

Преприят № 104

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ИСТОРИИ ЛУНЫ
ПРИ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ
РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Орнатская О.И.

Цейтлин Н.М.

Альбер Я.И.

Рязанцева И.П.

Горький - 1977 г.

А н н о т а ц и я

Проведены расчеты тепловой истории Луны, основанные на решении уравнения теплопроводности с источниками тепла — долгоживущими радиоактивными элементами ураном, торием и калием-40, концентрации которых задавались тремя наиболее вероятными вариантами 1^{**} , II и IУ, соответствующими стационарным потокам 0,91, 0,61 и $0,65 \cdot 10^{-8}$ кал $\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$. В расчете была учтена послонная (749 слоев, из них 676 слоев по 548 м с глубины 370 км от поверхности) дифференциация вещества с выносом к поверхности радиоактивных элементов при плавлении с интервалом плавления $\Delta T = 300, 200, 100, 75$ и 50°K . Во время плавления изменялись теплоемкость и теплопроводность. В качестве начальных условий рассматривалась "холодная" (373°K), "горячая" (900°K) модели и неравномерное распределение температуры с глубиной. Расчеты показывают, что поток и толщина твердой коры определяются соответственно двумя независимыми величинами: концентрацией радиоактивных элементов и интервалом плавления. При наиболее вероятных вариантах с пиролитовым — "мантийным" (1^{**}) и земным (П — состав "С" по Старковой и IУ) составом первоначально "горячей" Луны максимальное расплавление, охватившее практически всю Луну вплоть до глубины 15–45 км от поверхности, началось 3,5–3,8 млрд. лет назад, что соответствует возрасту морских базальтов и масконов (3,16–3,71 млрд. лет), свидетельствующих о вулканической деятельности, и за-

вершилось примерно 2,7-3 млрд. лет назад, что согласуется с отсутствием в обнаруженных на Луне породах образцов, моложе 3 млрд. лет, когда активность прекратилась. В настоящее время Луна остывает, и современная толщина твердой коры составляет от 400 км до полного радиуса Луны в зависимости от величины ΔT , а тепловой поток равен для вариантов I^а, II и IU соответственно 1,1 и 0,8 и $0,65 \cdot 10^{-6}$ кал см⁻² сек⁻¹.

1. Введение

Исследованию тепловой истории Луны, основанному на решении уравнения теплопроводности с заданными значениями параметров вещества Луны, начальными и граничными условиями и с источниками тепла – радиоактивными элементами с заданными концентрациями, посвящены работы Р.Юри (1951, 1955, 1962), Г.Мак-Дональда (1959, 1963), Е.А.Любимовой (1968), Б.Ю.Левина и Е.А.Любимовой (1955), В.Ю.Левина и С.В.Маевой (1960), Б.Ю.Левина (1963, 1966), С.В.Маевой (1964, 1965, 1971), П.Фрикера, Р.Рейнольдса и А.Саммерса (1967), Дж.Ириями и Дж.Шимазу (1967), Д.Андерсона (1969), Д.Андерсона и Р.Пинея (1967), Т.Хэнкса и Д.Андерсона (1969), Р.Мак-Коннела и др. (1967), М.Токсова и С.Соломона (1973) и других) Этому же вопросу посвящены и наши работы (Орнатская, Альбер, 1966; 1967; Орнатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975).

До 1966–67 гг. раздельно рассматривались однородная и расслоенная модели Луны. Затем, в 1966–67 гг. нами (Орнатская, Альбер, 1966, 1967) и независимо Н.Фрикером, Р.Рейнольдсом и А.Саммерсом (1967) была в самом расчете учтена дифференциация лунного вещества и вынос радиоактивных элементов к поверхности при плавлении. Учет непрерывной дифференциации в самом расчете позволил более детально исследовать тепловую историю Луны. В 1971 г. дифференциация была учтена в работе С.В.Маевой (1971) и в 1973 г. в работе Н.Токсова и С.Соломона (1973).

Таким образом, в настоящее время достаточно полно разработана схема расчетов на ЭВМ тепловой истории Луны и получено много новых результатов, однако, до сих пор интерес к этой проблеме не ослабевает, а в последнее время даже усилился. Это связано с большой неопределенностью в значениях параметров Луны, входящих в уравнение теплопроводности. Это относится и к неопределенности в задании плотности, теплоемкости и их зависимости от состояния лунного вещества (например, во время плавления) и к неопределенности в задании кривой плавления, и к начальным условиям (в частности, начальной температуре), и возрасту Луны, связанным с ее происхождением. Однако, по-видимому, определяющим в тепловой истории Луны является принимаемая концентрация радиоактивных элементов в веществе Луны и их перераспределение внутри Луны с течением времени.

