

## ГЛАВА 10 ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЛУНЫ

«В наших руках находятся лишь поверхностные породы Луны. Можно ли, исследуя лишь поверхностные породы Луны (ван и других планет), составить представление о химическом строении вещества внутри Луны?»

А. П. Виноградов, «Дифференциация вещества Луны и планет на оболочку» в книге «Космохимия Луны и планет»

Выше отмечалось, что для Луны хорошим приближением является однородная модель. Соответственно распределение давления в недрах Луны дается формулой (38). В настоящее время проведены первые зондирования Луны геофизическими методами. Суммируем кратко результаты этих работ.

### 10.1. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Первые сейсмические эксперименты на Луне проводились в 1969 г. В настоящее время на Луне работает сеть из четырех однопипных автоматических сейсмических станций. Эти станции работали до 1978 г. В настоящее время они выключены. В качестве источников питания используются изотопные энергетические установки. Лунные сейсмические станции непрерывно регистрируют естественные события: лунотрясения и падения метеоритов. Это пасивный сейсмический эксперимент.

На Луне были выполнены также активные сейсмические эксперименты двух типов. В активных экспериментах первого типа сейсмические волны возбуждались пассивным отработанным частотой космических аппаратов «Аполлон». По команде с Земли третья ступень ракеты направлялась в заданную точку Луны. Ее масса составляла  $14 \text{ т}$ , скорость удара о лунную поверхность  $2,5 \text{ км/сек}$ , кинетическая энергия  $5 \cdot 10^{17} \text{ эрг}$ , сейсмическая энергия  $5 \cdot 10^{12} \text{ эрг}$ . Такой же сейсмический эффект получается

при взрыве заряда тротила массой в  $10 \text{ т}$  (говорят, что тротильный эквивалент удара равен  $10 \text{ т}$ ). Лунный молдиль, в котором космонавты стартуют с Луны после стыковки с командным отсеком, также сбрасывался на Луну с лунной орбиты. Его масса  $2,4 \text{ т}$ , скорость падения  $1,7 \text{ км/сек}$ , кинетическая энергия удара  $3 \cdot 10^{16} \text{ эрг}$ , выделяемая сейсмическая энергия  $(1,5 \div 3) \cdot 10^{10} \text{ эрг}$ , тротильный эквивалент  $800 \text{ кг}$ .

Такой эксперимент можно раскатривать как космическую разновидность метода ГСЗ (глубинное сейсмическое зондирование). На Земле метод ГСЗ широко используется для изучения детального строения земной коры с помощью взрывов мощных зарядов взрывачатых веществ. Активные эксперименты второго типа похожи на земную сейсморазведку. В этом случае космонавты устанавливали на сейсмическом профиле длиной в сотни метров несколько геофонов, которые регистрировали около десятка искусственных взрывов зарядов от  $100 \text{ г}$  до  $2,7 \text{ кг}$  с расстояний  $100 \text{ м} - 2,7 \text{ км}$ . Активные эксперименты позволяли выявить детальную структуру наружных слоев Луны в местах посадки «Аполлона-14» (А-14), А-15, А-16 и А-17.

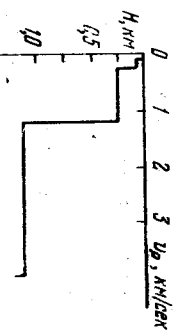


Рис. 38. Скоростной разрез наружных слоев Луны для станций А-14, А-15, А-16 и А-17.

На рис. 38 показан скоростной разрез верхних слоев Луны в континентальном районе Тавр — Питров (у юго-восточной границы моря Фености). Этот разрез построен группой американских сейсмологов под руководством Р. Ковача. Лунная поверхность выстлана слабовязанным раздробленным обломочным материалом, названным лунным реголитом. Мощность реголитового покрова колеблется вблизи значений порядка  $10 \text{ м}$ . Скорости сейсмических волн в реголите равны  $v_p \approx 10,4 \text{ м/сек}$ ,  $v_s \approx 6,2 \text{ м/сек}$ . Мощность второго слоя широко варьирует от десятков до сотни метров,  $v_p \approx 250 - 300 \text{ м/сек}$ . Этот слой состоит из трещиноватого базальтового материала с низкоскоростными включениями. Резкая граница перехода к  $v_p = 1,2 \text{ км/сек}$  располагается на глубине  $248 \text{ м}$ . Нижележащий слой примерно километровой мощности, видимо, также состоит из базальта, но более консолидированного. Он подстилается породами с  $v_p = 4,0 \text{ км/сек}$ . Предполага-

жизельный состав габбро-анортозитовый. Поверхностные слои Луны в широком смысле слова состоят из базальтов. В лунных базальтах, так же как и в земных, преобладают пироксены, плагиоклазы, оливины и ильменит ( $FeTiO_3$ ), который придает лунным морским базальтам темную окраску. Химические формулы и физические параметры оливинов и пироксенов даны в табл. 2. Лунные плагиоклазы состоят в основном из твердого раствора альбита  $NaAlSi_3O_8$  (Ab) и аноргита  $CaAl_2Si_2O_8$  (An). Содержание аноргита в лунных плагиоклазах  $\sim$  Альо ÷ Алью, в среднем Аль<sup>90</sup>.

