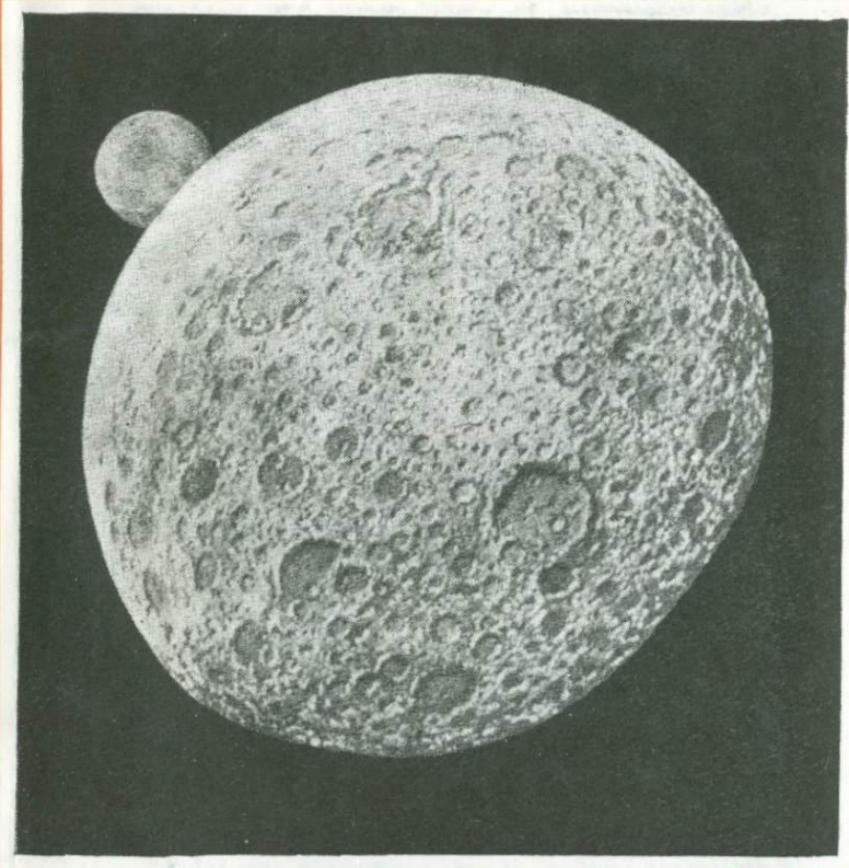


И.Н.ГАЛКИН
ГЕОФИЗИКА
ЛУНЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Серия «Планета Земля и Вселенная»

550.3

И. Н. ГАЛКИН

ГЕОФИЗИКА
ЛУНЫ

205993



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1978

Г 16 Галкин И. Н. Геофизика Луны. М.: Наука, 1978, с. 176,
ил.

В книге рассказывается о результатах исследований внутреннего строения естественного спутника Земли. Рассматриваются современные методы изучения лунных недр, сопоставляются физические свойства, глубинное строение и тектоника Луны и Земли. Обсуждаются гипотезы происхождения Луны, основные этапы ее эволюции.

36.7

Ответственный редактор
доктор ф.-м. наук
А. В. НИКОЛАЕВ

Г 20604—046
054(02)—78 30-78 НП

© Издательство «Наука», 1978 г.

ВВЕДЕНИЕ

Однаково таинственно светила Луна мыслителям Эллады, для которых она была богиней Селеной, и светит беспрекословным сыном космического века. Воспетая поэтами и фантастами, какие тайны хранит она? «Единокровная» часть Земли или «гость» из космоса, холодная или горячая, молодая или старая? Повернется ли к нам другой стороной? Быть ли лунному «Клондайку»? Что знает Луна о прошлом и будущем Земли?

Космические полеты позволили ответить на часть вопросов и одновременно поставили множество новых.

Однако для чего понадобилось предпринимать в наше время столь трудоемкие, дорогостоящие и рискованные экспедиции к Луне и на Луну? Разве мало у людей земных забот: сберечь окружающую среду от загрязнения, отыскать глубоко захороненные источники энергии, предсказать извержение вулкана, предотвратить землетрясение...

Но как это ни парадоксально на первый взгляд, понять Землю, не посмотрев на нее извне, трудно. Вот уж подлинно — «большое видится на расстоянии».

Человек всегда стремился познать свою планету. С того далекого времени, когда он понял, что Земля не покоятся на трех китах, он многое постиг.

Земные недра изучает геофизика. Исследуя с помощью приборов отдельные физические свойства планеты — магнетизм, гравитацию, тепло, электропроводность, — можно попытаться воссоздать ее цельный образ. Особо важную роль в этих исследованиях играют сейсмические волны: они, словно луч прожектора, освещают на своем пути недра Земли.

Однако даже с таким сверхзрением видно далеко не все. Внешние оболочки Земли (атмосфера, гидросфера, биосфера), столь поразительно расцвечивающие земной глобус белым, голубым, зеленым, за миллиарды лет неизвестно изменили ее поверхность. А в недрах активные

магматические и тектонические процессы неоднократно переплавляли первозданные породы. Возраст самых древних образцов (3,8 млрд. лет) почти на миллиард лет меньше возраста Земли. Знать же, какой Земля была вначале, значит понять ее эволюцию, значит надежнее прогнозировать будущее.

Но ведь не так уж далеко от Земли есть космическое тело, поверхность которого не подвержена эрозии. Это — вечный и единственный естественный спутник Земли — Луна. Найти на ней следы первых шагов Земли во Вселенной — эти надежды ученых оказались ненапрасными.

О космических исследованиях Луны можно говорить много. Но в этой книге мы подробно рассмотрим одну проблему — исследование структуры лунных недр.

«Селенофизика» как наука о свойствах Луны только зарождается. Методы изучения Луны, научные приборы, способы обработки данных — в основном те же, что и при исследовании Земли. Поэтому в научной практике и публикациях принят термин «геофизические исследования Луны». Мы воспользовались им, назвав книгу «Геофизика Луны». В пользу такого названия говорит и то, что Луна похожа на Землю, и то, что для науки целесообразно сравнивать свойства Земли со свойствами ее «седьмого континента» — Луны.

Первый этап непосредственных исследований на Луне закончился, но активность и энтузиазм ученых при обсуждении лунных проблем не угасает. Продолжаются жаркие дискуссии на международных конференциях, не иссякает поток статей в научной периодике.

В основу книги положен материал, который публиковался, докладывался и обсуждался на Московской советско-американской конференции по космохимии Луны и планет в 1974 г. и на последующих ежегодных лунных конференциях в Хьюстоне в 1975—1977 гг. Огромный объем новейшей информации о структуре, составе и состоянии лунных недр, а также популярный характер издания лишают автора возможности обсудить все нюансы затронутых проблем и упомянуть все точки зрения и имена ученых, внесших свой вклад в исследования естественного спутника Земли.

КОСМИЧЕСКАЯ ОДИССЕЯ

Особенный спутник

То, что знали о Луне в докосмический период, показано в табл. 1. Эта небольшая колонка цифр говорит о необычных качествах нашего спутника.

Луна издавна изумляла астрономов. У иных планет солнечной системы имеется по несколько спутников, а масса их по сравнению с массой планеты весьма незначительна. Луна же единственный спутник Земли, но масса ее так велика, что астрономы говорят о «системе планет Земля — Луна» (центр масс этой системы сдвинут от центра Земли на 4671 км; Земля движется вокруг него со скоростью 12,4 км/с и с периодом 1 мес). Луна лишь в 81 раз легче Земли, объем ее в 49 раз меньше, площадь поверхности не больше площади Азии, а ускорение силы тяжести в 6 раз слабее, чем на Земле.

Сравнимые массы планет, не обладающих абсолютной жесткостью, приводят к характерному явлению — взаимному приливному взаимодействию. На Земле оно проявляется в приливах и отливах воды в океанах. Приливы отмечаются и в твердой Земле — горб высотой несколько десятков сантиметров обегает ее поверхность, постепенно затормаживая вращение.

Земедление вращения Земли (земные сутки миллиарды лет назад составляли всего 4 ч) компенсируется вековым «убеганием» Луны от Земли со скоростью 3 см в год. Вследствие этого наступило равновесное состояние, при котором периоды обращения Луны вокруг своей оси и вокруг Земли совпадали. Это привело к досадному обстоятельству: во все века, кроме последнего, космического, люди могли видеть лишь чуть больше половины поверхности Луны.

Орбита Луны едва ли не самая сложная из всех планетарных орбит в солнечной системе. Луна вращается вокруг Земли по слегка сплющенному эллипсу, ее ось, хотя и

Таблица 1

Планетарные характеристики Луны

Масса	$7,353 \cdot 10^{25}$ г
Объем	$2,2 \cdot 10^{25}$ см ³
Площадь	$3,8 \cdot 10^7$ км ²
Плотность	$3,34 \pm 0,04$ г/см ³

Расстояние Земля — Луна:

среднее	384 402 км
в перигее	356 400 »
в апогее	406 800 »

Эксцентриситет орбиты 0,0432—0,0666

Радиус (средний) 1737 км

Наклон оси:

к плоскости лунной орбиты	83°11'—83°29'
к эклиптике	88°28'
Сидерический месяц (относительно звезд)	27,32 сут
Синодический месяц (равные фазы)	29,53 сут
Ускорение силы тяжести на по- верхности	162 см/с ²
Скорость отрыва от Луны (вто- рая космическая)	2,37 км/с

не так сильно как Земная, все же наклонена на несколько градусов к плоскости лунной орбиты и к эклиптике.

Среднее расстояние Луны от Земли 384 402 км. Радиосигнал проходит эту дистанцию за одну секунду с небольшим, ракета тратит на полет около двух суток, а пешеход, вздумай он отправиться в путь по окончании института, при среднем «туристском» темпе движения доехал бы до цели к пенсии.

Вместе с Землей Луна несется со скоростью 30 км/с вокруг Солнца. Лунные сутки делятся почти земной месяц — так лениво поворачивается Луна вокруг своей оси.

В результате этих движений спутника земные наблюдатели не только видят смену фаз от новолуния до полнолуния, не только убеждаются, что рисунок темных и светлых пятен на его поверхности всегда одинаков, но и могут слегка заглянуть на другую сторону Луны. Благодаря этой

так называемой оптической либрации Луна обнаруживает еще около 10% поверхности.

Из-за того, что Луна за каждый свой оборот вокруг Земли проходит также и часть гелиоцентрической орбиты, истинное время обращения ее вокруг оси, т. е. интервал между одинаковыми положениями Луны относительно звезд (сидерический лунный месяц), почти на двое суток отличается от интервалов между одинаковыми «фазами» Луны для земного наблюдателя (синодический месяц).

Кроме оптической, существует еще истинная, физическая либрация Луны — ее покачивание относительно прямой, соединяющей центры масс Земли и Луны. Покачивание объясняется суммарным действием гравитационных полей Земли и Солнца, его амплитуда всего несколько градусов, а периоды — несколько месяцев и несколько лет. Пронаблюдать и изучить такие маленькие и очень медленные покачивания совсем непросто, но ученым повезло: либрация, как мы увидим дальше, отражается в сейсмическом режиме Луны.

Познакомиться с физическим миром Луны поближе люди смогли лишь в конце 60-х годов нашего века, когда ракетная техника позволила достичь вторую космическую скорость (11,2 км/с) и направить автоматическую межпланетную станцию к Луне.

Лунная космическая одиссея началась 2 января 1959 г. стартом советской космической ракеты «Луна-1».

«Умные» автоматы

Через 34 ч после старта «Луна-1» пронеслась на расстоянии 5—6 тыс. км от поверхности Селены и стала первой искусственной планетой солнечной системы.

На Землю была передана первая «феноменальная» новость: у Луны нет магнитного поля. Потом эти наблюдения уточнялись. Выяснилось, что намагниченность пород внешнего происхождения там все же существует, но она очень мала и регулярного магнита, как у Земли, на Луне нет.

В сентябре того же года другой аппарат — «Луна-2» — достиг поверхности Селены, а еще через месяц, в день двухлетия запуска первого искусственного спутника Земли, космический аппарат «Луна-3» передал первые телеснимки невидимой с Земли стороны Луны. Эта съемка была повторена и дополнена «Зондом-3» в 1965 г. и амери-

канскими аппаратами. В результате были созданы карта обратной стороны Луны и ее глобус.

Затем последовала серия полетов с целью отработки мягкой посадки автомата на поверхность Селены. Американские «Рейнджеры» сфотографировали панорамы прилунения с высоты от нескольких километров до нескольких сот метров. Выяснилось, что буквально вся поверхность Луны испещрена малыми кратерами диаметром около 1 м.

Однако «пощупать» лунную поверхность удалось лишь через 7 лет после первого попадания ракеты на Луну — слишком сложной в техническом отношении оказалась задача прилунения при отсутствии тормозящей атмосферы. Первую мягкую посадку совершила «Луна-9», а затем прилунился ряд советских и американских автоматических станций и лунных экспедиций «Аполлон» (рис. 1).

Автоматическая лунная станция «Луна-9» в течение трех дней передавала на Землю телевизионные изображения лунного ландшафта и развеяла миф о том, что поверхность Селены покрывает толстый слой пыли. Этот вывод подтвердился и американским автоматом «Сервейер», который провел такой эксперимент: одновременно с работой телекамеры были на секунду включены двигатели бортовой системы стабилизации аппарата. Плотность пылевого покрова оказалась равной 1—2 г/см³.

Первоначальные данные с Луны поступали на Землю только по радиотелеметрическим и телевизионным каналам. Они стали много качественнее и полнее после отработки систем возвращаемых на Землю аппаратов: «Зонд-5» (1968) и «Зонд-8» (1970).

Естественные спутники имеются у всех, кроме Меркурия и Венеры, планет солнечной системы. Наблюдая за их движением, астрономы по величине момента инерции заранее узнают, однородна ли планета, сильно ли изменяются ее свойства от поверхности к центру. У Луны естественных спутников нет, но начиная с «Луны-10», над ней периодически появлялись искусственные спутники — автоматы, измерявшие поле тяготения, плотность потока метеоритов, космическую радиацию, а также состав пород лунного грунта задолго до того, как его образец попал под микроскоп в земной лаборатории.

Так, по измеренной со спутника концентрации радиоактивных элементов заключили, что лунные «моря» сложены породами, похожими на земные базальты. Величина

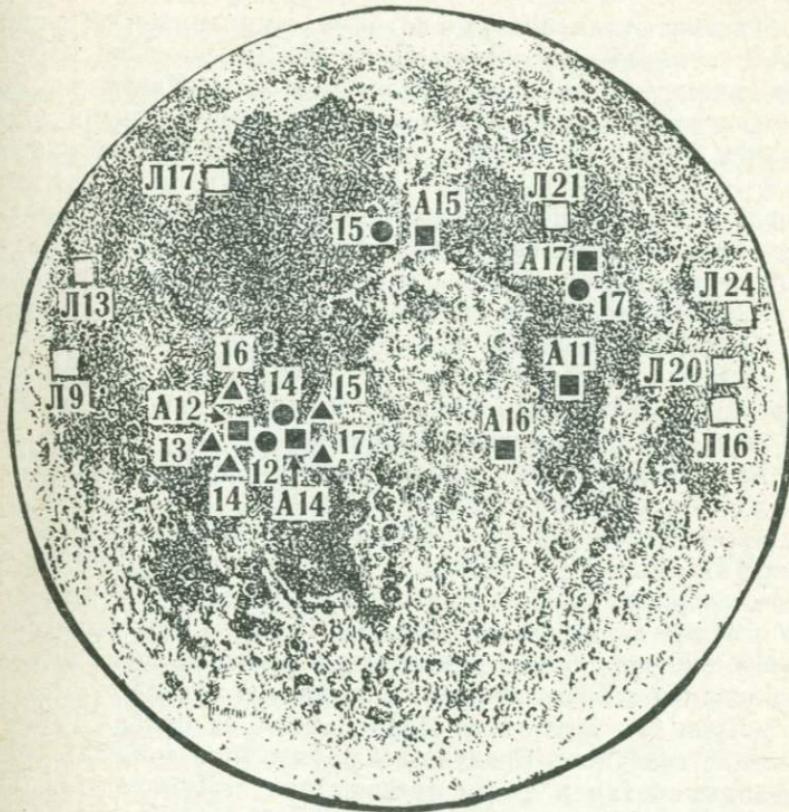


Рис. 1. Карта видимой стороны Луны с указанием мест посадки автоматических станций «Луна» (—, светлые квадраты) и экспедиций «Аполлон» (—, черные квадраты)

Кружки — места падения лунных модулей, треугольники — места падения третьих ступеней ракет; цифры при них соответствуют порядковому номеру экспедиций «Аполлон»

момента инерции Луны, определенная с помощью спутников, заставила думать, что Луна гораздо менее расслоена по сравнению с Землей. Эта точка зрения укрепилась, когда сперва по астрономическим данным рассчитали среднюю плотность Селены ($3,34 \text{ г}/\text{см}^3$), а потом непосредственно измерили плотность образцов лунной коры ($2,9 \text{ г}/\text{см}^3$). Орбитальные измерения выявили вытянутость поля тяготения на обратном полушарии Селены. В гравитационном поле видимой стороны были открыты крупные положительные аномалии — масконы.

Автоматы, запускаемые на Луну, становились все сложнее и «умнее». Станция «Луна-16» 24 сентября 1970 г. совершила мягкую посадку в районе Моря Изобилия. Робот-сelenолог осуществил сложные операции: выдвинулись штанга с буровым станком, электробур за 6 мин. погрузился в реголит на 350 мм, керн с лунным грунтом был упакован в герметический контейнер возвращаемого аппарата. Драгоценный груз был благополучно доставлен в земную лабораторию. Образцы оказались похожими на базальты, взятые в Океане Бурь на расстоянии около 2500 км от места посадки «Луны-16». Это подтвердило общность происхождения лунных «морей». 70 химических элементов, определенных в реголите Моря Изобилия, не выходят за рамки периодической системы Менделеева.

Второй автомат-сelenолог «Луна-20» в феврале 1972 г. взял и доставил на Землю пробу грунта из высокогорного «материкового» района, отделяющего Море Кризисов от Моря Изобилия. В отличие от базальтового состава «морского» образца континентальная пробы состояла в основном из светлых пород анортозитового типа, богатых плагиоклазом, окисью алюминия и кальция, и имела очень низкое содержание железа, ванадия, марганца и титана.

«Луна-17», достигшая Моря Дождей 17 ноября 1970 г., вызвала сенсацию. Коснувшись грунта, она «ожила» — по сходням съехал и начал путешествие «Луноход-1». Он имел массу 756 кг, габариты $2,2 \times 1,6 \times 1,2$ м. Восемь колес с независимыми подвесками и электродвигателями обеспечивали высокую проходимость и маневренность аппарата. В герметичном приборном отсеке поддерживались температура и влажность земной комнаты. Шесть электрических телескопоглаз осматривали трассу и передавали открывавшуюся перед ними панораму на Землю. Специальный конус с крестообразными лопастями вдавливался в грунт и поворачивался вокруг продольной оси, исследуя механические свойства реголита. Химический состав грунта определялся с помощью прибора с поэтическим названием РИФМА (рентгеновский изотопный флюоресцентный метод анализа). Любопытно, что в декабре РИФМА зафиксировала вспышку на Солнце, об этом же сообщила автоматическая станция «Венера-7».

Управляемый экипажем с Земли «Луноход-1» трудился 10,5 мес, прошел 11 км, обследовал рельеф и грунт на площади 80 тыс. м², передал на Землю более 200 панорам

и свыше 20 тыс. пейзажей лунного ландшафта, в 500 мес- тах трассы он исследовал физико-механические свойства и в 25 точках — химический состав грунта. Завершив про- грамму, «Луноход-1» не умер для науки: он повернул в на- правлении на Землю уголковый светоотражатель, изгото- ленный французскими учеными и инженерами для много- летней лазерной локации.

Вторая передвижная лаборатория «Луноход-2» начала маршруты 16 января 1973 г. в сложном по рельефу районе Моря Ясности — кратере Леманье. При создании второго лунохода использовался богатый опыт эксплуатации перво- го самоходного аппарата, применен ряд новых технических решений, расширен круг научных задач. Глаза «Лунохо- да-2» были более зоркими, они располагались выше и давали более широкую панораму. Кроме приборов для изме- рения химического состава и механических свойств грунта, на «Луноходе-2» был установлен астрофотометр для иссле- дования светимости лунного неба и магнитометр для опре- деления намагниченности отдельных участков лунной поверхности. В поле зрения телескопом находились фо- тометрические марки, с помощью которых изучались от- ражательные свойства поверхности для ориентировочного распознавания состава пород. РИФМА имела дополнитель- ные возможности исследовать рентгеновское излучение Солнца. На «Луноходе-2», как и на первом луноходе, были установлены радиометр для измерения характеристик кос- мических лучей солнечного и галактического происхожде- ния и уголковый отражатель для лазерной локации.

За время работы — 5 лунных дней — «Луноход-2» про- шел более 37 км. Два дня он двигался на юг в направлении материкового района, затем на восток к 16-километровому тектоническому разлому меридиального простирания. На Землю было передано 86 панорам и свыше 80 тыс. телес- снимков поверхности. Были подробно изучены различные морфологические образования: кратеры, каменистые рос- сыпи, камни, склоны разломов. По глубине свежих крате- ров определили, что толщина рыхлого слоя (реголита) равна 1—10 м. Число вторичных ударных кратеров диа- метром 0,5—2 м составило 25 % от общего числа кратеров этого размера.

Особенно интересным оказался тектонический разлом — Борозда Прямая глубиной 40—80 м. Он образовался давно, вскоре после того, как дно кратера Леманье было залито

базальтовой лавой, что свидетельствует о некогда активной «жизни» недр Луны. Луноход обнаружил выходы скальных пород мощностью несколько десятков метров, их несущая способность колебалась от 0,1 до 1,5 кг/см³. Измерения магнитного поля выявили его большую неоднородность, был открыт «парадокс Лунохода» — напряженность магнитного поля оказалась низкой, а палеомагнитность пород — высокой. Подробнее об этом будет рассказано дальше.

Этот странный лунный мир

Первый шаг человека на Луне, «такой маленький для него одного, но — скачок в истории человечества», был сделан 20 июля 1969 г. (рис. 2). Странный мир окружил двух первых посланцев Земли — Н. Армстронга и Э. Олдрина. Мир слабого тяготения, без воздуха, без воды, без жизни. Не было их на Луне и не будет никогда. Еще недавно думали иначе. Не только писатель-фантаст Герберт Уэллс в начале века придумывал приключения своих героев в подземных лабиринтах селенитов. Солидные ученые незадолго перед полетами «Луна» и «Аполлонов» всерьез обсуждали возможность существования в лунных условиях микроорганизмов. Именно поэтому астронавтов трех первых экспедиций «Аполлон» после возвращения на Землю подвергли двухнедельному карантину. За это время лунные образцы, в особенности рыхлого грунта (реголита), тщательно исследовали в микробиологических лабораториях, пытаясь оживить в них лунные бактерии, или найти следы погибших микробов, или привить к реголиту земные формы простейшей жизни.

Тщетно. Луна оказалась до обидного стерильной (так что астронавты трех последних экспедиций без промедления попадали в объятия друзей) — никакого даже намека на жизнь. Правда, реголит, примененный как удобрение к бобовым, томатам, шпенице, дал всходы не хуже, а в одном случае даже лучше, чем земная почва. Но эти эффекты к проблеме жизни прямого отношения не имеют.

