

МОДЕЛЬ АККУМУЛЯЦИИ ЛУНЫ, СОВМЕСТИМАЯ С ДАННЫМИ О СОСТАВЕ И ВОЗРАСТЕ ЛУННЫХ ПОРОД

Е. Л. РУСКОЛ

Институт Физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР, г. Москва, СССР.

(Поступила 18 Июл, 1972 г.)

Аннотация. Дается краткий обзор современных данных о составе и возрасте лунных пород, на основе которых Вудом, и другими был сделан вывод о необходимости раннего разогревания Луны с поверхности. Высказываются критические замечания по поводу гипотезы Вуда о повсеместной поверхностной магматической дифференциации Луны около 4.5×10^9 лет назад, давшей на месте континентов застывший анортозитовый "плот". Отмечается необходимость раннего разогревания недр Луны в связи с тем, что выплавление морских базальтов в эпоху около 3.5×10^9 лет назад требует начальной температуры Луны около 1000К, т.е. ее разогревания в процессе аккумуляции. Если бы Луна аккумуляровалась только из мелких тел, то ее начальная температура не превышала бы 300К. Предлагается дальнейшее развитие модели аккумуляции Луны в околоземном рою которая включает как первый этап образование системы из нескольких крупных спутников Земли, которые впоследствии сблизилась и объединились в одну Луну. Исходя из законов роста тел в окрестности планеты оценивается максимальное число спутников с различными массами. Проводится сравнение теоретически оцененного числа и расположения спутников Земли с наблюдаемыми системами спутников у других планет. Оценивается продолжительность приливной эволюции орбит крупных спутников Земли, которая должна была завершиться до образования наблюдаемого сейчас на Луне рельефа.

С учетом данных о возрасте экскавации бассейна наиболее крупного на Луне круглого Моря Дождей (около 3.9×10^6), которая должна была произойти вследствие столкновения с небольшим спутником Земли (радиус около 150 км), можно сделать вывод, что наиболее вероятное число крупных спутников Земли – протолун, было не более 2 или 3, а их первоначальные орбиты располагались в пределах 20–25 радиусов Земли; их слияние произошло более 4×10^9 лет назад. Оценивается выделение энергии при столкновении нескольких крупных спутников. Поскольку на разрушение и излучение в пространство уходит сравнительно небольшая доля этой энергии, а основная ее часть идет на нагревание, можно считать, что столкновение двух – трех крупных протолун, даже при минимальной относительной скорости, способно разогреть недра Луны в среднем до 1000К, что и требуется для дальнейшей термической эволюции, согласующейся с данными наблюдений.

1. Данные в пользу раннего разогревания Луны

В настоящее время накоплено очень много данных о химическом и минералогическом составе и возрасте лунных пород. Обсудим те из них, которые существенно зависят от ранней термической истории Луны и, следовательно, от способа ее аккумуляции.

Небольшая примесь плагиоклазовых частичек в тонкой фракции лунных образцов, собранных экипажем 'Аполлона 11' в Море Спокойствия, привела к предположению об анортозитовом т.е. по преимуществу плагиоклазовом составе поверхности лунных континентов [1]. Отсюда вытекало, что континенты – это продукт повсеместной магматической дифференциации Луны на очень раннем этапе, поскольку считалось, что континенты практически так же стары,

как и сама Луна, имеющая возраст 4.5×10^9 лет [2], [3]. Гипотеза об анортозитах казалась согласующейся со многими фактами. В самом деле, анортозит более светлый, чем базальты морей; более легкий (плотность 2.7 г см^{-3} по сравнению с 3.3 г см^{-3} для морских базальтов); наиболее низкоплавкий из всех фракций базальта; преобладающий в нем плагиоклаз в ходе дифференциации обогащается европием, что может объяснить относительное обеднение этим элементом морских базальтов. Гипотеза об анортозитах не противоречила измерению элементного состава вещества проделанного на станции 'Сервейор 7' в окрестности кратера Тихо; ее можно было бы согласовать также с существованием масконов на морях [4].

Вывод о том, что поверхность всех континентов представляла некогда расплавленный анортозитовый 'плот' толщиной около 10 км, плавающий на том же слое из более тугоплавких компонентов базальта, приводил к своеобразной термической истории Луны, составленной из двух циклов разогревания и остывания. Обзор см. в [5]. В самом начале получался разогрев поверхности до 1300К с расплавлением до глубины в десятки километров, затем ее быстрое охлаждение: континентальная кора в отвердевшем состоянии должна была успеть предельно густо покрыться кратерами еще до наступления второго теплового цикла. Второй цикл должен был разогреть до плавления недр Луны примерно через 10^9 лет после ее образования и привести к излияниям морских базальтов (их возрасты кристаллизации: $3.6-3.7 \times 10^9$ лет в Море Спокойствия в районе кратера Сабин; 3.4×10^9 лет в Море Изобилия и $3.2-3.3 \times 10^9$ лет в