Анортозит — светлая порода, слогающая лунные материка, состоит в основном из близкого к аноргиту плагиоклаза с небольшой примесью оливина и пироксена. Анортозиты, слогающие материки, значительно отличаются от лунных базальтов, покрывающих морские районы. Следствием этого является и заметно меньшая плотность анортозитов ( $\sim 2,9$  г/см<sup>3</sup>), чем плотность морских базальтов ( $\sim 3,3$  г/см<sup>3</sup>). Горная порода, образовавшаяся из базальтовой магмы, застывшей в приповерхностных слоях, называется габбро. Она имеет состав, сходный с базальтом, но более грубозерниста. Выше было указано, что поверхностный слой с  $v_p = 4,0$  км/сек имеет габбро-анортозитовый состав, т. е. как бы состоит из пород, представляющих смесь габбро и анортозита. Характерной особенностью лунных пород является то, что они обделены по сравнению с земными породами легколетучими элементами (Rb, K, Tl) и обладают повышенным содержанием многих «тугоплавких» элементов (Ba, Zr, Hf, редкие элементы, Th, U). Имеются еще и другие важные различия между лунным веществом, с одной стороны, и земным и метеоритным, с другой стороны. В настоящее время установлено несколько типов базальтовых магм, образовавшихся на различных этапах ранней эволюции Луны.

На рис. 39 показан скоростной разрез лунной коры и верхов ее мантии в районе формации Фра-Мауро в Океане Бурь, в местах расположения сейсмических станций А-12 и А-14. Этот разрез получен методом космического ГСЗ группой сейсмологов во главе с П. Токосем. Разрез характеризуется следующими данными: 1) быстрое нарастание скорости  $v_p$  от значения  $0,1$  км/сек на поверхности до  $5$  км/сек на глубине  $10$  км; 2) резкое нарастание скорости на глубине около  $20$  км (граница раздела в лунной коре); 3) примерно постоянное значение

$v_p \sim 7$  км/сек в интервале глубин от  $20$  до  $60$  км; 4) скачкообразное возрастание скорости у основания лунной коры (глубина  $60$  км); 5) в подкоровой области (лунной мантии) скорость определена неубверенно и неоднозначно. Нагнчим «забуа» на скоростном разрезе со значением скорости  $9$  км/сек уже несколько лет подвергается сомнению. Если и имеется высокоскоростной слой со скоростью сейсмических волн  $v_p = 9$  км/сек, то такой слой может быть локальной особенностью района Фра-Мауро и его мощность не должна превышать  $40$  км. Интерпретация скоростного разреза дана в подписи к рис. 39, на котором штриховкой показана область скоростей продолжных волн  $v_p$  в различных породах но лабораторным данным. Быстрый рост скоростей с глубиной в наружных слоях обусловлен переходом вещества от неконсолидированного к консолидированному состоянию под действием собственного веса и роста температуры вглубь Луны. На рис. 40 показана рабочая скоростная модель для всей Луны, построенная на основе пассивных и активных сейсмических экспериментов группой сейсмологов во главе с Г. Латемом. Рис. 40 интерпретируется следующим образом. Мощность коры принята равной  $60$  км для всей Луны чисто условно по единственному, сравнительно детальному данным для района Фра-Мауро. Можно только утверждать, что мощная кора является глобальной особенностью Луны. На это, в частности, указывает большая величина теплового потока из недра Луны при относительно умеренных температурах ее наружных оболочек. Следовательно, радиоактивные источники должны быть вынесены к поверхности, что требует глобальной

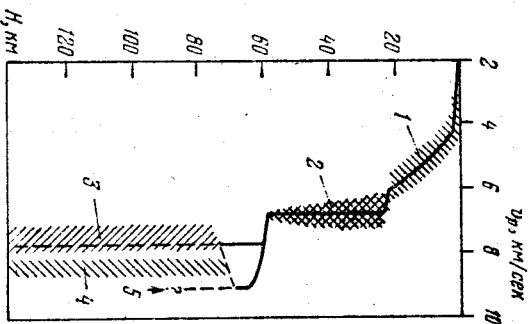


Рис. 39. Результаты исследования скоростной структуры коры и верха мантии в котловине Фра-Мауро. 1 — данные лабораторных данных. 2 — лунные данные базальтов. 3 — лунные данные анортозитов. 4 — земные данные. 5 — оливиниты.