Изучили и обратный вопрос — могут ли земные бактерии продержаться на поверхности Луны. «Аполлон-12» прилунился в Океане Бурь в 200 м от места, где ранее работала автоматическая станция «Сервейер-3». Астронавты Конрад и Бин разыскали космический автомат,

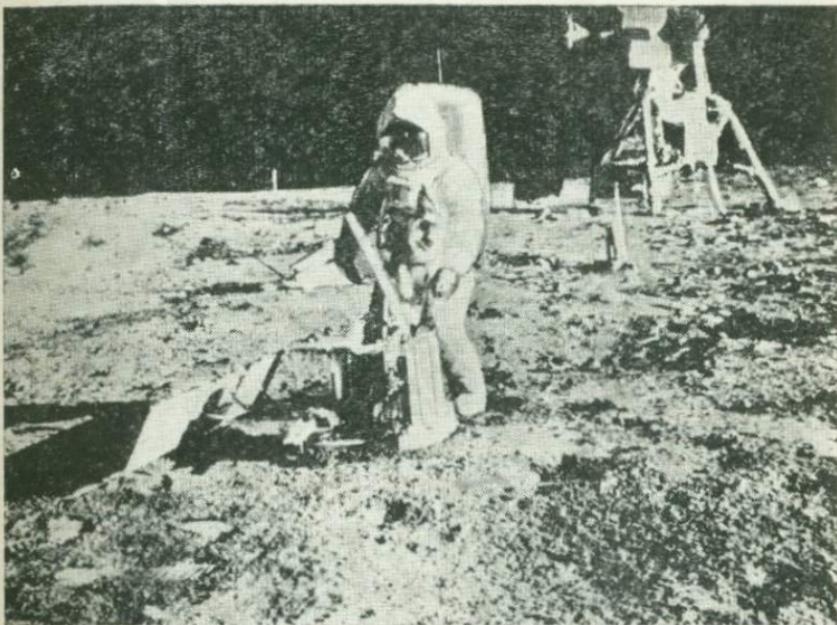


Рис. 2. Установка сейсмической станции на Луне экипажем «Аполлон-11»

забрали кассеты с давно экспонированной кинопленкой, а также части оборудования, подвергнувшиеся экспозиции иного рода: два с половиной года на них «сыпались» протоны и электроны, летящие со сверхзвуковыми скоростями от Солнца и из центра Галактики. Под их воздействием прежде белые детали стали светло-коричневыми, потеряли былую крепость — кабель стал хрупким, а металлические части легко резались.

Внутри телевизионной трубки, вне досягаемости космических лучей земные бактерии выжили. Но на поверхностях космического аппарата микроорганизмов не оказалось.

Похоже, что условий для возникновения жизни на Луне никогда не было. Еще при аккумуляции в околоземном спутниковом рое Луна была обеднена летучими компонентами. Затем в первый миллиард лет на ней действовали интенсивные магматические процессы, выплавлялась кора, из пород выделялись пузырьки газов, в том числе углерод и водород. Но Луна их не удержала, ее гравитационные силы оказались слишком слабыми — быстрые молекулы газов улетали в космос.

Причина — малая масса планеты, а отсюда и малое ускорение силы тяжести. Именно благодаря этому астронавты так легко прыгали на Луне, а лунная кабина при взлете так быстро исчезла из поля зрения телекамеры, предусмотрительно направленной на нее с лунного вездехода. Астронавты «Аполлона-15» — Скотт и Ирвин — повторили на Луне земной опыт Галилея. В левой руке астронавта — перо, в правой — железный молоток. По времени их падения любой телезритель, запасшийся секундомером, смог сосчитать ускорение силы тяжести ($162 \text{ см}/\text{с}^2$) и заодно убедиться, что «фокус» без обмана — передача шла из другого мира, и неожиданно удивиться: очень любопытно было наблюдать, что перо, опускаясь, не кружилось медленно, как это бывает на Земле, а бухнулось за то же время, что и молоток. И не мудрено — «атмосфера» Луны в 10^{12} раз разреженнее земной.

Астронавтов поразила изменчивость цвета поверхности. Цвет ее очень зависит от высоты Солнца и направления обзора. При низком Солнце поверхность мрачно-зеленая, формы рельефа скрываются, расстояние оценить трудно. Ближе к полудню краски приобретают теплые коричневые тона, Луна становится «дружелюбнее». В полдень она слепяще белая, что также неудобно для наблюдателей. Поэтому направлять экспедиции на Луну старались так, чтобы они могли работать по утрам — благо день на Луне продолжается две земные недели.

За дневное время несколько сантиметров лунной поверхности прогреваются выше температуры кипения воды ($+120^\circ\text{C}$), а за ночь остывают до -150°C , почти вдвое ниже, чем на антарктической станции Восток — земном полюсе холода. Такие термические перегрузки вызывают растрескивание пород. Еще большие взрыхляют их удары метеоритов разного размера.

Незащищенная, но и неизмененная атмосферой поверхность Луны имеет облик, определяемый внешними космическими факторами: ударами метеоритов, солнечным ветром и космическими лучами.

В результате Луна оказалась покрытой рыхлым слоем реголита толщиной несколько метров. Но слой собственно пыли там, как уже говорилось, невелик: от 1 до 10 см. Твердые пылевые частицы, не смоченные влагой и не «проложенные» воздушными прокладками, слипаются под действием космического облучения. Они обладают стран-

ным свойством: мягкий порошок упорно сопротивляется углублению буровой трубы и в то же время не держит ее в вертикальном положении.

Надежной защитой астронавтов от вакуума и тепловых перегрузок служит скафандр. Его «лунный вес» менее 10 кг, но центр тяжести смешен вверх и назад, так что человеку приходится принимать позу «усталой обезьяны» — прямую стойку в полуприседании. Астронавты говорили, что лунное тяготение приятнее и земного тяготения, и невесомости, что «Луна представляет весьма удобное и приятное место для работы. Здесь все время хочется прыгать вверх». Астронавты использовали три способа передвижения: хождение, подскоки при ходьбе и бег вприпрыжку. При этом скорость передвижения составляет от полуметра до 2 м в 1 с. Свободные прыжки с сохранением контроля за движением возможны на высоту до 1 м.

На Луне можно больше, чем на Земле, наклониться в любую сторону без потери равновесия, а падение не имеет неприятных последствий — скорость его мала и даже в скафандре подняться можно самому, особенно если упал вперед.

Первые люди на Луне так увлеклись процедурой передвижения, что получили напоминание из центра управления, что главная цель экспедиции — сбор образцов, и прежде всего «аварийной дозы» на случай, если бы пришлось взлетать досрочно. Но все шло по плану. Астронавты пробыли на поверхности Селены около 22 ч, в том числе вне кабины — 2 ч, собрали 22 кг образцов и поставили сelenофизические приборы: лазерный отражатель, улавливатель благородных газов в солнечном ветре и сейсмометр.

Вслед за первой на Луне побывало еще 5 экспедиций. 12 человек в скафандрах, в том числе геолог Х. Шмитт на «Аполлоне-17», оставили свои следы в лунной пыли.

Пока наметился перерыв в исследованиях Селены, но они, конечно, продолжатся.

Путешествие по Луне резко отличается от путешествий на Земле. На Луне не разведешь костер, там нет кислорода, не в чем гореть полену (да и дрова-то надо везти с собой). Любителей петь под гитару тоже ждет разочарование. Можно, конечно, привезти с собой музыкальный инструмент и играть на нем, но музыку не услышишь. Звуковые волны — это ведь механические колебания частиц воздуха, а на Селene его нет.

Таблица 2

Геолого-геофизическая изученность Луны

Космическая станция	Дата прилунения	Координаты, град. широты и долготы	Район	Цель, объекты изучения
«Луна-9»	3.II 1966	9,1 с., 64,4 з.	Океан Бурь	Фотографирование, механические свойства грунта
«Луна-13»	24.XII 1966	18,9 с., 62,0 з.	То же	То же
«Аполлон-11»	20.VII 1969	0,7 с., 23,5 в.	Море Спокойствия	Взятие образцов пород
«Аполлон-12»	19.XI 1969	3,2 ю., 23,4 з.	Океан Бурь (Море Познанное)	Взятие образцов пород, сейсмология, магнитное поле, электропроводность
«Луна-16»	20.IX 1970	0,7 ю., 56,3 в.	Море Изобилия	Взятие образцов пород
«Луна-17»	17.XI 1970	38,3 с., 35,0 з.	Сев.-зап. Моря Дождей	Высадка «Лунохода-1», фотографирование, механические свойства грунта
«Аполлон-14»	5.II 1971	3,7 ю., 17,5 з.	Кратер Фра-Мауро	Взятие образцов, сейсмология, сейсморазведка; магнитное поле

2593

Таблица 2 (окончание)

Космическая станция	Дата прилунения	Координаты, град. широты и долготы	Район	Цель, объекты изучения
«Аполлон-15»	30.VI 1971	26,1 с., 3,6 в.	Горы Апеннины, Борозда Хэдли	Взятие образцов, сейсмология; магнитное поле, электропроводность, тепловой поток
«Луна-20»	21.II 1972	3,5 с., 56,5 в.	Междуд Морем Изобилия и Морем Кризисов	Взятие образцов пород
«Аполлон-16»	21.IV 1972	9,0 ю., 15,5 в.	Кратер Декарт	Взятие образцов, сейсмология, сейсморазведка, магнитное поле, электропроводность
«Аполлон-17»	11.XII 1972	20,2 с., 30,7 в.	Кратер Тавр-Литров	Взятие образцов, сейсморазведка, тепловой поток
«Луна-21»	16.I 1973	25,8 с., 30,4 в.	Кратер Лемонье, Море Ясности	Высадка «Лунохода-2», фотографирование, механические и химические свойства грунта, магнитное поле
«Луна-24»	18.VIII 1976	12,5 с., 62,2 в.	Юго-вост. Моря Кризисов	Взятие образцов пород



Ночевки — этот заманчивый атрибут туризма — на Луне особенные. В ночном небе неподвижно висит яркая Земля (в 80 раз ярче, чем в нашем небе Луна), звезд гораздо больше и светят они не мерцая, а скользят по небосводу со скоростью, в 30 раз меньшей, чем звезды в земном небе. Не пригодится там и верный спутник путешественника — компас. На Луне нет устойчивого и сильного магнитного поля, как на Земле.

Такой уж он, странный и непривычный мир Селены. Такая уж она, мрачная, пустынная и холодная по сравнению с родной и теплой бело-голубой Землей.

* * *

Геофизические исследования Луны проведены с помощью автоматов и пилотируемых кораблей СССР и США (табл. 2).

Около 6 тыс. дней и ночей — от «Луны-1» до «Луны-24» — ученые, напряженно всматриваясь в новый лик Селены, получали вести, необыкновенные и захватывающие, подстать сказкам Шехерезады. К Луне было послано 54 корабля, 18 из них совершили мягкую посадку. На Землю переданы тысячи телевизионных снимков поверхности, сотни замеров электромагнитного и гравитационного полей, теплового потока, скоростей сейсмических волн. Лунходы искоlesили десятки километров по морям и континентам Луны. Около 400 кг образцов из девяти районов видимой стороны оказались в земных лабораториях.

Миллиарды лет неуклонно удалялась от Земли Луна, в результате этих экспедиций стала ближе и понятнее людям. О том, что узнали ученые — и пойдет рассказ в этой книге.

СЮРПРИЗЫ ЛУННОЙ СЕЙСМИКИ

Ученый, поставивший сейсмограф в новом месте, подобен врачу, принимающему нового больного. Та же неизвестность и ожидание — о чем расскажет биение пульса пациента? Стетоскоп — сейсмограф, электрокардиограмма — сейсмограмма. Но пациент сейсмолога необычный — планета. Да еще какая — нетронутая, неизвестная.

Сейсмический полигон

День рождения лунной сейсмологии — 21 июля 1969 г. Первые «лунные» сейсмологи Н. Армстронг и Э. Олдрин из экипажа «Аполлона-11» установили в этот день автоматическую сейсмическую станцию на каменной равнине Моря Спокойствия в точке с координатами $0,7^{\circ}$ с. ш., $23,5^{\circ}$ в. д. Аппаратура весом 48 кг (земных) была поставлена в 168 м от опоры лунного модуля. Она питалась током от солнечных батарей и проработала с 21 июля по 27 августа с перерывом на лунную ночь с 3 по 18 августа.

Первые сигналы, переданные на Землю и расшифрованные взволнованными сейсмологами, отнесены к источникам различного типа: шаги астронавтов, аппаратурные помехи, деформация грунта под весом лунной кабины, удары газовой струи при ее взлете, падение метеоритов, лунотрясения и др. К сожалению, из-за неисправности управления сейсмическая станция «Аполлон-11» вышла из строя.

Непрерывные сейсмические наблюдения на Луне начались 19 ноября 1969 г., когда в Море Познанном юго-восточной части Океана Бурь прилунилась станция «Аполлон-12». Затем в течение двух с половиной лет на видимой стороне Луны были установлены еще три сейсмические станции: «Аполлон-14, -15 и -16». Таким образом была построена сеть стандартных региональных станций для так называемого пассивного прослушивания Луны.

Станции расположены по вершинам большого треугольника со стороной около 1 тыс. км. В его юго-западном углу находятся две сейсмические станции «Аполлон-12 и -14», расстояние между ними 180 км.

Лунные станции снабжены изотопными энергетическими установками, питающими аппаратуру днем и ночью. Они рассчитаны приблизительно на 10 лет. Координаты и даты начала работы станций сведены в табл. 3, их расположение показано на рис. 1.

Таблица 3

Даты начала работы и координаты сейсмических станций

Станция	Дата уста-новки	Координаты		Примечание
		широта	долгота	
«Аполлон-12»	19.XI 1969	3,04° ю.	23,42° з.	Океан Бурь
«Аполлон-14»	5.II 1971	3,65° ю.	17,48° з.	Район кратера Фра-Мауро
«Аполлон-15»	31.VI 1971	26,08° с.	3,66° в.	Район гор Апеннины и Борозды Хэдли
«Аполлон-16»	21.IV 1972	8,97° ю.	15,51° в.	Район кратера Декарт

Каждая станция снабжена сейсмометрами двух видов и электронным модулем. Трехкомпонентная установка длиннопериодных сейсмометров емкостного типа может настраиваться по команде с Земли на период 15 или 2,2 с (большую часть времени сейсмометры ведут регистрацию на второй частоте). Вертикальный и два горизонтальных прибора, ориентированных по странам света, позволяют определить траекторию движения грунта и направление подхода сейсмической волны. Частотный диапазон аппаратуры (1—10 с) похож на региональные сейсмические станции Земли. Максимальное увеличение (более 10^6) позволяет фиксировать ничтожные перемещения грунта, соизмеримые с размерами атома $(0,5—3) \cdot 10^{-8}$ см]. Динамический диапазон станций высокий — 90 дБ. Благодаря этому одновременно записываются сигналы, отличающиеся по амплитуде в 30 тыс. раз.

Кроме длиннопериодных на каждой станции имеется короткопериодный сейсмометр электродинамического типа.

Его собственная частота 1 Гц, полоса пропускания 1—30 Гц, чувствительность 10^{-8} см, динамический диапазон 90 дБ.

Электронный модуль станции включает усилитель, фильтры, командно-контрольную схему, аналого-цифровой преобразователь. Аппаратура помещена в термостат, обеспечивающий нормальную температуру с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$.

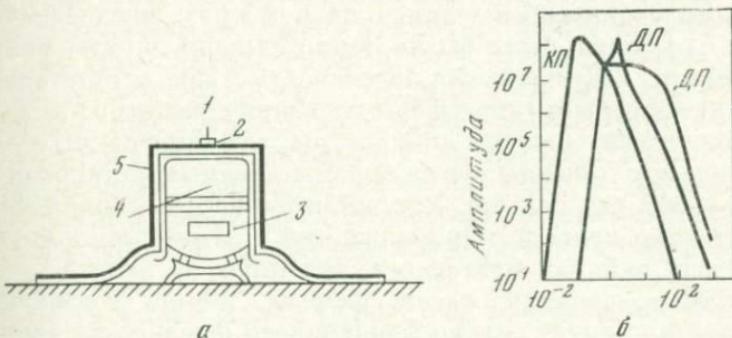


Рис. 3. Схема лунного сейсмометра

а — блок-схема, б — частотные характеристики; 1 — солнечный компас, 2 — датчик уровня, 3 — короткопериодный сейсмометр ($K\pi$); 4 — длиннопериодный сейсмометр ($D\pi$); 5 — термостат. На графике по вертикали — условное увеличение, на горизонтали — период колебаний в секундах

Потребляемая электрическая мощность станции невелика (4,3—7,4 Вт). Конструкция выполнена из бериллия. Вес каждого сейсмометра 750 г, размеры без термостата 23×29 см, общий вес станции 11,5 кг. Данные передаются на Землю со скоростью 1060 бит/с. Аппаратура управляется с Земли пятнадцатью командами. Они задают усиление, калибровку, скорость и направление движения электромоторов, устанавливающих азимут и положение вертикальных сейсмометров с точностью $\pm 5^\circ$ (рис. 3).

Характерные особенности конструкции лунных сейсмических станций связаны со спецификой сelenофизических условий. Если вообразить, что сейсмология зародилась на Луне, то сelenофизики, попав на Землю, были бы поражены сложностью и трудностью сейсмических наблюдений на нашей планете.

Первая сложность — разнообразие сейсмогеологических ситуаций: условий установки приборов (море, горы, тайга, ледники, пустыни), их защиты от климатических аген-

тов (ветер, дождь, снег). На Луне условия однороднее — каменистая пустыня, ровная в «морях» и гористая на «континентах». Зато здесь своя специфика: в 6 раз меньший вес, глубокий вакуум, контрасти между температурой поверхности днем и ночью, необходимость защиты приборов от ударов метеоритов.

Справившись с установкой сейсмических станций на Земле, воображаемые селенофизики оказались бы перед новыми сюрпризами: записи на приборах, предназначенных для Луны, были бы на Земле напрочь забыты микросейсмами. Тектоническая пассивность Луны, отсутствие на ней атмосферы и гидросферы позволяют реализовать здесь сверхчувствительность аппаратуры. Средний же шум земных помех (океана, ветра, промышленных установок) в 100—1000 раз больше, а чувствительность станций соответственно меньше и приближается к лунной лишь в уникальных районах платформ, удаленных от океана.

Самая верхняя часть разреза Земли — осадочная оболочка — имеет сильно меняющиеся физические свойства: скорость, плотность и мощность, а на кристаллических щитах и вовсе отсутствует. На Луне поверхность не подвержена водной и ветровой эрозии и весьма однородна.

Вид земных сейсмограмм кардинально отличается от лунных. Вместо долгого монотонного лунного «сейсмозвона» здесь отмечаются отдельные всплески вступлений в течение нескольких минут. Поразмыслив, следует порадоваться мудрости природы, изящно приспособившей Землю для сейсмических исследований.

Скорость сейсмических волн в Земле в целом растет с глубиной, поэтому сейсмические «лучи», загибаясь, приносят к поверхности информацию о физических условиях на глубине. Кроме того, Земля расслоена в направлении от поверхности к центру. Волны отражаются от резких границ между слоями и возвращаются к поверхности. Для анализа сейсмических данных на Земле развиты определенные представления, алгоритмы и аппарат интерпретации, согласно которым волновое поле разбивается на опорные группы волн, соответствующие различным слоям.

Этот опыт нельзя было использовать на Луне. Сейсмологам пришлось, начиная с 1969 г., учиться интерпретации заново. Лунная сейсмика оказалась и проще и сложнее земной. Она просто совсем другая.

Странные сейсмограммы

Первое искусственное лунотрясение произошло 20 ноября 1969 г. После старта с Луны и перехода астронавтов в «Аполлон» лунный модуль был отброшен. Беззвучно прочертил он пологую траекторию в черном небе Луны и врезался в ее поверхность на расстоянии 67 км от накануне открытой сеймической станции «Аполлон-12». Удар 2,5-тонного аппарата на первой лунной космической скорости (1,7 км/с) был эквивалентен взрыву заряда тротила массой 800 кг, его сейсмическая энергия $3 \cdot 10^{10}$ эрг. С поверхности поднялось многотонное облако пыли. Через 23,5 с прогнулся маятник сейсмометра. Еще через секунду сигнал достиг анализирующих устройств на Земле и... понадобились долгие месяцы, прежде чем сейсмологи оправились от неожиданности: колебание поверхности Луны продолжалось целый час.

С нетерпением ждали ученые новой экспедиции. Но высадка на Луну астронавтов, летевших на «Аполлоне-13», не состоялась. Однако в отношении сейсмики полет этот не был безрезультатным.

Третья ступень космической ракеты «Сатурн-5», сообщившая «Аполлону» вторую космическую скорость, отделившись от него, тоже летела к Луне (астронавты даже видели ее из иллюминатора). 14 апреля 1970 г. 15-тонный аппарат со второй лунной космической скоростью (2,5 км/с) упал на расстоянии 135 км от сейсмометров в районе Моря Познанного. Удар был эквивалентен 10-тонному взрыву тротила.

На этот раз энергия сейсмических волн ($5 \cdot 10^{12}$ эрг) соответствовала землетрясению 5—6 класса, и колебания на сейсмограмме не затухали 4 ч.

Лунные записи почти не имеют земных аналогов. Амплитуда колебаний поверхности Луны сперва растет, достигая максимума на 5—15 мин, а потом медленно, часами, ослабевает. На Земле записи взрывов и землетрясений на расстоянии нескольких сотен километров делятся менее 1 мин, если станция стоит на скальном грунте. В мощных осадках или ледовом покрове волны распространяются не более 10 мин.

На лунных сейсмограммах нечетки вступления объемных (продольных и поперечных) волн и практически отсутствуют фазы поверхностных волн, форма колебаний на

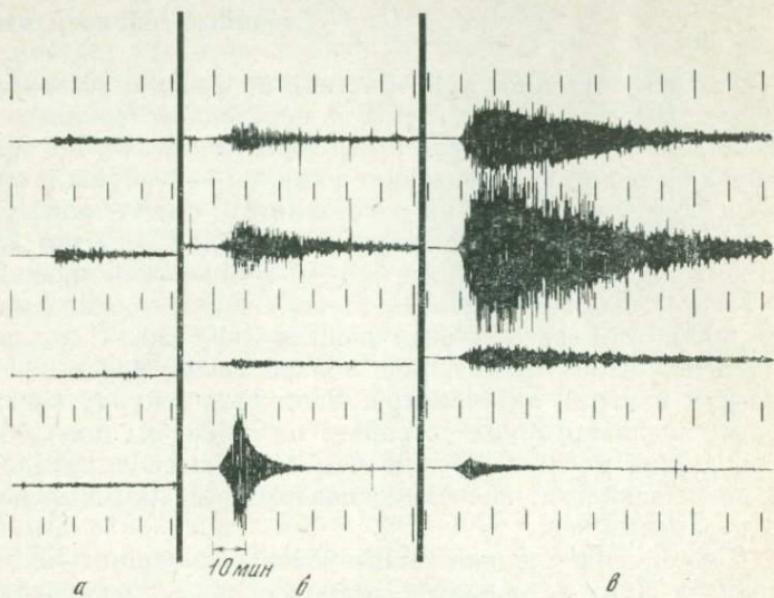


Рис. 4. Пример лунных сейсмограмм, полученных от приливных (а) и тектонических (б) лунотрясений и падений метеоритов (в)

вертикальном и горизонтальных сейсмометрах не повторяется (рис. 4).

Пока по техническим причинам задерживался вылет очередного «Аполлона», на страницах научных журналов разыгралась «борьба идей», претендующих на объяснение лунного «сейсмозвона». Не все гипотезы были собственно сеймическими. Так, специалисты по аппаратуре некоторые особенности записи приписывали специфике согласования емкостного датчика со схемой преобразования сигнала. Появилась и баллистическая гипотеза: удар поднял многотонное облако пылинок, которое пронеслось над поверхностью и «просыпалось» на сейсмометры.

Все же большинство авторов апеллировало к особенностям распространения сейсмических волн. Теоретики подсчитали, что так долго должен звучать однородный шар из-за совместного эффекта отражения, рассеяния и дифракции волн от его искривленной поверхности (однако вскоре стало ясно, что Луна имеет слоистое строение).

Сторонники гипотезы «дисперсии» объясняли растягивание записи различной скоростью пробега компонент по-

верхностных волн, имеющих разные периоды. Согласно расчетам, если тонкий слой, в котором скорость распространения поперечных волн менее 100 м/с, лежит на жестком основании, имеющем скорость продольных волн около 2 км/с, то даже при разнице периодов колебаний на 0,3 с скорости разночастотных компонент будут различаться в 50 раз. На дистанции 135 км высокочастотные колебания запаздывают на 74 мин.