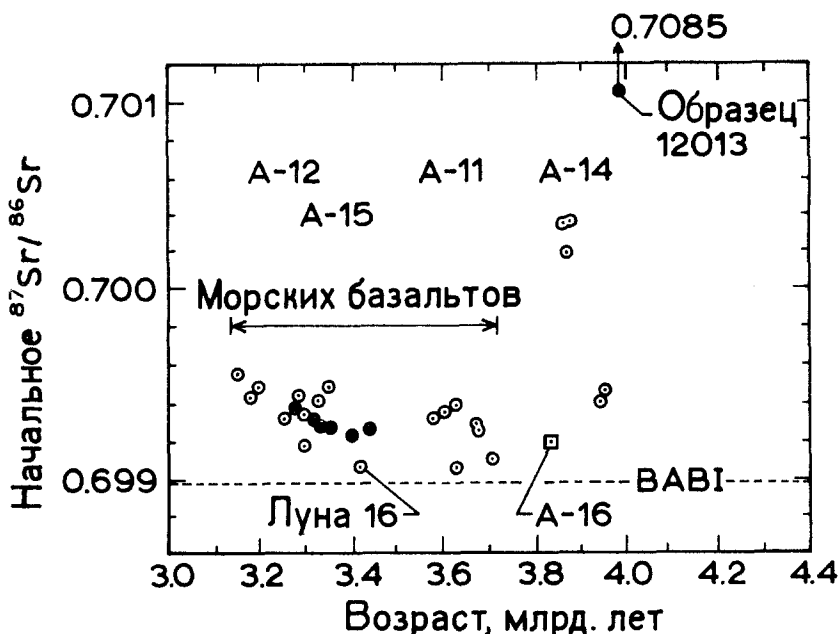


Рис. 1. Сводка данных о возрастах лунных базальтов, определенных Rb-Sr методом, согласно [6-7,25].

Океане Бурь возле кратера Лансберг, таков же возраст лавы Моря Дождей в районе Апеннин (Рис. 1) [6, 7, 25]. Раннегорасплавления недр Луны требует также предположение о существовании в прошлом у Луны магнитного поля, связанного с конвекцией в жидком металлическом ядре (внутреннее динамо). К этому предположению с необходимостью приводят данные об остаточной намагниченности лунных образцов. К современному моменту недр должны были остынуть по крайней мере до температуры 800 К, чтобы соответствовать картине, даваемой электромагнитными измерениями [8].

Для объяснения раннего разогревания поверхности Луны привлекались гипотезы о мощной и длительной солнечной вспышке [9], о крайне быстрой аккумуляции Луны из небольших частиц, когда их потенциальная энергия не успевает переизлучаться в пространство и дает значительный разогрев поверхности [1], о наличии оптически плотной первичной атмосферы на Луне и о приливном разогреве поверхностных частей Луны в эпоху ее тесной близости с Землей [10]. Неудивительно, что все эти гипотезы высказаны только в качественной форме: количественная оценка привела бы к явным преувеличениям действовавших факторов.

Новейшие данные о Луне, повидимому, не подтверждают гипотезы о повсеместной кристалло-жидкой дифференциации лунной поверхности. Подробное исследование куска плагиоклаза 15415, доставленного 'Аполлоном 15' из предгорий Апеннин, приводит к сомнениям в такой дифференциации, а также в том, что плагиоклаз уместно называть "породой сотворения" ('genesis rock') [11]. Далее. Сейсмический разрез верхнего слоя Луны до глубины 80 км в районе Фра Мауро показывает сходство скоростей сейсмических волн со скоростью в анортозитах лишь для глубин от 25 км и ниже, до 65 км. Верхний слой от 2 до 25 км можно скорее уподобить морским базальтам, а самый верхний – 1–2 км – слою раздробленной породы. [12]. Интересно отметить, что определяемый рубидиево-стронциевым методом возраст брекчий из района Фра Мауро, образованных по всей очевидности при ударной экскавации бассейна Моря Дождей, оказался меньше ожидаемого для континентов, а именно, $3,85\text{--}3,95 \times 10^9$ лет [6]. Это означает, что бомбардировка Луны крупными телами длилась по крайней мере $0,7 \times 10^9$ лет после ее аккумуляции. При ударах же столь крупных тел, как планетезималь Моря Дождей (ее радиус, повидимому, превышал 150 км), могли создаваться весьма обширные местные очаги плавления, ответственные за некоторую часть процессов дифференциации пород. Это согласуется с тем фактом, что базальты, взятые из разных точек, не могут быть извержениями из какого-то единого очага. Более того, из-за сложности наблюдаемой на поверхности картины пока еще невозможно воссоздать прообраз лунного вещества, давшего все наблюдаемые разновидности базальтов. Единственной (пока) общей особенностью всех базальтов является их обеднение летучими и низкоплавкими и обогащение тугоплавкими элементами, открытое впервые у пород с Моря Спокойствия [13].

Новейшие данные, полученные из анализов вещества, доставленного 'Луной

20°, показывают, что более светлое континентальное вещество действительно богато платоклазом [14]. Тем не менее в свете данных [11–12] можно усомниться в существовании жидкого анортозитового ‘плота’, плававшего на всей первичной лунной поверхности.* И все же необходимость значительного раннего разо-