терпретируется следующим образом. Мощность коры принята равной  $60$  км для всей Луны чисто условно по единственному, сравнительно детальному данным для района Фра-Мауро. Можно только утверждать, что мощная кора является глобальной особенностью Луны. На это, в частности, указывает большая величина теплового потока из недра Луны при относительно умеренных температурах ее наружных оболочек. Следовательно, радиоактивные источники должны быть вынесены к поверхности, что требует глобальной

дифференциации лунных недр. В настоящее время установлено, что центр тяжести Луны примерно на 2 км смещен по отношению к центру геометрической фигуры нашего естественного спутника в направлении к его видимому полушарию. Столь большое смещение центра тяжести может быть объяснено значительной мощностью лунной коры на видимой стороне Луны. Не исключено, что там мощность лунной коры превосходит 100 километров. Видимо, на континентах лунная кора может иметь одно-

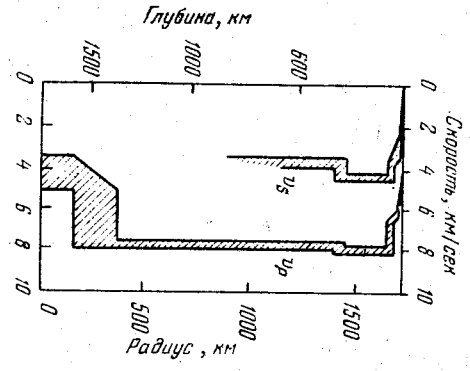


Рис. 40. Предварительный скоростной разрез Луны для  $v_p$  и  $v_s$ .

слоидное строение: анортозитовое сверху и ближе к фактору внизу. Игак, исследования показывают, что лунная кора может заметно меняться в горизонтальном направлении, иными словами, является горизонтально неоднородной.

Под корой расположена в верхней мантии Луны толщиной 250 км. Скорость  $v_p$  убывает от  $\sim 8,1$  км/сек до  $7,8$  км/сек. Распределение  $v_s$  ( $l$ ) установлено менее надежно ( $l$  — глубина); как видно из рис. 40, скорости  $v_s$  также убывают с глубиной от значении, равного  $\sim 4,7$  км/сек. Вероятный состав — пироксен-оливиновый.

Средняя мантия расположена на глубинах  $\sim 300-800$  км. Она отделена небольшим скачком  $v_p$  и  $v_s$ -волн от верхней мантии. Состав средней мантии еще более неопределен. В отличие от верхней мантии вещество средней мантии Луны может быть только частично дифференцировано в начальную эпоху лунной эволюции, и ее состав близок к первичному веществу, из которого образовалась Луна.

Кора, верхняя мантия и средняя мантия Луны образуют жесткую литосферу Луны, которая выдерживает заметные напряжения из-за неравномерности Луны. Добротность  $Q_s$  лунной литосферы порядка нескольких тысяч.

Столь большие значения  $Q_s$  объясняются тем, что вещество лунных недр практически не содержит летучих веществ ( $H_2O$ ,  $CO_2$  и др.), которые оно потеряло еще до образования Луны, следовательно, вещество лунной литосферы «не загрязнено» и, кроме того, температуры внешних оболочек Луны заметно ниже температуры плавления.

Нижняя мантия Луны расположена глубже,  $\sim 1000$  км. Ее отличает сильное поглощение сейсмических волн.  $Q_p$  заметно меньше 500. Соответственно, эту зону называют лунной астеносферой. Видимо, в лунной астеносфере температуры приближаются к температурам плавления ( $\sim 1500^\circ C$ ) или же вещество находится в состоянии частично плавления. Согласно распределению скоростей на рис. 40 у Луны может быть маленькое ядро с радиусом в несколько сотен километров. Ядро находится в расплавленном или полурасплавленном состоянии, так как через него не проходят поперечные волны, и состоит из раствора Fe—FeS.

Современное состояние лунных недр характеризуется очень низким уровнем сейсмичности. Полное выделение сейсмической энергии за год для Луны составляет  $\sim 10^{13} - 10^{15}$  эрг/год, что на  $12-10$  порядков меньше, чем для Земли. Все луноотражения исключительно слабы и их фокальные зоны расположены на глубинах 700—1000 км, т. е. в пограничной зоне между литосферой и астеносферой, где по расчетам должны концентрироваться напряжения из-за неравномерности фигуры Луны. Интересной особенностью лунной сейсмичности является ее периодичность с периодами, равными периодам лунных приливов (13,6 дня; 27,2 дня; 27,5 дня и 206 дней). Такими образом, лунные приливы служат или спусковым механизмом для луноотражений или же источником их энергии.