В упомянутых работах, за исключением наших (Орнатская, Альбер, 1966, 1967; Орнатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975), концентрация радиоактивных элементов принималась в соответствии с их содержанием в хондритовых метеоритах (например, Юри, 1962, Мак-Дональд, 1963) или в Земле (Левин, Маева, 1960), или в "земной смеси", что приводило к значениям теплового потока через лунную поверхность порядка $(0,3-0,6) \cdot 10^{-6}$ кал $\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$. В то же время результаты радиоастрономических исследований В.С.Троицкого и В.Д.Кротикова (Кротиков, Троицкий, 1962, Троицкий, 1967) приводили к величине потока $0,85-0,95 \cdot 10^{-6}$ кал. $\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$, которая долгое время считалась весьма сомнительной, однако, близкое по величине значение потока следует и из первых анализов лунного грунта, проведенных Апполоном-15 (Лангзетт и др., 1972) и Апполоном-17⁺). В результате возникла необходимость расчета тепловой истории Луны при различных

+) Недавно появилось сообщение о пересмотре этих данных (Лангзетт и др. 1976), приведем к существенно меньшему потоку.

вариантах содержания радиоактивных элементов, который мог бы объяснить столь большой поток. Первая попытка такого расчета была предпринята в наших работах 1966–1967 гг. (Орнатская, Альбер, 1966, 1967), где использовались четыре варианта содержания радиоактивных элементов, два из которых соответствовали концентрациям, принятым Б.Ю.Левиним и С.В.Маевой (1960) (вариант "С" – среднее содержание в Земле) и Г.Юри (1962) и Г. Мак-Дональдом (1963), а два – содержали сравнительно большие концентрации, дававшие стационарные значения потока близкие к радиоастрономическим данным. При этом использовалось предположение о дифференциации при расплавлении радиоактивных элементов по экспоненте, и, поскольку радиоактивные элементы с большой концентрацией сосредотачивались в основном вблизи поверхности Луны (в 10–20 км), то они оказывали слабое влияние на температуру основной массы Луны, которая быстро охлаждалась. В результате толщина твердой коры в этих вариантах оказалась равной 600–700 км, т.е. большей, чем при средней (Б.Ю.Левин) и малой (Юри, Мак-Дональд) концентрациях, где толщина коры 250 км и 400 км. Используемая нами (Орнатская, Альбер, 1966, 1967) в 1966, 1967 гг. экспоненциальная модель выноса радиоактивных элементов к поверхности при дифференциации, в какой-то степени соответствующая, так называемой "внезапной дифференциации", хотя и позволила выяснить основные физические особенности тепловой теории, связанные с дифференциацией, однако, ограничила число варьируемых параметров. В этом отношении послойная дифференциация, предложенная Фрикером и др. (1967), оказалась, по-видимому, ближе к реальным процессам. Поэтому в последней нашей работе (Орнатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975) нами была использована послойная дифференциация радиоактивных элементов при расплавлении с различными долями (от 10% до 20%) выносимых из слоя в слой элементов. Варианты концентраций радиоактивных элементов были приняты такими же, как и в наших работах 1966, 1967 гг. (Орнатская, Альбер, 1966, 1967), а остальные параметры для расчета мы выбирали либо, исходя из

ожидаемых величин потоков тепла (при задании концентраций радиоактивных элементов), либо, исходя из наиболее обоснованных работ других авторов. Так, начальные температуры (273К - "холодная" и 900К - "горячая" Луна) заданы на основе работ Фрикера, Рейнольдса и Саммерса (1967) и Ирияма и Шимазу (1967), теплоемкость - на основе работ С.В.Маевой (1964, 1965), отметившей необходимость учета резкого изменения теплоемкости во время плавления. Учтено было также замечание Е.А.Любимовой (1968) о возможности повышения потока при умеренных концентрациях радиоактивных элементов путем учета вклада от экситонной составляющей теплопроводности и усиления эффективности радиационной составляющей.

В результате наших расчетов (Ориатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975) оказалось, что наиболее вероятными с точки зрения теплового потока являются варианты 1^а с пиrolитовым ("мантийным") и 11 с земным (состав по Старковой, 1955) содержанием радиоактивных элементов, дающие, несмотря на умеренную концентрацию, достаточно большой тепловой поток, соответствующей радиоастрономическим измерениям и первоначальным данным Апполонов - 15 и 17.

Таким образом, как было выяснено в нашей предыдущей работе (Ориатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975), для получения наблюдаемого сравнительно большого теплового потока отнюдь не обязательны большие концентрации радиоактивных элементов. В то же время, как отмечено выше, в упомянутой работе сохранялся достаточный произвол как в выборе начальной температуры и ее начального распределения, так и в величине интервала плавления и в степени повышения теплопроводности во время плавления. Кроме того, как отметила Е.А.Любимова, представляет интерес существенное уменьшение шага при расчетах, т.е. толщины слоев с заданной концентрацией, особенно вблизи поверхности (в нашей работе 1974, 1975 гг. использовалось 100 слоев - 90 по 18,7 км и 10 у поверхности по 5,3 км). Наконец, представлялось полезным рассмотреть еще один вариант (1У) концентраций радиоактивных элементов, близкий к земной смеси следующий

из работы Токсоза и Соломона (1973) и дающий поток, близкий к новым данным Апполонов — 15, 17. Такое более тщательное рассмотрение тем более необходимо, что в предыдущей нашей работе (Орнатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975) толщина твердой коры оказалась порядка 200 км, что существенно меньше общепринятой (> 600 км).