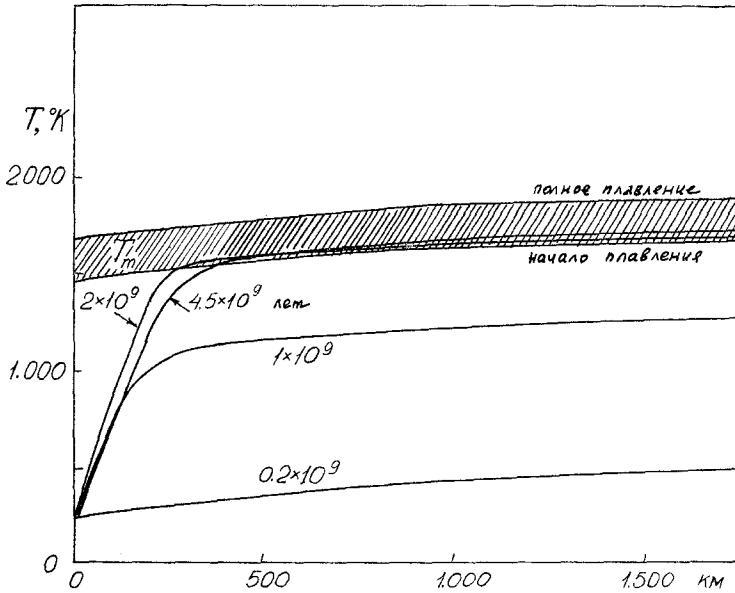


Рис. 2. Термическая история Луны с низкой (230 К) начальной температурой, при современном содержании $U = 2 \times 10^{-8} \text{ г г}^{-1}$; $Th = 8 \times 10^{-8} \text{ г г}^{-1}$; $K = 8 \times 10^{-4} \text{ г г}^{-1}$, согласно [15].

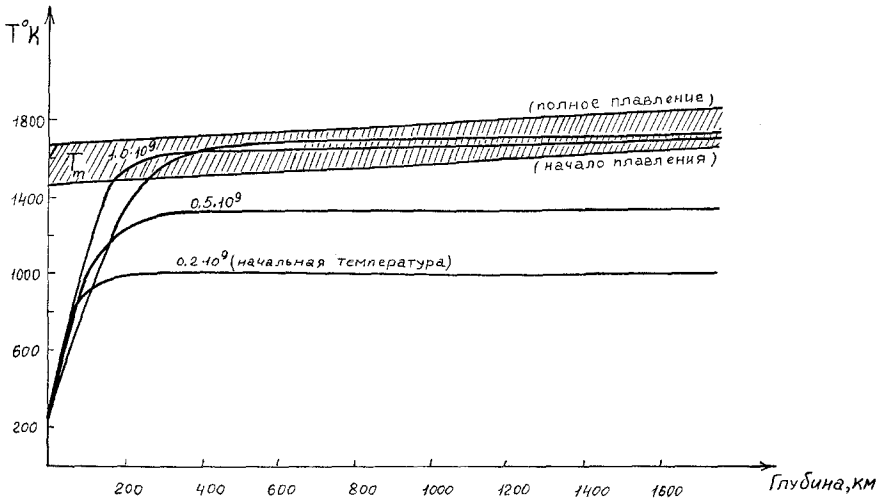


Рис. 3. Термическая история Луны с высокой начальной температурой недр (085 К) и температурой на поверхности 230 К при тех же обилиях радиоактивных элементов, как на Рис. 2, согласно С. В. Маевой.

*См р. 188.

гревания Луны (хотя и не обязательно до расплавления) остается. Это связано со сроком второго теплового цикла – разогревания лунных недр, который необходим для выплавления морских базальтов и для обеспечения раннего магнитного поля Луны. Еще до прямого освоения Луны были проведены детальные расчеты термической истории для ее моделей, содержащих близкие к хондритовым обилия долгоживущих радиоактивных элементов U, Th K^{40} [15]. Из этих расчетов вытекало, что если пренебречь вкладом гравитационной энергии при аккумуляции Луны и соответственно принимать низкую ($\lesssim 500$ K) температуру недр Луны, в момент образования, то расплавление недр происходит только $2\text{--}2.5 \times 10^9$ лет спустя. Для плавления через 1×10^9 лет после образования, нужна начальная температура около 1000 K (Рис. 2, 3). Данная оценка едва ли сильно изменится, если учесть отклонение реальных обилий р-а. элементов в Луне от хондритовой модели, т.к. несколько повышенное содержание урана и тория скомпенсируется пониженным содержанием калия.

Итак, надо искать модель аккумуляции Луны, которая приводила бы к начальной температуре около 1000 K у большей части вещества ее недр. Это даст нужный возраст морским базальтам и достаточно толстую, ≈ 500 км холодную оболочку к настоящему времени. С учетом конвективного охлаждения тела, оболочка может быть и толще. Что же касается природы континентальной коры, то пока она только начинает исследоваться прямыми методами, и можно лишь высказывать о ней предположения. Вероятно, строение континентов намного сложнее, чем застывший анортозитовый ‘плот’.

Нам представляется, что предположение о первичном цикле расплавления всей лунной поверхности вообще является спорным. При наличии температуры 1000 K на сравнительно небольшой глубине под поверхностью, можно получить локальные расплавления повсюду на континентах, где на поверхность попадают крупные кратерообразующие тела [16]. Поэтому мы будем исходить из одного цикла разогревания Луны, в духе работы [15], но с условием достаточно высокой начальной температуры.

