Записки Санкт-Петербургского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова
1992. Т. 134

УДК 523.12:523.2:525.235

А.А.БАРЕНБАУМ

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА В ЭПОХУ ВЗРЫВА ФАЭТОНА. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛУНЫ

В истории эволюции Солнечной системы выделены две достаточно длительные стадии эволюции, разделенные сравнительно короткой эпохой взрыва Фаэтона 4,7 млрд.лет назад. До этого события массы всех планет, исключая Плутон, подчинялись единой закономерности, которая была унаследована ими еще с протопланетной стадии. В эпоху разрушения Фаэтона большинство планет Солнечной системы претерпело значительные изменения, которые отразились на их массе, строении и составе. В рамках общей схемы предложена гипотеза образования Луны.

Разрушение Фаэтона 4,7 млрд.лет назад [5] было совершенно неординарным событием в истории Солнечной системы, которое во многом повлияло на ход эволюции почти всех планет и, в конечном итоге, придало им современный облик. В истории развития Солнечной системы выделяются, как минимум, две достаточно длительные и вполне самостоятельные стадии, разделенные сравнительно короткой эпохой взрыва Фаэтона.

Цель работы состоит в том, чтобы попытаться вычленить эти стадии и отделить последствия, вызванные разрушением Фаэтона, от тех закономерностей, которые были унаследованы Солнечной системой еще с протопланетной стадии. Особое внимание уделяется процессам формирования внешних и внутренних планет, а также проблеме происхождения Луны. Хотя для решения проблемы Луны существует ряд гипотез [14], ни одна из них полностью не удовлетворяет системе накопленных сегодня экспериментальных фактов [7, 21].

Общий анализ последствий взрыва

Неизбежность катастрофических последствий для Солнечной системы разрушения Фаэтона можно показать следующим расчетом.

Если принять плотность галактических комет в струйных потоках равной ее современному значению $2 \cdot 10^{-12}$ на 1 км^2 в год [3], массу Фаэтона взять примерно в 3 раза больше земной и допустить, что большая часть его фрагментов сразу же после взрыва осталась на орбите, то легко убедиться, что за время нахождения Солнца в струйном потоке (примерно 3 млн.лет) на обломках погибшей планеты должны были испытать разрушение и рассеяние около 10^{12} галактических комет общей массой примерно 10^{30} г. С учетом того, что наиболее активно дробление Фаэтона, вероятно, происходило в течение нескольких периодов попадания Солнца в струйные потоки и что наряду с комет-

ным могло задерживаться разреженное вещество газопылевых облаков, также присутствующих в галактических струях, суммарная масса рассеянного галактического материала, как минимум, на один-два порядка могла превысить массу всех планет Солнечной системы.

Рассеяние в астероидном кольце столь большого количества галактического вещества, наряду с процессами метеоритообразования в самом кольце, должно было стимулировать еще два процесса: массовый выброс из зоны кольца вторичных комет и обломков Фаэтона, интенсивно бомбардировавших поверхность всех планет, и вынос наружу из кольца огромных масс испарявшихся кометных газов и частиц пыли, которые захватывались внешними планетами.

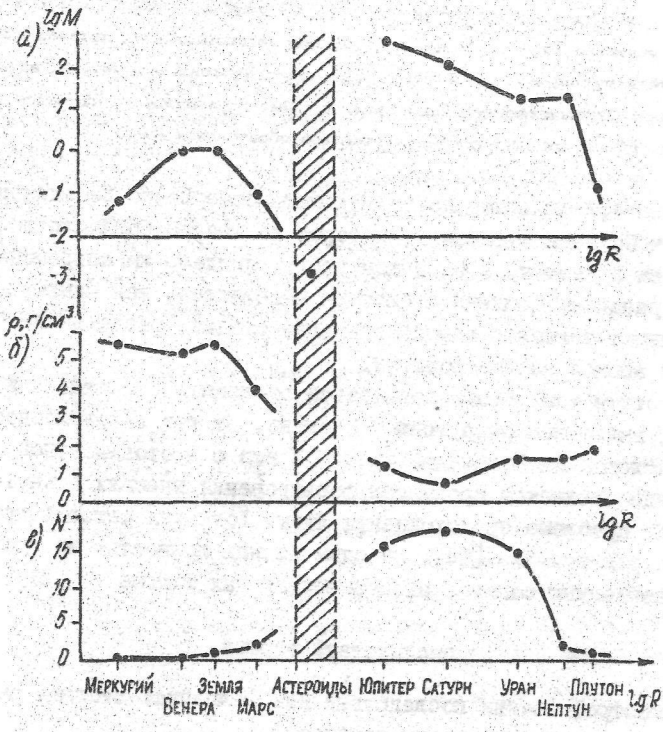


Рис.1. Распределение массы (а), плотности (б) и числа спутников (в) планет Солнечной системы в зависимости от гелиоцентрического расстояния
Заштрихованная область, занятая астероидами