## 10.2. ФИГУРА И ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ

Геометрическая фигура Луны близка к сфере  $R = 1738$  км, чему отвечает средняя плотность Луны  $\rho = 3,344 \pm 0,004$  г/см<sup>3</sup>. Из-за того, что лунные моря видны котлы в среднем понижениями относительно континентов и расположены они в основном на видимом полушарии, профиль высот ближайшего к нам полушария в общем

отрицателен по отношению к средней сфере, а профиль высот обратной стороны Луны соответственно положительен. Мы уже отмечали, что центр масс Луны смещен от посетельно геометрического центра к Земле примерно на 2 км. Гравитационное поле Луны в настоящее время детально исследовано по наблюдениям за искусственными спутниками Луны. В формуле для гравитационного потенциала (18) определены коэффициенты с  $n \leq 13$ . Это позволяет рассмотреть вопрос об отклонении фигуры Луны от гидростатической равновесной.

Если бы Луна была достаточно разогретой и пластичной, так чтобы ее фигура могла принять равновесную форму, то современной угловой скорости ее вращения соответствовало бы значение экваториального радиуса  $a = R + \Delta a$ ,  $\Delta a = 2,5$  м, а полярный радиус  $b$  был бы несколько меньше среднего  $b = R + \Delta b$ ,  $\Delta b = -10$  м. В поле Земли равновесная фигура Луны будет трехосной. Совместим начало координат с центром тяжести Луны, ось  $x$  расположим в экваториальной плоскости и направим к Земле, ось  $y$  выберем по направлению движения Луны по орбите, а ось  $z$  вдоль оси вращения. Тогда

$$a_x = R + \Delta a_x, \quad \Delta a_x = 39 \text{ м}, \quad a_y = R + \Delta a_y, \\ \Delta a_y = -11 \text{ м}, \quad a_z = R + \Delta a_z, \quad \Delta a_z = -28 \text{ м}.$$

Если теперь воспользоваться реальными значениями гравитационных моментов для Луны, определяющих ее внешнее гравитационное поле (18), то получим следующие величины для осей динамической фигуры Луны:  $a_x = R + \Delta a_x$ ,  $\Delta a_x \approx 510$  м, причем вклад в это значение гармоник с  $n > 2$  равен примерно 20%,  $a_y = R + \Delta a_y$ ,  $\Delta a_y = 490$  м, а вклад высших гармоник ( $n > 2$ ) в два с лишним раза больше, чем вклад от гармоник с  $n = 2$ . Полярная ось  $a_z$  меньше среднего радиуса на  $\Delta a_z = -520$  м, причем вклад в это значение гармоник с  $n > 2$  составляет  $\sim 7\%$ . Эти результаты приводят к важным выводам. В § 2.5 было введено понятие о высотах геоида Земли, которые оказались  $\sim 70$  м и характеризовали отклонение динамической фигуры Земли от нормального эллипсоида вращения, а гравитационного поля Земли от нормального поля. В случае Луны за нормальную фигуру можно выбрать сферу среднего радиуса  $R$ , о которой мы говорили выше, так как отклонение равновесной фигуры Луны от сферы мало и лежит в пределах

нескольких десятков метров. Динамическую фигуру Луны, определяемую уровнем поверхности ее внешнего гравитационного потенциала, можно назвать селеноидом, причем высоты селеноида, как мы только что видели, равны примерно 500 м, что на порядок больше, чем высоты геоида. Следовательно, отклонение Луны от гидростатического равновесия на порядок больше, чем Земли. Напряжения в теле планеты пропорциональны произведению ускорения силы тяжести на высоту геоида (или селеноида). Так как ускорение силы тяжести к Луне в шесть раз меньше, чем в Земле, то, несмотря на значительно большую неравномерность Луны, напряжения в ней примерно также же, как и в Земле. Наличие «размеченной» центральная области у Луны с радиусом 700 км приводит к некоторой концентрации касательных напряжений у подошвы лунной литосферы, где они равны примерно 40 бар.

Если бы фигура Луны была не равновесной, но описывалась бы сферическими функциями второго порядка  $n = 2$ , то тогда можно было бы сделать вывод о том, что в настоящее время мы наблюдаем «застывшую» древнюю равновесную фигуру Луны, которую она имела в начальный период своей истории, когда ее орбита была значительно ближе к Земле и соответственно ее угловая скорость вращения была заметно большей. (Луна из-за приливного трения должна была прийти в состояние синхронного вращения вскоре после своего образования в окрестности Земли.)

Тот факт, что гармоник с  $n > 2$  вносят существенный вклад в отклонение фигуры Луны от равновесной, и то, что эта неравномерность сохраняется последние 3,5 · 10<sup>9</sup> лет лунной истории, указывает на то, что наружные слои Луны должны были быть достаточно прочными, а следовательно, достаточно холодными, чтобы выдерживать все это время напряжения из-за неравномерности лунной фигуры. Кроме того, можно полагать, что заметный вклад в создание этой неравномерности внесла бомбардировка поверхности Луны большими телами (4,0 ÷ 3,8) · 10<sup>9</sup> лет назад, в эпоху образования лунных морей.