Возможен и другой эффект: волны бегут в верхнем низкоскоростном слое — «сейсмическом канале», многократно отражаясь от его кровли и подошвы. Аналогичные явления известны на Земле, например подводный звуковой канал в океане, который используется при дальней связи в мореходстве. На Луне ситуация для сверхдальнего пробега волн благоприятнее. Там нет ни воздуха, ни воды, поэтому ничтожно малы неупругие потери энергии волн.

Причина «сейсмозвона»

Группа сейсмологов, объединенных НАСА для анализа лунных сейсмических материалов, предложила гипотезу рассеяния. Она предполагает сильную неоднородность лунного вещества из-за трещиноватости, рожденной ударами метеоритов. Сейсмические волны в такой среде многократно отражаются, рассеиваются на мелких неоднородностях, а изначальный сигнал затягивается.

Для проверки гипотезы в лаборатории провели моделирование: взяли стальную пластинку (размером $1000 \times 600 \times 2$ мм), испещрили ее случайно расположеннымми отверстиями (размер 30×3 мм, плотность 400 отверстий на 1 м^2) и просветили ее ультразвуковыми волнами (длина которых в 4 раза меньше отверстия). Получилась сейсмограмма, напоминающая (в соответствующем масштабе) лунную.

Особенности распространения волн в случайно неоднородной среде могут быть описаны диффузионной теорией (аналогично броуновскому тепловому блужданию молекул).

Сотрудники отделения Земли и планет Массачусетского технологического института (США) на основе диффузионного уравнения изучили изменения амплитуд сейсмических волн во времени. Параметрами уравнения являются свойства среды: скорости продольных и поперечных

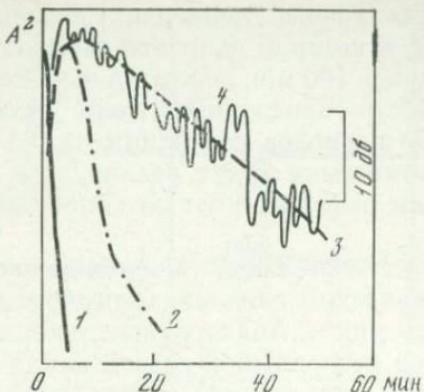


Рис. 5. График, показывающий ослабление амплитуд сейсмических волн во времени

- 1 — земные сейсмограммы на скальном грунте,
- 2 — земные сейсмограммы на слое осадков,
- 3 — теоретическая кривая для диффузионного рассеяния,
- 4 — экспериментальная кривая для Луны. По вертикали — квадрат амплитуды, по горизонтали — период колебаний

волн, коэффициенты рассеяния по горизонтали и вертикали, коэффициент поглощения или обратная величина, сейсмическая добротность. Для различных комбинаций этих параметров с помощью ЭВМ были рассчитаны теоретические кривые. Они сравнивались с сейсмограммами, полученными на станциях «Аполлон-12, -14 и -15» при ударах космических аппаратов на расстоянии 67—365 км. Выяснилось, что рассеяние волн происходит в приповерхностном слое. До удалений на расстояние 150 км время нарастания амплитуд увеличивалось, а потом оставалось постоянным. Если это объяснить прониканием сейсмических лучей глубже рассеивающего слоя, то мощность слоя должна быть 15 км для частоты 1 Гц и 20—25 км для 0,5 Гц. Этот слой изобилует скоростными неоднородностями. Их преобладающий размер 2—5 км, а плотность, судя по соотношению амплитуд на разных частотах, уменьшается с глубиной. Это понятно, поскольку рассеивание связано в основном с трещинами, которые закрываются по мере роста давления (рис. 5).

Степень рассеивания в горизонтальном направлении оказалась в 10 раз больше, чем по вертикали, значит, рассеиваются главным образом поверхностные волны. Теперь ясно, почему нет четких вступлений отдельных волн на лунных сейсмограммах — они разбиваются о многочисленные трещины, кратеры, борозды.

Сейсмограммы от лунотрясений, изученные подобным же образом, дали похожую, хотя и менее яркую, картину рассеяния, поскольку очаги лунотрясений находятся на большой глубине и волны от них пересекают рассеивающий слой один раз, притом в вертикальном направлении.

Из сравнения расчетных кривых с сейсмограммами удалось определить сейсмическую добротность рассеивающего слоя — величину, обратную ослаблению амплитуд волн на одном периоде колебаний. Она оказалась на Луне чрезвычайно высокой, около 5000, в 10—100 раз выше, чем в коре Земли. Объясняется это сухостью и отсутствием воздуха в пористых породах Луны. Когда земные образцы исследовали в лаборатории при низком давлении (10^{-2} атм), их добротность возрастала в 5 раз.

Характер лунных сейсмограмм подтверждает целесообразность введения в земную сейсмологию детерминированно случайной скоростной модели среды.

На этом вопросе следует остановиться подробнее. Сейсмология существует несколько десятков лет. За это время она добилась значительных успехов: открыты оболочки Земли, исследованы очаги землетрясений, разведаны полезные ископаемые и т. д. Одна из задач сейсмологии — увидеть в записи колебаний поверхности, в сейсмограмме, образ недр планеты. Она именуется «обратной» сейсмической задачей (в отличие от «прямой» — рассчитать для заданной модели волновую картину). Поскольку реальная Земля сложна, при анализе материалов выбирают упрощенную модель, более или менее соответствующую натуре. Модель становилась сложнее по мере уточнения знаний о Земле и совершенствования теории распространения сейсмических волн, особенно в связи с внедрением в геофизику электронно-вычислительных машин.

С помощью ЭВМ можно просматривать большое число вариантов устройства Земли и выбирать модели, для которых совпадают расчетная и составленная по наблюдениям волновые картины. Но оказалось, сколько ни усложняй модель, ни увеличивай число слоев и параметров, хорошего совпадения не получишь, пока остаешься в рамках так называемых детерминированных моделей, предусматривающих точное знание всех параметров среды. Предельная детальность уменьшает точность, получается «ничего обо всем». Наоборот, сильное упрощение модели означает знание «всего ни о чем».

Выход был найден в идеи использования детерминированно случайной модели: начиная с некоторого уровня детальности свойства среды описываются лишь статистически «в среднем». Такие модели в последние 10—15 лет применяются в радиофизике, гидро- и атмосферной аку-

стике. Житейски известные эффекты — мерцание звезд, замирание радиосигналов — это не что иное, как флуктуации амплитуд сигналов на мелких неоднородностях атмосферы.

Обоснование и первое использование новой модели для твердой Земли провел в 1967 г. А. В. Николаев (ИФЗ АН СССР). Для описания мелкой неоднородности он ввел новый параметр — сейсмический коэффициент мутности. Подобно тому как объем тела характеризует его величину, но не говорит о форме, коэффициент мутности — эффективный параметр. Он позволяет расставить среды в ряд по степени неоднородности, хотя и не дает их точной характеристики. В зоне перехода от Азиатского континента к Тихому океану было обнаружено, что кора «мутнее» мантии и среда в целом становится «прозрачнее» при переходе от континента к океану.

Не все геофизики приняли новую модель охотно. Но пока на Земле шла дискуссия (мутна ли среда и удобна ли детерминированно-случайная модель?), начался сейсмический эксперимент на Луне. Первые же лунные сейсмограммы не оставили сомнений в жизнеспособности новых подходов. Получилось так: земные сейсмологи пробивались от детерминированной модели к случайной. А лунная сейсмограмма была столь переполнена «случайностью», что извлечь из нее надежные сведения о глубинном устройстве нашего спутника оказалось делом не простым. Можно сказать, что земная сейсмограмма — это лунная, хорошо профильтрованная самой средой.

Разведка верхних слоев

После 15-месячного перерыва 5 февраля 1971 г. на Луну была доставлена очередная сейсмическая станция. Экипаж «Аполлона-14» установил ее в районе кратера Фра-Мауро, в 180 км от первой действующей станции. Но на этом сейсмическая программа экспедиции не закончилась. Астронавты Шепард и Митчел расставили в направлении север — юг через 47 м три высокочастотных (10-герцевых) сейсмометра. Затем через каждые 4—5 м они произвели 13 калиброванных ударов по грунту. Более далекий толчок на расстоянии 178 м дала реактивная струя при взлете лунного модуля. Кроме того, на профиле были поставлены установки для запуска гранат. Однако из-за неудачного распо-

ложения аппаратов, выстрелы пришлось отложить до окончания работы других приборов. Гранаты были запущены по команде с Земли и упали на расстояние до 524 м.

По времени прихода волн простейшим методом первых вступлений, принятым в земной сейсморазведке, американские геофизики Р. Ковач и другие определили структуру верхних слоев Луны. Выделено три слоя, в которых продольные волны бежали с различными скоростями. В верхнем слое толщиной 8,5 м отмечалась скорость 104 м/с. Судя по тому, что похожие скорости наблюдались в привезенных из кратера Фра-Мауро и изученных в земных лабораториях образцах, этот слой представляет лунный реголит. Первые сообщения о свойствах лунного реголита передали еще раньше автоматические станции «Луна» и «Сервейер». Скорость продольных волн в слое пыли толщиной несколько сантиметров по этим оценкам еще меньше — около 40 м/с.

Под реголитом залегает слой, в котором скорости волн достигают 300 м/с. Мощность его из-за недостатка данных определена неточно: от 19 до 76 м. Скорее всего это слой обломков, брекчий, насыпанных в районе Фра-Мауро при ударном образовании Моря Дождей. Под брекчиями до глубины более 400 м протягивается слой со скоростью 386 м/с (рис. 6, а).

Сейсморазведочный эксперимент по сходной методике был повторен в апреле 1972 г. экипажем «Аполлона-16» в холмистом предгорье кратера Декарт, в типично континентальном районе Луны. Астронавты Янг и Дьюк поставили здесь стандартную региональную сейсмологическую станцию, а также три высокочастотных сейсмометра, которые записали 15 ударов на удалении до 100 м, реакцию взлета лунного модуля на расстоянии 150 м и выстрелы двух гранат весом 50 и 100 г на дистанции до 500 м (они выполнялись по команде с Земли через месяц после отлета астронавтов). Разрез, освещенный до глубины 200 м, включает слой реголита мощностью 12,7 м, где скорость распространения волн 114 м/с, и подстилающий его слой со скоростью продольных волн 250 м/с (рис. 6, б).

Сходство сейсмических характеристик двух районов, удаленных более чем на 1 тыс. км, тем более поразительно, что химический состав коренных пород здесь различен. В районе Фра-Мауро это преимущественно темные морские базальты, а в районе кратера Декарта — светлые анорт-

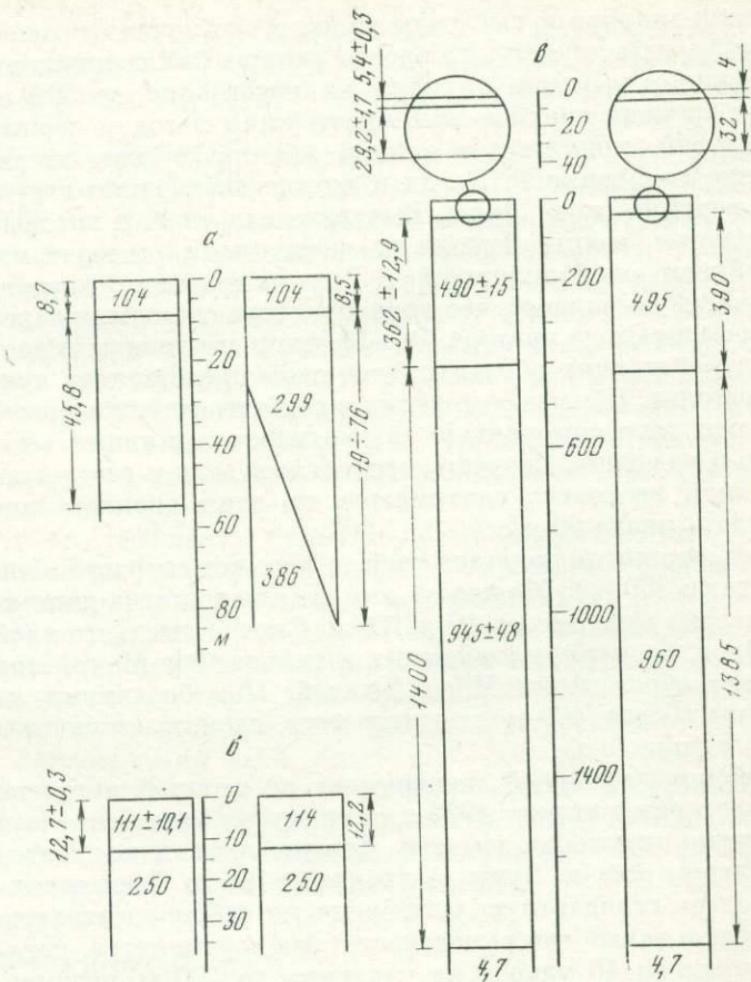


Рис. 6. Скоростная структура верхней части разреза по результатам активного сейсмического эксперимента в районах кратеров Фра-Мауро (а), Декарт (б), Тавр-Литтров (в) (верхняя часть разреза показана в увеличенном виде)

Правая часть колонок — опубликованные результаты М. Купера и др., левая — вариант с оценкой погрешности определения глубин и скоростей. По вертикали — глубины, м; в колонке — скорости продольных волн, м/с

зиты. По-видимому, решающую роль для сейсмических свойств верхних слоев играет механическое состояние пород. В обоих районах слой обломочного материала покрытается реголитом.

Оба сейсморазведочных эксперимента показали, что в верхнем слое Луны волны движутся с очень низкими скоростями. Но к этому времени уже знали, что на глубине около 10 км скорость волн «нормальная», свойственная кристаллическим породам (около 5 км/с).

Получалось, что наблюдаемый градиент роста скорости (2 км/с на 1 км) намного выше, чем при простом сжатии. Последнее изучалось в лабораторных условиях, где давление повышали до 50 бар, что соответствует на Луне давлению на глубине 1 км. Но при этом градиент не превосходил 0,4—0,8 км/с на 1 км.

Для уточнения характера роста скорости нужно было осветить промежуточные глубины — несколько первых километров лунного разреза. Такие специальные наблюдения проводились в месте посадки «Аполлона-17» в декабре 1972 г.

Район работ находился в северо-восточной части видимой стороны Луны, близ горной цепи Тавр и кратера Литтров. Здесь по косвенным признакам геологи надеялись найти проявление молодого вулканизма.

К большому сожалению ученых эта экспедиция была последней. Но зато она оказалась самой значительной по результатам. Экипаж «Аполлона-17» поставил несколько своеобразных рекордов: наибольшая продолжительность пребывания на орбите и на Луне, максимальная продолжительность полета, наибольшая длительность выходов на поверхность и протяженность поездок на луноходах и, наконец, наибольший вес привезенных геологических образцов.

Харрисон Шмитт, первый участвовавший в лунных экспедициях профессиональный ученый-геолог, и командир корабля Сернан провели сейсморазведочный эксперимент довольно большого масштаба и объема. Четыре высокочастотных сейсмометра были установлены по вершинам и в центре треугольника со стороной 100 м. Вокруг на расстоянии от 100 м до 2,7 км были после отлета астронавтов по команде с Земли подорваны девять зарядов весом от 60 г до 2,7 кг. Падение лунного модуля пришлось на дистанции 8,7 км. В результате изучена слоистая скоростная структура до глубины более 1,5 км. Вверху располагается 5-метровый слой реголита, скорости распространения волн в котором близки к скоростям, полученным в двух других исследованных районах (100 ± 10 м/с). Под

ним залегает также повсеместно отмеченный слой брекчий мощностью около 25 м со скоростями распространения волн 300—350 м/с. На глубине около 200 м найдена граница между слоями со скоростями 475—500 и 900—1000 м/с. Исходя из геологической ситуации в долине Тавр-Литтров, можно думать, что эти слои представляют собой излияния базальтов раннего возраста и различной степени трещиноватости. И лишь на 1385 м отмечен скачок скорости до 4,7 км/с. Он трактуется как переход к коренным породам типа габбро-анортозитов, слагающих хребет Тавр. Глубина кровли коренных пород хорошо согласуется с отмеченной здесь аномалией силы тяжести в редукции Буге (30—40 мгал) (рис. 6, в).

Уникальные сейсморазведочные эксперименты на Луне ввиду их дорогоизны и технической сложности проводились по очень простой схеме. По опубликованным графикам зависимости времени пробега волн от расстояния (годографам) можно оценить погрешности построений. Судя по встречным ветвям годографов гипотеза горизонтально однородной слоистости, лежащая в основе интерпретации материалов, подтверждается с точностью до 10 %. Сопоставляя значение скоростей и мощностей для разных слоев и исследованных районов, следует иметь в виду, что они получены с погрешностью 5—10 %.

В сейсморазведочных наблюдениях «Аполлона-14, -16 и -17» использовались только вертикальные сейсмометры и потому были изучены лишь скорости продольных волн. Для полного описания свойств упругой среды нужно знать еще скорость поперечных волн и плотность пород. Плотность измерена при посадках на Луну автоматов «Сервейер» и в земных лабораториях на образцах, доставленных с Луны. У реголита плотность составляет 1,6—1,7 г/см³, у брекчий — 1,8—1,9 г/см³.

Скорости поперечных волн удалось определить по записям длиннопериодных сейсмометров основной сейсмической сети «Аполлон», вернее, по отношению их амплитуд на горизонтальных и вертикальных сейсмометрах.

Из теории известно, что в поверхностной сейсмической волне частички грунта совершают движение по эллипсу. Соотношение осей (эксцентриситет) эллипса зависит от распределения по глубине упругих параметров: скоростей продольных и поперечных волн и плотности. К сожалению, поверхностные волны «разбиты» из-за рассеяния на неод-

породностях, так что четких вступлений выделить не удается и соответственно нельзя использовать такие важные их свойства, как фазовые и групповые скорости и дисперсионные кривые. Но можно узнать кое-что по характеру орбит частиц в поверхностной волне, т. е. по особенностям записи вертикальной и горизонтальной компонент движения грунта.

Такую попытку предприняли сотрудники Института геофизики Гавайского университета в Гонолулу. Они построили спектральные отношения амплитуд для горизонтальной и вертикальной компонент движения грунта в диапазоне частот 0,8—20 Гц. Использовались сейсмограммы, полученные при ударах отработавших ступеней и метеоритов на сейсмических станциях «Аполлон-12, -14 и -15». Затем рассчитали теоретические отношения амплитуд для большего числа моделей с правдоподобными значениями упругих параметров и отобрали те из них, для которых теоретические расчеты оказались похожими на результаты наблюдений.

Каковы основные результаты изучения верхней части лунного разреза?

Луна разделена на отдельные слои, скорость продольных и поперечных волн растет с глубиной от слоя к слою скачком. Градиент этого роста нельзя объяснить простым уплотнением пород под действием их веса, он обусловлен сменой генетического и химического состава.

Повсеместно поверхность Луны покрыта однородными слоями реголита и брекчий. Мощность реголита меняется в разных районах от 2 до 12 м, скорость продольных волн 90—115 м/с, поперечных — 35—37 м/с, отношение скоростей продольных и поперечных волн — 2,7—2,9, соответствующее значение упругого параметра — коэффициента Пуассона 0,42—0,43, плотность 1,5—1,6 г/см³, пористость выше 50%.

В слое брекчий скорость продольных волн 300 ± 50 м/с, отношение скоростей 2,2—2,4, коэффициент Пуассона 0,37—0,4, плотность 1,7—1,8 г/см³, мощность 18—38 м.

Отмечена горизонтальная изменчивость свойств этих, в общем довольно однородных, слоев. Самый тонкий слой реголита обнаружен в Море Познанном (1—3,5 м), в Апеннинах он увеличивается до 1,5—5,5 м, в районе Тавра равен 5,1—5,7, во Фра-Мауро 8,5—8,7, на кратере Декарт 12,4—13,0 м. Интересно, что в том же порядке растет мощ-

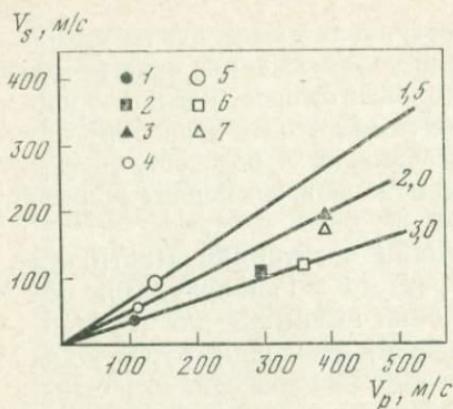


Рис. 7. Диаграмма скоростей продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн для грунта Луны и Земли. Показаны расчетные прямые для соответствующих соотношений скоростей V_p/V_s

Луна:
 1 — реголит,
 2 — брекчии,
 3 — трещиноватый базальт;
 Земля:
 4 — чернозем,
 5 — сухой песок,
 6 — лёсс,
 7 — глинозем.
 Прямые — расчетные зависимости для указанных величин V_p/V_s

ность второго слоя брекчий (18, 21, 28, 38 м) и уменьшается скорость волн в нем.

Но самое важное — обнаружена тесная связь между физическими свойствами слоев и числом лунотрясений, зарегистрированных на сейсмической сети «Аполлон»: чем больше мощность, тем сейсмичнее регион. Подобные эффекты имеют место и на Земле — чувствительность сейсмических станций, установленных на рыхлых осадках, гораздо выше, чем на скальных породах.

Сейсмические свойства лунного грунта заметно отличаются от земных грунтов низкими скоростями сейсмических волн и высоким коэффициентом Пуассона.

Сравнение лунного грунта с различными грунтами Земли показано на рис. 7. Несмотря на большое разнообразие земных грунтов, непросто подыскать для лунного реголита сейсмический аналог на Земле. Скорости продольных волн в реголите близки к тем, которые зарегистрированы в придонных океанических илах Земли, состоящих из смеси трех фаз вещества — твердых частиц, жидкостей и газов. При распространении волн в придонных осадках наблюдается и специфическое затягивание, и скоростное рассеивание сигнала, известное в акустике как «фаза Эйри». Но аналогия эта чисто внешняя — грунт Луны сух, в его порах нет воздуха.

По величине и отношению скоростей ближе всего подходит к лунному реголиту земной чернозем. Скорости в слое брекчий сродни тем, которые наблюдаются в обломочных материалах, слагающих окрестности вулканических кратеров, например кратеров Камчатки.

Луноходный эксперимент

31 июля 1971 г. во время работы в районе Апеннина экспедиции «Аполлона-15» на Землю с Луны поступили странные сигналы. Как и при ударах космических аппаратов, амплитуда записи медленно нарастала и плавно спадала. Но всплески были короткими, продолжались не часы, а минуты. Источник, судя по всему, находился недалеко от сейсмометров. Спектральный состав сигналов был относительно высокочастотным, именно поэтому такие эпизодически возникающие помехи ощущал лишь вертикальный 1-герцовый сейсмометр.

Разгадка пришла, как только сравнили время фиксации странных сигналов с расписанием поездок астронавтов Скотта и Ирвина на четырехколесном вездеходе к предгорьям Апеннина и к Борозде Хэдли. Вездеход весил вместе с астронавтами 700 кг (земных) и развивал на каменно-пустынном грунте скорость до 10 км/ч. Картина (теперь уже заранее предсказанная) повторилась в апреле 1972 г. во время работ в районе кратера Декарта экспедиции «Аполлона-16».

Казалось бы, что общего между передвижением транспорта и сейсмологией? Земной опыт свидетельствует скорее об отсутствии связи между ними. Движение и работа механизмов создают помехи, от которых при сейсмических исследованиях стараются избавиться: работают по ночам, вдали от населенных пунктов и дорог, в безветрие и штиль. На Луне, по крупицам собирая уникальные данные, исследователи обратили внимание на дрожание реголита под колесами луноходов в информацию о физических свойствах верхних слоев Луны.