На широкое развитие данных процессов указывает ряд сложившихся к настоящему времени в Солнечной системе фундаментальных закономерностей (рис.I). В первую очередь, это весьма специфический характер изменения с удалением от зоны кольца массы, плотности и состава планет, позволяющий четко разделить планеты на внутренние (земного типа) и внешние (планеты-гиганты). И во-вторых, наличие у планет-гигантов близких по природе спутниковых систем, сходных по строению систем колец и одинаковых (отличающихся лишь количеством наблюдавшихся членов) кометных семейств. Общность происхождения этих образований не вызывает сомнения. Однако „время жизни" околопланетных колец и комет в Солнечной системе несоизмеримо меньше времени существования спутников.

Особенности строения Солнечной системы и разнообразие возрастов ее объектов заставляют полагать, что формирование около Солнца системы планет, их спутников и малых тел происходило, как минимум, в два этапа. На первом возникли сами планеты, а на втором, уже после разрушения Фаэтона, – их спутники, астероиды и кометы.

Этапы эволюции

Изменение масс отдельных планет вследствие взрыва Фаэтона может быть оценено количественно, если воспользоваться параметром «распределенной плотности» [2], определяемым как

$$\rho_i = M_i / R_i^3,$$

где M_i и R_i – соответственно масса i-й планеты и ее удаление от Солнца.

Анализ зависимости $\rho(R)$, построенной для Солнечной системы в двойном логарифмическом масштабе (рис.2), позволяет отделить изменения второго этапа эволюции от закономерностей, сложившихся на первом.

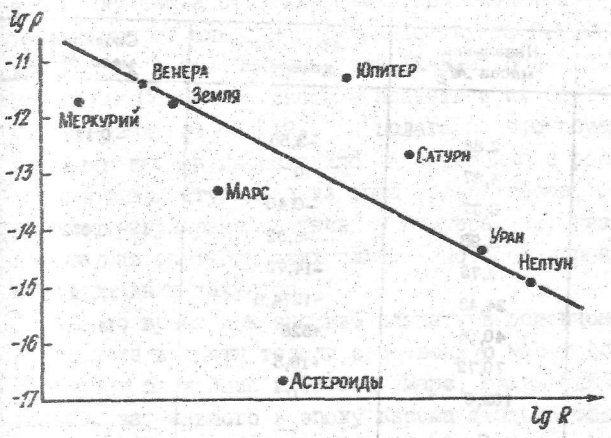


Рис.2. Распределенная плотность вещества Солнечной системы

Разделительной линией служит прямая, проведенная через точки, соответствующие Венере, Земле, Урану и Нептуну. Предполагается, что, в силу достаточно большой удаленности от Фаэтона, эти планеты после его взрыва сравнительно слабо изменили свои массы, поэтому их положения на графике подчиняются степенной зависимости, свойственной распределению плотности вещества в протопланетном диске [6]. В отличие от этих четырех планет все другие планеты Солнечной системы не смогли сохранить свои первоначальные массы, что привело к смещению их положений на графике от указанной линии. Причем отклонение вверх от нее было связано с захватом этими планетами дополнительного вещества – в основном испарявшихся и выбрасывавшихся из зоны кольца кометных газов, – а смещение вниз, наоборот, с потерей ими собственного материала.

Разделительная линия на рис.2 проведена так, чтобы одновременно удовлетворить трем условиям:

постоянству масс Венеры и Нептуна $M_i = M_i'$ до и после взрыва Фаэтона;

степенному распределению плотности вещества в протопланетном диске Солнца (рис.2)

$$\rho(R) \propto R^{-C}, \qquad (1)$$

где значение $C = 2{,}184$ хорошо согласуется с выводами теории, оценивающей этот коэффициент $C \geq 2$ [6];

экспоненциальному уменьшению с удалением от зоны кольца захваченной внешними планетами массы вещества

$$\Delta M_i = M_i' - M_i \propto \exp\left\{-\frac{1}{L}(R_i - R_\Phi)\right\}, \qquad (2)$$

где R_Φ = 2,7 а.е. – радиус орбиты Фаэтона в соответствии с законом Тициуса – Боде; L = 2,9±0,1 а.е. – константа.

Требование (2) введено на основании результатов работы [4], в которой получен вывод о диффузионном характере процесса распространения пыли в пределах пояса астероидных тел.