В настоящей работе рассматриваются три варианта концентраций радиоактивных элементов, оказавшиеся (см. Орнатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975) наиболее подходящими по величине потока: I^{##}, II и IV (см. ниже). В этих вариантах теперь рассматривается лишь полный вынос (100%) радиоактивных элементов из слоя в слой, поскольку, как было выяснено величина доли выносимых элементов мало влияет на основные результаты расчетов. В качестве начальной температуры задано три варианта: "холодная" и "горячая" Луна и предложенное Е.А. Любимовой (см. также Токсоз и Соломон, 1973) неравномерное начальное распределение температуры с глубиной (расплавление у поверхности и спад температуры с глубиной).

Если в нашей работе 1974, 1975 гг. теплопроводность во время плавления возрастала в 4 раза, то здесь рассчитаны варианты с возрастанием теплопроводности не только в 4, но и в 10 и 30 раз. Температурный интервал плавления ΔT в настоящей работе составляет не только 200°K , как мы принимали в 1974 г., но также и 300°K , 100°K , 75°K , 50°K (забегая вперед, отметим, что, как оказалось, именно величина ΔT наиболее существенно влияет на толщину твердой коры).

Наконец, расчеты проводились с толщиной слоев 18,7 км от центра Луны до 1365 км, а с глубины 370 км под поверхностью с шагом 548 м (всего 749 слоев).

Таким образом, не найдя достаточно веского физического обоснования для какой-либо модели, определяющей теплопроводность во время плавления и величину интервала плавления, мы пошли по пути варьирования этих (как, впрочем, и других) параметров с целью выяснения их влияния на тепловую историю Луны. По-видимому, этот путь является пока наиболее приемлемым, поскольку

Т а б л и ц а I

Варианты	Уран $\text{H}_1^{\downarrow 0}$	Концентрация радиоактивных элементов Торий $\text{H}_2^{\downarrow 0} = 4\text{H}_1^{\downarrow 0}$ Калий $40\text{H}_3^{\downarrow 0}$	η стац. кал. см $^{-2}$ сек $^{-1}$
Базальт 10% (К-40/ц) = 1,18	I** 8,5 · 10 $^{-8}$	34 · 10 $^{-8}$	0,91 · 10 $^{-6}$
Базальт 5% (К-40/ц) = 1,6	II 5,2 · 10 $^{-8}$	21 · 10 $^{-8}$	0,61 · 10 $^{-6}$
К-40/ц = 0,24 К/ц = 2 · 10 3	III 7 · 10 $^{-8}$	28 · 10 $^{-8}$	0,65 · 10 $^{-6}$

чения N_j^0 - концентрации в начале рассмотрения определяются, исходя из предполагаемой в настоящее время концентрации $N_j^{t_0}$ по формуле $N_j^0 = N_j^{t_0} \cdot e^{\lambda \cdot t_0}$, где $t_0 = 4,7 \cdot 10^9$ лет. Рассматриваются три варианта значений концентрации радиоактивных элементов, указанные в таблице 1. Концентрации радиоактивных элементов выбраны на основании результатов нашей предыдущей работы (Ориатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975), т.е. соответствующие наиболее вероятным вариантам 1** и 11. Отношение тория к урану бралось, как обычно, равным 4 (см., например, Левин, Маева, 1960), концентрация урана бралась в вариантах 1** и 11, исходя из пиrolитового состава Луны. Такое предположение о пиrolитовом составе Луны основано на отмеченном Андерсоном (1969) сходстве состава Луны и мантии Земли (например, средний атомный вес мантии Земли $\bar{M} = 22,4$, что относится к изверженным породам, углистым, обыкновенным и энстативным хондритам, такой же атомный вес 22,0 вещества Луны), а также на данных Сорвейера-У и работах Мак Криа (1969), Рейнольдса и Саммерса (1969) и др., из которых следует, что Луна состоит из силикатов (например, базальт), подобных содержащимся в мантии Земли⁺). В таблице 2 приведены концентрации урана и отношения концентраций К-40 и урана для различных пород.

Таблица 2

Порода	Граниты	Базальты	Эклогиты	Перидотиты	Луны-титы	Хондриты
10^8	400	80	4,3	0,6	0,1	2,1
К-40/	1,05	1,13	1,44	1,2	1,2	9

Исходя из этой таблицы и заданных стационарных потоков нами были выбраны упомянутые варианты 1** и 11

⁺) Из этого не обязательно следует, что верна гипотеза от образований Луны путем отрыва от Земли, поскольку в межзвездном веществе обнаружены зерна тугоплавких силикатов (Мак Криа, 1969).

