однако химия лунного магматизма на этот раз была уже совсем иной.

Как и в первый период ускоренного расширения лунной орбиты, так и на этот раз, через 600 млн лет после своего образования, Луна в раннем архее (благодаря большей массе) должна была усиленно “выметать” из околоземного пространства еще сохранившиеся до этого времени на внешних околоземных орбитах другие спутники. Но, как уже отмечалось, все наиболее крупные тела околоземного спутникового роя за время, прошедшее с момента образования Луны, благодаря приливным взаимодействиям с Землей также должны были удалиться на периферию этой системы – на расстояния от 170 до 300 тыс. км. Следовательно, в интервале отмеченных расстояний в это время должны были сконцентрироваться и наиболее массивные спутники, и микролуны из околоземного спутникового роя.

Но за время от момента образования Луны до начала раннего архея прошло около 600 млн лет, и за этот период мощность лунной литосферы успела возрасти приблизительно до 150 км. Поэтому пробить такую литосферу уже могли только сравнительно крупные космические тела – спутники с поперечными размерами около сотни километров и соответственно с массами порядка 10^{20} – 10^{21} г. По-видимому, в начале раннего архея помимо Луны по внешним геоцентрическим орбитам вокруг Земли еще вращалось несколько (до 10–12) таких сравнительно массивных спутников.

Падая на Луну, эти массивные спутники пробивали не только анортозитовую кору, но и подстилающий ее слой габбро, открывая тем самым доступ подлитосферным

базальтовым магмам на лунную поверхность. Излияния базальтов из образовавшихся ударных кратеров и оперяющих их разломов как раз и создали привычный нам узор базальтовых покровов лунных “морей”. С внедрениями крупных базальтовых масс в пробитые спутниками бреши анортозитовой коры следует связывать и происхождение так называемых лунных масконов – аномально тяжелых масс под кратерами лунных “морей”. Такие массы с избыточной плотностью на фоне легких анортозитов лунной коры ($\rho \approx 2,7$ г/см³) создаются внедрившимися в кору заметно более плотными базальтами ($\rho \approx 2,9$ г/см³). Судя по абсолютной геохронологии лунных образцов, формирование гигантских ударных кратеров и заполнение их базальтами происходило в период от 4,0 до 3,8 млрд лет тому назад и полностью совпадает по времени с началом тектонической активности Земли, что и следует из рассмотренного здесь механизма образования и эволюции системы Земля–Луна. По-видимому, на совпадение проявлений базальтового магматизма на Луне с началом процесса выделения земной коры (т.е. фактически с началом тектонической активности Земли) впервые обратил внимание и увидел в этом совпадении определенную связь между событиями на Земле и Луне выдающийся российский геолог В.Е. Хаин (1977).

Интересно отметить, что, согласно А. Рингвуду (1979), процесс дифференциации лунного вещества, породивший базальтовые излияния раннеархейского возраста, судя по изотопному составу свинца и рубидий-стронциевым отношениям, происходил не в момент излияния самих базальтов, а значительно раньше – около 4,6 млрд лет назад, т.е. во время формирования самой Луны. Отсюда следует, что базальты лунных морей действительно изливались на ее поверхность благодаря разрушению целостности ее литосферной оболочки и вскрытию “магматического океана”, существовавшего еще с момента формирования самой Луны, как это и вытекает из рассматриваемой гипотезы ее образования.

После второго периода ускоренного отталкивания Луны от Земли ее движение вновь стало более спокойным (см. рис. 3.5). Примерно в это же время, к началу позднего архея, около 3,2 млрд лет назад, в связи с полным исчерпанием “микролун” из спутникового роя Земли прекратилась и активная бомбардировка лунной поверхности бывшими спутниками Земли. С тех пор на Луну, как, впрочем, и на Землю, спорадически падали лишь метеоритные тела, орбиты которых случайно пересекались с нашими двумя планетами. Поэтому около 3,5–3,2 млрд лет назад полностью прекратился и лунный магматизм, а сама Луна превратилась в тектонически мертвую планету.

В заключение этого раздела хотелось бы обратить внимание на два важных обстоятельства, касающихся тектонического развития Земли в катархее и архее. Во-первых, массовые выпадения на лунную поверхность метеоритных тел и даже спутников средних размеров вовсе не означает, что в катархее и раннем архее такой же интенсивной бомбардировке подвергалась и Земля. Как раз наоборот: ведь на Луну выпадали те космические тела из околоземного спутникового роя, которые в силу их приливного взаимодействия с Землей должны были только отодвигаться от нее, но не выпадать на земную поверхность.