В 1968 г. Моллер и Свигрен, изучая гравитационное поле Луны, обнаружили крупные положительные аномалии и ввели понятие о масконах как источниках этих аномалий. Масконы обнаружены на видимой стороне

Луны и около лимба (края Луны), причем наибольшие из них соизмерены с главными круговыми морями (Море Дождей, Море Яности, Море Кризисов, Море Восточное, Море Нектара и Море Влажности). Существование мегалы наблюдается не позволяют вылить масконы обратной стороны Луны. Однако тот факт, что на обратной стороне отсутствуют большие круговые моря, позволяет предположить, что там нет и крупных масконов.

На Земле положительные гравитационные аномалии встречаются над континентами и горными областями, а отрицательные — над глубокоководными океаническими впадинами.

Особенность лунных масконов в том и заключается, что они связаны с понижениями лунной поверхности. Исследование показывает, что аномальные массы, дающие масконы, расположены в наружных слоях Луны и хорошо описываются дискообразными моделями. Наиболее крупным масконам отвечают аномальные массы примерно в  $20 \cdot 10^6$  массы Луны, что составляет  $\sim 10^{21}$  г. Если отнести аномальные массы к уровню поверхности Луны, то для круговых морей величина избыточной массы на единицу площади приблизительно одинакова и равна  $800-900 \text{ кг/см}^2$ . Такая величина была бы эквивалентна дополнительному слою базальта толщиной 3 км при плотности  $3,0 \text{ г/см}^3$ . Если маскон образован распределением у поверхности лунным морским базальтом ( $\rho \sim 3,3 \text{ г/см}^3$ ) в анортозитовой коре ( $\rho \sim 2,9 \text{ г/см}^3$ ), так что контраст плотности  $\Delta\rho \sim 0,4 \text{ г/см}^3$ , то толщина базальтового слоя должна быть равна  $\sim 20 \text{ км}$ . Места расположения масконов являются топографически понижениями и связаны с геологически древними образованиями. Поскольку круговые моря генетически связаны с падениями на поверхность Луны крупных тел, то эти события сыграли важную роль в образовании масконов. Падение этих тел и заполнение круговых морей разделены заметным интервалом времени. Возможность того, что масконы образованы самими упавшими телами, в настоящее время представляется маловероятной. Поэтому возникновение масконов связано с перетеканием вещества в теле Луны и, по-видимому, требует следующей цепи событий, вне зависимости от конкретного механизма образования масконов.

На раннем этапе развития Луна выделила свою кору с плотностью меньшей, чем плотность подстилаю-

щей ее мантии. По-видимому, в эту эпоху наружные слои Луны были достаточно разогреты, обладали высокой пластичностью и находились в состоянии, близком к гидростатическому равновесию. Удары крупных тел о поверхность Луны привели к образованию на месте бугорчатых круговых морей больших кратеров, которые затем стали тем или иным способом изостатически выравниваться. След за этим Луна вступила в сравнительно спокойный период, в течение которого происходило формирование ее литосферы в результате охлаждения наружных слоев. По-видимому, в эту эпоху Луна приняла и зафиксировала свою фигуру. Тогда же наружные слои Луны приобрели прочность, достаточную как для сохранения своей неравномерной фигуры, так и для поддержания масконов. Заполнение базальтовой лавой круговых морей вслед за образованием лунной литосферы привело к окончательному образованию масконов.

Масконы представляют собой такое же неравномерное образование на Луне, как и ее фигура, только другого пространственного масштаба. Наличие масконов приводит к отклонению недр Луны от гидростатических условий и порождает касательные (сдвиговые) напряжения порядка  $50-100 \text{ бар}$  в наружном слое Луны мощностью в несколько сотен километров.

Существует несколько различных гипотез, объясняющих образование масконов путем перетекания вещества в теле Луны. Гипотезы, связанные с локальным переносом массы, требуют, чтобы в окрестности маскона существовал дефицит массы и, следовательно, отрицательные гравитационные аномалии. В настоящее время намечается окаймливание некоторых масконов кольцом отрицательных аномалий. Этот вопрос находится в стадии исследования. Открытие лунных масконов представляет пример важного, неожиданныго открытия в космосе.

### 10.3. МАГНЕТИЗМ ЛУНЫ

Магнетизм Луны изучался как советскими, так и американскими исследователями космоса. Магнетизм Луны необычен. Действительно, у Луны не обнаружено собственного дипольного магнитного момента заметной величины. По оценкам величина магнитного диполя Луны  $M_L < 10^{20} \text{ эс}\cdot\text{см}^3$ . Это в  $10^6$  раз меньше, чем магнитный момент Земли и в 300 раз меньше магнитного момента

Марса. Если такой момент поместить в Центре Луны, то магнитное поле на ее поверхность будет всего несколько *гаусс*.