Массы планет Солнечной системы до и после взрыва Фаэтона, 10^7 г

Планета	Современная масса M_i	Начальная масса M_i	Абсолютное изменение	Соотношение масс M_i'/M_i
Меркурий	0,333	2,88	-2,55	0,116
Венера	4,87	4,87	0	1,0
Земля	5,97	6,37	-0,40	0,937
Марс	0,642	8,96	-8,32	0,072
Фаэтон	0,0042	14,75	-14,75	0,000285
Юпитер	1899	24,43	+1874,6	77,72
Сатурн	568,0	40,06	+528	14,18
Уран	87,2	70,72	+16,5	1,23
Нептун	102	102,0	0	1,0
Плутон	0,66	-	-	-

Согласно интерпретации данных рис.2, до взрыва Фаэтона массы всех планет (см. таблицу), исключая Плутон, подчинялись единой закономерности (I), которая была ими унаследована с протопланетной стадии. Однако в эпоху разрушения Фаэтона большинство планет Солнечной системы претерпело существенные изменения, которые отразились на их массе, составе и строении.

Изменения внешних и внутренних планет

По современным представлениям, все большие планеты являются газожидкими телами, обладающими центральным, не исключено железокаменным, ядром, окруженным ледяной (H_2O, CH_4, NH_3 и др.) оболочкой. Существует ряд адиабатических моделей внутреннего строения планет-гигантов [9, I7, 20], удовлетворяющих известным из наблюдений значениям их масс, радиусов, периодов вращения, а также вторых и четвертых гравитационных моментов. Из этих моделей следует, что ближайшие к астероидному поясу Юпитер и Сатурн почти сплошь состоят из водорода и гелия, а более далекие Уран и в меньшей степени Нептун покрыты оболочками этих газов заметной толщины. С уда-

лением от кольца относительные массы центральных твердых зон планет закономерно увеличиваются от 3–4 % для Юпитера до примерно 97 % для Нептуна [10].

Указанные особенности состава и строения внешних планет получают естественное объяснение, если предположить, что после взрыва Фаэтона эти планеты присоединили к первоначальным массам некоторое количество ΔM_i (см. таблицу) нового космического вещества. Полагая, в соответствии с [9], что у Юпитера общая масса твердой компоненты (ТК-материала), распределенной в теле планеты, составляет примерно $16M_3$, а у Сатурна – $7M_3$, находим, что поступавшее из астероидного пояса вещество в основном состояло из газов и содержало только 1–3 % (в среднем 2 %) нелетучего материала. При захвате вещества такого состава и отложении его нелетучей компоненты в центральной области планет-гигантов массы их ТК-ядер по отношению к массе планет составят: 3,2 % для Юпитера, 9 % для Сатурна и 81,5 % для Урана.

Эти оценки, полученные на основании условия (1), не противоречат результатам более строгих физических расчетов [9]. Вместе с тем они свидетельствуют об ошибочности предположения О.Ю.Шмидта [19] о сходстве составе внутренних планет и материала ТК-ядер больших планет. Сформировавшиеся на периферии Солнечной системы планеты и их спутники в основном сложены льдами замерзших газов [17]. Мы полагаем, что образование спутниковых систем планет-гигантов происходило одновременно с ростом самих планет в результате захвата поступавших из зоны кольца газов, обломков Фаэтона и комет. Крупные регулярные спутники Юпитера, Сатурна и Урана возникли первыми, все другие спутники этих планет, по всей вероятности, стали результатом более поздних захватов.

В то время как внешние планеты в основном набирали новое вещество, внутренние планеты теряли собственную массу (см. таблицу). Наиболее сильно пострадал ближайший к Фаэтону Марс, оказавшийся в зоне досягаемости тел кольца, занимавшего в эпоху взрыва Фаэтона объем несомненно больший, чем сейчас. Если предположить, что 4,7 млрд.лет назад Марс имел внутреннее строение, сходное с Фаэтоном [5], и принять во внимание, что масса металлического ядра этой планеты составляет 5–7 % ее полной массы, приходим к выводу, что Марс мог быть основательно разрушен, но позднее восстановился из своих же обломков с участием новых порций космического вещества. Этим объясняются малые размеры планеты и ее ядра, а также высокая мощность, железистость и жесткость марсианской мантии [10] при более низком, чем у других внутренних планет, общем содержании Fe.