Во-вторых, возобновление после длительного перерыва около 600 млн лет повторной бомбардировки лунной поверхности, на этот раз крупными космическими телами, и связанная с этим вспышка базальтового магматизма на Луне четко маркируют переход Земли от тектонически пассивного состояния в катархее к ее активному тектоническому развитию в архее. Фактически базальтовый магматизм на Луне четко маркирует начало тектонической активности Земли.

3.5. Состав и строение первичной Земли

Как уже отмечалось в разделе 3.1, Земля формировалась благодаря гомогенной и холодной аккреции протопланетного газопылевого облака, предварительно прошедшего под влиянием солнечного ветра, светового давления, кратковременного повышения температуры и магнитной сепарации исключительно сильную дифференциацию вещества еще на доаккреционной стадии его развития. В результате такой дифференциации протопланетного вещества в зоне формирования Земли и Луны из первичного облака практически полностью были удалены все газовые компоненты исходного вещества, оно было резко обеднено гидросиликатами, карбонатами и серой, а также заметно обеднено щелочами и некоторыми другими легкоплавкими элементами.

Впервые предложенная О.Ю. Шмидтом (1948) и подробно разработанная В.С. Сафроновым (1969) гипотеза образования Земли, как и других планет Солнечной системы, оказалась на редкость плодотворной не только при объяснении механизмов образования планет, но и при рассмотрении эволюции Земли уже на планетной стадии ее развития. Подчеркнем, что для изучения геологического развития Земли отмеченные работы являются отправными и, безусловно, очень важными, поскольку они определяют начальные условия существования нашей планеты. В частности, для понимания дальнейших путей развития Земли исключительное значение имеют два основных вывода теории планетообразования. Во-первых, молодая Земля сразу же после своего образования была относительно холодным космическим телом и нигде в ее недрах температура не превышала температуру плавления земного вещества. Во-вторых, первичная Земля имела достаточно однородный состав и, следовательно, тогда еще не существовало ни земного ядра, ни земной коры. Кроме того, молодая Земля тогда была лишена гидросферы и плотной атмосферы.

Если принять эти условия за исходные, то дальнейшая эволюция Земли должна полностью определяться исходным составом земного вещества, начальным теплосодержанием нашей планеты и, как мы видели выше, историей ее взаимодействия с Луной. При этом подразумевается, что эндогенные источники энергии, фактически управляющие всем ходом глобального развития Земли (энергия распада радиоактивных элементов и гравитационной дифференциации земного вещества), в конце концов тоже определяются исходным составом Земли. Именно поэтому начнем с состава первичного земного вещества.

Состав первичной Земли. Расчет среднего состава земного вещества по главным петрогенным окислам и элементам можно выполнить, мысленно смешав вещество основных геосфер Земли: мантии, ядра и земной коры. Такой расчет приведен в табл. 2.1. Как видно из нее, первичное вещество Земли представляло собой резко выраженную ультраосновную породу с низким коэффициентом насыщенности кремнеземом (практически таким же, как и у оливина) и высоким относительным содержанием двухвалентной окиси железа. Следовательно, первичное вещество Земли характеризовалось резко выраженным ортосиликатным составом и состояло приблизительно на 75% из оливина ($Mg_{0,62}Fe_{0,38}SiO_4$), на 11% из остальных силикатов и на 13,8% – из камасита $Fe_{0,9}Ni_{0,1}$.

Судя по приведенным расчетам, можно считать, что относительно среднего состава солнечного вещества, а следовательно, и среднего состава планет и метеоритов Солнечной системы Земля несколько обогащена железом и его окислами (приблизительно на 50—60%), существенно обеднена серой (примерно в 10 раз), калием (около 4—5 раз) и другими подвижными элементами, но характеризуется почти средним для Солнечной системы обилием кислорода (по отношению к кремнию).

Содержание в первичном веществе Земли летучих, подвижных и редких (рассеянных) элементов вычислить значительно сложнее. Для этого, к сожалению, часто приходится пользоваться лишь косвенными методами, всегда помня, что найденные на поверхности образцы глубинных земных пород еще в процессе внедрения или

последующих воздействий обычно бывают существенно контаминированы (загрязнены) водой и рассеянными элементами, попадающими в них из внешних геосфер (гидросферы или земной коры). Например, для определения содержания воды и других летучих в мантии приходится полностью браковать все данные по ксенолитам (включениям) глубинных пород в лавах вулканов ввиду неопределенности истории их формирования. По-видимому, для этих целей можно пользоваться только анализами содержаний искомым компонентов в закалочных стеклах свежих базальтов из рифтовых зон срединно-океанических хребтов, да и то лишь после их термической обработки для удаления сорбированных H_2O и CO_2 . Для определения же концентрации калия в Земле приходится привлекать данные по распространенности радиогенного аргона в атмосфере. В соответствующих разделах монографии (раздел 4.2) рассмотрим эти примеры подробнее, здесь же отметим лишь главные выводы такого анализа.