То, что Луна не обладает заметным дипольным полем, было известно до начала экспедиций «Аполлонов». Поэтому открытие магнетизма Луны явилось большой неожиданностью. Оказалось, что лунные магнитное поле крайне нерегулярно как по направлению, так и по величине. Так, в месте посадки А-15 (район Аненин и Борелды Хэдли у юго-восточного края Моря Дождей) величина магнитного поля составляет 6 *гаусс*, в Океане Бурь (А-12) поле составляет 40 *гаусс*, а на насыпной формации Фра-Мауро (А-14), образовавшейся в Океане Бурь выбросом материала при ударном образовании Моря Дождей, ~ 100 *гаусс*, наконец в континентальной области (район кратера Декарт, 9°S, 15.5°E) поле на протяжении нескольких километров меняется на сотни *гаусс*. Достигая величины 300 *гаусс*. Исследования, проведенные аппаратами «Аполлон» с окололунных орбит, показали, что кора континентов намагничена сильнее, чем кора лунных морей. После на обратной стороне Луны также сильно перемно и характеризуется локальными минимумами в местах расположения кратеров. Исследование образцов лунного грунта в лабораториях позволило установить, что основными носителями магнетизма являются мелкокристаллические частички железа, содержащиеся как в скальных лунных базальтовых породах (~ 0,05%), так и в лунном реголите (~ 0,5%). Видимо, большую роль в образовании «тубулентной» структуры лунного магнетизма сыграла ударная обработка поверхности Луны на протяжении ее истории. Изучение лунных образцов привело к заключению, что на протяжении от ~ 4 · 10<sup>9</sup> лет до ~ 3 · 10<sup>9</sup> лет назад лунные породы подвергались воздействию магнитного поля величиной в несколько тыс. *гаусс*. Эти данные указывают, что не исключено, что Луна обладала собственным магнитным полем сразу же после своего образования ~ 4,6 · 10<sup>9</sup> лет назад и до ~ 3,2 · 10<sup>9</sup> лет назад — момента, когда прекратилась активная вулканическая жизнь Луны.

Происхождение магнитного поля можно объяснить или первоначально горячей Луной с активно действующим механизмом гидромагнитного динамо, или же сравнительно холодной Луной (температура ниже 800°С, виле точки Кюри для железа), «запомнившей» какое-то

магнитное событие, имевшее место в прошлом. Большинство специалистов склоняется к мнению, что внешние магнитные поля не могли явиться причиной лунного магнетизма. Резюмируя, можно сказать, что происхождение древнего магнитного поля, которое намагнитило первичную лунную кору и лунные горные породы, является одним из важнейших нерешенных вопросов, стоящих перед исследователями Луны.

#### 10.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Электромагнитное зондирование Луны осуществляется путем исследования ее реакции на переменное поле, переносимое солнечным ветром. Результаты зондирования основаны на показаниях трех магнитометров (А-12, А-15 и А-16), расположенных на лунной поверхности, и показаний магнитометра на лунном спутнике «Эксплорер-35», одновременно измерявшем магнитное поле солнечного ветра в окрестностях Луны. Определение электропроводности лунных недр является сложной и неопределенной задачей. Решения, предложенные различными исследовательскими группами, показаны на рис. 41. Все эти решения кубично-постоянные, т. е. недра Луны разбиваются на

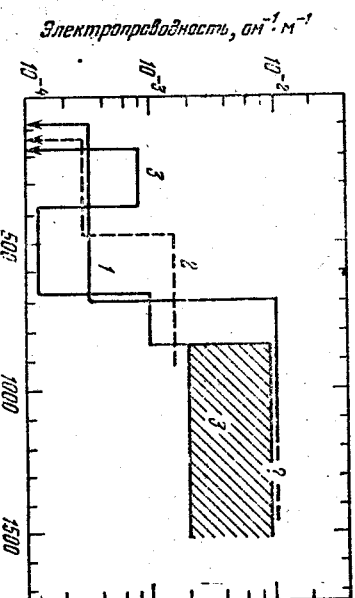


Рис. 41. Распределение коэффициента электропроводности в недрах Луны по данным разных авторов. 1 — Длина с сотрудниками, 2 — Сонетт с сотрудниками, 3 — Ваньян с сотрудниками.