Сильные повреждения получил Меркурий, а все другие более близкие к Солнцу планеты, если таковые до взрыва Ф этони в Солнечной системе имелись, были разрушены вследствие концентрации около Солнца перигелиев орбит вторичных тел, которые в больших количествах выбрасывались тогда из астероидного кольца. Здесь эти тела имели максимальную скорость и, следовательно, обладали наибольшей разрушительной силой. Сопоставление данных таблицы с результатами работы [5] позволяет заключить, что к настоящему времени Меркурий лишился большей части мантийных оболочек и теперь на 80 % представлен своим металлическим ядром.

Взрыв Фаэтона не прошел бесследно и для Земли, потерявшей примерно 6,3 % своей массы. Поскольку 4,7 млрд.лет назад наша планета уже существовала и, подобно Фаэтону, была дифференцирована на отдельные оболочки, „утерянный" Землей материал должен был состоять из вещества ее коры и верхней мантии. Если это вещество „вернуть" и равномерно распределить по поверхности Земли, приняв его плотность равной средней плотности Луны 3,34 г/см^3, то радиус нашей планеты увеличился бы на $\Delta r_З = 235$ км.

Начальный радиус Земли можно определить другим образом, опираясь на сходство внутреннего строения нашей планеты и Венеры [I7]. При большом подобии обеих планет средняя плотность вещества Венеры $\rho_В = 5{,}23$ г/см^3 заметно меньше, чем у Земли (5,52 г/см^3) [I]. Более высокая плотность земного вещества объясняется отсутствием у нашей планеты определенной части ее легкого поверхностного материала. Не потеряй Земля это вещество, ее средняя плотность, надо полагать, была бы равна $\rho_В$. Исходя из этих соображений, радиус Земли до взрыва Фаэтона найдем как $r_З = (3M_З/4\pi\rho_В)^{1/3} =$ = 6625 км. Сопоставляя полученное значение с современным радиусом Земли $r'_З = 6371$ км [I], приходим к оценке толщины утерянного слоя в 251 км. Обе оценки $\Delta r_З$ практически совпадают.

Происхождение Луны

Привлекая механизм высокоскоростного удара [I5], можно утверждать, что основная масса оторванного от Земли материала была представлена твердыми обломками пород, скорости v которых, вероятнее всего, подчинялись степенному распределению

$$N(v) \propto v^{-\gamma}. \qquad (3)$$

При этом какая-то часть обломков пород была неизбежно потеряна нашей планетой, другая – вынесена на околоземную орбиту, а третья – вернулась назад и упала на поверхность Земли.

Для объяснения природы Луны и некоторых черт геологического строения Земли необходимо допустить, что вещество, оказавшееся на околоземной орбите, сравнительно быстро (за время 10^7 лет [6]) смогло аккумулироваться в единое тело массой $M_Л = 7{,}35 \cdot 10^{25}$ г (примерно 1,15 $\%M_З$), ставшее близким спутником нашей планеты.

На образование Луны таким способом из твердых обломков коры и мантии Земли однозначно указывают многие ее свойства и среди них [7, I7, 2I]:

тождественный изотопный состав вещества обеих планет;

бо́льшая, чем у Земли, мощность коры;

низкое в целом по Луне содержание Fe при его более высоком, по сравнению с Землей, содержании в лунной мантии;

значительное обеднение однотипных с земными лунных пород летучими и сидерофильными элементами и обогащение их литофильными;

сильная неравновесность фигуры Луны, свидетельствующая, что ее тело никогда не находилось в полностью расплавленном состоянии.

Условием образования у Земли спутника является требование аккумуляции вещества в пределах ее полости Роша радиусом $R_* = R_З M_З^{2/5} \approx 9{,}3 \cdot 10^5$ км, которому отвечает скорость выброса земного материала

$$v_* = \sqrt{GM_З\left(\frac{2}{r_З} - \frac{1}{R_*}\right)}. \qquad (4)$$

В силу несопоставимости R_* и $r_З$ для Земли величина v_* очень близка ко второй «космической» скорости, определяемой первым членом в подкоренном выражении (4). Если допустить, что весь захваченный на околоземную орбиту материал вошел в состав Луны, то с учетом данных таблицы можем записать

$$\Delta M_З = \int_{v_1}^{\infty} N(v)\,dv = 0{,}4 \cdot 10^{27} \text{ г};$$
$$M_Л = \int_{v_1}^{v_2} N(v)\,dv = 7{,}35 \cdot 10^{25} \text{ г}, \qquad (5)$$

где v_1 и v_2 – первая и вторая космические скорости для Земли.

Из решения системы (5) находим значение показателя $\gamma = 1{,}59$.