с 10% и 5% содержанием базальта, 77% и 82% — перидотита и 13% железа (Рейнольдс и Саммкрс, 1969), обедненно-го радиоактивными элементами (в железе $\mu = 0,1 \cdot 10^{-8}$ /г. $T_n = 0,4 \cdot 10^{-6}$, $K-40=0$ и отношением $K_{40}/\mu = 1,13$ и $1,6$ (см. Левин, 1963 и Любимова, 1968). Отметим, что вариант 11 соответствует варианту "С" среднего содержания радиоактивных элементов в Земле (см. Старкова, 1955 и Любимова, 1968). Кроме упомянутых вариантов 1** и 11, рассматривался также вариант 1У, близкий к 11, однако, с существенно уменьшенным содержанием К-40 ($K_{40}/\mu = 0,24$; $K/\mu = 2 \cdot 10^3$), в соответствии с работой Токсоза и Соломона (1973).

В качестве начального условия принимаются три варианта: "холодная" и "горячая" модели Луны в момент ее образования соответственно с начальными температурами 273К и 900К. Это также же начальные условия, которые принимались Юри, Мак-Дональдом, Ириямой и Шимазу, Фриккером, исходя из различных гипотез происхождения Луны и времени ее аккумуляции и первоначального разогрева, на которых мы не останавливаемся. Третий вариант — с неравномерным начальным распределением температуры, а именно: на поверхности 273°К, затем резкий рост до температуры плавления на глубине 1 км, затем температура, равная температуре плавления до глубины 200 км, затем спад до 273°К к центру Луны (см. рис. 1)[†].

Граничное условие ($r = r_0$) определяется соотношением:

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0} = \sigma \cdot T^4 - \beta \quad (6)$$

где $\beta = 0,9 \cdot 10^{-2}$ кал см⁻²сек⁻¹ учитывает подогрев Луны солнечной радиацией. Это условие практически при расчете приводит к тем же результатам, что и более простое $T = 273\text{К} = \text{const}$.

[†]) Маева (1971) принимала параболическое распределение температуры со значением в центре Луны 500 К. Наше неравномерное начальное распределение выбрано в соответствии с рекомендацией Е.А. Любимовой и работой Токсоза и Соломона (1973).

Механизм дифференциации.

Механизм дифференциации определяется функцией распределения радиоактивных элементов $F(r, t)$, которая задавалась следующим образом. Вначале рассматривалась однородная модель распределения радиоактивных элементов, т.е. $F(r, t) \equiv 1$ (аналогично нашим работам: Орнатская, Альбер, 1966, 1967; Орнатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975) — первый этап расчета. Затем, после достижения в момент t_1 , в точке r_1 , температуры, соответствующей началу плавления $T_{\text{нач.пл.}}$, получившееся ко времени $t_2 = t_1 + \Delta t$ (где Δt — время плавления — см. ниже) распределение температуры принимается за новое начальное распределение, а распределение радиоактивных элементов предполагается расслоенным, а именно, радиоактивные элементы из слоя $r_1 \pm \Delta r$ переходят в соседний слой $r_2 \pm \Delta r$ и расчет продолжается с обедненным слоем $r_1 \pm \Delta r$. Однако, за время Δt , определяемое необходимостью нагрева слоя на ΔT (напомним, что величина ΔT варьировалась от 300 до 500°K), уже достигнут температуры плавления более глубокие слои (поскольку $T_{\text{нач.пл.}}$ повышается с глубиной, т.е. с уменьшением r), из которых в этот слой $r_1 \pm \Delta r$ также поступят радиоактивные элементы, т.е. содержание их в этом слое выровняется и т.д., пока нижние слои не прекратят расплавляться. Такая послойная дифференциация (аналогичная принятой Фрикером, Рейнольдсом и Саммерсом, 1967) задавалась в предыдущей нашей работе (Орнатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975), пятью вариантами, различающимися величиной N — долей выноса радиоактивных элементов из слоя. Здесь мы принимали $N = 1$ (полный вынос) поскольку, как оказалось, конечные результаты от N зависят незначительно. В настоящей работе мы не рассматривали возможность внедрения расплавленного вещества в наружный твердый слой, как это сделано в работе Мавевой (1971), поскольку сосредоточение радиоактивных элементов в тонком приповерхностном слое, действительно приводящее к более быстрому остыванию Луны и большей толщине твердой коры, получается в модели экспоненциальной дифференциации, подробно рассмотренной нами в

1966, 1967 гг. (Орнатская, Альбер, 1966, 1967).