слои с постоянной электропроводностью. Качественно они похожи, хотя решение Ваньяна и сотрудников (кривая 3) имеет минимум электропроводности на глубинах 370—670 км. Если бы были известны состав различных

облоочек лунных недр, то, измеряя в лаборатории электропроводность этих веществ в предполагаемых ( $p, T$ ) условиях, мы затем по данным об электропроводности, приведенным на рис. 41, могли бы оценить температуры, соответствующие в недрах Луны. В действительности проблема составления лунных недр далека от своего решения. Тем не менее, данные, показанные на рис. 41, используются для оценки температур. Так, в предположении оливинового состава распределение, полученное Дейлом с сотрудниками (Кривая 2) и Солеттом с сотрудниками (Кривая 3), дают оценочные температуры  $\sim 1000^\circ\text{C}$  на глубинах  $\sim 700$  км. Если предположить прорекено-оливиновый состав, то температуры получаются более высокими:  $\sim 1000^\circ\text{C}$  на глубине  $\sim 400$  км и  $1400^\circ\text{C}$  на глубинах 800 км. Хотя оценки температур по данным об электропроводности приводятся во многих работах, они еще очень ненадежны.

Как общий вывод, можно принять, что электропроводность наружных слоев Луны заметно меньше электропроводности наружных оболочек Земли, что указывает на более низкие температуры в Луне. Этот вывод согласуется с данными гравиметрии, в частности, с данными о массах, которые также указывают, правда, косвенно, на сравнительно низкие температуры в наружных слоях Луны.

#### 10.5. ТЕПЛОВОЙ ПОТОК

Тепловой поток из недр планеты определяется по формуле (34). На Луне выполнено два измерения теплового потока (A-15 и A-17). В обоих случаях бурлилась скважина на глубину  $\sim 230$  см, в которую вводился тепловой зонд. Стационарные температуры в Луне (не возмущаемые колебаниями температуры на дневной поверхности) устанавливаются на глубине  $\sim 70$  см и равны  $\sim 253^\circ\text{K}$ . Начиная с этой глубины, температурный градиент, отрицательный стационарный тепловой поток из недр к поверхности, составил  $\sim 1,3-1,7^\circ/\text{м}$ . Верхние 2 см реголита при температуре  $220^\circ\text{K}$  характеризуются очень низкой теплопроводностью,  $\sim 3,5 \cdot 10^{-6}$  кал/см·град·сек. С ростом глубины теплопроводность быстро нарастает. На глубинах от 50 до 230 см были получены значения от  $5,3 \cdot 10^{-5}$  до  $1,23 \cdot 10^{-4}$  кал/см·град·сек. Рост теплопроводности является следствием уплотнения лунного

грунта с глубиной. Места измерения теплового потока были в поряничном районе между морской и континентальной областями (A-15) и в континентальной области (A-17). Вначале Лансет с сотрудниками получили для теплового потока для обоих районов примерно одинаковые значения, равные  $0,70 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·сек. Однако дополнительный анализ привел авторов к заключению, что первые опубликованные ими результаты содержат систематическую ошибку. После пересмотра данных оказалось, что тепловой поток в месте посадки A-15 равен  $0,53 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·сек, а для района посадки A-17  $0,38 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·сек. Получается так, что разные геологические структуры на Луне, так же как и на Земле, характеризуются различными тепловыми потоками. Это означает, что при исследовании Луны может быть использован метод структурной селенотермии. Получается, что тепловой поток из недр Луны примерно в три раза меньше земного теплового потока.

Поясним теперь простой оценкой, почему тепловой поток из недр Луны следует считать большим. Предположим, что тепловое состояние Земли и Луны примерно стационарно, т. е. количество тепла, вытекающее через поверхность обоих тел, равно количеству тепла, выделяемому в их недрах. Такое предположение близко к действительности. Тогда тепловой поток пропорционален объему и обратно пропорционален поверхности тела:

$$\frac{q_L}{q_3} = \frac{(V_L/S_L)}{(V_3/S_3)} \sim \frac{V_L}{V_3} \cdot \frac{S_3}{S_L} = \frac{R_L}{R_3}.$$

Следовательно, отношение тепловых потоков в предположении одинаковой концентрации источников, грубо говоря, равно отношению радиусов  $R_L = 1738$  км и  $R_3 = 6371$  км. Это отношение получается равным  $1/4$ , а лунный поток  $q_L = \frac{1}{3} q_3$ . Следовательно, концентрация источников тепла в лунных породах в среднем должна превышать концентрацию радиоактивных источников тепла в земных породах.

Данные о тепловом потоке позволяют сделать еще два важных вывода. Мы уже отметили, что наружные слои Луны сравнительно холодные и прочные (не пластичные), так как на протяжении  $\sim 3,5 \cdot 10^9$  лет они выдерживают напряжения от лунных массовов. Это возможно

лится в том случае, если недра Луны претерпели глубокую дифференциацию с выделением лунной коры и выносом в нее почти всех радиоактивных источников в раннем этапе лунной истории. Тепло от радиоактивных источников, сконцентрированных в коре, отводится через поверхность Луны и почти не идет на нагревание ее недр.