Оказывается, земное вещество по сравнению с углистыми хондритами, близкими по среднему составу к исходному протопланетному веществу, обеднено водой в 200–250 раз; калием в 5–7 раз; углеродом приблизительно в 1000 раз и т.д. Такие же соединения, как метан или аммиак, по-видимому, были практически полностью выметены из области формирования планет земной группы и поэтому вообще не попали на Землю. Дефицит же благородных газов (кроме радиогенного аргона), по оценкам специалистов, достигает 10^{-6} – 10^{-14} . Некоторые летучие элементы и соединения в небольших количествах все же могли попадать на Землю, но только в связанном состоянии: вода – с гидросиликатами, углекислый газ – в виде карбонатов, азот – в составе нитридов и нитратов и т.д. И лишь самые ничтожные количества первичных газов, в том числе и благородных, попадали на Землю, адсорбируясь на поверхности рыхлых и пористых частиц исходного протопланетного вещества.

Строение первичной Земли. Зная состав первичного вещества и с большим основанием предполагая, химическую однородность молодой Земли, уже можно рассчитать распределение плотности в ее недрах, например, по данным ударного сжатия силикатов и железа. Такой расчет был выполнен нами для наиболее вероятного распределения температуры в недрах только что образовавшейся Земли (см. рис. 3.8). Результаты такого расчета приведены в табл. 3.1 и показаны на рис. 2.13. Как видно из приведенных расчетов, в первичной Земле не было никаких границ раздела, кроме зон фазовых переходов на глубинах от 300 до 700 км. В те далекие времена на Земле еще не существовало ни земной коры, ни мантии, ни тем более земного ядра. Все эти геосферы обособились значительно позже – только в архее, а тогда (в катархее) была лишь однородная по составу Земля, расчлененная на зоны только полиморфными минеральными ассоциациями в зависимости от господствующих на данных глубинах давлений. Плотность вещества на поверхности молодой Земли достигала $3,92 \text{ г/см}^3$, а к ее центру она повышалась до $7,2 \text{ г/см}^3$.

Радиус молодой Земли, по-видимому, мало отличался от современной его величины, равной 6371 км. Связано это с тем, что в процессе эволюции Земли на ее размеры одновременно действовали сразу два противоположно направленных фактора. С одной стороны, дифференциация земного вещества, сопровождаемая выделением плотного ядра, увеличением давления в центральных частях Земли и перераспределением ускорения силы тяжести в ее недрах, все это должно было бы приводить к уменьшению объема Земли и ее радиуса на 150 – 200 км. С другой стороны, после дифференциации Земли плотность ее верхних слоев должна была заметно снизиться (с 3,9 до $3,2 \text{ г/см}^3$), а это уменьшало давление в верхней мантии и увеличивало глубину расположения границ главных фазовых переходов в подстилающем ее слое Голицына, что должно было приводить к расширению Земли. Такой же эффект возникал и за счет дополнительного разогрева земных недр приблизительно на $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Поэтому суммарный эффект

расширения от этих двух воздействий также приблизительно равнялся все тем же 150–200 км.

Т а б л и ц а 3.1

Распределения плотности, температуры, давления и ускорения силы тяжести в молодой Земле^{*)}

Глубина, км	Плотность, г/см ³	Температура, К	Давление, кбар	Ускорение силы тяжести, см/с ²	Глубина, км	Плотность, г/см ³	Температура, К	Давление, кбар	Ускорение силы тяжести, см/с ²
0	3,92	260	0	985	2200	6,06	1379	1042	764
200	4,21	1147	82	980	2400	6,17	1378	1133	734
400	4,51	1385	168	973	2600	6,27	1377	1223	703
400	4,63	—”—	—”—	—”—	2800	6,36	1376	1309	670
600	4,89	1457	261	986	3000	6,46	1375	1393	638
670	4,98	1294	285	955	3400	6,63	1373	1548	569
670	5,14	—”—	—”—	—”—	3800	6,78	1371	1688	498
800	5,24	1433	358	941	4200	6,91	1369	1810	425
1000	5,38	1411	456	921	4600	7,0	1367	1912	350
1200	5,50	1400	556	898	5000	7,06	1365	1995	273
1400	5,62	1393	656	874	5400	7,12	1363	2057	196
1600	5,73	1387	754	848	5800	7,16	1361	2097	119
1800	5,83	1384	852	821	6200	7,18	1359	2116	52
2000	5,94	1381	948	793	6360	7,18	1358	2116	0

^{*)} При расчете распределений плотности, ускорения силы тяжести и давления использовалось значение массы Земли $M = 5,977 \cdot 10^{27}$ г, при этом безразмерный момент инерции сферической Земли J оказался равным 0,374.