2. Раннее разогревание Луны при ее аккумуляции в околоземном спутниковом рое

Если принять, что (а) начальная температура недр Луны была близка к 1000 K и (б) Луна образовалась в околоземном спутниковом рое, который пополнялся веществом в течение всего времени активного роста Земли, т.е. 10^8 лет [17], мы тем самым наложим условия на способ ее аккумуляции. Естественнее всего искать причину раннего нагрева Луны в высвобождении гравитационной энергии слагавших ее частей. Потенциальная энергия однородной сферической Луны равна $-\frac{3}{5}(G\mu_0^2/r_c)$. Если бы вся энергия мгновенно выделилась при аккумуляции, то при теплоемкости вещества Луны около 10^3 дж кг^{-1} град $^{-1}$, вся Луна в среднем нагрелась бы до 1700 K. Но так как образование Луны длилось продолжительное время, то ‘гравитационный’ нагрев должен быть меньше за счет

излучения энергии с поверхности ее растущего зародыша. Формулы для подсчета начальной температуры планет, растущих за счет выпадения на них частиц 'с бесконечности' впервые выведены в [18]. Для оценки же начальной температуры Луны, растущей как единое тело, можно воспользоваться аналогичной, но более простой формулой из работы [19]:

$$\rho \frac{G\mu(r)}{r} \frac{dr}{dt} = \sigma(T^4 - T_{\text{равнов.}}^4). \quad (1)$$

Здесь ρ – плотность планеты, $\mu(r)$ и r – ее текущие масса и радиус, T – температура поверхности, разогреваемой ударами, $T_{\text{равнов.}}$ – температура черного тела на орбите планеты. Если проинтегрировать это соотношение, считая правую часть не зависящей от времени, то можно убедиться, что при характерном времени роста Луны 10^8 лет, определяемом темпом вычерпывания вещества в зоне питания Земли, температура T практически не поднимается выше $T_{\text{равнов.}}$, которую следует брать примерно равной 270 К. Для того, чтобы T составляло в среднем 1000 К, время роста должно быть 2×10^3 лет, что крайне мало вероятно из-за краткости этого промежутка по сравнению с временем 10^8 лет. Следовательно, рост Луны в околоземном рое из единственного зародыша (протолуны) не дает требуемой высокой начальной температуры, пункты (а) и (б) в этом случае несовместимы.

Пункты (а) и (б) можно согласовать, если предположить существование не одной, а нескольких крупных протолун. Давно уже отмечалось то обстоятельство, что система Земля-Луна представляет аномалию среди других планет. Как правило, планеты имеют по несколько спутников, общая масса которых не превышает нескольких десятитысячных от массы планеты. В системе Земля-Луна самое высокое отношение μ/M , наиболее значительное приливное взаимодействие и наибольшее (среди массивных спутников) расстояние спутника по отношению к радиусу планеты.

Предположим, что в пределах современной лунной орбиты в прошлом образовались несколько (от 2 до 4) спутников с массами μ_i и суммарной массой приблизительно равной μ_0 , которые отодвигаясь из-за приливного трения, слились в одну Луну. Слияние столь крупных тел представляет удар со значительной скоростью, определяемой их гравитационным взаимодействием. Сумма энергии удара E_i и энергии перестройки E_r двух масс, μ_1 и μ_2 , которая в основном переходит в тепло, может быть оценена из следующих соображений. Полная энергия системы из двух однородных сферических масс μ_1 и μ_2 , находящихся вначале на бесконечно большом расстоянии, в покое по отношению друг к другу, равна лишь сумме их потенциальных энергий как шаров:

$$E_{12} = U_{10} + U_{20} = -\frac{3}{5} \frac{G\mu_1^2}{r_1} - \frac{3}{5} \frac{G\mu_2^2}{r_2}. \quad (2)$$

При соударении, разрушении и слиянии в один однородный шар с массой

$\mu_1 + \mu_2$ кинетическая энергия относительного движения и перестройки масс тратится на разрушение, нагревание и излучение с поверхности. Полная энергия вновь образованного шара равна

$$E = -\frac{3}{5} \frac{G(\mu_1 + \mu_2)^2}{r}. \quad (3)$$

Разность E_{12} и E и представляет искомую сумму энергии $E_i + E_r$:

$$E_i + E_r = \frac{3}{5} \left[\frac{G(\mu_1 + \mu_2)^2}{r} - \frac{G\mu_1^2}{r_1} - \frac{G\mu_2^2}{r_2} \right]. \quad (4)$$

Сюда должна еще прибавляться кинетическая энергия относительного движения тел 'на бесконечности', если она не равна нулю. Соударение тел с массами около $\frac{1}{2}$ – $\frac{1}{3}$ массы Луны происходит со скоростью около 2 км сек^{-1} , тогда как для разрушения каменных тел достаточно удара со скоростью порядка 0.2 км сек^{-1} . Потери энергии на излучение при столкновении двух луноподобных масс невелики, так как время удара и схлопывания менее часа. Мы можем принять, что сумма $E_i + E_r$ в основном тратится на нагревание всей массы.

При $\mu_1 = \mu_2 = \mu_c/2$, $E_i + E_r = 0.37 |E|$. Соответствующее повышение температуры составляет около 600° . В случае, когда происходит сначала слияние массы $\mu_1 = \mu_c/3$ с равной ей массой μ_2 , а затем к ним присоединяется масса μ_3 , также равная $\mu_c/3$, и тепло не успевает уйти, повышение температуры составляет около 900° . Если принять за начальную температуру тел ее равновесное значение около 300 К , то в результате слияния крупных протолун можно в принципе получить температуру недр Луны 900 К и выше. В этом случае пункты (а) и (б) согласуются.

Перейдем теперь к оценке возможного числа крупных протолун, образующихся возле растущей Земли.