Именно для этого случая, когда ввиду малых дистанций между источником и приемником распространение сейсмических волн происходит в верхнем, наиболее трещиноватом слое, лучше всего подошли представления о детерминированно-случайном процессе многократного рассеяния волн на скоростных неоднородностях.

Распространение воли в случайно неоднородной среде рассматривалось в атмосферной акустике и в гидроакустике и недавно введено в земную сейсмику. В зависимости от соотношения длин волн (λ) и размеров неоднородности (D) возникает три ситуации. При $\lambda \gg D$ имеет место так называемое релевеское рассеяние, когда амплитуда волн

пропорциональна квадрату радиуса неоднородности и четвертой степени частоты, $f(A \sim D^2 f^4)$. При сопоставимых размерах $\lambda \approx D$ амплитуда рассеянной компоненты пропорциональна размеру неоднородности и квадрату частоты ($A \sim D f^2$). При длинах волн, много меньших размеров неоднородности $\lambda \ll D$, распространение хорошо описывается детерминированным волновым уравнением, амплитуда убывает обратно пропорционально дистанции в соответствии с геометрическим расхождением — увеличением фронта волны ($A \sim D^{-1}$).

Лунная ситуация представляет комбинацию первых двух случаев. Особенность луноходного эксперимента по сравнению с ударами космических аппаратов состоит в том, что луноходы излучали в грунт упругие волны, которые на всем пути до сейсмометра (4 км) распространялись в сильно рассеивающей среде.

Иосио Накамура из геофизической лаборатории морского института Техасского университета предложил для объяснения «сейсмолуноходных сюрпризов» теорию, названную им сейсмической диффузионной. Вместо детерминистического решения уравнений вводится вероятностно-статистическое описание «блужданий» волн среди бесчисленных контрастов неоднородностей, напоминающее броуновское движение молекул.

Особая благоприятность применения такого подхода к лунным сейсмограммам связана со специфическими физическими свойствами приповерхностного слоя: 1) высокая неоднородность (трещиноватость) обуславливает интенсивное рассеяние волн; 2) почти полное отсутствие летучих элементов приводит к малому поглощению (неупругим тепловым потерям) энергии; 3) высокий градиент скорости в верхних слоях создает приповерхностный сейсмический канал и нарушает похожесть записи на разных компонентах сейсмометров. Именно для лунного случая можно говорить о полном рассеянии, потере первоначального направления распространения сейсмической волны.

Теория хотя и не вполне математически строгого, но достаточно хорошо объясняет все наблюдаемые особенности сигналов. Сейсмическая среда предполагается двумерной, рассеиватели разных размеров вкрашены в нее случайно, потери сейсмической энергии связаны с процессами рассеяния и поглощения. Поглощение, как это обычно принято в земной сейсмике, количественно оценивается

безразмерным коэффициентом — добротностью — величиной обратно пропорциональной неупругим потерям энергии волны на одном цикле колебаний. Для характеристики рассеяния вводятся параметры: диффузивность и интервал свободного пробега волны. Диффузивность пропорциональна скорости распространения волны и интервалу свободного пробега. Она тем выше, чем меньше потеря энергии при рассеянии. Теория объясняет наблюдаемые особенности сигналов: плавные вариации амплитуд, постепенный рост амплитуд после начала движения, их плавный спад после остановки лунохода. Объяснена также и совсем неожиданная закономерность: при движении лунохода от сейсмической станции сигналы накладываются друг на друга более благоприятно, чем при движении по направлению к сейсмометру. Поэтому максимальная амплитуда интерференционного колебания оказывается раза в три больше при удалении лунохода.

Анализ луноходных сейсмограмм позволил определить новые физические параметры среды и сопоставить по этим параметрам два сelenологически разных региона, разделенных тысячекилометровой дистанцией.

Экспериментально подтверждено предсказание теории о том, что диффузивность уменьшается с ростом частоты (от 0,03 $\text{км}^2/\text{с}$ на 4 Гц до 0,02 $\text{км}^2/\text{с}$ на 8 Гц). Таким образом, рассеяние на высоких частотах сильнее. Рассеяние энергии происходит в основном вблизи сейсмометра, и при этом в виде объемных волн.

Интервал свободного пробега (вероятность рассеяния) уменьшается с ростом частоты, поскольку рассеяние растет, а диффузивность падает. Для типичного разреза верхних слоев (реголит мощностью 4–12 м со скоростью распространения волн 100 м/с, подстилаемый слоем брекчий, где скорости волн 300 м/с) средний интервал свободного пробега волн около 100 м.

Горный район кратера Декарт, сложенный более древними породами, оказался однороднее района Апеннин, диффузивность в нем (0,022–0,033 $\text{км}^2/\text{с}$) в полтора раза выше, чем в районе работ «Аполлона-15». Это различие превосходит возможные ошибки измерений.

Луноходы одинаковой конструкции и одного веса, двигаясь со сравнимой скоростью, на кратере Декарт возбуждали более интенсивные волны, чем в Апенинах. Это хорошо увязывается с обсуждавшимися выше результатами

активной сейсморазведки: на кратере Декарт слой реголита мощнее и скорость распространения волн в подстилающих слоях брекчий ниже. К тому же и сейсмичность (число лунотрясений) здесь в несколько раз выше, чем в Апеннинах. Словом, наблюдается хорошо известный в земной сейсмологии эффект: в районах рыхлых и мощных осадков сейсмические колебания интенсивнее, чем на коренных породах.

Что касается неупругих тепловых потерь, то в обоих регионах они близки. Фактор диссипации (сейсмическая добротность Q) растет пропорционально корню квадратному из частоты колебаний. Нижний предел значений Q для разреза мощностью несколько километров ($Q_p \geq 2000$) на порядок выше, чем на Земле.

Найдена эмпирическая зависимость числа рассеивателей (N) от их размеров (D): $\lg N$ (на 1 км²) = (4,0—4,1) — $-1,5 \lg D_e$ (м).

Рассеивателей с эффективным диаметром $D_e > 10$ м оказывается на Луне около 300 на 1 км². При увеличении диаметра вдвое число рассеивателей возрастает в 2,8 раза. Интересно, что распределение рассеивателей похоже на распределение числа метеоритных кратеров на поверхности (кратеров с диаметром 10 м оказывается около 700 на 1 км²). По-видимому, в рассеянии сейсмической энергии на Луне значительную роль играют не только приповерхностные слои, но и особенности рельефа.

Как видим, не зря ездили по Луне астронавты: сейсмический КПД лунных маршрутов весьма высок, в том числе и для земных проблем. Новый теоретический подход может быть с успехом применен (и уже применяется в несколько иных вариантах) для расшифровки сейсмограмм землетрясений.

Диффузивные свойства сейсмических волн на Земле на сопоставимых дистанциях оказались, как это ни странно, сходными с лунными. Основное различие в облике сейсмограмм связано с поглощением (диссипацией), а не рассеянием энергии. Для описания распространения сейсмических волн на Земле нужна теория, представляющая комбинацию диффузионного и волнового подхода.

* * *

Первые же сейсмические наблюдения на Луне проподнесли сюрпризы. Лунные сейсмограммы не похожи на земные: колебания на Луне не затухают часами, четкие вступления волн отсутствуют.

Специфический феномен — лунный «сейсмозвон» — объясняется малыми тепловыми потерями и рассеянием волн на многочисленных неоднородностях верхнего слоя, которые представляют главным образом трещины, созданные метеоритной бомбардировкой.

Верхняя часть лунного разреза слоиста, скорость распространения волн растет с глубиной скачками, свойства реголита и подстилающего слоя брекчий относительно одинаковы даже в удаленных районах. В то же время выявленные региональные отличия мощности и скорости соотносятся с сейсмичностью.

Лунный реголит — уникальное образование, продукт метеоритного «вспахивания» поверхности и «обдувания» ее солнечным ветром в условиях глубокого вакуума и полной сухости. Он отличается от грунтов Земли чрезвычайно низкой электропроводностью, ничтожной теплопроводностью, большой неоднородностью и высокой сейсмической добротностью. Очень низкие скорости, в особенности по перечных волн, почти не имеют земных аналогов. Ближе всего по сейсмическим свойствам подходят к реголиту чернозем, к лунным брекчиям — обломочные породы близ вулканических кратеров.

Знание физических, и в частности сейсмических, свойств лунного грунта и отыскание их земных аналогов крайне необходимы для испытаний на Земле космической техники и планирования межпланетных экспедиций.

Специфика сейсмоселенологических условий благоприятствует просвечиванию малыми источниками на большие расстояния. Однако отсутствие четких вступлений волн в последующей части записи затрудняет локализацию глубинных структур.

Опыт сейсмических наблюдений на Луне стимулирует усовершенствование сейсмической модели при исследовании Земли.

КОРА В СЕЙСМИЧЕСКИХ «ЛУЧАХ»

Космическое сейсмическое зондирование

В ходе экспедиций «Аполлон» проводился активный сейсмический эксперимент по исследованию строения коры Луны. При его подготовке опирались на опыт сейсмических зондирований земной коры. Границу между корой и мантией на Земле открыл югославский сейсмолог Андрей Мохоровичич. По его имени эта граница получила название поверхности Мохоровичича.

В 40—50-е годы советский сейсмолог — академик Г. А. Гамбурцев и его ученики создали специальный активный метод взрывной сейсмологии для исследования коры — глубинное сейсмическое зондирование. При глубинном сейсмическом зондировании путем взрывов зарядов весом в десятки и сотни килограммов вызываются искусственные землетрясения. Их регистрируют сейсмические станции на удалении нескольких сотен километров, при этом сейсмические волны освещают кору и верх мантии Земли до глубины нескольких десятков километров. Наблюдения ведутся непрерывно вдоль линий (профилей), сейсмографы ставятся через 100—200 м. Взрывы проводятся на концах, в середине и вне профилей. В труднодоступных районах Земли непрерывное наблюдение возможно лишь на небольших отрезках. Это кусочно-непрерывная методика.

В морях и океанах пункты взрыва и приема меняются местами; движется корабль, подрывая заряды через несколько километров, а приемные станции дрейфуют или стоят на дне на расстоянии нескольких десятков километров друг от друга.

В труднодоступных районах применяется методика точечных зондирований — станции ставятся в отдельных, довольно редких точках, сейсмические волны возбуждаются взрывами, например, авиабомб, сбрасываемых в ненаселенные районы тайги.

С годами такое зондирование недр приобрело в глазах геологов и геофизиков авторитет опорного метода изучения земной коры. Его результаты помогают разобраться в сложных проблемах эволюции континентов и океанов, в горообразовательных процессах, понять связи глубинных структур с поверхностным рельефом, открыть месторождения нефти и предсказать землетрясения.

Днем и ночью, на суше и на море, с сейсмографами и гидрофонами, непрерывным профилированием и точечным зондированием, на фотобумаге и магнитной ленте записывают сейсмологи взрывные волны, просвечивающие земную кору.

На карте нашей страны сейсмические профили уже образовали причудливую сеть сотен сейсмических разрезов—смотровых щелей внутрь Земли.

И вот к моменту, когда общая длина профилей зондирования превысила половину расстояния от Земли до Луны, был произведен первый сейсмический толчок, зондирующий недра Селены.

Это была остроумная идея — использовать в качестве источников волн отработанные системы космических аппаратов. Такая разновидность космического глубинного сейсмического зондирования представляла комбинацию точечных зондирований и морской методики.

Каждая экспедиция «Аполлон» имела возможность произвести искусственное лунотрясение дважды; «уронить» в нужную точку Луны третью ступень ракеты «Сатурн-5» и лунный модуль. Первая подлетела к Луне раньше очередного «Аполлона», так что в экспедиции «Аполлона-12» она не использовалась, ведь сейсмическая станция «Аполлон-11» в Море Спокойствия в это время уже не функционировала.

«Сатурны» по команде с Земли могли направляться в любую точку Луны. Все они были посланы в юго-восточный район Океана Бурь, где находились две сейсмические станции «Аполлон-12 и -14». Здесь и было изучено строение лунной коры.

Лунный модуль каждой экспедиции уже после установки аппаратуры сбрасывался с сelenоцентрической орбиты (высота около 100 км) и падал вблизи «своего» сейсмометра.

Первая сейсмограмма лунного глубинного зондирования появилась на станции «Аполлон-12» от удара своего мо-

дуля на расстоянии 67 км. Следующая — на той же станции от последней ступени ракеты «Аполлона-13» на удалении 135 км. Эти первые уникальные точки на лунном годографе, хотя их было сперва всего две, принесли важные открытия.

Скорость сейсмических волн мизерная у поверхности с глубиной стремительно росла. На трассе ближнего удара она составляла в среднем 3,1 км/с, дальнюю трассу продольная волна «пробежала» со скоростью 4,64 км/с. На максимальной глубине проникания сейсмического «луча» (около 20 км) скорость достигла величины 4,8—5,6 км/с. Характер роста скорости с глубиной совпал с лабораторными измерениями для лунных базальтов под давлением. Казалось, что лунная кора имеет постоянный состав, а рост скорости с глубиной объясняется просто уплотнением.

Выяснить, нет ли глубже на Луне границы, подобной границе Мохоровичича, должен был удар последней ступени ракетоносителя экспедиции «Аполлон-14». Он планировался на удалении 350 км от сейсмометра «Аполлона-12», однако из-за технических неполадок произошел вдвое ближе. Волны проникли лишь до 30-километровой глубины, и там никаких неожиданных изменений скорости замечено не было.

После установки сейсмической станции «Аполлон-14» его лунный модуль упал в 67 км.

Третья сейсмическая станция была доставлена на Луну в июле 1971 г. экипажем «Аполлон-15». Модуль был сброшен в 93 км от своего сейсмометра. Последняя ступень «Сатурна» упала на удалении 184 км от станции «Аполлон-14» и в 356 от станции «Аполлон-12». В эту пока рекордную по дальности точку волны «бежали» со скоростью выше первой земной космической — 8,1 км/с. Результат был волнующим: на Луне тоже есть заветная граница между корой и мантией. Но поскольку точка была пока одна, возникали сомнения, не закралась ли ошибка в определение времени удара или не фиктивно ли увеличение скорости из-за наклона слоев?

Сейсмологи нетерпеливо ждали следующей экспедиции. Экспедиция «Аполлон-16» установила в континентальном районе кратера Декарт четвертую стандартную станцию, завершив создание первой на Луне сейсмической сети. Теперь можно было определить координаты эпицентров достаточно сильных событий.

Однако очередные удары прошли не совсем удачно. Связь со ступенью «Сатурна» прервалась, скорректировать ее траекторию не удалось, и она упала не в намеченной точке, а опять-таки довольно близко от сейсмометров «Аполлон-12» (132 км) и «Аполлон-14» (243 км).

Что касается лунного модуля, то астронавты забыли установить переключатель в нужное положение, поэтому его не удалось сориентировать и затормозить. Он летал по сelenоцентрической орбите неизвестно сколько и неизвестно где упал, потому что передатчик на нем уже не работал, и, таким образом, модуль не сыграл намеченной ему роли в лунной сейсмологии.

Зато природа наградила сейсмологов: почти месяц спустя, 13 мая 1972 г., в 142 км к северу от сейсмической станции «Аполлон-14» упал довольно крупный метеорит: его размеры 2 м, скорость падения около 20 км/с. От удара образовалась воронка диаметром около 100 м, а сейсмические волны проникли на глубину, которую ранее не удавалось достичь. Шкалы приборов ближайших станций «Аполлон-12 и -14» не были рассчитаны на такой мощный удар, зато на дальних станциях на расстоянии 967 км («Аполлон-15») и 1026 км («Аполлон-16») были получены долгожданные записи. Они убедили сейсмологов в существовании на Луне коры и одновременно задали новые загадки.

Есть ли на Луне граница Мохоровичича?

Итак, четырьмя станциями сети «Аполлон» были прослежены девять падений космических аппаратов и один удар метеорита и получены 14 драгоценных сейсмограмм (табл. 4). Как бы ни были велики и рискованы усилия астронавтов и центра управления полетами для получения этих сейсмограмм, предстояло решить не менее сложную и важную задачу: обратить эти, столь непривычные и странные записи в картину сейсмического устройства лунной коры.

Большая группа опытных экспертов была привлечена НАСА для анализа лунных сейсмических записей. Исследования сосредоточились в основном в двух центрах: в одноименных лабораториях Земли и планет Техасского университета (здесь ими руководит Г. Латем) и Массачусетса

Таблица 4

Характеристики ударов космических аппаратов
(ЛМ — лунный модуль, С4В — третья ступень «Сатурна»)

Удар	Дата	Координаты, град.		Энергия, эрг
		широта	долгота	
ЛМ-12	20.XI 1969	3,94 ю.	21,2 з.	$3,36 \cdot 10^{16}$
С4В-13	5.IV 1970	2,75 ю.	27,86 з.	$4,63 \cdot 10^{17}$
С4В-14	4.II 1971	8,09 ю.	26,02 з.	$4,52 \cdot 10^{17}$
ЛМ-14	7.II 1971	3,42 ю.	19,67 з.	$3,35 \cdot 10^{16}$
С4В-15	29.VII 1971	1,51 ю.	11,81 з.	$4,61 \cdot 10^{17}$
ЛМ-15	3.VIII 1971	26,36 с.	0,25 в.	$3,44 \cdot 10^{16}$
С4В-16	19.IV 1972	1,3 с.	23,8 з.	—
С4В-17	10.XII 1972	4,21 ю.	12,32 з.	$4,71 \cdot 10^{17}$
ЛМ-17	15.XII 1972	19,96 с.	30,50 в.	$3,15 \cdot 10^{16}$

сетского технологического института (под руководством М. Токсоца). По мере поступления новых данных и продвижения в их обработке ученые публиковали результаты, частично приводя сейсмограммы, годографы, а позже и таблицы времен пробега волн.

В настоящий момент американскими, советскими, немецкими, а также геофизиками других стран опубликовано более 100 научных статей по сейсмическим исследованиям Луны.

При изучении коры Земли сейсмологи накопили арсенал приемов выделения волн на сейсмограммах, анализа их формы, амплитуд и времени пробега. Разработан специальный метод изучения коры — глубинное сейсмическое зондирование. Основные идеи интерпретации базируются на выделении небольшого числа опорных волн, отраженных и преломленных в слоях Земли, построении закона пространственного изменения скоростей и рельефа границ. При этом весьма существенно иметь достаточно детальную систему наблюдений, чтобы изучаемый блок коры просвечивался с разных сторон разноудаленными источниками. Говоря специальным языком, нужна система встречных и нагоняющих годографов.

На Луне не было детальной профильной системы, да и всего-то имелось полтора десятка точек на годографе. Пришлось вести интерпретацию по сводному годографу, предполагая, что кора горизонтально однородна по своим свойствам в юго-восточной части Океана Бурь, а верхняя мантия — внутри большого треугольника станций.

Сводный годограф был составлен из редких и весьма неравномерных точек (табл. 5, рис. 8 и 9). На расстоянии от 67 до 356 км имелось 10 точек, причем дистанция между ними превышала 20 км. Этот интервал соответствует волнам, распространяющимся в лунной коре. Она и была изучена более детально.

Что касается больших дистанций, то там имелось всего пять довольно редких точек на годографе в диапазоне

Таблица 5

Время пробега волн при глубинном сейсмическом зондировании коры

и верха мантии Луны

(ЛМ — лунный модуль, СИВ — третья ступень «Сатурна»)

Источник волн	Сейсмическая станция	Расстояние до эпицентра		Время пробега волн, с	
		в км	в град.	первые вступления	последующие вступления
ЛМ-17	A-17	9	0,29	5,57	—
ЛМ-14	A-14	67	2,21	18,5/17,8	29,1
ЛМ-15	A-15	93	3,07	22,0	—
ЛМ-14	A-12	114	3,76	23,8/25,0	—
C4B-13	A-12	135	4,45	28,0/28,6	41,7
C4B-17	A-14	157	5,18	32,0	35,0
C4B-14	A-12	172	5,67	35,7	36,0/49,5
C4B-15	A-14	184	6,03	36,1/36,6	37,8
C4B-17	A-12	338	11,15	34,5/37,0	58,3
C4B-15	A-12	356	11,74	55,5/55,0	60,5/61,0
C4B-17	A-16	850	28,02	120,7	123,0
Метеорит	A-15	967		131,5	
»	A-16	1026		133,5	
C4B-17	A-15	1032	34,02	143,7/151,0	150,9/155,1
C4B-16	A-15	1099		147,0	

Примечание. Значения времени приведены по разным источникам.

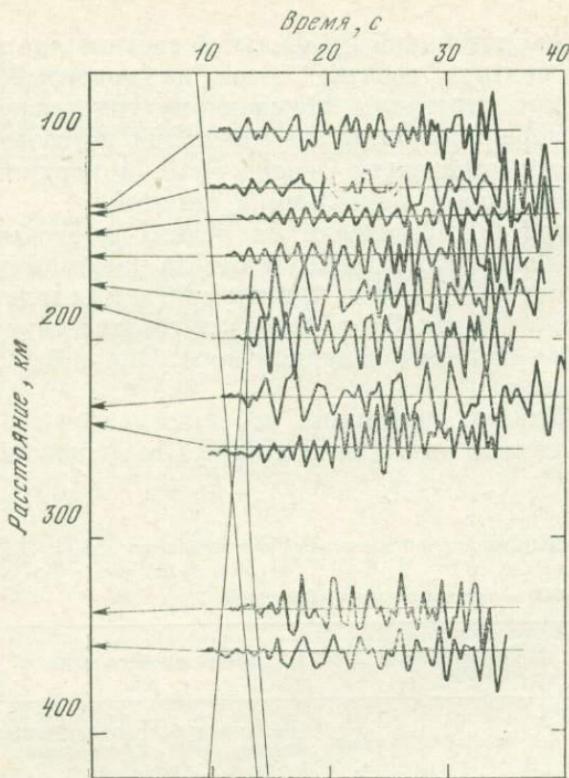


Рис. 8. Сводка сейсмограмм зондирования лунной коры

По вертикали — расстояние от источника до сейсмометра, по горизонтали — время пробега волн

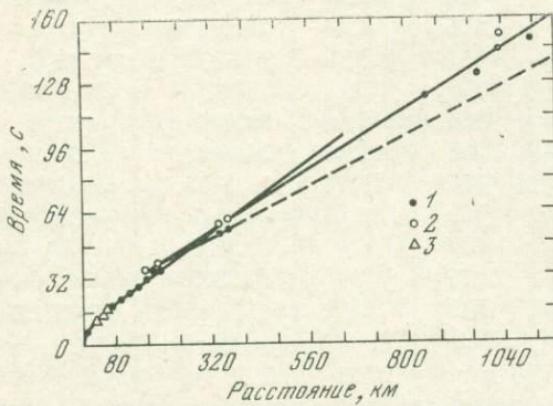


Рис. 9. Лунный годограф для коры и верхней мантии

1 — первые вступления волн, 2 — последующие вступления, 3 — кратные волны

850—1100 км. Представления о верхах мантии Луны оказались весьма схематичными.

Другая сложность — отсутствие четких вступлений волн из-за их рассеяния в верхних слоях Луны. Понадобились многочисленные ухищрения, использование узкополосных частотных фильтров, поляризационного анализа, «чистка» записей на ЭВМ, чтобы выделить что-нибудь, кроме первых вступлений. Время вступления первых волн определялось с ошибкой $\pm 0,5$ с, последующих — с погрешностью ± 1 с.

Из сказанного следует, что полученные данные по надежности уступают земным, в них еще много «но» и «почему», на которых мы остановимся дальше.

Но как ни привыкли мы ничему не удивляться в космический XX в., сложность лунного сейсмического эксперимента и значительность его результатов невозможно переоценить. На Луне была открыта кора, определена ее мощность и выделены отдельные слои. Правда, проблема эта решалась не однозначно. В толковании лунных сейсмограмм осталась известная неопределенность.

В последние годы сейсмологи много занимались нахождением единственно правильного решения обратных сейсмических задач. Этому способствовали успехи динамической теории, изучающей распространение сейсмических волн в сложно построенной упругой среде, а также успехи вычислительной математики с использованием электронно-вычислительных машин.