Поверхностные слои Земли практически в течение всего периода ее формирования состояли только из мелкопористого реголита, постоянно возникавшего за счет оседания тонкодисперсной пыли и конденсации испарявшегося при ударных взрывах вещества падавших на Землю планетезималей. Сорбционная способность такого грунта была исключительно высокой, и он, безусловно, активно поглощал собой все те остатки летучих, которые выделялись при тепловых взрывах планетезималей или захватывались растущей Землей из протопланетного облака (правда, уже практически полностью потерявшего ко времени образования Земли все свои летучие компоненты). Сказанное полностью относится и к таким ныне достаточно распространенным во внешних геосферах летучим, как вода и углекислый газ. В процессе образования Земли вода и углекислый газ, частично освобождавшиеся при испарении падавших на Землю планетезималей, сразу же усиленно связывались с ультраосновным по составу реголитом, например, благодаря реакции серпентинизации



Поскольку протопланетное вещество в зоне формирования Земли уже ранее было существенно обеднено содержанием H_2O и CO_2 (о чем говорилось выше), то такой процесс серпентинизации и другие аналогичные ему реакции гидратации реголита практически полностью поглощали и погребали под новыми наслоениями земного вещества практически все поступающие на Землю количества воды и углекислого газа. Из всех летучих лишь тяжелые благородные газы (Ne, Ar, Kr, и Xe), попадавшие на Землю в исключительно малых количествах, возможно, с солнечным ветром, еще могли сохраняться в газовой фазе протопланетной атмосферы молодой планеты.

Из приведенных теоретических соображений и расчетов вытекает важный геологический вывод: первичная Земля не имела ни гидросферы, ни плотной атмосферы.

Все это появилось значительно позже, приблизительно через 600 млн лет после образования Земли, а в ту далекую эпоху молодая Земля могла обладать лишь сравнительно разреженной атмосферой из азота с небольшой примесью благородных газов. Суммарное давление такой примитивной атмосферы тогда не превышало 0,5–0,6 атм.

3.6. Энергетика и тепловой режим молодой Земли

Распределение температуры в первичной Земле по понятным причинам можно оценить лишь теоретически, исходя из имеющихся представлений о формировании планет Солнечной системы. Такую наиболее вероятную оценку для рассмотренной выше модели образования Земли (благодаря аккреции холодного протопланетного пылевого облака) выполнил В.С. Сафронов (1969).

По этой модели большая часть тепловой энергии растущей Земли генерировалась в ее недрах за счет перехода в тепло кинетической энергии падавших на земную поверхность планетезималей. Помимо этого заметный вклад в энергетику растущей и молодой Земли должны были вносить ее приливные взаимодействия с Протолуной и Луной.

Общая энергия аккреции Земли огромна (см. раздел 4.1), и ее вполне хватило бы не только на полное испарение земного вещества, но и на разогрев возникшей плазмы до 36000 °С. Однако энергия аккреции выделялась главным образом в приповерхностных частях формирующейся планеты, поэтому генерируемое в ее верхних слоях тепло легко терялось с тепловым излучением растущей планеты. При этом, естественно, доля теряемого тепла существенно зависела от скорости аккреции планеты и размеров выпадавших на нее планетезималей. Теория показывает, что одновременно с ростом Протоземли увеличивались размеры планетезималей и энергия их падения на земную поверхность. Благодаря этой закономерности температура в недрах молодой Земли могла несколько повышаться от центра к периферии, но затем, вблизи поверхности, она вновь снижалась за счет более быстрого остывания ее приповерхностных частей. В такой ситуации общий теплоспас молодой Земли, а следовательно, и распределение температуры в ее недрах полностью определялись скоростью роста планеты. Поскольку с тепловым режимом формирования Земли очень тесно связан вопрос о времени выделения земного ядра, а во многих, даже серьезных работах, просто постулируется раннее выделение земного ядра, рассмотрим эту проблему подробнее.

Во всех гипотезах с короткой аккрецией планет (порядка 10 млн лет) получалось, что Земля должна была бы расплавиться еще в процессе образования. Но если бы такое случилось, то у нее, как и у Протолуны, произошла бы быстрая дифференциация вещества, добавившая и свою немалую долю энергии в плавление Земли. В результате в самом начале жизненного пути Земли около 4,6 млрд лет назад у нее выделилось бы плотное железное ядро, сформировался бы расплавленный слой мощной анортозитовой коры, а также произошла бы ранняя дегазация земного вещества с образованием флюидной водно-углекислотной атмосферы.