3. Максимальное и наиболее вероятное число крупных спутников у растущей Земли

Максимальное число крупных спутников Земли можно оценить, зная ширину тех кольцевых зон роя, где эти спутники доминировали над остальными телами, в предположении, что орбиты самих спутников были круговыми. По аналогии с тем как это принималось Сафроновым для зон питания растущих планет [20], мы можем считать, что ширина зоны пропорциональна среднему эксцентриситету орбит питающих частиц:

$$\Delta l = 2e \cdot l, \quad (5)$$

где l – радиус круговой орбиты спутника. При наличии эксцентриситета орбиты спутника, зона питания должна быть шире.

Эксцентриситеты, как и наклоны орбит питающих частиц связаны с возмуще-

ниями от спутника массы μ и радиуса a :

$$e \approx i \approx \frac{v}{v_c},$$

где

$$v = \sqrt{\frac{G\mu}{\theta a}}, \quad v_c = \sqrt{\frac{Gm}{l}},$$

отсюда

$$\Delta l = 2 \sqrt{\frac{\mu}{\theta m a}} \cdot l^{3/2}. \quad (6)$$

На Рис. 4 показана зависимость Δl от l для 4 случаев систем спутников с одинаковыми массами: $\mu = \frac{1}{10}\mu_c$; $\frac{1}{5}\mu_c$; $\frac{1}{3}\mu_c$; и $\frac{1}{2}\mu_c$, при $\theta = 3$, в пространстве, ограниченной современной лунной орбитой. Мы видим, что с удалением от Земли ширина зон питания быстро растет.

Расположение спутников в своих зонах зависит от концентрации вещества к центру роя. Его можно оценить для спутников, у которых в процессе роста приливное взаимодействие с центральным телом несущественно. Введем, как

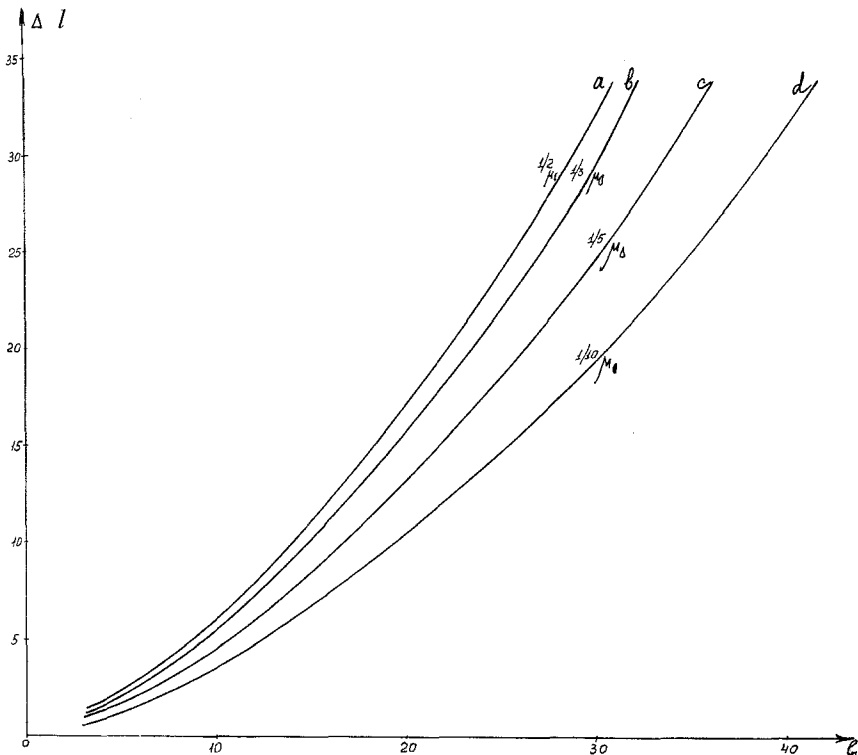


Рис. 4. Зависимость ширины зон питания спутников от их расстояния от Земли; (a) $\mu = \frac{1}{2}\mu_c$; (b) $\mu = \frac{1}{3}\mu_c$; (c) $\mu = \frac{1}{5}\mu_c$; (d) $\mu = \frac{1}{10}\mu_c$.

и ранее [21] некую эффективную поверхностную плотность роя σ , которая является интегралом по времени от фактической поверхностной плотности роя на данном расстоянии. Пусть σ распределяется в рое по закону:

$$\sigma \sim l^{-q} \quad (7)$$

тогда масса вещества, заключенного в кольцевой зоне с границами l_1 и l_2 будет:

$$\mu_s = \int_{l_1}^{l_2} 2\pi\sigma l \, dl = \frac{\text{const}}{2-q} (l_2^{2-q} - l_1^{2-q}),$$

а суммарный геоцентрический момент вещества зоны:

$$K_s = \sqrt{Gm} \int_{l_1}^{l_2} \sqrt{l} \, d\mu = \frac{\text{const} \sqrt{Gm}}{\frac{5}{2}-q} (l_2^{5/2-q} - l_1^{5/2-q}).$$

Последний определяет расстояние l_s образовавшегося в зоне спутника:

$$K_\mu = \mu_s \sqrt{Gm l_s} = K_s,$$

где μ_s – масса спутника. Отсюда

$$\sqrt{l_s} = \frac{(2-q)(l_2^{5/2-q} - l_1^{5/2-q})}{(\frac{5}{2}-q)(l_2^{2-q} - l_1^{2-q})} \quad \text{при } q \neq 2 \text{ и } q \neq 2.5 \quad (8)$$