Рассмотрим отрыв земного вещества с энергетической точки зрения. Оценим энергию $W_Л$, запасенную в обломках пород на околоземной орбите, а также энергию $W_З$ обломков, вернувшихся обратно на Землю. На основании (5) имеем

$$W_Л \approx 1/2 \int_{v_1}^{v_2} v^2 N(v)\,dv = 3{,}3 \cdot 10^{30} \text{ Дж};$$
$$W_З \approx 1/2 \int_{0}^{v_1} v^2 N(v)\,dv = 5{,}4 \cdot 10^{30} \text{ Дж}. \qquad (6)$$

Полная энергия, заключенная в бомбардировавших Землю телах, таким образом, была порядка 10^{31} Дж. Ее носителями могли быть не только крупные фрагменты Фаэтона, но и мелкие его обломки, которые при взрыве приобретали сильно вытянутые (эксцентриситет $e \approx 1$) орбиты и потом, спустя тысячи и миллионы лет, подобно современным долгопериодическим кометам [3], возвращались в Солнечную систему. Их скорость встречи с Землей исчислялась $v \approx 25 \cdot \sqrt{(1+e)/(1-e)}$ и могла достигать многих сотен километров в секунду.

Сопоставление значения $W_Л$ с энергией гравитационной связи Луны ($1{,}2 \cdot 10^{29}$ Дж) и ее теплосодержанием в состоянии полного плавления ($1{,}6 \cdot 10^{29}$ Дж [8]) показывает, что этой энергии более чем достаточно для образования у Земли спутника лунной массы и его значительного разогрева. Принимая, что при импактных событиях на плавление пород расходуется примерно 1–2 % энергии ударника и учитывая быстрое образование Луны, приходим к выводу, что энергий $W_З$ и $W_Л$ вполне хватало, чтобы расплавить верхний слой пород обеих планет на многие километры. У Земли эта зона не превышала 100 км, а у Луны могла составить несколько сотен километров.

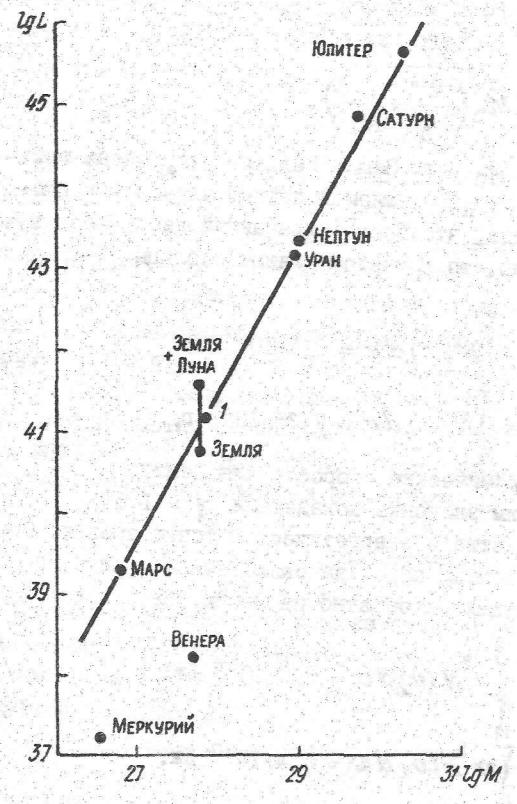


Рис.3. Связь момента импульсе осевого вращения планет с их массой
Линия соответствует зависимости (7). Точка „1" определяет значение предполагаемого момента импульса Земли до отрыва вещества

Немаловажным следствием бомбардировки Земли космическими телами стала передача ей дополнительного момента вращения (рис.3). Следуя Г.Макдональду [21], будем полагать, что у планет, не испытавших на постаккреционной стадии внешнего воздействия, момент импульса осевого вращения L и масса тесно коррелируют:

$$L_i \propto M_i^{1,8}. \qquad (7)$$

Соотношение (7) позволяет оценить момент и период вращения Земли до отрыва от нее вещества. Согласно (7) их вероятные значения соответственно $L_З \approx 1{,}6 \cdot 10^{41}$ г·см^2/с и $T_З \approx$ $\approx$ 10 ч.

Современный момент импульса системы Земля – Луна $L_{З+Л} = 3{,}5 \cdot 10^{41}$ г·см^2/с [1] определенно указывает на привнос в систему дополнительного момента. В качестве некоторой оценки привнесенного момента воспользуемся значением $\Delta L = L'_{З+Л} - L_З = 1{,}9 \cdot 10^{41}$ г·см^2/с, полученным в предположении, что момент $L_{З+Л}$ был приобретен системой в эпоху образования Луны и с тех пор существенно не менялся.