Но если бы в результате ранней дифференциации земного вещества действительно выделилась бы мощная (до 80 км) и относительно легкая (плотностью 2,7 г/см³) анортозитовая земная кора возрастом 4,6 млрд лет, то она сохранялась бы на Земле вечно. Однако никаких следов такой первичной коры, как и других признаков ранней планетарной катастрофы, на Земле нет. По геологическим же данным, земная кора формировалась постепенно, и только начиная приблизительно с 4,0–3,8 млрд лет назад. Более того, если бы действительно у молодой Земли около 4,6 млрд лет назад выделилось металлическое ядро и образовалась бы мощная анортозитовая кора, то в нее перешла бы и большая часть радиоактивных элементов, а Земля, лишившись всех источников эндогенной энергии, подобно Луне, превратилась бы в тектонически мертвую планету.

Есть и прямые доказательства того, что молодая Земля никогда не плавилась и у нее еще не было плотного металлического ядра. Например, мы уже рассматривали многие отличия геохимии лунных пород от земных, объясняемые именно тем, что Земля не проходила стадию плавления, тогда как родительское тело Луны, т.е. Протолуна, сразу же после образования была полностью расплавлена и прошла дифференциацию с выделением металлического ядра и анортозитовой коры. Но наиболее ярким и неопровержимым свидетельством этого являются изотопные отношения свинца на Луне и Земле. В лунных породах, явно выделившихся после полного расплавления планеты, как уже отмечалось, отношения радиогенных изотопов свинца с атомными весами 206, 207 и 208, образовавшихся за счет распада урана 238 и 235, а также тория 232, к стабильному (первичному) изотопу 204 экстремально велики и достигают соответственно значений 250, 130, 270 и выше, тогда как для земных пород, осредненных в океаническом резервуаре пелагических осадков, эти же отношения равны 19,04, 15,68 и 39,07. Для первичных свинцов (судя по изотопному составу железного метеорита “Каньон Дьябло”, Аризона, США) они еще меньше – 9,50, 10,36 и 29,45. Из приведенных соотношений вытекает, что в лунном веществе во время расплавления Протолуны действительно было потеряно (перешло в протолунное ядро) от 96 до 98% первичного (нерадиогенного) свинца.

Ничем другим, кроме полного расплавления протолунного вещества, ликвации расплавов и переходом сульфидов свинца в ядро этого спутника, такую потерю первичного свинца лунным веществом объяснить не удастся. При этом, железный метеорит “Каньон Дьябло”, в котором изотопы свинца действительно близко соответствуют их первичным отношениям, следует рассматривать как осколок ядра некоего спутника, прошедшего, подобно Протолуне, приливное расплавление, дифференциацию и разрушение еще на стадиях формирования самих планет Солнечной системы.

В противоположность этому земное вещество никогда полностью не плавилось и поэтому никогда не подвергалось быстрой и радикальной дифференциации. Земное ядро же формировалось постепенно и в его состав в равной мере переходили как первичный свинец, так и его радиогенные изотопы, успевшие накопиться ко времени протекания процесса дифференциации земного вещества. Отсюда и промежуточные отношения изотопов свинца на Земле по сравнению с такими же отношениями в железных метеоритах и лунных породах.

Таким образом, анализ изотопных отношений свинца в земных породах, как и некоторые геохимические аномалии лунного вещества, а также многочисленные геологические данные (о которых пойдет речь далее) практически однозначно свидетельствуют о том, что Земля никогда полностью не плавилась и что ее ядро выделялось постепенно в течение всей истории ее геологического развития.

Помимо уже отмеченных геохимических и геологических данных о том, что у молодой Земли еще отсутствовало плотное ядро и поэтому земное вещество тогда не подвергалось коренной дифференциации, приведем и чисто экологические аргументы. При полной дегазации земных недр в атмосферу Земли должно было поступить около $5 \cdot 10^{23}$ г углекислого газа, ныне связанного в карбонатных породах (что подняло бы ее давление приблизительно до 100 атм), а в гидросферу – более $2,5 \cdot 10^{24}$ г воды. В этом случае благодаря парниковому эффекту температура земной поверхности поднялась бы сначала до 400 °С, после чего закипели бы океаны, а общее давление, возникшей флюидной атмосферы поднялось бы еще выше – до 600 атм. В результате на Земле, как и на Венере, установился бы **необратимый** (!) парниковый эффект со средними температурами, стабильно превышающими 550 °С. В этом случае на Земле не было бы ни жидкой фазы воды, ни даже примитивных бактерий. К счастью для нас и всего живого на Земле, этого не произошло.

К таким же выводам приводит и рассматриваемая здесь теория планетообразования, разработанная В.С. Сафроновым (1969) по идеям О.Ю. Шмидта (1948). Согласно его расчетам, время формирования Земли растянулось, по крайней мере, на 100 млн лет, и поэтому ее недра тогда повсеместно оставались холоднее температуры плавления земного вещества. Своего максимума температура молодой Земли достигала на глубинах около 600 – 800 км и поднималась до 1400 – 1500 °С, а к центру она вновь несколько снижалась (рис. 3.8).