3. Метод расчета

При численном решении параболического уравнения использовался метод сеток. Для аппроксимации (3) применялась абсолютно устойчивая разностная схема вида (Самарский, 1971):

$$\frac{u_i^{j+1} - u_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta r} \left[K \left(\frac{u_{i+1}^j + u_i^j}{2} \right) \cdot \frac{u_{i+1}^{j+1} - u_i^{j+1}}{\Delta r} - K \left(\frac{u_i^j + u_{i-1}^j}{2} \right) \cdot \frac{u_i^{j+1} - u_{i-1}^{j+1}}{\Delta r} \right] + \left[1 + \frac{(\Delta t)^2}{12 \tau_i^2} \right] \cdot \frac{1}{2} \left[H \left(r_i^+, t_{j+\frac{1}{2}} \right) + H \left(r_i^-, t_{j+\frac{1}{2}} \right) \right]$$

где $u_i^j = u(r_i, t_j)$

Эта схема является линейной относительно значения функций u^{j+1} на t_{j+1} слое. Получаемая линейная система уравнений решалась методом прогонки. Для более точного вычисления глубины основного залегания радиоактивных элементов, потока и других параметров производилось измельчение шага Δr по r у поверхности, до тех пор, пока указанные параметры оставались неизменными при уменьшении шага вдвое. Наиболее оптимальными оказались шаги: 73 слоя от центра по 18,7 км, а остальные по 548 м. Шаг по времени Δt отгонялся точно таким же образом. В данных расчетах он принимался равным $5 \cdot 10^6$ лет. Время счета одного варианта на ЭВМ БЭСМ-6 составляло не более 45 минут.

4. Результаты расчета.

а) Процесс расплавления и дифференциации.

Были рассчитаны временные зависимости температуры в различных слоях Луны (вдоль радиуса, начиная от центра 0) для всех вариантов при повышении теплопроводности во время плавления в 4, 10, 30 раз для различных интервалов плавления $\Delta T = 300, 200, 100, 75, 50^\circ$ и при различных начальных распределениях темпера-

тура ("холодная", "горячая" Луна и модель с неравномерным $T_{\text{нач.}}$ (τ)). Как показали расчеты, плавление во всех вариантах начинается в слое около 1400 км (для неравномерного $T_{\text{нач.}}$ в слое 1500 км) от центра (т.е. на глубине ≈ 350 км под поверхностью) в период времени от 0,1 до 2,2 млрд. лет с начала истории Луны. Чем больше концентрация радиоактивных элементов и чем выше начальная температура, тем раньше начинается расплавление. Раньше всего оно начинается, естественно, для неравномерного $T_{\text{нач.}}$ (0,1–0,3 млрд. лет), затем для "горячей" Луны (0,4; 0,5 и $0,8 \cdot 10^9$ лет для вариантов 1**, 11 и 1У), затем – для "холодной" (0,7; 1,1 и $2,2 \cdot 10^9$ лет для 1**, 11 и 1У соответственно). Затем достаточно быстро (за 0,1–0,3 млрд. лет) область расплавления распространяется к центру и значительно медленнее к поверхности Луны. В том же слое, где впервые началось расплавление, через $\approx 0,5$ млрд. лет впервые начинается и дифференциация вещества, причем, область расплавления в момент начала дифференциации $t_{\text{нач. диф.}}$ достигает 1600 км и в это же время происходит резкое увеличение температуры в слоях, близких к поверхности, в результате чего в этих слоях достигается температура, близкая, или превышающая $T_{\text{нач.пл.}}$. Это понятно, т.к. в эти слои из более глубоких постунают выплавленные радиоактивные элементы, глубокие же слои (глубже 500–600 км, т.е. $\tau = 1100–1200$ км) к моменту начала дифференциации оказываются уже нагретыми выше $T_{\text{нач.пл.}}$ и медленно остывают в связи с выносом из них в верхние слои радиоактивных элементов. Таким образом, происходит почти одновременный разогрев вещества Луны вплоть до глубины 200–250 км под поверхностью, причем, слои, лежащие ближе к поверхности, нагреваются медленнее и толщина этих медленнее нагревающихся слоев с течением времени увеличивается. Сказанное относится к первоначально "холодной" и "горячей" Луне. В случае неравномерного начального распределения температуры, область расплавления довольно медленно (за миллиарды лет) распространяется к центру и быстрее к поверхности. Это естественно, т.к. в этом случае начальная тем-

пература у поверхности близка к $T_{\text{нач.пл.}}$, вплоть до глубины 200 км, а затем быстро спадает. На самой же поверхности температура из-за излучения остается постоянной и равной 273°K .

Обращают на себя внимание процессы при малых интервалах плавления $\Delta T = 75$ и 50°K . Здесь остывание начинается не только от поверхности, но и из глубины Луны, так, что в настоящее время в ряде вариантов при $\Delta T = 75$ и 50°K . Луна уже либо сплошь твердая, либо внутри имеются твердые слои.

б) Начало и продолжительность максимального расплавления недр.