и

$$\sqrt{l_s} = \frac{\sqrt{l_2} - \sqrt{l_1}}{\ln(l_2/l_1)} \quad \text{при } q = 2; \quad \sqrt{l_s} = \frac{\ln(l_2/l_1)}{2\left(\frac{1}{\sqrt{l_1}} - \frac{1}{\sqrt{l_2}}\right)} \quad \text{при } q = 2.5. \quad (8a)$$

При $q < 2$ на результирующее расстояние l_s больше влияет внешний край зоны. При $q > 2$ – внутренний край. При $q = 2$ мы получаем l_s , близкое к геометрической середине зоны. В [21] отмечено, что удовлетворительное согласие с современным моментом системы Земля-Луна получается, если принять, что поверхностная плотность только что захваченного вещества удовлетворяет соотношению:

$$\sigma_0 \sim l^{-b}, \quad (9)$$

где $1 \lesssim b \lesssim 2.5$. Переход захваченных частиц на круговые орбиты с прямым направлением движения означает уменьшение среднего расстояния частицы с l_0 , на котором она начинает обращаться вокруг Земли, до расстояния l , по формуле

$$l_0^2 \omega_c = \sqrt{Gm l}, \quad (10)$$

откуда $l = \text{const} \cdot l_0^4$. При такой ‘перестройке’ роя его плотность меняется по закону:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{4} \left(\frac{l_0}{l}\right)^2.$$

Подставляя сюда l_0 из (10), имеем:

$$\sigma \sim \sigma_0 l^{-3/2} \sim l^{-b-3/2}, \quad q = b + \frac{3}{2}. \quad (11)$$

Отметим, что стягивание роя, которое вызывается приростом массы Земли, не меняет степени концентрации, т.к. при этом все расстояния частиц сокращаются в одно и то же число раз. Из (9) и (11) следует:

$$2.5 \lesssim q \lesssim 4. \quad (12)$$

При таких значениях q положение спутника в своей зоне близко к внутренней границе l_1 . Это означает, что самая близкая к Земле протолуна могла находиться в непосредственной близости от предела Роша ($2.89 R$ для жидкого спутника и около 2.8 для твердого с радиусом $\gtrsim 10^3$ км). Округляя, можем положить расстояние протолуны № 1 равным $3 R$. Далее, пользуясь соотношением (6) для ширины зон питания протолун, можно найти последовательность расстояний следующих протолун, имеющих соприкасающиеся зоны питания. В пределах сферы действия Земли можно поместить не более 7 протолун с массами $\frac{1}{2}\mu_c$, или 9 с массами $\frac{1}{3}\mu_c$ или не более 10 с массами $\frac{1}{5}\mu_c$, или не более 11 с массами $\frac{1}{6}\mu_c$. В пределах современной лунной орбиты можно поместить соответственно 6, 7, 8 и 9 протолун с выбранными массами. Число таких протолун следует считать максимальным по двум причинам: мы пренебрегли эксцентриситетами орбит спутников и их приливным отодвиганием в процессе роста.

Сравним эти формальные системы с реальными кратными системами небесных тел. Для этого можно воспользоваться диаграммой, составленной

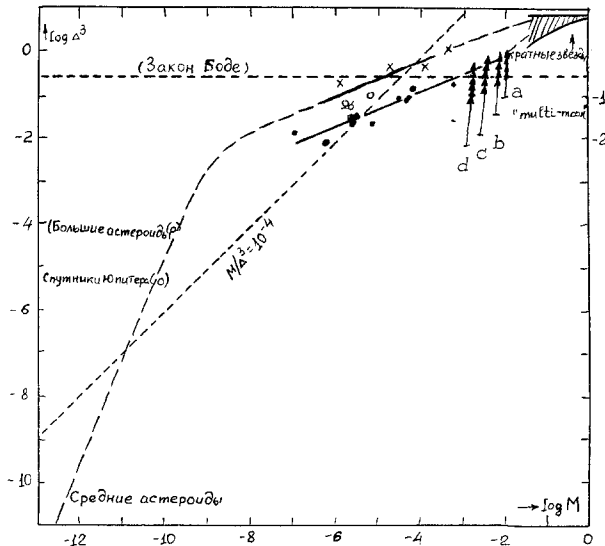


Рис. 5. Зависимость масса-расстояние для наблюдаемых кратных систем, по Кейперу [22]; a, b, c, d – кратные системы спутников Земли с массами, указанными на Рис. 4.

Кейпером в 1949г. для всех наблюдаемых кратных систем [22]. На Рис. 5, заимствованном из этой работы, отложены значения массы (μ) против куба расстояния (Δ^3) в логарифмической шкале, где μ – средняя масса двух соседних спутников μ_1 и μ_2 , выраженная в единицах массы центрального тела; Δ – расстояние между их центрами в единицах среднего расстояния до планет:

$$\Delta = \frac{l_2 - l_1}{\frac{1}{2}(l_2 + l_1)}.$$

Если построить единую (очень грубую) зависимость для всех тел Солнечной системы, начиная от небольших астероидов и кончая большими планетами, то на графике Кейпера она изобразится прямой, соответствующей

$$\mu/\Delta^3 = 10^{-4}.$$

Но если исключить астероиды и нерегулярные спутники Юпитера, то окажется, что большая часть планет и спутников удовлетворяет соотношению

$$\log \mu = 2.5 \log \Delta^3 - A,$$

где $A = 1.8$ для планет (спутников) сравнимой массы и 3.6 для планет (спутников) сильно различающихся масс. Полоса для соответствующего интервала значений A образует на диаграмме последовательность, на продолжение которой в правом верхнем углу попадают также кратные звезды.