Второй вопрос, на который помогают ответить данные о лунном тепловом потоке, это проблема источников энергии, из которой формируется тепловой поток. В случае Луны не существует никаких источников, кроме радиоактивности, которые могли бы давать существенный вклад в формирование теплового потока. Сделать такой же однозначный вывод в отношении Земли значительно труднее. Хотя радиоактивных источников тепла в Земле достаточно, чтобы объяснить ее тепловой поток, тем не менее последние 10 лет все настойчивее выдвигается гипотеза о важной роли энергии, выделяемой в Земле из-за все еще протекающих в ней процессов гравитационной дифференциации. Данные о лунном тепловом потоке можно рассматривать как косвенное указание на то, что и в Земле тепловой поток формируется за счет радиоактивности. Температуры в недрах Луны оценить очень трудно. В качестве оценок можно положить  $\sim 400^\circ\text{C}$  на глубине 200 км,  $\sim 800^\circ\text{C}$  на глубине  $\sim 500$  км,  $\sim 1200\text{--}1500^\circ\text{C}$  на глубине  $\sim 1000$  км, в центре Луны температуры не выше  $\sim 1600^\circ\text{C}$ .

#### 10.6. ЛУННАЯ ХРОНОЛОГИЯ

На Луне нет и, видимо, никогда не было плотной атмосферы и гидросферы. В результате поверхность Луны запечатлела и сохранила следы начальной истории Солнечной системы. В связи с этим исследование Луны имеет исключительно большое значение для проблемы происхождения и эволюции Земли и планет. В этом смысле Луна для проблемы происхождения представляет особый интерес, чем, скажем, Земля, Венера и Марс — планеты, на которых процессы эрозии стерли следы ранней истории. Методом радиоактивного датирования лунных образцов, доставленных на Землю, установлено, что возраст Луны равен  $\sim 4,6 \cdot 10^9$  лет. Образование лунной коры мощностью 60—100 км из-за частичного или полного плавления наружных слоев Луны и процессов гравитационной дифференциации произошло как на стадии образования Луны как космического тела, так и в последующие  $\sim (2 \div 3) \cdot 10^8$  лет. Эпоха образования первичной коры перекрывается со следующим этапом лунной истории продолжительностью от  $2 \cdot 10^8$  до  $6 \cdot 10^8$  лет. Это был период активной вулканической деятельности, интенсивной бомбардировки лунной поверхности метеоритами, в результате чего возникли лунные брекчии и произошло ударный метаморфизм древних пород. Следующим этапом являются первые  $0,6 \cdot 10^9$  лет активной роли иррадиации как эндогенные (внутренние), так и экзогенные (внешние) процессы. В это же раннее время произошло выделение анортозитового «плота» Луны, образовавшего ее первичную кору, и выделение ранних лунных базальтов. Следующая эпоха, длившаяся  $\sim 10^8$  лет ( $\sim 6 \cdot 10^8 \div 7 \cdot 10^8$  лет после образования Луны), характеризуется ударным образованием крупных лунных морей (Море Дождя, Море Восточное, Море Ясности, Море Кризиса и др.). Выбросы из кратеров будующих крупных морей образовали насыпные горы и некоторые формации, например, Фра-Мауро в Океане Бурь, и в значительной степени стерли следы предыдущей истории лунной поверхности.

Следующий период связан с заполнением базальтовой лавой лунных морей и завершением образования масконов. Этот эпизод был весьма продолжительным (от  $\sim 3,9 \cdot 10^8$  до  $3,6 \cdot 10^8$  лет назад). Таким образом, как отмечалось выше, события заполнения их лавой различных морей и события заполнения их лавой различных лунных морей не менялся за счет эндогенных процессов, хотя надежде на нее метеоритов и образование кратеров происходило. Таким образом, эрозия лунной поверхности в последние  $3 \cdot 10^8$  лет обусловлена только метеоритной бомбардировкой. Эта бомбардировка, по существу, не стерла главных событий в жизни Луны, о которых мы говорили выше.

Исследования Луны, проведенные космическими аппаратами в последние 10 лет, сделали наши представления о ней более конкретными. Но более конкретными стали и все важнейшие проблемы, связанные с Луной и Солнечной системой в целом. Решение этих проблем — дело будущего и, видимо, требует больших усилий.



*Виджур Наумосич Жарков*

**ВНУТРЕННИЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ**

М., 1978 г., 192 стр. с илл.

Редактор *Г. С. Кудинков*

Техн. редактор *Н. В. Кошелева*

Корректоры *Е. А. Белуцкая, Л. Н. Воронина*

ИБ № 2470

Снято в набор 12.06.78. Подписано к печати 10.11.78. Т-20135.  
Бумага 84×108/16, тип. № 2. Обыкновенная радничтура.  
Высокая печать. Условн. печ. л. 10,08. Уч.-изд. л. 10,25.  
Тираж 40000 экз. Заказ № 188. Цена книги 50 коп.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы  
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Типография № 4. Изд-ва «Наука». 630077, Новосибирск, 77.  
Станиславского, 25.