Теоретики из Института физики Земли АН СССР показали, что даже если совершенно точно знать время пробега волн, не всегда можно построить скоростной разрез в единственном варианте. Так, в случае, если имеется зона уменьшения скорости с глубиной — скоростной канал, то сам факт его существования обнаружить можно, а точный облик канала не определить. Множеству скоростных каналов будет соответствовать один годограф.

Наблюдения всегда содержат неизбежную погрешность. Поэтому неоднозначность результатов распространяется на любые типы строения среды. Интерпретаторам, которые частенько представляют разные варианты обработки одних и тех же наблюдений, не стоит сходу отвергать мнения оппонентов. И те и другие, оказывается, могут быть правы: множество разрезов может удовлетворить наблюдениям в пределах точности эксперимента.

Неопределенность уменьшается при увеличении детальности и повышении точности наблюдений, а также при изучении не только времени пробега, но и других характеристик волн: амплитуд, форм колебаний, спектров, их изменчивости во времени и пространстве.

Лунные сейсмограммы обрабатывались несколькими коллективами сейсмологов по-разному. Группы Латема и Токсоца по годографу построили вертикальный скоростной разрез. Для него рассчитали теоретические сейсмограммы и убедились, что они похожи на экспериментальные. В разное время были представлены варианты строения среды, несколько различающиеся небольшими деталями. Все они принадлежат к разряду возможных решений.

Позже была исследована вся область неоднозначности. При этом применялись два метода, разработанные в Институте физики Земли АН СССР.

Первый — метод перебора: рассматривается множество разрезов и оценивается пригодность каждого из них. Такой способ решения обратной задачи известен в науке как метод «проб и ошибок». Он основан на многократном решении прямых задач — на теоретическом расчете синтетических сейсмограмм и их сравнении с наблюдениями.

В ИФЗ АН СССР в Москве создана сложная логическая вычислительная программа «Еж». Сначала в ходе случайногоперебора отыскивается «хороший» разрез (у которого теоретические характеристики близки к экспериментальным с допустимой погрешностью). Далее «Еж» шаг за шагом, узел за узлом, проходит по многомерной сетке параметров скоростной структуры, «проверяя» соседние разрезы. В результате он обходит всю область возможных ответов. Применяя эту программу, исследователи из университета в Эдмонтоне (Канада) построили скоростную модель лунной коры, соответствующую времени на сейсмограммах с точностью $\pm 0,5$ с.

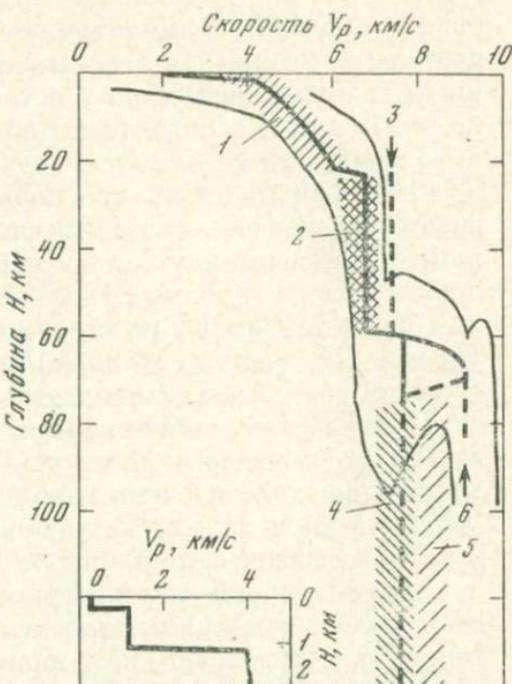
Другой, так называемый тау-метод (разработан Э. Н. Бессоновой и В. М. Фишманом в Москве) не требует никаких априорных представлений о свойствах разреза. Исходный годограф дифференцируется, и путем математических ухищрений удается для каждого значения скорости построить полосу вероятных глубин. По этой программе лунные данные были обработаны авторами метода совместно с М. Токсоцом.

Все скоростные разрезы, полученные разными метода-

Рис. 10. Скоростная структура коры Луны

Различные варианты Г. Латема, М. Токсоца — сплошная и пунктирная жирные линии; диапазон всех возможных разрезов — тонкая линия. Заштрихованные участки — значения скоростей для пород по лабораторным измерениям
 1 — лунные морские базальты,
 2 — лунные анортозиты,
 3 — земные габбро,
 4 — пироксены,
 5 — оливинги,
 6 — гранаты.

В левом нижнем углу — структура верхней части разреза коры



ми (рис. 10), имеют общие черты. В верхней трети коры толщиной 20—25 км скорость распространения сейсмических волн быстро растет до значений 5—5,8 км/с, причем характер роста такой же, как у образцов, сжимаемых под давлением. Свойства нижней части относительно стабильны, скорость около 7 км/с. Правда, не ясно, не кажущаяся ли это стабильность: ведь низы коры и на Земле освещаются неточно. Трудно отличить постепенное увеличение скорости от его небольшого уменьшения, а ведь при этом будут существенно разными физические условия, соотношения температур и давления.

На глубине 60—65 км происходит резкое увеличение скорости до значений, свойственных мантии Земли (8 км/с и более). Это — граница между корой и мантией. Открытие ее — важное событие в лунной сейсмологии. Подобная граница является глобальной особенностью Земли, одним из двух самых резких сейсмических разделов в ее недрах (вторая особенность — поверхность внешнего ядра). И на Луне существование такой границы теперь не вызывает сомнения.

Однако точная глубина и характер перехода к мантии оставались неясными, пока к времени пробега волн не до-

бавили анализа их амплитуд. Всплески волн в последующей части сейсмограмм, опознанные как отраженные волны от границы кора — мантия, показали, что это, собственно, не граница, а переходная область толщиной не менее 3—4 и не более 10—12 км.

Факт слоистости лунной коры подтверждается и независимыми измерениями силы тяжести со спутника «Аполлон-15». Теперь идут дискуссии о том, что же именно происходит на глубине 20—25 км. Последующие вступления на гидографе на расстояниях 67—135 км от станции (правда, не очень уверенные) могут означать, что здесь скорость возрастает скачком от 5,8 до 6,8 км/с.

Причину этого найти нельзя, если оставаться в рамках только сейсмических данных. Сейсмические свойства — лишь одна, хотя и очень важная, характеристика среды. Для понимания физических процессов необходим комплекс геолого-геофизических данных.

Для выяснения загадки границы внутри коры обратились к образцам лунных пород. Они изучались в лабораториях так тщательно, как, наверное, ни один из земных образцов, и охранялись бережнее, чем бриллиант из романа Коллинза.

Загадки верха мантии

Для петрографической привязки сейсмических данных нужно сравнить скорости, вычисленные по сейсмограммам, со скоростями в породах различного состава. Измерения проводятся в лабораториях на небольших образцах при помощи коротких ультразвуковых волн при разных давлениях и температуре, имитирующих их рост с глубиной.

На рис. 7 и 10 показаны результаты таких измерений для образцов лунных базальтов, габбро-анортозитов, брекчий и реголита. Здесь же приведены данные для земных минералов: оливин, пироксена, граната.

Возможны два объяснения границы в коре Луны. Это может быть смена химического состава с базальтового на габбро-анортозитовый. Но, может быть, здесь меняется механическое состояние пород одного состава, ведь на глубине 25 км достигается критическое давление 1 кбар, при котором в породах закрываются поры и микротрещины.

Ряд геологов считают, что базальтовые «моря» на Луне не могут быть столь глубокими. О том же свидетельствуют

результаты сейсморазведочного эксперимента в районе гор Тавра: кровля коренных пород подсечена на глубине менее 2 км, а скорости в них такие, как в габбро-анортозитах, окружающих горы.

Но если пытаться объяснить с позиции изостазии 4-километровую разницу в средних уровнях «морей» и «континентов» Луны, принимая различие в плотностях базальтов и анортозитов 0,2, то как раз и получается мощность слоя большей плотности около 20 км.

Однако данных пока мало, и вопрос остается открытым, а формальные совпадения цифр могут привести к казусам. Так, в образцах лунных обломочных материалов скорость продольных волн изменяется в пределах 1,25—1,84 км/с. Подобные же скорости заметил остроумный профессор Андерсон (США) в пищевых сырах: норвежском (1,83 км/с), итальянском (1,75 км/с), швейцарском (1,65 км/с), висконсийском (1,57 км/с). Значит ли это, что Луна состоит из сыра? Кстати, ее верхний слой трещиноват, а многие сорта сыра тоже с дырочками?

Интересно, что независимые оценки глубин верхнего слоя лунной коры по данным глубинного сейсмического зондирования и по характеру рассеяния волн на лунных сейсмограммах совпали — 20—25 км.

На ранее прочтенных сейсмограммах с помощью специальных фильтров удалось дополнительно выделить в последующей части записи вступление поперечных волн, распространяющихся в лунной коре. Время их пробега близко к тому, которое получается по продольным волнам, если принять, что отношение скоростей продольных и поперечных волн 1,72. Такому отношению соответствует величина упругого параметра — коэффициента Пуассона 0,25, которая типична для компактных кристаллических пород.

Простейшая модель коры в Океане Бурь теперь выглядит так: изначальная полевошпатовая, габбро-анортозитовая кора была разбита метеоритами и покрыта излившимися из глубин плотными базальтами.

К сожалению, специальные исследования коры удалось провести лишь в одном районе Луны. Однако косвенные измерения фигуры Луны, смещение центра масс от геометрического и уточнение аномалий силы тяжести свидетельствуют о горизонтальной неоднородности ее свойств. По-видимому, в континентальных районах кора однослоистая,

габбро-апортозитовая. В восточном полушарии и на обратной стороне Луны ее мощность увеличивается до 150 км, в районах Моря Кризисов и Моря Ясности она сокращается до 70—80 км.

Как бы ни были сложны и неоднозначны сейсмические данные по коре, но загадок еще прибавилось, когда обнаружилось, что сейсмическая волна, превысив первую земную космическую скорость, проникает в мантию Луны. На удалении 338—356 км от станции «Аполлон-12» кажущаяся скорость волны достигает 9 км/с, а на еще больших удалениях (850—1100 км) на трассах к станциям «Аполлон-15 и -16» она всего 7,7 км/с. Возможно, сигнал столь слаб, что обнаружены лишь последующие вступления волн, а первые потеряны среди помех? А может быть, высокие скорости в Океане Бурь фиктивные, эффект же вызван подъемом кровли мантии с востока на запад?

Пока данных имелось мало, нельзя было отвергнуть ни одно из измерений. Приходилось рассматривать два варианта объяснений. Либо блок высокоскоростной мантии существует только на юго-востоке Океана Бурь, либо во всем регионе Море Познанное — Апеннины — кратер Декарт в верхах мантии имеется высокоскоростной «козырек». И в этом случае оценить его мощность помогают амплитуды волн — толщина его не должна превышать 40 км.

Варианту низкой скорости соответствует оливино-пироксеновый состав верхов мантии Луны. Эти породы могут служить источником для выплавления лунных базальтов, причем их плотность ($3,4 \text{ г/см}^3$) не противоречит изменившемуся моменту инерции Луны.

По мере накопления данных удалось уменьшить эту неопределенность. Дело в том, что низкие значения кажущейся скорости получались по двум точкам, расположенным на удалении 850 и 1032 км. Однако если воспользоваться опубликованными позже данными о времени первых вступлений волн от удара метеорита 13 мая 1972 г. и падения третьей ступени ракеты «Аполлон-16» (эпицентральные расстояния 967, 1026 и 1099 км), то можно предложить иной вариант интерпретации. По пяти точкам годографа, расположенным на расстоянии 850—1100 км, методом наименьших квадратов можно вывести прямую с таким же наклоном ($\Delta R / \Delta t = 9,2 \text{ км/с}$), как и на участках годографа 184—356 км. Отсюда, по-видимому, можно сде-

лать вывод, что внутри всего региона, заключенного между сейсмическими станциями «Аполлон-12, -15, -16» (а не только в районе Моря Познанного), в верхах мантии существует высокоскоростной «козырек» мощностью около 40 км (оценка по амплитудным кривым).

Высокоскоростной вариант можно объяснить двояко: добавкой к оливину 25% шпинеля, имеющего более плотную кристаллическую упаковку, либо фазовым переходом вида аортозит-гроссуалит-киасит-кварц. При этом в интервале давлений и температур, свойственных глубинам 60—100 км на Луне, устойчивой оказывается плотная высокоскоростная структура минерала граната.

Глубже, вплоть до 150 км, освещенных при лунном грунтовом сейсмическом зондировании, скорость сейсмических волн уменьшается.

В районе Моря Познанного (между станциями «Аполлон-12 и -14» и вокруг них) удалось изучить тонкую структуру верхней мантии, залегающей непосредственно под корой. Сюда сбрасывались третий ступени ракет-носителей всех экспедиций «Аполлон» и здесь же, в 140 км к северу от «Аполлона-14», упал метеорит 13 мая 1972 г. По разнице времени пробега волн до близко расположенных станций «Аполлон-12 и -14» с учетом угла подхода волн к поверхности удалось определить значения кажущихся скоростей под границей кора—мантия. На северном участке региона скорости составляют 8,1—8,8 км/с, сейсмические трассы направлены к северо-востоку. На южном участке в широтном направлении скорости больше (8,9—9,8 км/с). Еще мало данных, чтобы решить, связано ли это с неоднородностью структуры верха мантии или граница кора—мантия имеет сложный седлообразный рельеф, с подъемом на восток и опусканием на север-северо-восток.

Кора Земли и Луны

Интересно сравнить сейсмическую структуру коры Луны и Земли. На Земле, исследованная во многих регионах, она чрезвычайно разнообразна и неоднородна по числу слоев, их мощности и величине скоростей.

В океанах кора состоит из слоя осадков и «базальтового» (назван условно, по совпадению скоростей). Ее мощность, не считая слоя воды, не превышает 5—10 км. На континентах, где кора включает между осадками и базаль-

том слой «гранита» (назван тоже условно), ее толщина увеличивается до 40—45 км. Под горами имеются «корни» коры до глубины 50—70 км. Таким образом, у гор наблюдается антирельеф поверхности Земли: избытку масс на поверхности соответствует дефицит массы мантии на глубине. Это так называемое явление изостазии вызвано действием закона Архимеда применительно к верхним слоям Земли. Более легкая кора Земли, подобно айсбергам на воде, плавает на плотном мантийном субстрате, выравнивание веса столба коры происходит на глубине нескольких сот километров в мантии.

В коре Земли выделяются две резкие границы: между осадочными породами и кристаллической корой и между корой и мантией (граница Мохоровичича). При переходе через эти границы скорости сейсмических волн возрастают скачком.

В кристаллической коре скорость волн растет с глубиной в среднем от 5,6—6 до 7—7,5 км/с, но характер этого роста даже в пределах одного типа строения коры меняется. На континентах есть районы, где можно выделить дополнительные слои со скачками скоростей, и участки, в которых скорость нарастает плавно, без промежуточных границ. Большой интерес представляют слои, в которых скорости ниже, что объясняется локальным преобладанием роста температуры над давлением, изменением химического состава или фазовыми превращениями.

Кора меняется как по вертикали, так и по горизонтали, ее структура имеет слоисто-блочный характер. Тонкие слои, зоны пониженной скорости, разломы, области аномального поглощения сейсмической энергии, прерывистые границы и изменения градиента скорости — все это стараются и часто умеют находить специалисты по глубинному зондированию.

Судя по измерениям скорости в образцах под давлением, состав земной коры меняется в зависимости от глубины и ее типа — кора океанов и кора континентов, а между ними промежуточные типы.

В коре континентов на глубинах 10—15 км скорость распространения упругих волн примерно соответствует скорости в кислых породах (гранито-гнейсы), содержащих много окиси кремния, на глубинах 15—30 км — скорости приближаются к основным (породы гранулитовой фации с включением интрузий габбро). Низы коры континентов

сложены плотной модификацией базальта — эклогитами. В океане консолидированная кора имеет скорости,ственные кислым и основным породам.

Вблизи подошвы давление в земной коре в зависимости от ее мощности меняется от 2—3 кбар на Тихом океане до 12 кбар в платформенных областях и 18—20 кбар в горных районах Памира и Тянь-Шаня. Температуры при этом достигают 200—300°C в океане, 400°C на платформах и доходят до 1000—1200°C в складчатых горных районах.

Граница Мохоровичича выделена на Земле повсеместно, скорость продольных волн в верхней мантии, как правило, равняется первой космической, однако в рифтовых зонах Земли наблюдается понижение скоростей (7,6—7,8 км/с), связанное с частичным подплавлением вещества верхней мантии.

Верхняя мантия сложена ультраосновными породами, обедненными кремнеземом и обогащенными железом и магнием; основные минералы здесь оливин и пироксен. В последние годы методами взрывной сейсмологии верхняя мантия изучена до глубин 80—100 км, установлена ее сложная, пространственная структура.

Кора Луны, разумеется, изучена гораздо хуже земной, ее исследование только началось, детальные наблюдения проведены лишь в районе Моря Познанного. Однако уже проведенные на Луне измерения представляют огромный научный интерес. Их можно, пусть пока ориентировочно, сопоставить с земными.

Прежде всего на Луне, как и на Земле, кора существует. Ее свойства также меняются не только с глубиной, но, по-видимому, и в горизонтальном направлении. Скорости распространения волн в низах коры и их отношение (коэффициент Пуассона) близки к земным. Судя по всему в определенной мере похож и их состав. Переход к мантии так же, как на Земле, носит сложный характер.

Но кора Луны отличается от земной прежде всего большой мощностью, что становится понятно, если иметь в виду намного меньшие ускорение силы тяжести и давление на Луне. На границе с мантией Луны давление соизмеримо с земным в низах океанической коры.

Заметно отличаются от земных также и физические свойства верхнего слоя коры Луны. В самом верху ско-

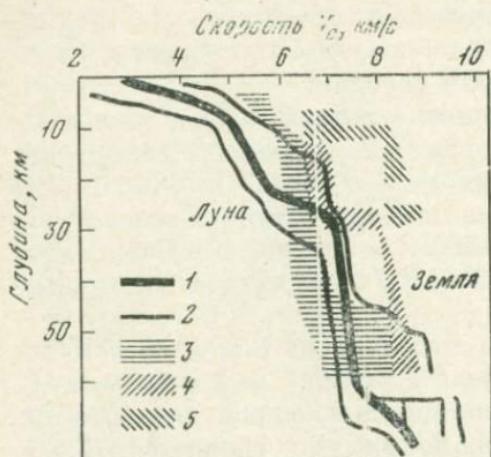


Рис. 11. Сравнение скоростных моделей коры Луны и Земли
 1 — вариант лунного разреза,
 2 — полосы возможных моделей Луны,
 3 — континент Земли,
 4 — зона перехода от континента к океану,
 5 — океан

рость распространения сейсмических волн очень маленькая, глубже она стремительно возрастает с очень высоким градиентом. Верхний слой коры вследствие большой неоднородности вызывает сильное рассеяние волн и в то же время имеет чрезвычайно высокую сейсмическую добротность, что и является причиной долго незатухающих колебаний.

Сравнение скоростей распространения волн в модели коры Луны и в земной коре океанического, горного и переходного типов представлено на рис. 11. Здесь приведены полосы возможных значений скорости и глубины, полученные методом перебора на ЭВМ.

Добыть образцы из недр коры — заветная мечта геологов. С этой целью на Земле организуется чрезвычайно сложное и трудоемкое сверхглубокое бурение, расходы на которое соизмеримы с космическими программами. Пока удалось получить керн лишь из верхних слоев базальта в океане и из первых десяти километров на континенте.

Бурение на Луне затруднительно. Трубка керна, доставленного на Землю, ограничена длиной 2,7 м. Но сама природа помогла исследователям Луны. Крупные метеориты, падавшие миллиарды лет назад, произвели специфическое космическое сверхглубокое бурение — вырвали из тела коры и разбросали далеко вокруг образцы коренных пород, и люди могут узнать ее состав и свойства.

* * *

Используя удары космических аппаратов, экспедиции «Аполлон» провели сейсмическое зондирование лунной коры. Как и кора Земли, она радиально слоиста и горизонтально неоднородна, скорость распространения волн в ней растет с глубиной, переход к мантии имеет сложную неоднородную структуру и знаменуется значительным увеличением скорости. Корка Луны сложена в основном кальциево-алюминиевыми породами среднего состава. Верх мантии, как и в Земле,— ультраосновными породами, богатыми оливином. В Луне, возможно, находится высокоскоростной «козырек», глубже которого скорость убывает.

В отличие от земной, лунная кора имеет низкие скорости распространения волн вверху и высокий градиент роста скорости с глубиной, большую мощность и малый коэффициент затухания волн. Уникальное по земным меркам явление представляет верхний очень неоднородный и добротный слой, рождающий столь долгое звучание сейсмических сигналов.

Открытие лунной коры — первый и очень важный аргумент в пользу общности развития «космических сестер» — Земли и Луны.

ПУТЕШЕСТВИЕ К ЦЕНТРУ ЛУНЫ

Долгожданный метеорит

Энергии ударов космических аппаратов хватило на то, чтобы просветить мантию Луны до 150—200 км. Однако важно было знать свойства более глубоких недр. Похожа ли Луна на свою «сестру» Землю, которая имеет три основные оболочки: кору, мантию и ядро?

На помощь сейсмологам пришел второй крупный метеорит, который 17 июля 1972 г. упал на обратную сторону Луны в район кратера Москва. Его энергия оказалась эквивалентной взрыву 1 тыс. т тротила.

Метеоритная статистика предсказывала, что такие крупные метеориты должны падать один раз в 10 лет. Столь приятное исключение — два метеорита за два с небольшим месяца — позволило сейсмологам узнать феноменальную новость — у Луны существует ядро.

«Просветив» Луну насквозь, сейсмические волны качнули сейсмометры на всех четырех станциях сети «Аполлон». Однако волновая картина оказалась резко различной в зависимости от удаления станций, т. е. от глубины проникания волн (табл. 6).

На записях станций, на пути к которым волны проникли глубже 800—1000 км, не оказалось фаз поперечных волн. Они были выделены лишь на станции «Аполлон-15» с помощью узкополосных фильтров на частоте 2—4 Гц. Однако и здесь волны запаздывают на 30 с по сравнению с моделью, в которой скорость волн в мантии постоянна. Значит, в низах 800-километровой толщи скорость продольных волн уменьшается. Отсутствие поперечных волн в центральной половине Луны можно объяснить, исходя из земного опыта. Поперечные сдвиговые волны не распространяются в жидкости, поэтому при исследованиях в океане волновая картина намного проще. Не замечены они и в расплавленном эффективно жидким внешнем ядре Земли.

Может быть и у Луны центральная область расплавлена? Вывод был столь неожиданным и значительным, что в него сперва не поверили.

Но вот «заговорил» очаг лунотрясений на обратной стороне. 12 событий было зарегистрировано из эпицентра с координатами 6° с. ш., 104° в. д.

На записях сейсмических станций «Аполлон-15 и -16», эпицентрические расстояния до которых соответственно 111 и 104° , вступление поперечных волн выделено уверенно, их амплитуда в несколько раз превосходит продольные волны. А вот на сейсмической станции «Аполлон-14» (эпицентрическое расстояние 137°), где трасса проникала глубже 1 тыс. км, поперечных волн не замечено. (На станции «Аполлон-12», удаленной на 142° , запись была слишком слабой для детального анализа.)

Таким образом, открытие подтверждено — внутренняя зона, через которую не проходят поперечные волны, у Луны существует.

Разные авторы в разное время именовали ее «ядром», «астеносферой» и «нижней мантией». Но дело не в названии, а в том, как объяснить причину сейсмического феномена. Объяснение может быть двояким.

Во-первых, в центральной зоне сильно увеличиваются эффекты неупругого поглощения энергии волн. При этом сейсмическая добротность становится меньше 500 — 600 для продольных и 100 — 200 для поперечных волн. Это может быть связано с тем, что температура недр здесь превышает точку плавления базальтов (1500°C при давлении 40 кбар).