Были рассчитаны временные зависимости радиуса расплавления. Из этих расчетов следует, что во всех вариантах наблюдается период максимального расплавления, продолжающийся 1-2,5 млрд. лет (в зависимости от варианта) и начинающийся в интервале 0,5-2 млрд. лет с начала истории Луны. Почему, естественно, для больших концентраций, "горячих" моделей и меньших интервалов плавления максимальное расплавление начинается раньше, чем для концентраций меньших и "холодных" моделей. Так, для всех вариантов с $\Delta T = 75$ и 50°K , а также для "горячих" моделей в вариантах 1^{**} и 11 максимальное расплавление началось примерно 3,5-4 млрд. лет назад и продолжалось в течение 1,5-1 млрд. лет, а в случае средних концентраций, "холодных" моделей и больших теплопроводностей во время плавления ($K/K_0 = 10,30$) (варианты 11 и 1У) максимальное расплавление началось 2,5-3 млрд. лет назад и продолжительность 1,5-2,5 млрд. лет, т.е., как и следовало ожидать, началось позже и длилось дольше⁺⁾ .

⁺⁾ Чем меньше концентрация, тем более спокойно протекают процессы. Заметим, что вариант 1У с резко уменьшенным содержанием К-40 относится к малым концентрациям, т.к. у К-40 весьма большой период полураспада, т.е. и в начале истории Луны содержание К-40 было малым.

Во всех вариантах сейчас происходит остывание Луны, причем, наиболее интересный случай представляют варианты I** и II с малыми интервалами плавления ($\Delta T = 75$ и 50°), в которых период максимального расплавления, начавшийся 3,5–4 млрд. лет назад, продолжался всего около 1 млрд. лет, после чего началось резкое охлаждение, как с поверхности, так и с глубины Луны. В результате в ряде вариантов Луна оказывается в настоящее время полностью отвердевшей.

в) Толщина твердого слоя (коры)

Как следует из расчетов в период максимального расплавления минимальная толщина твердого слоя составляла в различных рассмотренных вариантах от 15–20 до 70 км, т.е. вплоть до 1,5–3 млрд. лет назад Луна была еще почти полностью расплавлена, затем началось остывание, и в настоящее время толщина твердой коры в различных вариантах составляет от 75 км до 550 км и до полного радиуса Луны.

Как уже отмечено выше, при малых величинах интервала плавления $\Delta T = 100^\circ$, 75° и 50° К во всех вариантах толщина твердой коры оказывается весьма большой. Например, в варианте I** ("горячая" модель) при $\Delta T = 75$ и 50° К твердой оказывается практически вся Луна, поскольку затвердевание происходит как с поверхности, так и из глубины. То же самое имеет место и в вариантах II и IV ("горячая" модель) при $\Delta T = 50^\circ$ К.

Таким образом, если из каких-либо дополнительных данных окажется, что интервал плавления вещества типа лунных пород, составляет величину порядка $50\text{--}70^\circ$ К, то как показывают наши расчеты, Луна в настоящее время полностью, твердая если принять умеренную концентрацию радиоактивных элементов, соответствующую вариантам I, II и IV первоначально "горячей" Луне (см. таблицу 1).

Хотелось бы отметить следующее обстоятельство. Если принять в качестве исходных объективных данных современную толщину твердой коры порядка 800 км и более, то отпадает ряд вариантов, не обеспечивающих такой коры, а именно, оказываются нереальными вариант IV первоначально "холодной" Луны, варианты 2

повышенной в 10 и 30 раз теплопроводностью во время плавления и варианты с $\Delta T = 200^\circ$. Условно глубокой твердой коры лучше всего удовлетворяют варианты I**, II и IУ первоначально "горячей" Луны (при условии малого интервала плавления $\Delta T < 100^\circ$).

г) Тепловой поток через лунную поверхность.

Из временных зависимостей теплового потока через лунную поверхность видно, что в периоды максимального расплавления Луны поток, как и следует ожидать, также оказывался максимальным, в 2-3 раза превышая стационарное значение при данных концентрациях радиоактивных элементов. Сейчас во всех рассмотренных здесь вариантах наблюдается уменьшение потока и его приближение к стационарному значению $Q_{\text{стац.}}$, однако, и сейчас поток превышает $Q_{\text{стац.}}$ примерно на 25% для вариантов I** и II и равен стационарному для варианта IУ.

Величина потока в вариантах I**, II и IУ равна соответственно $1,1 \cdot 10^{-6}$ кал см⁻² сек⁻¹; $0,8 \cdot 10^{-6}$ и $0,65 \cdot 10^{-6}$ кал см⁻² сек⁻¹, причем эта величина, определяемая концентрацией радиоактивных элементов, практически не зависит от начального распределения температуры, ни от предположений об изменении теплопроводности во время плавления, ни от степени и скорости дифференциации, ни от величины интервала плавления. Это естественно, поскольку Луна сейчас находится в условиях, близких к стационарному состоянию.

Таким образом, потоки, близкие к измеренным радиоастрономическими методами реализуются в вариантах I**, II) а потоки, близкие к новым данным Аполонов-15 и 17 - в варианте IУ, т.е. при земном или "мантийном" - преролитовом составе вещества Луны.