Мы видим, что векторная величина ΔL соизмерима с первоначальным моментом собственного вращения Земли $L_З$ и, вероятно, была близка к нему по направлению. В противном случае, например при перпендикулярности обоих векторов, это привело бы к изменению наклона земной оси, как у Урана, а при их антиколлиниарности изменило бы направление вращения Земли на противоположное и замедлило бы ее угловую скорость, как у Венеры.

Радиус лунной орбиты $R_Л$ на начальный момент времени найдем в предположении, что при отрыве вещества от Земли произошло перераспределение момента ΔL между материалом, оставшимся на орбите и образовавшим Луну, и материалом, выпавшим обратно на Землю. На основании (5) максимальный приобретенный Луной момент импульса

$$L_Л = \alpha \Delta L = 2{,}5 \cdot 10^{40} \text{ г·см}^2/\text{с}, \qquad (8$$

где $\alpha = \int_{v_2}^{\infty} vN(v)dv \Big/ \int_{v_1}^{\infty} vN(v)dv = 0{,}134$, тогда средний радиус орбиты $R_Л = L_Л^2 / v_1 G M_З M_Л^2 \approx 3 \cdot 10^3$ км.

Начальный радиус орбиты спутника можно оценить другим способом, если учесть, что аккумуляция Луны была энергетически выгодна на „синхронной" орбите, определяемой равенством угловых скоростей орбитального движения Луны и осевого вращения Земли. Полагая, как и ранее, момент $L_{З+Л}$ сохраняющимся, для эпохи образования Луны запишем

$$0{,}33(r'_З)^2 M'_З + (R^\circ_Л)^2 M_Л = L'_{З+Л} \frac{T_0}{2\pi}, \qquad (9)$$

где $R^\circ_Л$ – радиус синхронной орбиты; T_0 – синхронный период вращения.

Дополняя равенство (9) соотношением между $R^\circ_Л$ и T°, вытекающим из третьего закона Кеплера, и подставляя в него численные значения параметров, приходим к уравнению

$$0{,}961x^4 - 3{,}48x^3 + 0{,}586 = 0; \quad x = (T^\circ)^{1/3}. \qquad (10)$$

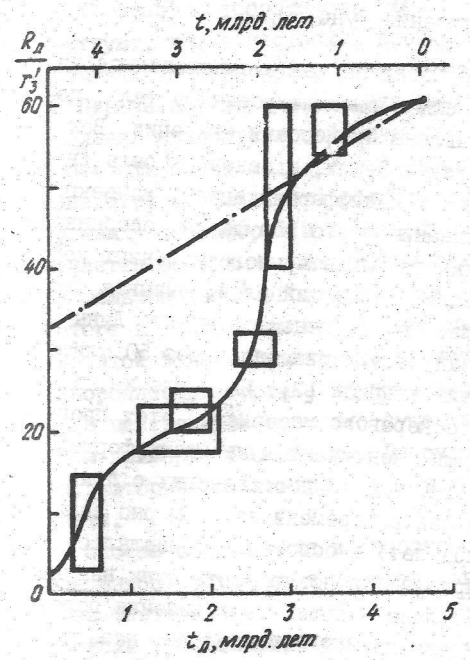


Рис.4. Изменение расстояния Луна – Земля в абсолютном $t_Д$ и геологическом t времени (по А.Биндеру)

Эмпирическая кривая проведена по разным фактическим данным (прямоугольники). Точкой обозначено современное расстояние до Луны, равное 60,3 земным радиусам. Наклон пунктирной линии соответствует современной скорости удаления Луны 3,8 см/год по результатам лазерных измерений [10]

Решением уравнения (10) находим $T^\circ = 0{,}41$ суток и $R_Л = 1{,}4 \cdot 10^4$ км, что вполне согласуется с предыдущей оценкой. Таким образом, отрыв от Земли вещества должен был сопровождаться резким увеличением угловой скорости вращения нашей планеты.

Дальнейшее поведение системы Земля – Луна хорошо известно [21]: после образования Луны эксцентриситет ее орбиты быстро уменьшается, а сама она стремится переместиться в плоскость вращения Земли. Одновременно за счет диссипативных процессов происходит замедление вращения планеты и увеличение радиуса орбиты спутника.

Используя различные эмпирические данные, А.Биндер попытался восстановить характер изменения расстояния между Луной и Землей во времени (рис.4). Из его построений следует, что в прошлом скорость удаления Луны сильно варьировала и, значит, момент системы $L_{З+Л}$ не сохранялся. Наибо-

лее резкий скачок величины $L_{З+Л}$ отмечается в интервале 2-3 млрд.лет назад, что могло быть связано с падением на одну из планет крупного космического тела. В первый миллиард лет Луна, по крайней мере, трижды испытывала подобные удары, которые становились причиной излияния магм и приводили к изменению направления ее магнитной оси [I2].