Таблица 6

Эпицентрические расстояния и глубина проникания сейсмических волн

Станция	Эпицентрическое расстояние, $1^{\circ}=30,3$ км	Глубина проникания, км	Наличие поперечных волн
«Аполлон-15»	99	600	Есть
«Аполлон-16»	112	770	Нет
«Аполлон-14»	134	1060	»
«Аполлон-12»	138	1110	»

Наблюдаемый эффект может быть достигнут, если в мантийной породе, богатой оливином, появляется небольшое количество (до 5%) расплавленных капелек базальта. Тот же результат получится, если на глубине более 800 км увеличится содержание летучих элементов.

Во-вторых, если скорость поперечных волн быстро убывает с глубиной, то в таких случаях образуется «зона тени» и энергия волн, возвращающихся к поверхности, очень ослабевает.

Скорее всего в природе имеют место оба эффекта. Во всяком случае можно сделать фундаментальный вывод о том, что Луна грубо разделена пополам на две зоны, в которых сейсмические волны распространяются по-разному. Этот результат, равно как и открытие коры, представляет важнейшие граничные условия, которые сейсмология накладывает на гипотезы эволюции Луны.

В дальнейшем представление о структуре и физических свойствах внешней половины Луны несколько уточнено. По аналогии с Землей эта 800—900-километровая толща Луны названа «литосферой».

«Сейсмические сестры»

Вспомним вкратце, что выяснила в последнее время геофизика о внутреннем строении Земли. Не говоря о тонкой коре, составляющей менее 0,01 земного радиуса, вся остальная ее толща (радиус Земли 6370 км) делится примерно пополам на мантию и ядро.

Мантия составляет $\frac{2}{3}$ массы и 84% объема Земли. Она сложена ультраосновными породами, богатыми соединениями кремния с тяжелыми элементами, железом и магнием. По сейсмическим свойствам мантия делится на верхнюю (до 300 км), переходную зону (до 700—800 км) и нижнюю (до 2900 км).

Кора и верхний слой мантии образуют жесткую литосферу, ее мощность — менее 10 км в рифтовых зонах, 50—70 км под океаном и 100—150 км на континентах. В низах литосферы давление достигает 50 кбар и температура превышает 1000°C.

Глубже почти повсеместно на земном шаре выделена астеносфера — «неустойчивая сфера» мощностью 100—150 км. В астеносфере на несколько порядков уменьшается вязкость вещества и во многих регионах падает скорость

распространения сейсмических волн в особенности попечных. Резкой верхней границы у астеносферы нет, по крайней мере не наблюдается отраженных от нее волн. Бряд ли здесь меняется состав пород, скорее всего ее свойства объясняются частичным плавлением базальтовых составляющих мантию. Значит здесь температура (1200°C) «перебарывает» давление (50—70 кбар).

Это приводит к весьма важным последствиям для тектоники Земли — по такой «смазке» могут перемещаться литосферные плиты.

До глубины 300 км скорость распространения волн расстет плавно, что объясняется уплотнением вещества под давлением вышележащих пород.

В переходной зоне отмечаются неоднократные резкие скачки скорости и плотности. Они связаны с тем, что кристаллы оливина под влиянием температуры и давления переходят в более плотную структуру типа шпинеля и постшпинеля. Возможно также, что на большей глубине сложные соединения магния, алюминия и кремния распадаются на отдельные, более плотные окислы.

Нижняя мантия Земли в целом более однородна, хотя и в ней обнаружены отдельные слои и даже крупные блоки с большими или меньшими градиентами скорости.

Существенно, что вся почти 3000-километровая толща мантии тверда. Ее вещество находится в кристаллическом состоянии — сейсмические волны как продольные, так и попечные, затухают в ней мало, добротность достигает 1000—2000. Поперечные волны распространяются и по астеносфере. Жесткость мантии Земли, несмотря на высокие температуры в ней (4000 — 5000°C у подошвы), обусловливается гигантскими давлениями (до миллиона атмосфер). Принято считать, что вплоть до ядра состав мантии значительно не изменяется. Она содержит силикаты с окисью кремния, магния и железа. Гипотетический «коктейль» пород мантии можно приготовить по-разному: смешать три части альпийского перidotита с одной частью гавайского базальта — получится пиролит, или пять частей перidotита и одну базальта из рифтовых зон океана — получится лерполит.

Величина скорости продольных волн (около 14 км/с) и плотности ($5,5$ г/ см^3) в низах мантии свидетельствует о том, что кристаллы здесь находятся в плотнейшей ионной упаковке.

В последнее время по сейсмическим данным установлена также значительная горизонтальная неоднородность верхней мантии, которая, по-видимому, переходит в нижнюю.

Ядро Земли имеет по новейшим данным радиус 3490 км, оно занимает только 16 % объема, но зато треть массы планеты. Мантию отделяет от ядра довольно тонкий переходный слой, ниже которого резко меняются все сейсмические характеристики: плотность возрастает до $10 \text{ г}/\text{см}^3$, скорость продольных волн падает до 8 км/с, а поперечные волны через него вовсе не проходят.

Из последнего факта делается фундаментальный вывод о том, что внешнее ядро Земли жидкое. По поводу его состава существуют разные мнения. По одной точке зрения, которой придерживается большинство исследователей, ядро считается железным (с примесями серы или кремния) или железно-окисным. Согласно другой точке зрения, силикаты мантии под гигантским давлением переходят в металлизированное состояние, при котором электроны вытесняются с орбит атомов и «обобществляются».

В любом варианте вещество внешнего ядра — хороший электрический проводник. Полагают, что его движение вызывает образование (по механизму «динамо») сильного и стабильного дипольного магнитного поля нашей планеты.

Сейсмологи записали волны, отраженные от кровли внешнего ядра. Добротность внешнего ядра 1000, вязкость менее 10^9 пуз.

У Земли имеется и внутреннее ядро радиусом около 1200 км. Переход к нему сложный. Скорость продольных волн в нем возрастает на 0,5–1,0 км/с и в центре Земли достигает значения второй космической — 11,2 км/с, плотность $13 \text{ г}/\text{см}^3$, температура 6000 К, как на поверхности Солнца, и давление 3 млн. кг на 1 см^2 . При таком сжатии вещество затвердевает. Во внутреннем ядре распространяются сдвиговые волны. Его гипотетический состав — сплав металлического железа с никелем.

Литосфера и астеносфера Луны

Опираясь на знания сейсмической структуры Земли, можно показать, что внешняя оболочка Луны литосферой названа не напрасно. Правда, она в несколько раз мощнее земной,

но термодинамические условия у них близки: давление вблизи подошвы 35–40 кбар и температура не более 1200° С. Можно сказать, что литосфера Луны — гипертропированная по толщине, монолитности и жесткости литосфера Земли.

Первоначальные представления о том, что Луна может быть грубо разбита на две зоны (жесткую холодную литосферу и частично расплавленную мягкую центральную зону), в последнее время уточнились благодаря важным сейсмограммам от падений метеоритов и мелкофокусных лунотрясений на больших эпицентральных расстояниях.

Правда, следует иметь в виду, что из-за ошибок определения времени толчка и координат эпицентров, а также трудностей выделения слабых сигналов структура мантии Луны известна много хуже, чем структура ее коры.

Две основные исследовательские группы в Техасе и Массачусетсе рассматривают несколько вариантов структуры лунных недр, различающихся по скорости распространения сейсмических волн.

На Советско-американской конференции по космохимии Луны и планет, состоявшейся в июне 1974 г. в Москве, Г. Латем предложил пятислойную сейсмическую модель «Луна-74». Она включала кору, верхнюю и среднюю мантию (все вместе — «литосфера»), нижнюю мантию («астеносфера») и ядро. Такое расчленение удалось сделать по гидографам продольных и поперечных волн (рис. 12).

Однако использование только одного свойства волн — их времени пробега (как в случае изучения структуры коры, и даже в большей мере, поскольку точек на мантийном гидографе меньше и отсчет времени хуже) — оставляет простор для неоднозначных решений.

Полоса всех возможных разрезов мантии, исходя из одних времен пробега волн, была построена американскими исследователями по тау-методу, разработанному в ИФЗ АН СССР. При этом делалось допущение, что мантия Луны однородна в горизонтальном направлении, свойства ее меняются лишь вдоль радиуса.

Со среднеквадратичной погрешностью ± 5 с наблюдения удовлетворяли как условиям роста скорости с глубиной, так и моделям со скоростным накалом (при уменьшении скорости с глубиной). Такое изменение скорости примерно на 10% возможно в диапазонах глубин 250–550 и 800–1100 км.

Интересно, что модель 1974 г. техасских сейсмологов оказалась внутри полосы возможных разрезов. Рассчитанный для нее теоретический годограф отличается от полученного в наблюдениях в среднем на 4,9 с.

Несмотря на завершение в декабре 1972 г. активного сейсмического эксперимента, вплоть до настоящего времени продолжают поступать новые известия о глубинной структуре Луны. Они связаны как с доосмысливанием и частичным пересмотром (на новом методическом уровне) прежних экспериментальных данных, так и с анализом новых записей естественных сейсмических событий.

К марта 1976 г. в распоряжении сейсмологов имелись сейсмограммы не только нескольких тысяч слабых глубокофокусных лунотрясений, но и более энергичных толчков: 21 падение крупных метеоритов и 13 довольно сильных мелкофокусных лунотрясений.

Строгая калибровка сейсмического регистрирующего канала, применение специальных методов выделения сигналов позволили наряду с временем пробега волн изучить их амплитуды и выделить фазы последующих вступлений. При этом имевшиеся ранее записи падений космических аппаратов, энергия ударов которых хорошо известна, позволили привести к абсолютному выражению и амплитуду записей от естественных событий. В итоге была построена глобальная амплитудная кривая поперечных волн, показывающая изменения амплитуды спектра мощности волны в месте максимальной записи на сейсмограмме (рис. 13).

Это обстоятельство имело важное значение. Как показал опыт земной сейсмологии, введение в интерпретацию амплитуд волн, в особенности последующих, сильно сужает область возможных решений задачи. На амплитудной кривой выделено четыре интервала с ростом эпицентрального расстояния: на малых удалениях до 5° (лунный градус на поверхности равен 30,3 км) регистрируются прямые волны, бегущие в коре; несколько дальше, вплоть до $17-20^\circ$, начинают поступать волны, слегка заходящие в верх мантии (рефрагированные), и волны, отраженные от границы кора-мантия, им соответствует тройная ветвь годографа, своеобразная «петля». Во всем этом интервале амплитуда волн ослабевает примерно в 30 раз.

До дистанции 90° приходят волны, соответствующие верхней мантии, здесь амплитуды мало ослабевают с расстоянием. Но далее кривая снова «ныряет» вниз — вступа-

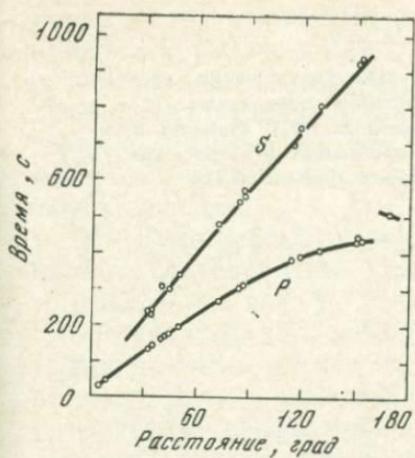


Рис. 12. Глобальный годограф Луны для P - и S -воли, использованный для построения скоростного разреза мантии и ядра. По вертикали — время, по горизонтали — эпицентрическое расстояние

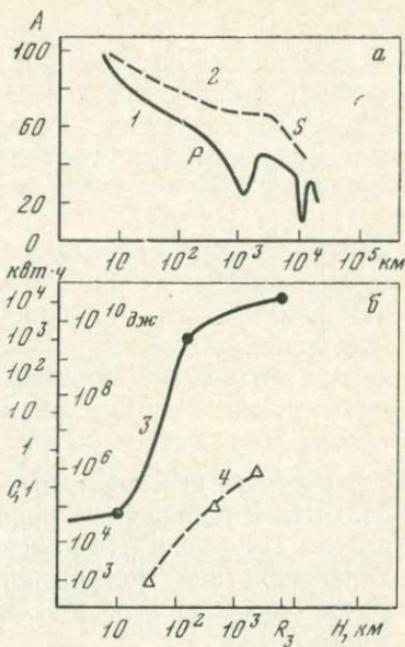


Рис. 13. Амплитуды сейсмических волн

а — калибровочные кривые продольных P -волн для Земли (1) и поперечных S -волн для Луны (2); (по вертикали — амплитуда, по горизонтали — эпицентрическое расстояние); б — энергетические кривые сейсмического просвечивания Земли (3) и Луны (4). По вертикали — сейсмическая энергия, по горизонтали — глубина проникания волн

ют волны, «заглянувшие» в среднюю мантию Луны и глубже.

Из теории известно, что изменение амплитуды прямых волн прямо пропорционально второй производной годографа, т. е. отражает скорость изменения скорости с глубиной, иначе говоря, ее градиент. А соотношение амплитуд на разных частотах (1 и 8 Гц) позволило оценить потерю энергии за счет неупругих тепловых потерь — сейсмическую добротность мантии.

В связи с плохим знанием положения очагов и момента лунотрясений время прихода продольных и поперечных волн отсчитывается со значительной ошибкой. Гораздо точнее определяется разность времени их прихода (практически это временная дистанция от начала до максимума записи). По наклону кривой на рис. 14 путем сопоставления

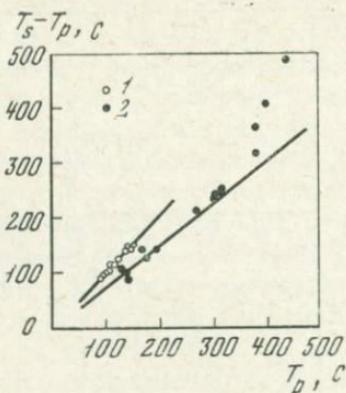


Рис. 14. Соотношение времени вступления продольных (T_p) и поперечных (T_s) волн по записям приливных лунотрясений (1) и ударов метеоритов (2)

с расчетным временем оценено отношение скоростей продольных и поперечных волн и, значит, величина коэффициента Пуассона. Эта константа, всегда существенная для характеристики физического состояния среды, в случае Луны оказалась особенно значительной. Но об этом — немного позже.

Особенно важна в этом анализе возможность использования записей глубокофокусных лунотрясений (трудности, связанные с их малой интенсивностью, удалось преодолеть, суммируя их похожие по форме записи), поскольку из-за отрицательного градиента скорости лучи поперечных волн от поверхностного (метеориты) или неглубокого (тектонические лунотрясения) источника проникают лишь до 400—500 км и, загибаясь, возвращаются к поверхности. Очи же приливных лунотрясений расположены на глубинах 800—1000 км, волны от них просвечивают всю литосферу снизу вверх.

Прежде чем перейти к описанию текущей скоростной модели Луны, остановимся еще на одном важном качестве глобальной амплитудной кривой для Луны.

Имея калиброванные удары отработанных частей космических аппаратов (зная скорость, угол падения и вес аппарата), удалось оценить смещение грунта, вызванное сейсмическими волнами, и таким образом сравнить условия распространения сейсмической энергии и соответственно возможности просвечивания Земли и Луны.

На нижней части рис. 13 указано количество сейсмической энергии, необходимое для того, чтобы сигнал превышал средний сейсмический «шум» в 10 раз. Кривая для

Земли построена по первым, продольным волнам. На удалениях около 100 км и 10–15 тыс. км имеется «зона тени» — резкое уменьшение амплитуд. На этих расстояниях энергия для просвечивания должна быть увеличена. В целом в интервале 2–10 тыс. км для просвечивания Земли упругими волнами нужно посыпать в грунт от 1 до 10 кВт·ч сейсмической энергии.

На Луне условия для сверхдальнего распространения намного благоприятнее. Правда, данные из-за очень низкого фона помех пока не столь подробны, но уже ясно, что отсутствие воздуха и свободной воды сильно повышает возможности сейсмического сверхзрения. В частности, на Луне могут быть с успехом применены маломощные, легко управляемые невзрывные источники упругих волн, например механические вибраторы. Энергии, заключенной в одном литре керосина, окажется достаточно для многократного сквозного просвечивания недр Луны.

Однако по другим признакам Луна хуже приспособлена для сейсмических просвечиваний, чем Земля: из-за сильного рассеяния затруднено выделение волн в последующей части записи, а вследствие уменьшения в мантии скорости поперечных волн с глубиной поверхностным источником нельзя осветить недра глубже 500 км.

И все же сведений о структуре сейсмических скоростей в лунных недрах не так уж мало.

Итоговая модель «Луна-77» (докладывалась на VII и VIII лунных конференциях в Хьюстоне), развивающая, но в принципе не меняющая прежние представления группы Г. Латема, показана на рис. 15, а.

Подстилающая кору верхняя мантия протягивается до глубины 250–300 км. Ее подошва «отбивается» как отраженными волнами от поверхностных ударов метеоритов, так и волнами от глубокофокусных лунотрясений, меняющими на этой границе свой тип: продольная на поперечную, поперечная на продольную (рис. 16).

Близ кровли верхней мантии скорость продольных волн 8,1 км/с, поперечных — 4,7 км/с, коэффициент Пуассона 0,26. Сейсмическая добротность, определенная по изменению амплитуд во времени и с частотой, высокая: для продольных волн более 5000 (есть оценки 7000 и даже 10 000) и для поперечных 4000. Судя по амплитудам волн от метеоритов на удалениях 17–90°, в верхней мантии имеется небольшой отрицательный градиент скорости — 0,013 км/с на

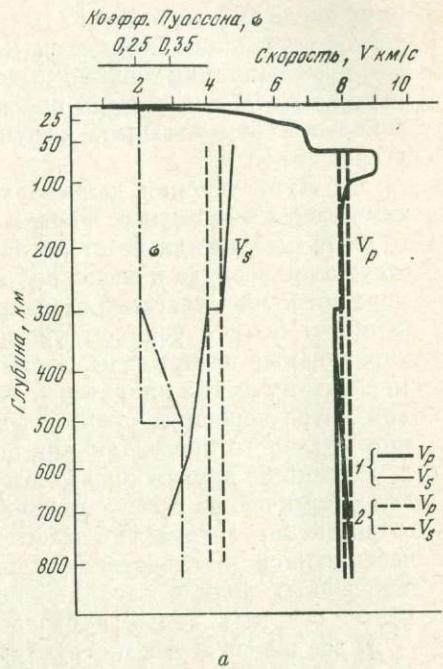
Рис. 15. Сводка геофизических данных о литосфере и астеносфере Луны

a — скорости продольных (V_p), поперечных (V_s) волн и величины коэффициента Пуассона (σ). 1 — вариант Латема, 2 — вариант Токсоца;

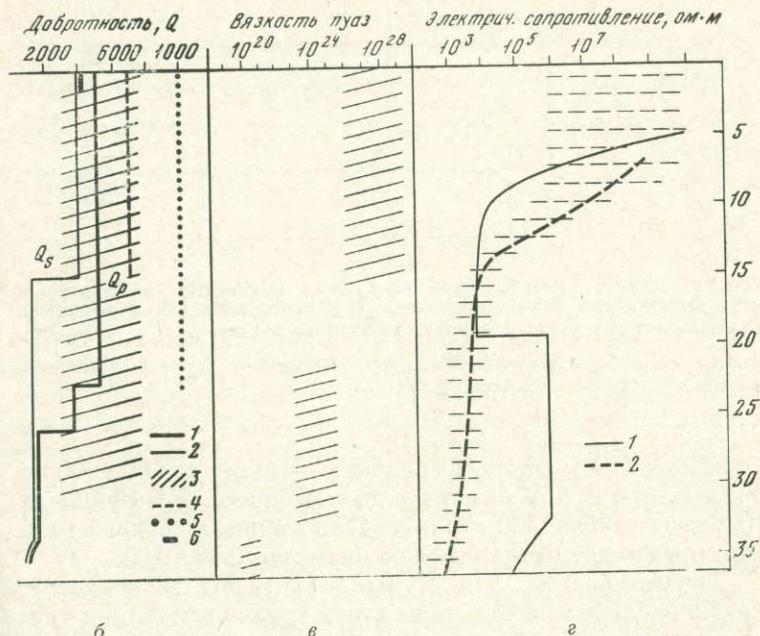
b — сейсмическая добротность по продольным (Q_p) и по-перечным (Q_s) волнам (1, 3, 5 — данные Токсоца, 2 — данные Латема, 4 — определения по затуханию амплитуд с расстояниями, 6 — результаты сопоставления с теоретической диффузионной моделью, 7 — добротность реголита по лабораторным данным);

c — вязкость (по Мейеру);

d — сводные данные о глубинной электропроводности Луны (1 — по Ваньяну и др., 2 — по Дайелу и др.); по вертикали — указаны глубины, км (слева) и давление, кБ (справа)



a



б

в

г

мантии: увеличение содержания пироксена или увеличение на несколько процентов отношения количества $Fe/(Fe+Mg)$.

С глубины 300 км при переходе к средней мантии скорость поперечных волн начинает убывать вдвое быстрее. Пока не ясно, вызвано это увеличением температурного градиента или изменением состава пород. На глубине 400 км скорость поперечных волн снижается до 4,15 км/с, соответственно до 0,33 возрастает коэффициент Пуассона. Сейсмическая добротность хотя и уменьшается, но остается весьма высокой (3500 на глубине 600 км для продольных и 1500 для поперечных волн). К верхам средней мантии относится слой пониженного электрического сопротивления.

Вплоть до глубины 800 км скорость поперечных волн продолжает убывать, оставаясь в пределах $3,7 \pm 0,2$ км/с. Добротность также уменьшается по неизвестному закону

1 км. В низах верхней мантии скорость продольных волн 7,8 км/с. Отношение скоростей продольных и поперечных волн $1,733 \pm 0,059$ (с вероятностью 95 %), коэффициент Пуассона $0,25 \pm 0,025$.

Для выяснения состава мантии теоретические кривые зависимости скорость—плотность сопоставлялись со значением, полученным по сейсмическим данным. Хорошие совпадения получились для оливина (80—85 % форстерита).

Согласно расчетам, 300-километровая толща ультраосновных пород достаточна для выплавления плагиоклазовой коры мощностью 50—60 км.

Наблюдаемый в верхней мантии скоростной градиент при оливиновом составе соответствует росту температур с темпом 5° на 1 км, при этом вещество должно частично плавиться. Поскольку это противоречит высокой добротности, то предполагается частичное изменение состава верхней

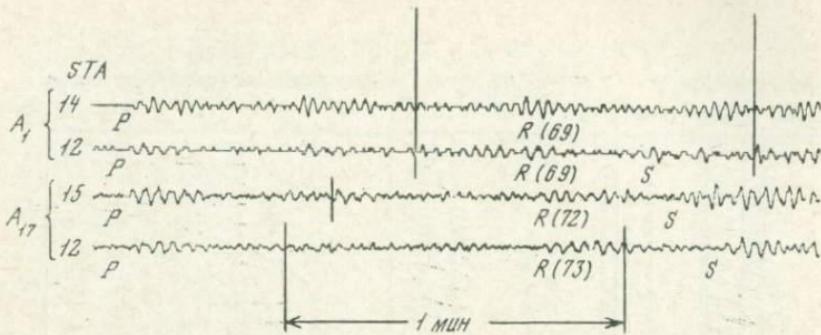


Рис. 16. Пример записей глубокофокусных приливных лунотрясений, на которых видны фазы продольных (P), поперечных (S) и обменных (R) волн, соответствующие границе на глубине 300 км

A_1 , A_{17} — номера эпицентральных зон. В начале трассы обозначены номера сейсмических станций «Аполлон»

(при переходе к астеносфере она снижается до 500–600 по продольным и 100 по поперечным волнам). Коэффициент Пуассона глубже 300 км, и особенно в низах средней мантии, принимает очень высокое значение $0,36 \pm 0,02$.

Таким образом, для Луны характерны зависимости, хотя и наблюдающиеся, но не столь частые для Земли: скорости волн сжатия и волн сдвига меняются с глубиной по-разному. Высокое значение отношения скоростей (коэффициент Пуассона) не получило окончательного объяснения. Такие высокие значения имеют некристаллические материалы, глины, пластилин. Вспомним, что коэффициент Пуассона 0,4 отмечен в лунном реголите.