б. Заключение

Проведены расчеты тепловой истории Луны при различных начальных распределениях температуры, различной теплопроводности и концентрациях радиоактив -

+) Это мы отмечали и в предыдущей работе (Ориатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975).

ных элементов, соответствующих земному (11. 1У) и мантйно-пиролитовому (1***) составу Луны. Вынос радиоактивных элементов к поверхности, происходящий в результате плавления, учтен в процессе расчета по схеме послойной дифференции с весьма малым шагом (толщина слоев), начиная с глубины 370 км у поверхности, равной 548 м) при различных значениях интервала плавления $\Delta T = 300, 200, 100, 75, 50^\circ$.

По-видимому, можно принять, что существуют два определяющих параметра, связанных с тепловой историей Луны, а именно, значение теплового потока ($0,85-0,95 \cdot 10^{-6}$ кал $\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ по радиоастрономическим данным и $0,5-0,6 \cdot 10^{-6}$ по новым данным Апполонов 15, 17) и толщина твердой коры (больше 600 км), которым должны удовлетворять результаты расчетов.

Как выяснилось в результате наших расчетов, величина потока и толщина твердой коры в основном определяются двумя независимыми величинами, а именно, поток определяется концентрацией радиоактивных элементов, а толщина коры — интервалом плавления.

Это представляется физически очевидным, поскольку Луна в настоящее время уже находится в состоянии, близком к стационарному, следовательно, и поток близок к стационарному, определяемому лишь концентрацией радиоактивных элементов⁺). Толщина твердой коры определяется тем, насколько рано началось и завершилось расплавление и началось остывание. Это, конечно, зависит от концентрации радиоактивных элементов, но, коль скоро она определена ожидаемым стационарным потоком, а начальное распределение температуры довольно быстро нивелируется из-за разогрева Луны, то определяющую роль в скорости процессов нагрева и остывания играет именно интервал плавления.

+) Об этом же свидетельствует и недавняя работа А.Н. Тихонова, Е.А. Любимовой, В.К. Власова (1977), в которой при концентрациях, близких к нашему варианту 1У, получен поток $0,6 \cdot 10^{-6}$ кал/ $\text{см}^2\text{сек}^{-1}$, т.е. практически такой же, как и у нас, хотя модель Луны была существенно отличной, т.к. использовалось предположение о наличии тонкого теплоизолирующего слоя у поверхности Луны.

ния ΔT . Доля выносимых радиоактивных элементов и темп выноса имеют при принятых не слишком малых концентрациях этих элементов второстепенное значение.

Из сказанного следует, что задаваясь величинами потока и твердой коры, можно существенно ограничить возможные варианты тепловой истории Луны. Как оказалось, наиболее приемлемыми являются варианты 1**, П и 1У (пиролитовый и Земной составы Луны) первоначально "горячей" Луны при интервале плавления порядка 100° и меньше. Вариант 1У первоначально "холодной" Луны с малым современным содержанием К-40, по-видимому, неприемлем, поскольку, хотя он и приводит к ожидаемому потоку, но из-за большого периода полураспада содержание К-40 оказывается весьма мало также и в начале тепловой истории Луны, что приводит к малой толщине твердой коры. Для этих вариантов 1** и П, как показывают расчеты, недра Луны разогреты до плавления в течение первых 0,5–2,5 млрд. лет после ее образования. Максимальное расплавление Луны, охватившее практически всю Луну вплоть до глубин 15–45 км от ее поверхности началось 3,5–4 млрд. лет назад в предположении о пиролитовом составе Луны (1**) либо 2,5–3,5 млрд. лет назад в предположении о земном (варианты 11 и 1У) составе Луны. Это максимальное расплавление продолжалось в течение 1–2 млрд. лет, и в настоящее время Луна остывает.

Современная толщина твердой коры составляет от 400 км до полного радиуса Луны в зависимости от величины ΔT , а величина теплового потока 1**, П и 1У соответственно 1,1, 0,8 и $0,65 \cdot 10^{-6}$ кал.см⁻² сек⁻¹.

При наиболее вероятных вариантах с пиролитовым – "мантийным" (1**) и земным (11, 1У) составом первоначально "горячей" Луны максимальное расплавление Луны началось 3,5 – 3,8 млрд. лет назад, что соответствует возрасту морских базальтов и масконов (3,16–3,71 млрд. лет), свидетельствующих о вулканической деятельности, и завершилось примерно 2,7–3 млрд. лет назад, что согласуется с отсутствием в обнаруженных на Луне породах образцов, моложе 3 млрд. лет (Папанестазиа и

Вассербург, 1971, 1972, Вассербург и Папанестазиа, 1971), когда активность прекратилась. Таким образом, удовлетворяются ограничения, установленные Токсозом и Соломоном (1973), в том числе и относительно толщины твердой коры.