Наиболее важным следствием формирования Луны на малом расстоянии ($R_Л \sim 2r_З$) от Земли из вещества последней является сильно выраженная асимметрия строения и форм рельефа обеих планет. У Луны это, в частности, проявилось в смещении примерно на 3 км ее центра тяжести относительно геометрического центра в направлении Земли и в более тонком слое коры на постоянно обращенной к Земле стороне [8]. А у Земли асимметрия рельефа связана с отсутствием значительной части ее коры и находит отражение в существовании океанического Тихоокеанского полушария, по-видимому, никогда не покрывавшегося корой континентального типа [I6].

Эволюция и строение Луны

Согласно развиваемой гипотезе, Луна возникла как скомпонованное из отдельных блоков пород в целом холодное и слабо сцементированное тело, поверхность которого была полностью расплавлена процессами аккреции. Вся последующая геологическая эволюция Луны, как и Земли, в основном была связана с остыванием этого расплавленного слоя и с дифференциацией, конвекцией и отвердением его вещества. Процесс остывания часто нарушался, особенно в первый миллиард лет, падением на поверхность планеты многочисленных космических тел, которые дробили и перемешивали твердеющий слой, вызывая явления локального магматизма и метаморфизма. Тем не менее остывание Луны шло столь быстро, что уже 4,65 млрд.лет назад, т.е. примерно через 50 млн.лет после взрыва Фаэтона, ее поверхность была твердой [7]. На Земле же, в силу больших размеров и нехватки тугоплавкого корового материала, этот процесс происходил медленнее, так что ядра будущих континентов начинают формироваться только 3,8-3,5 млрд.лет назад [II]. Анализ доставленных с Луны образцов пород показывает, что состав ее лав во времени закономерно менялся [I8]. Если в ранний период (4,6-3,9 млрд.лет) в основном выплавлялась анортозитовая кора, то примерно 3,8-3,6 млрд.лет на поверхность Луны начинают поступать богатые титаном ($TiO_2 > 8$ %) лавы - продукты плавления пород на глубинах около I00 км, а позднее, в интервале 3,4-3,I млрд.лет назад, изливавшиеся расплавы главным образом поднимаются с глубин 200-400 км и характеризуются низким содержанием титана. На рубеже примерно 2,6 млрд.лет происходит новый всплеск базальтового магматизма с излиянием среднетитанистых лав [II]. В последнем случае на поверхность, по-видимому, поступали расплавы вещества с еще больших глубин, в меньшей степени затронутые процессами дифференциации.

Согласно результатам геофизических исследований [8, I4], к настоящему времени поверхностный слой Луны полностью остыл и дифференцирован. Верхняя его часть сложена полевошпатовой корой мощностью около 50 км на полюсах,

70–80 км на обращенной к Земле стороне и примерно 150 км на обратной стороне Луны. Вещество коры, возможно, меняется от анортозитового наверху до более габбрового внизу. Ниже, до отметки 300 км, залегают мантийные породы оливиново-пироксенового состава (80–85 % фаялита). С глубиной в них отмечается некоторое увеличение содержания железа и железо-магниевого отношения.

Рубеж в 300 км отделяет некогда полностью расплавленную внешнюю зону Луны от внутренней более холодной части. Ниже этой границы, по мнению Г.Латема и др. [13], залегают породы исходного состава, слабо измененные дифференциацией. Интервал глубин 200–500 км характеризуется аномально низким электрическим сопротивлением пород (около 10^4 Ом·м). Допускается [21], что их высокая электропроводность обусловлена повышенным содержанием железа. Аналогичный низкоомный слой в интервале 40–180 км существует и у Земли. Образование под зоной полного плавления пород такого слоя мы связываем [5] с миграцией вниз расплава сульфида железа, обладающего большой подвижностью и низкой температурой отвердевания. Высокая вязкость ($\eta \gtrsim 10^{24}$ пуаз) и добротность ($Q \gtrsim 3000$) пород внешних оболочек Луны свидетельствуют, что в настоящее время вещество ее литосферы находится при субсолидусных температурах.