К глубинам с высоким коэффициентом Пуассона приведены очаги приливных лунотрясений.

Токсоц и его сотрудники полагают, что для детального расслоения скоростной структуры Луны данных недостаточно. Они разработали процедуру определения средних скоростей продольных и поперечных волн для мантии в целом по записям приливных лунотрясений, очаги которых располагаются в низах литосферы, так что волны пересекают всю ее толщу. По записям двух лунотрясений получены значения средних скоростей в литосфере (табл. 7).

От поверхности на глубину скорость поперечных волн убывает, но не ясно, происходит это плавно или скачком. Структура Луны, по представлениям сейсмологов Масса-

Таблица 7

Средние скорости сейсмических волн в литосфере, км/с

Глубина очага, км	Скорость волн, м/с		Ошибка в отсчете времени, ± с
	продольных	поперечных	
880	7,9	4,4	0,9
920	8,1	4,0	0,9

чусетского технологического института, в сравнении со структурой Земли менее дробна: кора, мантия (литосфера) на глубинах 60—600 км и ядро (астеносфера) вплоть до центра. Это отчасти обусловлено меньшим объемом данных, использованных при анализе. Благодаря использованию поляризационных фильтров удалось идентифицировать фазы отраженных продольных, поперечных и обменных волн от границ в мантии на глубинах 520 км и менее уверенно — 400 и 350 км.

Результаты группы Токсоца в общем близки к оценкам Латема. Их основное противоречие — разная глубина кровли астеносферы — может быть устранено введением представления о переходной зоне между лунной литосферой и астеносферой. Эта зона расположена на глубинах 500—900 км, имеет сложный рельеф и отличается большими градиентами физических характеристик пород. К ней приурочены очаги приливных лунотрясений.

Уникальность свойств лунной литосферы по сравнению с Землей проявляется в росте коэффициента Пуассона с глубиной и высокой сейсмической добротности. Сводка новейших результатов определения сейсмической добротности Земли опубликована Институтом физики Земли АН СССР. Верхние 4—5 км кристаллической коры имеют добротность по продольным волнам около 30 на частоте 1 Гц. В среднем для коры $Q_p > 400$, $Q_s \approx 200$. Среднее значение добротности для мантии 400—600. При этом верхняя мантия и переходная зона вплоть до глубины 800—900 км весьма низкодобротны, в нижней мантии добротность растет до величины 600—1000 (в интервале глубин 1500—2000 км) и затем снова падает с глубиной по мере приближения к ядру Земли.

Подобно литосфере Земли, литосфера Луны (кора, верхняя и средняя мантия) весьма холодна и не содержит сколько-нибудь обширных зон частичного расплава вещества.

Другие геофизические наблюдения дополняют эту картину (см. рис. 15). На кривой электропроводности (по данным Л. Ваньяна и др.) выделен слой пониженного электрического сопротивления (10^4 Ом) на глубине 250—500 км, соответствующий верхней части средней мантии по сейсмическим данным. Глубже, в поясе гипоцентров лунотрясений, электрическое сопротивление возрастает в 10 раз.

Сейсмическая добротность литосферы, определяемая различными методами (по спаду амплитуд во времени, по расстоянию и с частотой), имеет высокие значения,— в 10—100 раз больше, чем в литосфере Земли.

Токсоц и другие исследователи обнаружили детали распределения сейсмической добротности для продольных волн с глубиной. Изучались спектральные отношения (в диапазоне частот 1—10 Гц) амплитуд волн на двух станциях, записавших один и тот же удар.

В толще до 500 км добротность очень высокая (5000, у других авторов до 7000—10 000). По данным Латема, она очень высока (4000—6000) и для поперечных волн. В верхней части пояса очагов лунотрясений на глубине 500—600 км добротность для продольных волн уменьшается до 3500, а к подошве литосферы падает до 1400 (до 1500 для поперечных волн).

Для понимания процессов взаимодействия внешней и внутренней оболочки Луны важно знать степень жесткости пород, их способность к «перетеканию» под действием длительных по геологическим масштабам напряжений.

Это свойство характеризуется коэффициентом вязкости. Его распределение с глубиной установил немецкий геофизик Р. Мейснер, сопоставив две температурные кривые. Одна из них — изменение температуры с глубиной — была рассчитана по данным магнитотеллурического зондирования*. Другая — изменение температуры плавления с ростом давления — построена по лабораторным измерениям образцов сухого перидотита.

* Магнитотеллурическое зондирование — метод исследования внутреннего строения Земли, основанный на изучении переменного электромагнитного поля виземного происхождения.

От 200 до 300 км верхняя мантия Луны характеризуется очень высокой вязкостью, что соотносится с чрезвычайно большой сейсмической добротностью. Коэффициент вязкости здесь (10^{26} пуз) на 2–3 порядка выше, чем на соответствующих глубинах Земли, даже если сравнивать с самыми жесткими регионами древних кристаллических щитов. Подобные же оценки получены независимо, исходя из массы масконов, которые литосфера выдерживает на себе уже 3 млрд. лет.

В средней мантии Луны вязкость уменьшается в 100–1000 раз и становится похожей на литосферу Земли.

Небольшое ядро допускается

Зона глубже 800–900 км во многом напоминает земную астеносферу. Здесь сравнимые термодинамические условия (температура около 1500°C и давление более 40 кбар), низкая сейсмическая добротность (менее 500–700 для продольных и менее 100 для поперечных волн), маленькая вязкость (10^{20} пуз). Однако лунная астеносфера отличается от земной в главном — через нее не проходят (или в ней очень сильно затухают) поперечные волны. Возможно, различие обусловлено меньшей мощностью и меньшей степенью расплавленности астеносферы Земли.

Переход от литосферы к глубоким частям Луны постепенный. На это указывает отсутствие отраженных от границы волн. В низах литосферы находится пояс с резкими градиентами физических свойств. По-видимому, можно говорить об особом переходном слое между литосферой и внутренней зоной. Здесь обнаружены увеличенный отрицательный градиент скорости поперечных волн, высокий коэффициент Пуассона, уменьшение добротности, локальный рост электрического сопротивления. К переходной зоне приурочена часть очагов приливных лунотрясений.

Похоже, что взаимодействие основных оболочек Луны определяет ее тектонический облик.

На лунной конференции в Москве Г. Латем сообщил неожиданный результат. От удара метеорита 19 сентября 1973 г. на эпицентральном расстоянии 168° приход волны запаздывал на 57 с. К сожалению, пока не получены новые записи на столь больших удалениях. Но если

запаздывание подтвердится, то последуют многозначительные выводы: скорость распространения волн в центральной зоне Луны на глубине 1380—1570 км уменьшается до 4—5 км/с. Подобные скорости при давлении, свойственном центральной зоне Луны (40 кбар), имеет сернистое железо (FeS). Такое ядро имело бы массу, равную 1% планетарной, и не повлияло бы на величину момента инерции.

Величина момента инерции планеты служит индикатором неоднородности распределения ее массы по глубине. Относительный момент инерции однородной сферы равен 0,4. В случае роста плотности с глубиной он меньше. Так, у Земли, имеющей большое плотное ядро, он составляет 0,335. Измерить момент инерции можно, изучая особенности орбит спутников планет.

На Луне это стало возможно, начиная с полета «Луны-3». Момент инерции Луны оказался довольно близок к значению для однородной сферы. Сперва даже получилась величина, несколько большая 0,4, и казалось, что в недрах Луны проявляется инверсия плотности, т. е. плотность уменьшается с глубиной. Однако новейшие определения момента инерции 0,395 (+0,005, —0,01) убеждают, что инверсии нет, плотность с глубиной растет, но очень незначительно.

Исходя из смоделированной плотности Луны, Токсоц оценил ограничения, которые момент инерции накладывает на величину внутреннего ядра. Радиус ядра не может превышать 700 км, если оно сернистожелезное по составу, и 450 км, если оно чисто железное. Как видим, сейсмические наблюдения умещаются в этом «прокрустовом ложе».

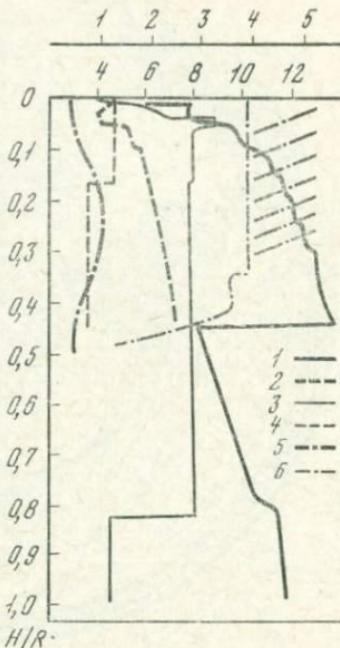
Впрочем, высказывается и не столь общепринятая точка зрения: железное ядро у Луны есть и немалое, но его избыточная масса компенсируется тем, что мантия состоит из рыхлых, плохо скрепленных метеоритных «кирпичиков» лунного здания.

* * *

Глубинная структура Луны изучена по записям отдаленных мелкофокусных лунотрясений и ударов метеоритов. Особенно важными оказались одно падение метеорита и сотрясения с эпицентрами на обратной стороне.

Рис. 17. Глубинная структура Земли и Луны по сейсмическим данным

Скоростная структура по продольным волнам Земли (1) и Луны (2), по поперечным волнам Земли (3) и Луны (4); сейсмическая добротность по продольным волнам Земли (5) и Луны (6); по вертикали — глубина по отношению к радиусу. По горизонтали: первая строка — добротность, $Q \cdot 10^3$, вторая — скорость, км/с



Главная особенность внутреннего устройства Луны — ее разделение на мощную, жесткую, холодную и сейсмически добротную литосферу и внутреннюю область, находящуюся, судя по непрохождению поперечных волн, в состоянии частичного расплава. Это свойство Луны объясняет тот факт, что ее гигантская литосфера парализует тектоническую жизнь планеты.

Менее надежно разделение лунной мантии на отдельные слои, а также наличие небольшого центрального железосульфидного ядра. Однако радиальная, а также горизонтальная неоднородность Луны не вызывают сомнений, они подтверждаются различными геофизическими методами.

Слоистость Луны выражена слабее земной (единственная ярко выраженная граница в ней — между корой и мантией).

На рис. 17, 18 приведены скоростные разрезы Луны и Земли для продольных и поперечных волн. Они построены в масштабе относительных глубин. В таком представлении выявляются любопытные особенности: положение ряда сейсмических границ у Земли и Луны совпадает, хотя изменение физических свойств на них далеко

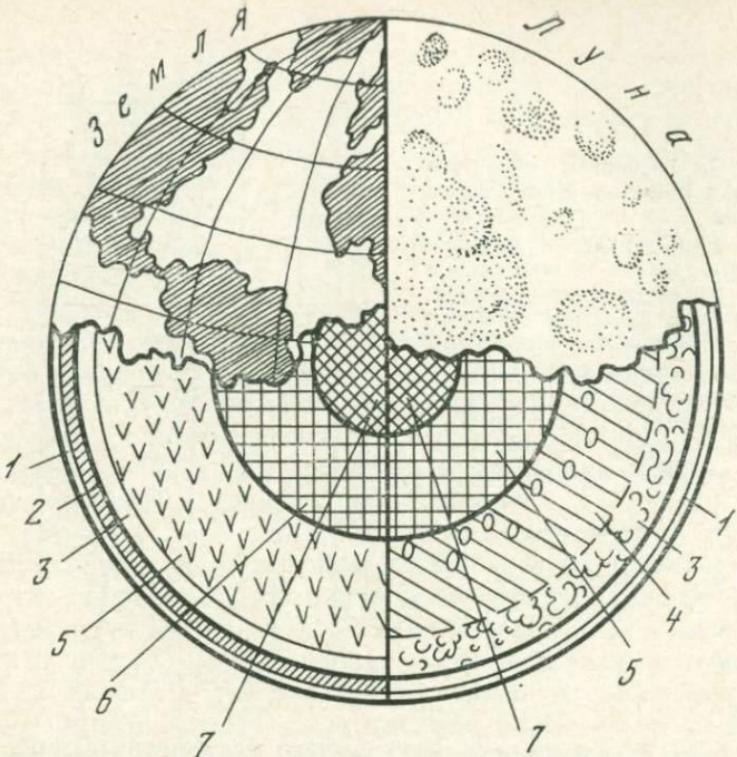


Рис. 18. Схема глубинной структуры Земли и Луны

1 — кора, 2 — астеносфера, 3 — верхняя мантия, 4 — средняя мантия, 5 — нижняя мантия, 6 — внешнее ядро, 7 — ядро

не всегда одинаково. На глубине 0,05 радиуса планет наблюдается наиболее резкое увеличение скорости, на Луне это соответствует переходу от коры к мантии, на Земле же — высокому градиенту скорости в зоне первого фазового перехода в верхней мантии.

На глубинах примерно в половину радиуса в обеих планетах пропадают поперечные волны. Это означает частичное или полное расплавление вещества более глубоких слоев. Правда, состав нижней половины планет различный. На Луне состав пород при переходе через границу слоев остается неизменным, а на Земле, по-видимому, меняется. Впрочем, многие ученые уверены, что и на Земле меняется не состав, а состояние силикатного мантийного вещества. Но в чем можно не сомневаться, так это в том, что на Луне таких фазовых превращений не происходит, там слишком неподходящие для этого

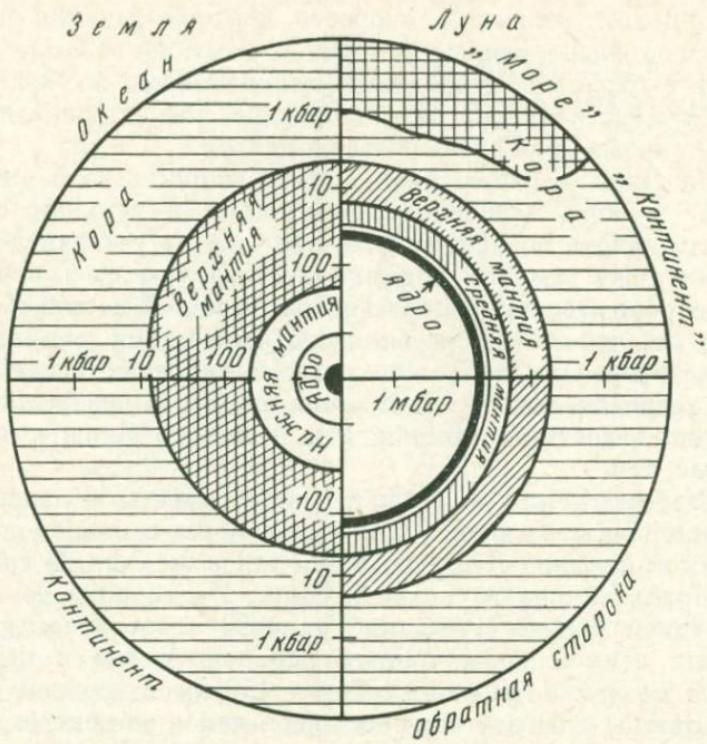


Рис. 19. Структура Земли и Луны по шкале давлений

термодинамические условия — низкие давление и температура. Не потому ли так мала ее тектоническая активность?

При переходе к области нераспространения поперечных волн скорости продольных на Луне заметно не изменяются. На Земле же они уменьшаются на 5 км/с, создавая самую резкую на планете сейсмическую границу.

Наконец, в обеих планетах намечаются внутренние ядра с радиусом 0,2 от полного радиуса каждой из них, состоящие в основном из железа. На Луне это ядро, по-видимому, расплавленное сульфидно-железное. Скорость продольных волн падает там столь же резко (хотя и на уровне меньших величин), как и во внешнем ядре Земли, — на половине его радиуса. Внутреннее ядро Земли — твердое, железоникелевое, скорость распространения волн при переходе к нему возрастает скачком.

В целом величины скорости распространения волн в Луне гораздо меньше земных. К тому же в Земле скорость с глубиной в среднем увеличивается, по крайней мере в коре и мантии. И даже в ядре, сперва снизившись на его кровле, она вновь растет к центру.

На Луне картина иная. Здесь скорость воли растет лишь в коре, особенно стремительно в верхнем слое. Далее, вплоть до центра планеты, она не увеличивается, скорее даже убывает. Влияние температуры здесь превосходит рост давления, что объясняется малой массой Луны. Заметим, что такая особенность скоростной структуры Луны предсказывалась еще до сейсмических исследований теоретически (В. Н. Жарков и др.). В центре Земли давление достигает 6 млн. атм, в центре Луны — лишь 40 тыс. атм.

Разрезы Земли и Луны в едином масштабе давлений представлены на рис. 19. В низах коры западной части видимой стороны Луны давление такое же, как на границе Мохоровичича в океанах Земли. На границе верхней и средней мантии Луны оно сравнимо с давлением у подошвы земной коры горных районов. А вот в центре Луны давление, как на глубинах 150 км в верхней мантии Земли, и на два порядка ниже, чем в ее центре.

Разумеется, скоростная структура недр Земли изучена куда лучше лунной. Однако есть надежда углубить знания и о структуре Луны, продолжив регистрацию естественных сейсмических событий. Природа может опять подарить падение метеорита или толчки лунотрясений подходящей силы в благоприятном месте. А может быть, мы еще станем свидетелями нового активного сейсмического эксперимента на Луне.

Однако даже на уровне современных знаний данные о недрах Луны говорят о многом. По-видимому, радиальное расслоение — общепланетарное свойство для земной группы планет. Их эволюция шла по единому пути: будучи первоначально однородным телом, слепленным из частиц протопланетного облака, в ходе миллиардолетней истории планеты расслоились на отдельные оболочки. Конечно, у разных планет темп разделения и степень его завершенности разные.

Направляя автоматы с научными приборами и экспедиции к космическим соседям Земли, люди смогут многое рассмотреть и лучше понять строение и развитие планет солнечной системы.

МОЖНО ЛИ ПРЕДСКАЗАТЬ ЛУНОТРЯСЕНИЕ?

Планируя сейсмические наблюдения на Луне, ученые стремились к тому, чтобы сейсмические станции были поставлены в места контакта крупных структур рельефа, на границе морей и континентов. Именно здесь надеялись обнаружить свидетельства активности недр — тектонические подвижки.

Увы, Луна оказалась пассивной и асейсмичной. Этим она в корне отличается от Земли. Земля, говоря словами короля Лира, «тряслась, как в лихорадке», Луна лишь лениво «пощелкивала». Лунотрясения редки и слабы. Космические сестры — Луна и Земля в отношении сейсмичности оказались дальними родственницами.

Естественная сейсмичность Луны проявляется в сотрясениях трех сортов: приливных («земных»), тепловых («солнечных») и тектонических (собственно «лунных»). Сюда прибавляются удары метеоритов, вызывающие сотрясения, практически неизвестные на Земле, окутанной защитным слоем атмосферы.

Картина закономерностей естественной сейсмичности Луны проявлялась постепенно, по мере появления новых станций и накопления статистики лунотрясений.

Лунотрясение или метеорит?

Одна из первых задач сейсмологов — отличить лунотрясения от сотрясений, вызываемых падением метеоритов.

Эта проблема сродни различению землетрясений и подземных ядерных взрывов. Она решается так: на записях событий заведомо известной природы исследуются отдельные особенности волн — время их пробега, амплитуда, частотный состав, поляризация и др. По совокупности признаков в духе статистического распознавания образов

Таблица 8

Лунная сейсмическая активность
(с 21 апреля 1972 г. по 21 мая 1974 г.)

Сейсмиче- ская стан- ция	Лунотрясения			Удары метеоритов		
	Все собы- тия *	Интенсив- ная за- пись **	Число со- бытий в год	Все собы- тия	Интенсив- ная за- пись	Число со- бытий в год
A-12	998	689	328	281	251	120
A-14	1648	1279	609	403	355	169
A-15	808	774	369	284	281	134
A-16	1544	1402	668	359	332	158

* Включены события, записанные на двух и более станциях.

** Запись, где амплитуда больше или равна среднему шуму.

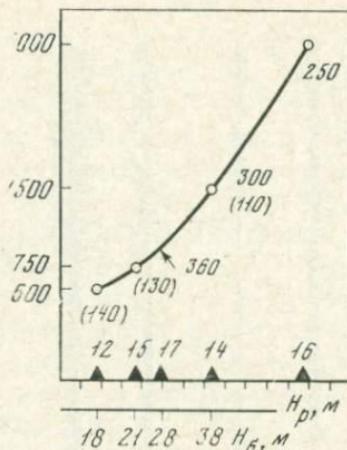
Сейсмическая станция	Относительное число собы- тий		Относительная интенсив- ность событий	
	Лунотрясе- ния	Удары метео- ритов	Лунотрясе- ния	Удары метео- ритов
A-12	1,0	1,0	1,0	1,0
A-14	1,9	1,4	3,0—3,5	2,0—4,0
A-15	1,1	1,1	1,5	1,5
A-16	2,0	1,3	3,5	2,0—4,0

с определенной вероятностью делается альтернативный выбор: «да — нет».

На Луне проверенного и пригодного для обучения материала не было. И все же постепенно картина прояснилась. Помогло то важное обстоятельство, что метеориты падают на поверхность, а гипоцентры лунотрясений (пока речь идет о приливных лунотрясениях) расположены глубоко. Рожденные ими волны пробегают в верхнем рас- сеивающем слое меньшую дистанцию. Поэтому на сейсмо- грамме время записи от первого вступления лунотрясения до его максимума меньше, чем при падении метеорита, и не зависит от частоты колебаний. Спектр записей при

Рис. 20. Связь сейсмичности Луны со скоростными характеристиками верхней части разреза

На горизонтальных шкалах указана мощность реголита (H_p) и слоя брекчий (H_b) в местах расположения сейсмических станций «Аполлон» (треугольники с цифрами). Вертикальная шкала — число лунотрясений в год. На кривой нанесены величины скоростей продольных и поперечных (в скобках) волн в слое брекчий



ударах метеоритов высокочастотный и резонансный, а при лунотрясениях низкочастотный и равномерный.

У лунотрясений выделяются фазы продольных (первые вступления) и поперечных волн (последующие вступления). Поперечные волны записываются на горизонтальных приборах с большей амплитудой, чем на вертикальных.