Следует подчеркнуть, что, как мы уже отмечали (орнатская, Альбер, Рязанцева, 1974, 1975), по-видимому, наиболее близким к действительности является вариант "земного" состава первоначально "горячей" Луны (состав "С" по Старковой (1955), дающий, несмотря на умеренную концентрацию, достаточно большой тепловой поток⁴⁾, соответствующий радиоастрономическим измерениям. Если верны новые данные Апполонов - 15 и 17, то наиболее приемлем вариант 1У первоначально "горячей" Луны, однако, заметим, что данные эти относятся к локальным участкам Луны, в то время, как радиоастрономические дают поток, усредненный по всей видимой поверхности Луны.

Авторы признательны члену-корреспонденту АН СССР, профессору В.С.Троицкому за внимание к настоящей работе и полезные обсуждения.

⁴⁾ Эту возможность отметила Е.А.Любямова (1988).

- Anderson D.L., 1969, Applied Optics, 8, N7, p.1271.
- Anderson D.L., Phinney R.A., 1967 in "Mantles of the Earth and Terrestrial Planets", (ed. by S.K. Kuncorn), Interscience p.113, 1967 in "Phys. Moon", Washington, P.C. Amer. Astron. Soc., p.161-179.
- Anderson D.L., Harks T.G., 1972, Science, 178, 1245.
- Fricker P.E., Reynolds R.T., Summers A.L., 1967, J. Geophys. Res., 72, 2649.
- Harks T.S., Anderson D.L., 1969, Phys. Earth Planetary Int., 2, 1972; Phys. Earth Planetary Int., 5, 409.
- Iriyama J., Shimazu I., 1967, Icarus, 6, 3.

Кротиков В.Д., Троицкий В.С., 1962, УФН, 31, 4.

Langseth M.G., Clark S.P., Chute J.L., Keihm S.J., Wechsler A.E., 1972, The Moon, 4, 390.

Langseth M.G., Keihm S.J., Peters K., 1976, Abstracts of the Seventh Lunar Science Conference, March 15-19, p.474.

Левин Б.Ю., Любимова Е.А., 1955, Природа, № 10, 81.

Левин Б.Ю., Маева С.В., 1960, ДАН СССР, 133, 44.

Левин Б.Ю., 1963. Сб. "Новое о Луне", изд. АН СССР, стр. 118.

Левин Б.Ю., 1966, в кн. "Вулканизм и глубинное строение Земли", М., изд. "Наука".

Любимова Е.А., 1968, "Тематика Земли и Луны", М., "Наука".

Маева С.В., 1964, ДАН СССР, 159, 2.

Маева С.В., 1966, Изв.комиссии по физике планет, 14

Маева С.В., 1971, Физика Земли, Изв. АН СССР, № 3, стр. 3.

MacDonald G.J.F., 1959, J.Geophys.Res., 64, 1967.

MacDonald G.J.F., 1963, Space Sci.Rev., 2, 473.

McConnel R.K., McClaine L.A., Lee D.W., Aronson J.R., Allen R.V., 1967, Rev.Geophys., 5, 121.

McCrea W.H., 1969, Nature, 223, N5203.

Орнатская С.И., Альбер Я.И., 1966, Изв. Вузов, Радиофизика, 9, № 3.

Орнатская О.И., Альбер Я.И., 1967, Астрон. журнал, 44, № 1, 158.

Ornatskaya O.I., Al'ber Ya.I., Ryazantseva I., P., 1974, The Moon, II, N 3/4, 396.

Орнатская О.И., Альбер Я.И., Рязанцева И.П., 1975, Космохимия Луны и планет., М., "Наука".

Papanastassion D.A., Wasserburg, 1971, Earth Planetary Sci.Letters, II, 37; 12, 36.

Papanastassion D.A., Wasserburg, 1972, Earth Planetary Sci.Letters, 16, 289.

Reynolds R.T., Summers A.L., 1969, J.Geophys. Res., 74, N 10, p.2494.

Ringwood A.E., 1966, in *Advances in Earth Science*, 267-356, Cambridge, M.I.T. Press.

Старкова А.Г., 1955, *Метеоритика*, в. 13, 19.

Самарский А.А., 1971, *Введение в теорию разностных схем*, М., "Наука",

Тихонов А.Н., Любимова Е.А., Власов В.К., 1989, *ДАН СССР*

188, № 2. Тихонов А.Н., Любимова Е.А., Власов В.К. 1977, *ДАН СССР*, 233, № 2.

Toksoz M.N., Solomon S.C., 1973, *The Moon*, 2, N3/4.

Троицкий В.С., *Изв. ВУЗов, Радиофизика*, 10, № 8.

Urey H.C., 1962, in *"Physics and Astronomy of the Moon"* (ed. by L.Kopal), Academic Press New York, p.481.

Urey H.C., 1951, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1, 209.

Urey H.C., 1955, *Proc. Natl. Acad. Sci., U.S.* 41, 127.

Wasserburg G.J., Papanastassion D.A., 1971, *Earth Planetary Sci. Letters*, 13, 97.