Закону Бодде на диаграмме Кейпера соответствует горизонтальная прямая линия, которая значительно хуже изображает наблюдаемые расстояния. Модели систем протолун с соприкасающимися зонами питания не попадают на приведенную последовательность, причем дальше всего от нее оказываются самые ближние протолуны. Для сходства с реальными системами потребовалось бы либо очень существенное уменьшение масс спутников (на 3 порядка) либо сравнительно небольшое (в 2–3 раза) увеличение расстояний между ними. Поэтому если взять протолуны “через одну”, то их системы вплотную придвинутся к основной последовательности на диаграмме Кейпера как раз в той ее части (нижней), которая относится к системам спутников сравнимой массы (Рис. 5). Таким путем мы могли бы получить систему из 4 протолун с массами по $\frac{1}{2}\mu_c$ и расстояниями 3; 6; 14,5; 50 R или же 4 протолуны с массами по $\frac{1}{3}\mu_c$ и с расстояниями 3, 5,5, 11,5, 31 R или же 5 протолун с массами по $\frac{1}{5}\mu_c$ и расстояниями 3, 5, 9, 22, и 60 R или 6 протолун с массами по $\frac{1}{10}\mu_c$ на орбитах с радиусами 3, 4,5, 7, 12, 25 и немногим более 60 R . Мы видим, что есть много возможностей построить систему спутников Земли, которая располагается внутри современной лунной орбиты, с суммарной массой, близкой к массе Луны, и в динамическом отношении подобной реальным спутниковым системам.

Покажем теперь, что приливное взаимодействие спутников – протолун с Землей могло за короткое время привести к их взаимному сближению и, по всей очевидности, объединению.

Известно, что для каждого из нескольких спутников, вызывающих приливы

на планете, имеет значение только его взаимодействие с приливными горбами, вызванными им самим, а перекрестное приливное влияние спутников друг на друга мало. Поэтому можно рассматривать приливную эволюцию орбит спутников по отдельности. Для спутника с массой μ на круговой орбите, лежащей в плоскости экватора планеты, время приливного отодвигания с расстояния l_1 на l_2 пропорционально $(\mu/\delta) (l_2^{13/2} - l_1^{13/2})$, где δ – угол запаздывания прилива от спутника на планете [23, 24]. В таблице I приведены сроки приливного отодвигания с l_1 на l_2 спутников Земли с массами $\frac{1}{3}\mu_c$ и μ_c для современного значения $\delta = 2^\circ 16$ [24].

ТАБЛИЦА I

Сроки отодвигания спутников Земли с расстояния l_1 на расстояние l_2 вследствие приливного трения с постоянным углом запаздывания приливов

l_1	l_2	$\Delta t(\mu = \mu_c/3)$	$\Delta t(\mu = \mu_c)$
5 R	10 R	4.5×10^4 лет	1.5×10^4 лет
10	20	4×10^6	1.3×10^6
20	40	3×10^8	1×10^8
40	60	4.5×10^9	1.5×10^9
Всего:		4.8×10^9 лет	1.6×10^9 лет

Видно, что при современном значении δ продолжительность отодвигания близких протолун ($l \leq 30 R$) мала по сравнению с временем аккумуляции Земли и околоземного роя (10^8 лет). Поэтому гипотеза о нескольких протолунах и не может дать того удлинения приливной шкалы времени в несколько раз, которое требуется из-за чрезмерной краткости ($< 2 \times 10^9$ лет) приливного отодвигания одной целой Луны (см. последний столбец табл. I). В работе Мак Доналда [24] выход из противоречия с краткой шкалой предполагался именно в существовании в прошлом у Земли системы 3–4 протолун. Однако ранее нами [23] была предложена иная гипотеза, позволяющая избежать трудности, а именно постепенный рост со временем угла запаздывания для Земли, который позволяет построить приливную эволюцию системы Земля – Луна за время 4.5×10^9 лет. При этом для ранних этапов существования Земли следует принимать значения δ_0 в несколько десятков раз меньшие, чем δ совр. Соответствующие значения Δt для близких расстояний ($l \leq 30 R$) должны соответственно увеличиться в десятки раз, но и при этом они остаются не более нескольких сотен миллионов лет. Ввиду краткости приливной эволюции орбит самых близких протолун, вероятно, следует уменьшить их предполагаемое число по крайней мере на I в каждом из примеров а, б, в, г.