Первые признаки плавления вещества – сильное поглощение поперечных и ослабление продольных сейсмических волн, резкое уменьшение вязкости и добротности пород и др. – у Луны появляются, начиная с глубины около 800 км. По аналогии с Землей эта область получила название лунной астеносферы. Граница между литосферой и астеносферой (800–1100 км) у Луны сильно размыта и отмечается большими градиентами физических характеристик [8]. К ней приурочено большинство очагов приливных (глубокофокусных) лунотрясений, которые тяготеют к нескольким поясам сейсмичности сложного глубинного профиля. Наличие этой зоны и физические свойства ее пород мы объясняем изначальной неоднородностью состава земного вещества, аккумулировавшегося в Луну.

В центре Луны возможно существование жидкого металлического ядра радиусом примерно 160–260 км. Вероятнее всего, оно состоит из расплавов троилита, который по ослабленным зонам между блоками пород поступал к центру планеты.

Способ образования и особенности строения Луны позволяют глубже понять современное состояние и характер эволюции нашей собственной планеты после взрыва Фаэтона.

Если предположить, что вещество, из которого аккумулировалась Луна, достаточно хорошо перемешивалось, то состав пород ее 300-километрового ранее расплавленного слоя должен отвечать среднему составу материала (без летучих), оторвавшегося от Земли. Поскольку после остывания и дифференциации этот слой лунных пород на 1/3 по объему оказался представлен веществом корового состава и на 2/3 мантийного, очевидно, в той же пропорции терялось и земное вещество. Поэтому из около 240 км толщи пород, потерянных Землей в результате бомбардировки ее поверхности космическими телами, примерно 80 км составлял материал ее коры. Отсюда приходим к выводу, что до

разрушения наша планета, по-видимому, была покрыта весьма толстым слоем коры, по составу и мощности близким к современной коре Луны.

Вследствие взрыва Фаэтона бо́льшая часть первичной коры была Землей утеряна, а та, что осталась, полностью расплавилась и смешалась с мантийным веществом. Таким образом, современная кора Земли, так же как Луны, – это продукт дифференциации некогда расплавленных пород поверхностного слоя планеты. Однако в отличие от Луны на Земле этот расплавленный слой до сих пор не остыл и находится в состоянии продолжающейся дифференциации и конвективного перемешивания. Масса земного корового вещества, вероятно, составляет I/4–I/6 своего первоначального значения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аллен К.У. *Астрофизические величины.* М.: Мир, 1977.

2. Альвен Х., Аррениус Г. Эволюция Солнечной системы. М.: Мир, 1979.

3. Баренбаум А.А. Новые представления о происхождении комет и их взаимодействиях с объектами Солнечной системы // Кометный циркуляр. Киев: Изд-во Киев.гос.ун-та, 1990. № 418.

4. Баренбаум А.А. О природе *C*-астероидов и углистых хондритов // Кометный циркуляр. Киев: Изд-во Киев.гос.ун-та, 1990. № 419.

5. Баренбаум А.А. Происхождение астероидов и метеоритов (новая космогоническая концепция) // См. наст. сб.

6. Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы. *Происхождение и ранняя эволюция.* М.: Наука, 1990.

7. Вуд Дж. Происхождение Луны // Спутники планет. М.: Мир, 1980.

8. Галкин И.Н. Геофизика Луны. М.: Наука, 1978.

9. Гудкова Т.В., Жарков В.Н., Леонтьев В.В. Модели Урана и Нептуна с частично перемешанными оболочками // Астроном. вестник. 1988. Т. 22, № 1. Модели Юпитера и Сатурна с двухслойной молекулярной оболочкой // Астроном. вестник. 1988. Т. 22, № 3.

10. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983.

11. Макаренко Г.Ф. Вулканические моря Земли и Луны. М.: Недра, 1983.

12. Ранкорн С.К. Древнее магнитное поле Луны // В мире науки. 1988. № 2.

13. Результаты пассивного сейсмического эксперимента по программе „Аполлон" / Г.Латем, И.Накамура, Дж. Дорман и др. // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975.

14. Рускол Е.Л. Модели строения и происхождения Луны // Астроном. вестник. 1991. Т. 25, № 4.

15. Ударные кратеры на Луне и планетах. М.: Наука, 1983.

16. Удинцев Г.Б. Тихий океан. Геоморфология и тектоника дна Тихого океана. М.: Наука, 1972.

17. Хаббард У. Внутреннее строение планет. М.: Мир, 1987.

18. Хейс Дж., Уолкер Д. Изверженные лунные породы // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975.

19. Шмидт О.Ю. Четыре лекции о теории происхождения Земли. М.: Изд-во АН СССР, 1957.

20. Юпитер: Т.1. Происхождение и внутреннее строение. Спутники. М.: Мир, 1978.

21. Юри Г., Макдональд Г. Возникновение и история Луны // Физика и астрономия Луны. М.: Мир, 1973.