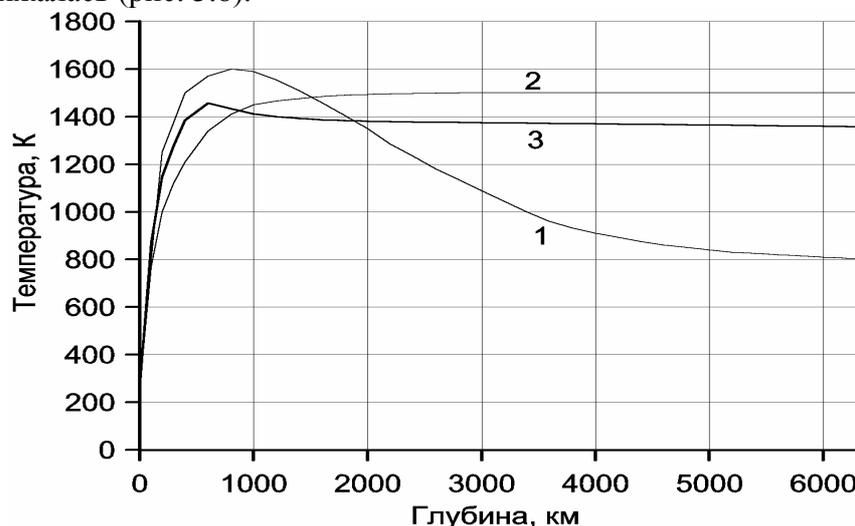


Рис. 3.8. Температура молодой Земли: 1 и 2 предельные распределения начальной температуры Земли: 1 – по В.С. Сафронову (1969) с учетом ударов тел разных размеров, но вначале мелких, а затем и более крупных; 2 – по А.В. Витязеву и др. (1990) с учетом ударов крупных тел в начале процесса аккреции Земли; 3 – принятое распределение начальной температуры Земли, учитывающее как ударное нагревание планеты, так и ее приливное разогревание при захвате и разрушении Протолуны

Температурная зависимость, изображенная на рис. 3.8, по-видимому, правильно отражает общий характер распределения температуры в молодой Земле. Однако при пользовании ею необходимо помнить, что приведенные температурные оценки являются весьма приближенными, поскольку решение этой задачи существенно зависит от нескольких трудноопределимых параметров модели аккреции Земли. Тем не менее, используя расчеты по выделению в земных недрах приливной и радиогенной энергии в катархее и учитывая, что первые расплавы земного вещества появились только в начале архея (около 4,0 млрд лет назад), температурные кривые В.С. Сафронова и А.В. Витязева удалось уточнить и согласовать их с общим энергетическим балансом Земли. Именно такая температурная кривая 3 приведена на рис. 3.8.

3.7. Догеологическое развитие Земли в катархее

На ранних этапах планетарной эволюции Земли ее строение, состав, тепловое состояние и “приливная” тектоника настолько резко отличались от всех последующих режимов геологического развития Земли, что эту уникальную эпоху, продолжавшуюся около 600 млн лет (от момента рождения нашей планеты приблизительно 4,6 млрд лет тому назад до начала раннего архея), следует выделять в качестве самостоятельного подразделения истории Земли. Однако общепринятого термина для ее обозначения в геологической номенклатуре пока еще не существует. Иногда эту эпоху от образования Земли до архея называют лунной. Но как мы старались показать это выше, такой термин к Земле абсолютно не применим. По сути, эту эпоху можно было бы называть доархейской, но значительно раньше в 1893 г., Дж. Седерхольмом был введен термин “катархей”, примерно с тем же смыслом – ниже архея, т.е. до архея. Но во времена Седерхольма понятие архея еще не устоялось, и под ним тогда понимали возраст древнейших

гранитогнейсовых комплексов Скандинавии. Когда же выяснилось, что архей следует распространять во всяком случае до возрастов приблизительно 3,8 млрд лет (включая, например, формацию Исуа в Западной Гренландии), то термин “катархей” иногда стали использовать как синоним нижнего (раннего) архея, что уже семантически неверно. Поэтому нам представляется правомерным сместить понятие “катархей” по временной шкале истории Земли на эпоху от ее рождения до начала архея, т.е. на время приблизительно от 4,6 до 4,0 млрд лет назад.