Дальнейшее ограничение на возможное количество протолун вытекает из того обстоятельства, что последнее слияние крупных масс должно было произойти до образования наблюдаемого сейчас на Луне рельефа. Самым крупным по масштабу образованием, несомненно, ударного происхождения, является на

Лице Море Дождей. Его строение указывает на то, что ударившее Луну тело, имело радиус порядка 150 км пришло с околоземной орбиты. Если принимать, что возраст впадины Моря Дождей 3.9×10^9 лет [6], то пользуясь расчетами приливного отодвигания Луны [23] для меняющегося по времени значения δ , можно оценить, что Луна в момент 3.9×10^9 лет назад была на расстоянии не более 30 R от Земли. Отсюда следует, что на расстояниях около 30 R и далее от Земли могли существовать лишь небольшие спутники типа астероидов, а орбита последней крупной протолуны должна была лежать в пределах 20–25 R . Это ограничивает возможное число крупных протолун с массами $\frac{1}{2}$ – $\frac{1}{3}\mu_{\oplus}$ всего лишь до 3 или даже до 2. В разделе 2 мы показали, что при слиянии 2–3 подобных тел обеспечивается необходимая начальная высокая температура недр Луны. Динамическая история системы протолун нуждается в дополнительном исследовании.

Добавление при корректуре. В настоящее время не подтверждается предположение о возрасте континентов 4.5×10^9 лет, так как определение возраста куска плагиоклаза с места посадки 'Аполлона-16' дало возраст 3.84×10^9 лет [25].

Литература

- [1] Wood, J. A., Dickey, J. S., Jr., Marvin, U. B., and Powell, B. N.: 1970, 'The Lunar Anorthosites', *Science* **167**, 602.
- [2] Wetherill, G. W.: 1971, 'Of Time and the Moon', *Science* **173**, 383–392.
- [3] Wasserburg, G. J.: 1972, *Proc. Nice Symposium on the Models of the Origin of Solar System*.
- [4] Kaula, W. M.: 1971, 'Interpretation of the Lunar Gravitational Field', *Phys. Earth Planetary Interiors* **4**, 185–192.
- [5] Hinners, N. W.: 1971, 'The New Moon: A View', *Rev. Geophys. Space Phys.* **9**, 447–522.
- [6] Papanastassiou, D. A. and Wasserburg, G. J.: 1971, 'Rb–Sr Ages of Igneous Rocks from the A-14 Mission and the Age of the Fra Mauro Formation', *Earth Planetary Sci. Letters* **12**, 36–48.
- [7] Papanastassiou, D. A. and Wasserburg, G. J.: 1972, 'Rb–Sr Age of a Luna 16 Basalt and the Model Age of Lunar Soils', *Earth Planetary Sci. Letters* **13**, 368–374.
- [8] Sonett, C. P., Dyal, P., Parkin, C. W., Colburn, D. S., Mihalov, J. D., and Smith, B. F.: 1971, 'Whole Body Response of the Moon to Electromagnetic Induction by the Solar Wind', *Science* **172**, 256–258.
- [9] Bell, P. R.: 1971, 'An Origin of the Moon Compatible with Its Present Condition', *Phys. Earth Planetary Interiors* **4**, 215–217.
- [10] Левин, Б.Ю.: 1971, 'Развитие Луны в свете современных данных', *Природа*, № 12, 2–9.
- [11] Steele, J. M. and Smith, I. V.: 1971, 'Mineralogy of Apollo 15415. 'Genesis Rock' Source of Anorthosite on Moon', *Nature* **234**, 138–140.
- [12] Toksöz, M. N., Press, F., Anderson, K., and Dainty, A.: 1972, 'Velocity Structure and Properties of the Lunar Crust', *3rd Lunar Science Conf. Abstracts*, Houston, Texas, 670.
- [13] Ganapathy, R., Keays, R., Laul, J. C., and Anders, E.: 1970, 'Trace Elements in Apollo 11 Lunar Rocks: Implications for Meteorite Influx and Origin of Moon', *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.* **2**, 1117–1142.
- [14] Виноградов, А. П.: 1972, 'Трунт лунных гор', *Правда* 4.V.1972, 3.
- [15] Маева, С. В.: 1971, 'О тепловой истории Луны', *Изв. АН СССР, сер. физ. Земли*, № 3, 3–10.
- [16] Barricelli, N. A. and Metcalfe, R.: 1969, 'The Lunar Surface and Early History of the Earth's Satellite System', *Icarus*, **10**, 144–163.
- [17] Рускол, Е. Л.: 1960, 'О происхождения Луны', I – *Астрон. ж.* **37**, 690; II – *там же* **40**, 288, 1963; III – *там же* **48**, 819, 1971.
- [18] Сафронов, В. С.: 1954, 'О росте планет в протопланетном облаке', *Астрон. ж.* **31**, 499–510.

- [19] Hanks, T. C. and Anderson, D.: 1969, 'The Early Thermal History of the Earth', *Phys. Earth Planetary Interiors* **2**, 19–29.
- [20] Сафронов, В. С.: 1969, *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет*, Москва, Наука.
- [21] Рускол, Е. Л.: 1972, 'Роль спутникового роя в происхождении вращения Земли', *Астрон. Вестн.* № 2, 91–95.
- [22] Kuiper, G. P.: 1949, 'The Law of Planetary and Satellite Distances', *Astrophys. J.* **109**, 308–313.
- [23] Рускол, Е. Л.: 1963, 'Приливная эволюция системы Земля – Луна', *Изв. АН СССР сер. геофиз.*, № 2, 216–222.
- [24] MacDonald, G. J. F.: 1964, 'Tidal Friction', *Rev. Geophys.* **2**, 467.
- [25] Papanastassiou, D. A. and Wasserburg, G. J.: 1972, 'The Rb-Sr Age of a Crystalline Rock from Apollo 16', *Earth Planetary Sci. Letters* **16**, 289.