Ниже будет показано, что после архейского эпизода расплавления верхней мантии и ее перегрева с возникновением в этой геосфере “магматического океана” вся первозданная поверхность Земли вместе с ее первичной и относительно плотной (около $3,9 \text{ г/см}^3$) литосферой очень быстро буквально утонула в расплавах верхней мантии, т.е. опустилась вниз (в мантию). Поэтому перевод греческой приставки ката – вниз, по-видимому, можно понимать как напоминание о том, что все геологические объекты до архейского, т.е. катархейского, возраста опустились вниз, в расплавленную верхнюю мантию Земли, и там полностью исчезли из ее исторической летописи.

Рассмотрим теперь те внешние условия, которые господствовали на поверхности молодой Земли, и специфику приливной тектоники в катархее. Это тем более полезно сделать, поскольку о начальных условиях на Земле бытуют произвольные и умозрительные представления о якобы бурной вулканической и гидротермальной деятельности, происходившей под покровом густой и плотной атмосферы. Такие представления перешли к нам в основном из научно-популярной литературы эпохи господства в геологии контракционной гипотезы, исходившей, как известно, из идеи “горячего” происхождения Земли.

Условия на поверхности молодой Земли действительно были необычными, но как раз в противоположном смысле. В те далекие времена существовали только ландшафты неприветливой, суровой и холодной пустыни с черным небом, яркими немигающими звездами, желтым слабо греющим Солнцем (его светимость была приблизительно на 25—30% ниже современной) и непомерно большим диском Луны, на котором еще не существовало привычных нам “морей”. Рельеф Земли напоминал испещренную кратерами поверхность Луны. Однако из-за сильных и практически непрерывных приливных землетрясений этот рельеф был существенно сглажен и сложен только монотонно темно-серым первичным веществом, перекрытым сверху столь же темным и сравнительно толстым слоем реголита. Никаких других более дифференцированных пород типа базальтов, перидотитов, анортозитов или гранитов тогда на Земле вообще не существовало.

Пустынный пейзаж первозданной Земли временами нарушался сотрясениями взрывов падавших на Землю остаточных планетезималей. Но частота их падения со временем быстро сокращалась. Только в экваториальной зоне молодой Земли в то время еще продолжали выпадать из спутниковых роев недавно разрушенной Протолуны обильные, буквально ливневые потоки мелких каменных и железных обломков. Поэтому земная поверхность в экваториальной зоне еще какое-то время и после образования Луны оставалась раскаленной (во всяком случае в течение сотен или первых тысяч лет).

Хотелось бы еще раз обратить внимание, что никаких вулканов, извергающих на поверхность молодой Земли потоки лавы, фонтаны газов и паров воды в то время не было, как не существовало тогда ни гидросферы, ни плотной атмосферы. Те же очень небольшие количества газов и паров воды, которые выделялись при тепловых взрывах падающих на Землю планетезималей и осколков Протолуны, активно и быстро сорбировались пористым реголитом ультраосновного состава, покрывавшим тогда толстым слоем всю поверхность молодой Земли.

Удивительным тогда было и стремительное движение Солнца: всего за 3 ч оно пересекало небосвод, с тем чтобы еще через 3 ч вновь взойти с востока над безжизненным

горизонтом первозданной Земли. Хотя продолжительность года была такой же, как и сейчас, но состоял он почти из 1500 суток! Движение Луны было более медленным, поскольку она быстро вращалась вокруг Земли в ту же сторону, но фазы Луны менялись буквально на глазах, проходя все стадии всего за 6–8 ч. Месяц в самом начале эволюции системы Земля–Луна также приблизительно равнялся периоду обращения спутника на пределе Роша, т.е. тем же 6 ч, хотя со временем этот период тогда очень быстро возрастал. Удивительными были и кажущиеся размеры Луны, в 300–350 раз превышающие видимую площадь диска современной Луны.

В самом начале своего существования Луна была еще горячей планетой и излучала тепловую энергию в красной части спектра. Поэтому днем и ночью помимо отраженного солнечного света она светилась еще собственным темно-красным светом и в связи с огромными видимыми размерами заметно обогревала земную поверхность. Временами, особенно с восточной стороны лунного диска, вспыхивали ярко светящиеся оранжевым светом пятна изливающейся на лунную поверхность магмы, освобождавшейся из-под тонкой корки застывших пород при падениях на Луну метеоритных тел, выметавшихся тогда Луной из околоземного спутникового роя. Кроме того, весь огромный лунный диск временами как бы пронзался зигзагообразными яркими стрелами – трещинами, возникавшими в тонкой коре лунных пород при быстрых изменениях радиуса кривизны приливных вздутий Луны, стремительно удалявшейся в то время от Земли.

Поразительным было и наличие у Земли диска мелких частиц, вращавшихся вокруг нее на близких орбитах в экваториальной плоскости. Траектории отдельных частиц сливались воедино и создавали иллюзию существования у Земли сплошных полупрозрачных дисков типа колец Сатурна. При определенных углах зрения эти диски отражали солнечный свет, и тогда они казались жесткими, но на самом деле по-прежнему оставались эфемерными, и вскоре все их вещество выпало на Землю (см. рис. 3.2).

Необычным было и наличие у Земли нескольких более мелких, чем Луна спутников – “микролун”, удаленных от Земли на значительно большие расстояния, чем “главная” Луна, но также хорошо видимых с поверхности Земли в отраженном солнечном свете в виде мелких дисков или просто ярких “звездочек”. Всего наиболее крупных спутников из этой серии, по-видимому, было не менее 10–12 (все они в дальнейшем выпали на Луну, образовав на ней крупные залитые базальтами кратеры, называемые сейчас “лунными морями”).

Однако самыми впечатляющими, вероятно, были рои разрушительных и непрерывно сменяющих друг друга землетрясений, вызываемых интенсивными приливными деформациями Земли. Вслед за Луной и вместе с приливными горбами эти землетрясения буквально потрясали первозданный лик Земли. Периодичность приливных землетрясений определялась разностью периодов осевого вращения Земли и орбитального обращения Луны, поэтому она все время менялась. Вначале, когда Луна еще находилась на пределе Роша и угловые скорости вращения Земли и Луны совпадали (случай стационарного вращения планет), приливные вздутия Земли практически не перемещались по ее поверхности, поэтому и землетрясения такого типа должны были отсутствовать. Но как только Луна сошла с предела Роша и стала удаляться от Земли, сразу же возникли и интенсивные приливные землетрясения, дважды потрясавшие земную поверхность при каждом видимом обороте Луны вокруг Земли.

Высота лунных приливов на поверхности Земли обратно пропорциональна третьей степени расстояния между центрами тяжести планет. На пределе Роша центр тяжести Луны отстоял от центра Земли на 17,2 тыс. км (сама же лунная поверхность в то время нависала над земной поверхностью на высоте всего около 7 тыс. км). Поэтому высота лунных приливов на Земле в это время была очень высокой, приблизительно равнялась 1,5 км (на Луне же “земные” приливы тогда достигали 870 км!). Столь высокие приливы при их перемещениях по земной поверхности, естественно, сопровождалась роями

многочисленных и сильных землетрясений, непрерывно сотрясавшими поверхность молодой Земли. Однако в связи с быстрым приливным отталкиванием Луны от Земли (обратно пропорциональным степени 5,5 от расстояния между планетами) в это время уже через 1 млн лет после образования планет, лунные приливы на Земле снизились до 130 м, еще через 10 млн лет их амплитуда уменьшилась до 45 м, а через 100 млн лет – до 15 м. К концу катархея около 4 млрд лет назад, когда Луна находилась приблизительно на расстоянии 168 тыс. км от Земли, лунные приливы уже снизились до 7 м. Для сравнения отметим, что сейчас Луна отстоит от Земли на расстоянии 384,4 тыс. км, а современные приливы твердой Земли вблизи подлунной точки достигают примерно 46 см.

Стремительное отодвигание Луны от Земли в раннем катархее и как следствие этого резкое снижение приливной энергии, рассеиваемой в недрах молодой Земли, спасли ее от перегрева, но и быстро снизили уровень приливной сейсмичности нашей планеты. Так, если предположить, что на возбуждение землетрясений расходовалась только 1/1000 часть приливной энергии, и принять суммарную энергию современных землетрясений равной 10^{25} эрг/год, то оказывается, что энергия приливных землетрясений в самом начале катархея (около 4,6 млрд лет назад) примерно в 17 тыс. раз превосходила энергетический уровень современной сейсмичности Земли. Однако уже через 100 млн лет суммарная интенсивность приливных землетрясений снизилась приблизительно до уровня, лишь в 2,2 раза превышающего современную сейсмичность, а к концу катархея 4 млрд лет назад она уменьшилась еще примерно в 6 раз.

Рассматривая сейсмичность молодой Земли в катархее, важно помнить, что ее природа и характер проявления тогда принципиально отличались от сейсмических характеристик современных землетрясений. Во-первых, приливные землетрясения катархея были только экзогенного происхождения и никак не привязывались к каким-либо фиксированным тектоническим зонам (их тогда просто не существовало на Земле). Во-вторых, эти землетрясения вместе с бегущей приливной волной закономерно перемещались по Земле и ее поверхности со скоростью, определяемой видимым вращением Луны вокруг Земли. Как и у обычных приливов, кульминации землетрясений происходили дважды за каждый оборот Земли относительно Луны. В-третьих, наибольшей интенсивности приливные землетрясения достигали в экваториально-тропическом поясе Земли и минимальной – на ее полюсах.