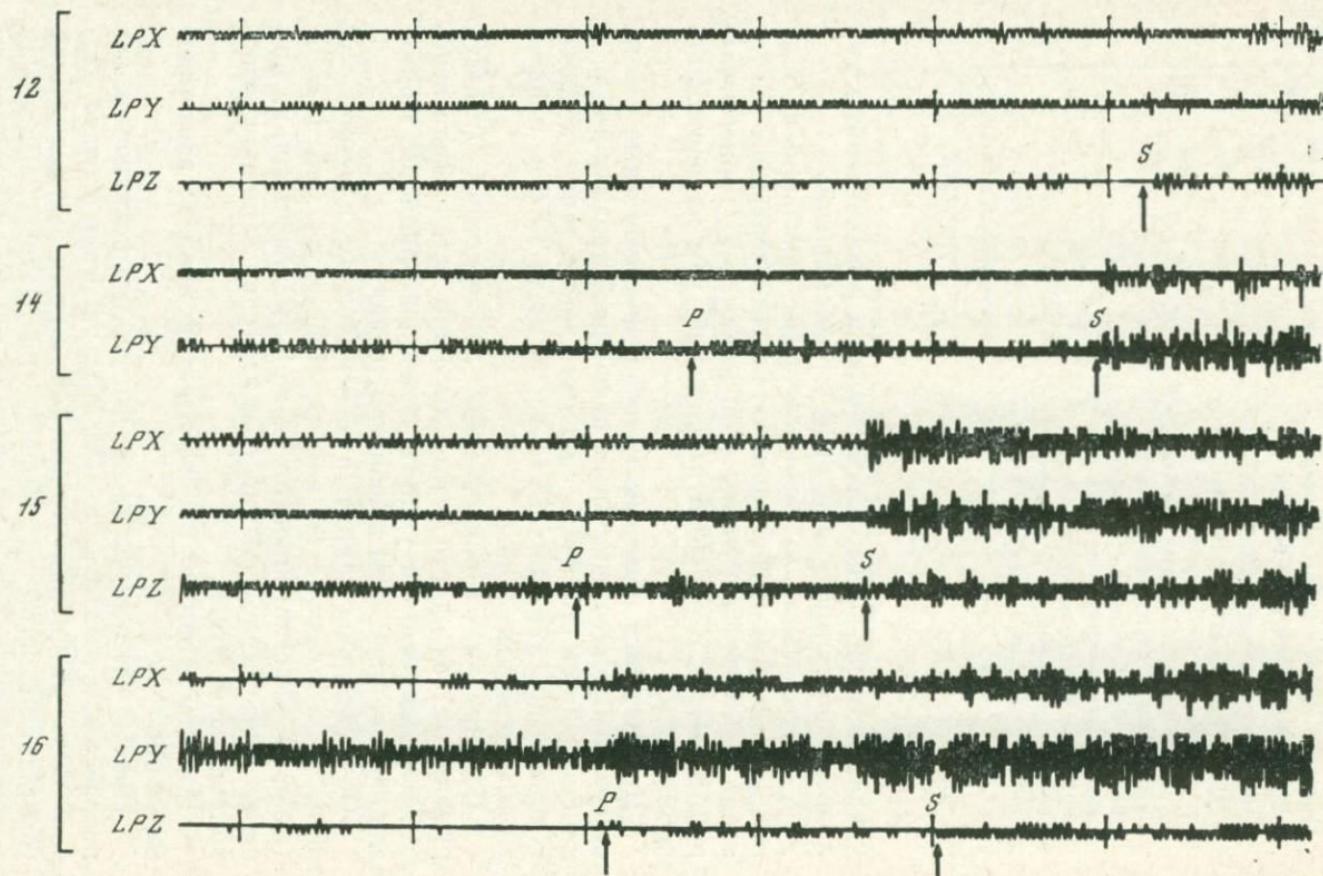
При падении обычных метеоритов поперечные волны не возникают. Это едва ли не решающий признак для различия. Лишь при очень сильных ударах, таких, которые возникли при падениях 13 мая и 17 июля 1972 г., появляются поперечные волны.

Наконец, на сейсмограммах лунотрясений (именно приливных) из одного и того же очага установлена строгая периодичность и удивительная повторяемость формы записи и направления первого смещения.

Опубликованы данные о сейсмических явлениях на Луне за 5,5 года, с 20 ноября 1969 г. по май 1975 г. (табл. 8). Зарегистрировано около 8 тыс. сигналов, из них около 4 тыс. лунотрясений с амплитудой записи, превосходящей фон помех.

Представления об их свойствах и природе эволюционировали.

Прежде всего выяснилось, что все без исключения лунотрясения очень слабые. Оценить энергию в очаге удалось после уточнения скоростной структуры недр. Зная (благодаря строгой калибровке аппаратуры) амплитуду смещения грунта под сейсмометром, можно оценить потери



энергии при распространении волн и таким образом рас-считать энергию источника. Для максимальных толчков приливной природы она оказалась всего 10^7 — 10^9 эрг, что соответствует условной величине — магнитуде землетрясения 0,5—1,3. Столь слабые сотрясения на Земле невозмож-но различить из-за интенсивного фона микросейсм. Чтобы этот фон не забивал запись, земная сейсмологическая аппарата гораздо грубее лунной.

На различных сейсмических станциях сети «Аполлон» записывается в среднем в год разное число лунотрясений: в Море Познанием 600, в Апеннинах 650, в районе кратера Фра-Мауро 1500 и больше всего в континентальном районе у кратера Декарт — свыше 3000.

После проведения сейсморазведочных исследований верхней части разреза стало ясно, что сейсмичность ре-гиона тесно связана с мощностью и скоростью волн в слоях грунта. Этот эффект хорошо известен сейсмологам и на Земле.

Как видно из рис. 20, число лунотрясений больше на тех станциях, в районе которых мощнее слои реголита и брекчий и ниже скорости сейсмических волн во втором слое.

Амплитуды регистрируемых сигналов от лунотрясений различаются не более чем в 10 раз, так что возможности динамического диапазона аппаратуры при их записи не реализуются. Приборы фиксируют чрезвычайно слабые сейсмические сигналы. Абсолютное смещение грунта при этом $(0,5\text{--}5) \cdot 10^{-8}$ см соизмеримо с размерами атома.

Всеми станциями на Луне регистрируется одновремен-но около 600—700 событий в год, из них только 25% при-годны для анализа, остальные записи слишком слабые. Пример записи лунотрясений приведен на рис. 21.

Важное свойство планетотрясений — соотношение меж-ду их числом и энергией (рис. 22). Эти так называемые графики повторяемости говорят о многом. Они имеют вид

Рис. 21. Пример записи на сейсмических станциях сети «Аполлон» приливного лунотрясения из очага A₁₈ 5 января 1973 г. в 22 ч 53 мин по Гринвичу

Номера станций указаны в начале сейсмограмм. Отмечены горизонталь-ная и вертикальная компоненты. Сигналы типичны для приливных лунотрясений. Стрелками показаны вступления волн P и S

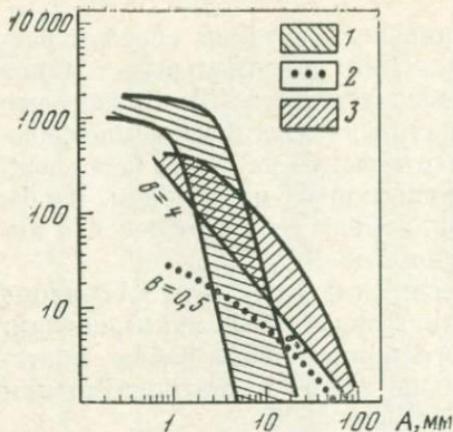


Рис. 22. Кривые повторяемости сейсмических событий на Луне

1 — приливные лунотрясения;
2 — тектонические лунотрясения;
3 — падения метеоритов.
Указана величина тангенса угла наклона графиков. По вертикали — число событий, по горизонтали — амплитуда их записи

прямых, наклоненных в сторону больших энергий (амплитуд). Это и понятно: слабых сотрясений происходит больше, чем сильных. Наклон кривых характеризует очень важное свойство сейсмического режима — максимально возможное сотрясение, которое определяется по точке пересечения графика с горизонтальной осью. А пересечение с вертикальной осью дает представление о сейсмичности — количестве слабых сотрясений.

У приливных лунотрясений наклон кривых в 4 раза круче, чем у тектонических землетрясений. Это означает, что Луна устроена так, что в ней может происходить много слабых, но невозможны сильные сотрясения. Почему это так — выясним позже.

Столь крутые графики повторяемости на Земле получаются лишь для мелкоочаговых вулканических землетрясений, а также мелкофокусных землетрясений в районах срединных океанических хребтов.

Кривые, подобные лунным, удалось в нескольких случаях получить и в лабораториях, когда в образцах имелись микротрешины и они были подвержены малым деформациям при растрескивании под действием температурных контрастов и при трении двух поверхностей в условиях низкого давления на контактах. Результаты моделирования следует иметь в виду при обсуждении механизма приливных лунотрясений.

Графики повторяемости — еще один признак различия лунотрясений и ударов метеоритов: у последних он менее крутой.

Гравитационное расписание

Через несколько месяцев после начала работы сейсмических станций на Луне выяснилось, что сотрясения не просто слабы и редки, но в их календаре имеется определенный порядок. Сперва была подмечена месячная периодичность: толчки происходили близ времени перигея, когда Луна, обращаясь вокруг Земли, оказывалась всего ближе к ней. Напрашивалось естественное объяснение: возрастает сила земного притяжения, соответственно растет напряжение в недрах, блоки пород не выдерживают и трескаются.

Однако в дальнейшем, по мере увеличения срока наблюдений и подключения новых станций, картина усложнилась и даже запуталась. Наметились дополнительные двухнедельные пики сейсмической активности, а затем обнаружилась и более длинная периодичность, составляющая 206 суток. На сейсмической станции «Аполлон-12», которая действовала дольше других, максимальное число лунотрясений было отмечено в первой половине 1970 г., затем наблюдался плавный спад активности. В 1972 г. (рис. 23) Луна была наиболее пассивной. Новый подъем, соответствующий шестилетнему периоду активности, наступил в 1976 г.

Наблюдаемая периодичность лунотрясений может быть расшифрована исходя из закономерностей вращения и движения Луны в поле притяжения Земли и Солнца.

Луна вращается вокруг Земли по эллипсу со средним расстоянием 384 тыс. км. Орбита не намного отличается от круговой — эксцентриситет эллипса всего 0,05, при этом в периоды перигея и апогея Луна приближается и удаляется от Земли примерно на 15 тыс. км. Период обращения вокруг Земли 27,32 земных суток. За это же время совершается полный оборот Луны вокруг собственной оси с запада на восток. Лунный экватор имеет небольшой наклон к эклиптике — $1^{\circ}32'$ (ось Луны, как и земная, «смотрит» на Полярную звезду) и к орбите — $6,5^{\circ}$.

Форма Луны не строго сферическая. На видимой стороне в районе экватора из-за притяжения Земли существует выступ. В системе Земля — Луна, как уже упоминалось, действуют приливные гравитационные силы. Они вызывают периодические подъем и спад уровня воды в океанах Земли (приливы и отливы). Эти силы действуют и на

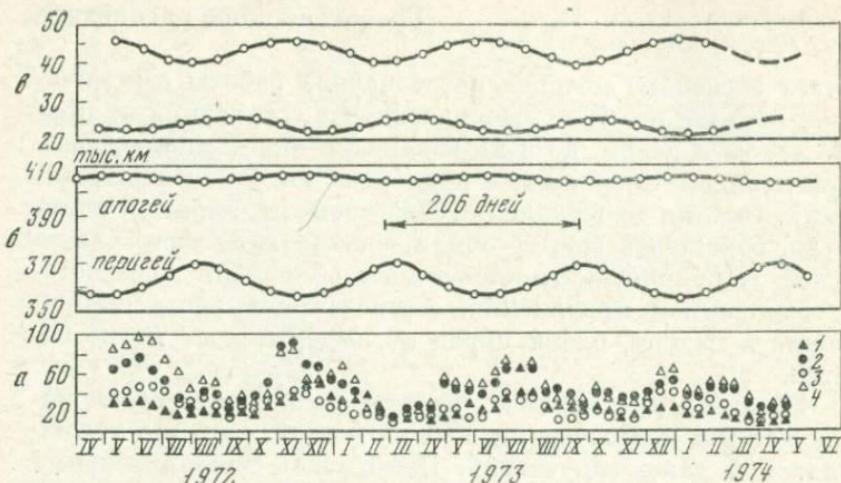


Рис. 23. История сейсмичности, орбитальных изменений и вариаций приливного потенциала Луны в 1972—1974 гг.

Горизонтальная ось — месяцы года. 1 — данные для станции «Аполлон-12», 2 — «Аполлон-14», 3 — «Аполлон-15», 4 — «Аполлон-16». Вертикальная шкала: а — число лунотрипперов в месяц, б — расстояние Земля — Луна, в — приливной потенциал в условных единицах, рассчитанный для глубины 870 км для точек в середине видимого диска. Отмечается корреляция периодичности лунотрипперов, максимума эксцентриситета лунной орбиты и приливного потенциала с периодом 206 сут

твёрдую Землю. Именно приливное взаимодействие приводит к торможению Земли.

Замедление вращения Земли компенсируется удалением Луны от Земли. Через 50 млрд. лет расстояние между ними вырастет в полтора раза и синхронизация вращений станет иной: с Луны будет видно только одно полушарие Земли.

Вследствие много большей массы Земли ее обратное приливное воздействие на Луну проявляется заметнее. Поскольку Луна не абсолютно жесткая, приливные силы рассеиваются, нагнетая в ее теле напряжение. Теоретически показано (В. Н. Жарков и др.), что напряжения должны сосредоточиваться на контакте твердой и жидкой оболочек.

Кроме Земли, на Луну действует гравитационное поле Солнца. Оно вызывает периодические изменения лунной орбиты, проявляющиеся в вариациях эксцентриситета и расстояния Земля — Луна.

Можно выделить четыре основных периода движения Луны. Период широтной либрации — 27,2 сут (1 нодикальный месяц); при этом центр видимого диска Луны колеблется почти по синусоиде от 7° с. ш. до 7° ю. ш. Долготная либрация имеет период 27,5 сут (1 аномалистический месяц). Максимальный угол поворота Луны несколько меняется от месяца к месяцу от 5 до 8° в течение 206 сут (7,5 аномалистического месяца). С таким же периодом «ползет» и сама длительность аномалистического лунного месяца (25—28,5 сут). Это связано с пертурбациями лунной и земной орбит под действием гравитационных сил Солнца.

Раз в 27,55 сут Луна при орбитальном движении вокруг Земли оказывается предельно близкой к Земле (в перигее) — на расстоянии 356 тыс. км. И раз в месяц максимально удаляется (в апогее) на 407 тыс. км. Но само положение апогея и перигея и, следовательно, эксцентриситет лунной орбиты также колеблются с периодом 7,5 аномалистического месяца (перигей варьирует от 356 до 370 тыс. км, апогей — от 404 до 407 тыс. км).

И, наконец, вследствие небольших различий периодов широтной и долготной вибраций соотношение их взаимных фаз медленно «ползет» и повторяется через 6 лет.

Эта фундаментальная периодичность движений Луны находит свое отражение в вариациях лунной сейсмичности (число приливных лунотрясений). Если рассматривать все очаги вместе, то во временных спектрах приливных лунотрясений на каждой сейсмической станции выделяются четкие пики. Самый большой из них приходится на период 13,6 сут — половина нодикального месяца. В 2—5 раз слабее пики с периодами 27,2 и около 206 сут. И совсем слабенькие всплески отмечаются в спектрах на периодах 13,7—15 и 27,5—30 сут, соответствующих половине и полному аномалистическому месяцу. Это связано с тем, что длительность месяца меняется в течение 206 дней.

В одном и том же очаге лунотрясения происходят раз в месяц в течение нескольких дней и включают 1—4 толчка с фиксированным временным интервалом между ними. И хотя основная лунная сейсмическая периодичность — месячно-полумесячная, наибольшее число толчков и наиболее энергичные из них происходят не в момент апогея и перигея, а сдвинуты в моменты так называемой характеристической фазы.

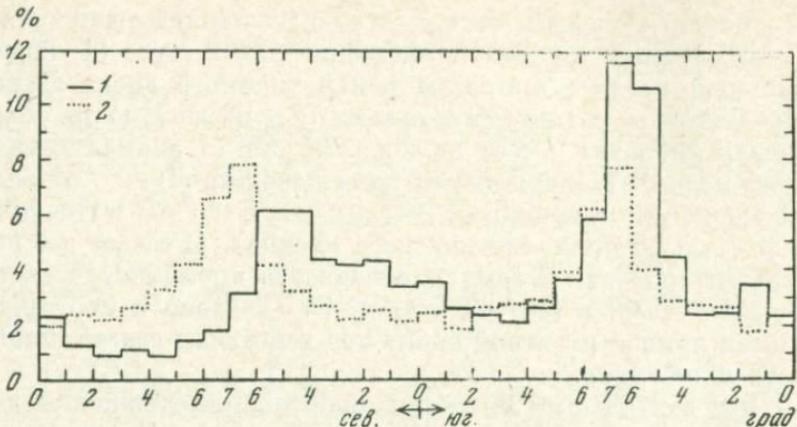


Рис. 24. Связь приливных лунотрясений с широтной либрацией

Вертикальная ось — число событий (в %): 1 — лунотрясения, 2 — широта ближайшей к Земле точки лунной поверхности. Гистограмма лунотрясений построена по 1279 событиям, зарегистрированным на станции «Аполлон-14» со 2 апреля 1972 г. по 22 мая 1974 г. Два пика числа лунотрясений тесно связаны с максимумами широтной либрации при углах 5—7°, которые наблюдаются каждый нодикальный месяц

Все это хорошо иллюстрируется гистограммами на рис. 24, где указана частота сотрясения в зависимости от положения центра видимого диска Луны. Максимальное число приливных лунотрясений происходит при наибольшем отклонении Луны к северу, а также в момент западного максимума долготной либрации. При этом максимум, связанный с долготной либрацией, размыт, поскольку ее период слегка «ползет».

Сейсмическая активность меняется и в зависимости от расстояния Земля—Луна.

Луна тряслась больше всего во время минимума перигея и максимума апогея (следовательно, максимума эксцентриситета лунной орбиты) при наибольшей широтной и долготной либрации. Это вызвано максимумами приливного потенциала и деформацией на глубинах очагов лунотрясений.

Все сказанное свидетельствует о гравитационной природе приливных лунотрясений. Их описание может прогнозироваться, исходя из расчетов по законам небесной механики.

Делались экзотические попытки найти взаимосвязь между пиками сотрясаемости Луны и временем восхода

пульсара СР 133. Предполагалось, что гравитационные волны, излучаемые при его вращении через каждые 1,19 с, должны приводить к ничтожным перемещениям вещества планеты на 10^{-10} см. Казалось, что этот эффект может быть замечен сейсмографами. Однако специальный сейсмический эксперимент в глубоком тоннеле на Земле не обнаружил гравитационных волн от пульсара.

Что касается влияния гравитационных полей Земли и Солнца на приливные лунотрясения, то оно ни у одного из исследователей сейсмичности Луны сомнений не вызывает.

Пояса сейсмичности

Картина распределения очагов на Луне прояснилась постепенно. Пока действовали две сейсмические станции в западном полушарии — «Аполлон-12 и -14», можно было судить лишь о плоскости эпицентров, но не удавалось их привязать к определенному месту. На сейсмограммах многих сотрясений время пробега на обе станции было очень близким, это значило, что очаги расположены где-то между станциями. Такая фокальная зона рисовалась как субмеридиональная, протянувшаяся с севера на юг по 20° з. д.

Поразительными были эпицентральные расстояния: около 800 км для любой станции. А ведь станции располагались всего на расстоянии 180 км. Когда после накопления сейсмограмм стало ясно, что ошибки в отсчете времени пробега волн нет, пришло естественное объяснение: очаги расположены глубоко.

После установки станций «Аполлон-15» и «Аполлон-16» эта гипотеза подтвердилась. Большой треугольник станций позволял определять координаты эпицентров с точностью до 10—30 км и глубины с точностью до 50 км. В дальнейшем, по мере уточнения скоростной структуры лунной мантии и при использовании процедуры последовательных приближений на ЭВМ, для части очагов удалось повысить точность определения координат до 1 км и глубин до 20 км.

О большой глубине очагов свидетельствовал и характер записей приливных лунотрясений — на них меньше действовал эффект рассеяния в верхнем неоднородном слое. Поэтому первые вступления были четкими, хорошо

различались фазы поперечных волн, а межволновой фон между ними практически отсутствовал. Записи из одного очага на одной станции обнаруживали поразительную похожесть, форма колебаний во все годы наблюдений повторялась из месяца в месяц, и сам очаг, как видно, не перемещался, а первое движение маятника сейсмометра происходило всегда в одну сторону. Это можно понять, если размеры очага невелики, соизмеримы с длиной волны (10–20 км).

Среди приливных лунотрясений по форме записи выделен 61 тип очаговых зон. Запись 633 лунотрясений оказалась достаточно отчетливой на трех станциях, чтобы определить координаты эпицентров. Д. Ламлэйн (США) и другие ученые выделяют 43 эпицентральных зоны, для 36 из них определены глубины очагов (табл. 9, рис. 25).

Определение глубин очагов по лунным сейсмограммам затруднено из-за сильного рассеяния волн вблизи поверхности. Оно мешает выделять вступление в последующей части записи. Дистанция от очага до сейсмометра определяется по разности времен вступления продольных и поперечных волн. На Луне эта разность всегда больше 100 с, это значит, что расстояние равно 1 тыс. км, т. е. очаги глубокофокусные.

Расчет глубин очагов проведен для модели, в которой в верхах мантии (глубина 60 км) скорость распространения продольных волн 8,1 км/с, поперечных 4,7 км/с; в низах мантии (на глубине 800 км) скорость продольных 8,0 км/с, поперечных 4,3 км/с. Таким образом, в нижней мантии скорость поперечных волн уменьшается на 9% по сравнению с верхней. Для независимой проверки пригодности этой модели к расчетам глубин очагов использовалось 20 лунотрясений, для которых выделено более четырех фаз волн. Отклонение расчетных времен пробега от наблюдений не превысило 3 с, т. е. было не более погрешности отсчета времени вступления продольной волны.

Уже на ранней стадии изучения приливных лунотрясений сейсмологи с удивлением отмечали, что эпицентры расположены не как попало, а, подобно землетрясениям, группируются в узкие пояса. Долгое время удавалось выделить лишь два таких пояса. Теперь Ламлэйн выделяет уже по крайней мере четыре, причем внутренняя структура поясов достаточно сложна.

Западный пояс сейсмичности (он был выделен первым)

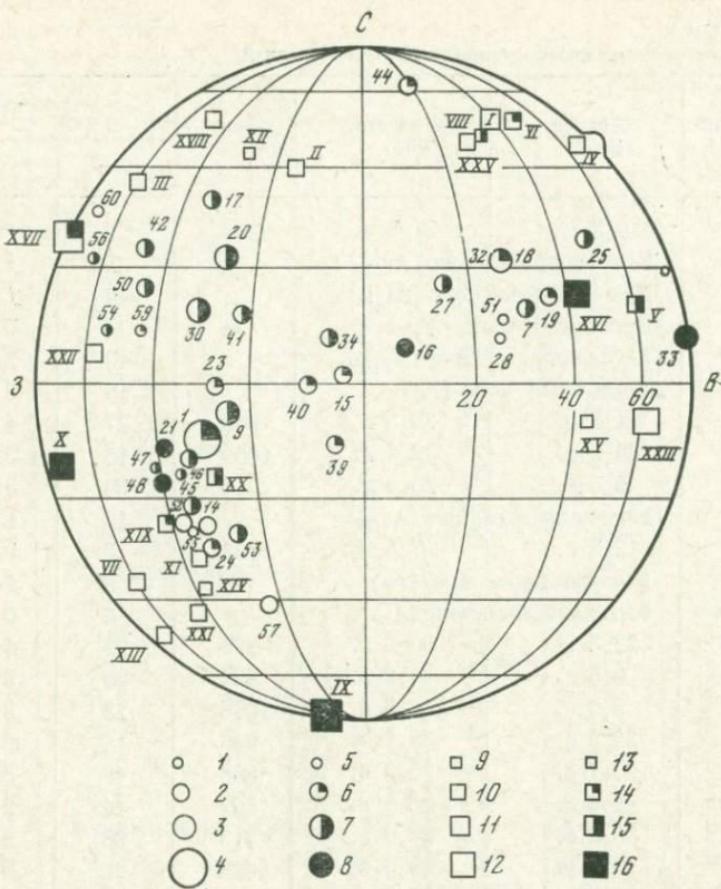


Рис. 25. Схема сейсмичности Луны

Приливные лунотрясения: 1 — эпицентры с числом толчков менее 1%, 2 — 1—5%, 3 — 5—10%, 4 — более 10%, 5 — глубина очага не известна, 6 — глубина 800—900 км, 7 — 900—1000 км, 8 — более 1000 км. Тектонические лунотрясения: 9 — магнитуда менее 1, 10 — 1—2, 11 — 2—3, 12 — более 3, 13 — глубина очага не известна, 14 — менее 100 км, 15 — 100—200 км, 16 — 200—300 км. Номера очагов даны по таблице 9

имеет субмеридиональное простирание (по меридиану 20° — 40° з. д.), начинается у 30° с. ш. (очаг A₁₇) и протягивается на 2 тыс. км за 40° ю. ш. (A₅₇), расширяясь от 100 км на севере до 200—300 км на юге. Пояс включает более половины всех очагов и более 60% лунотрясений и проходит по западному обрамлению Моря Дождей, Моря

Таблица 9
Характеристика очагов приливных лунотрясений

№ очага	Широта, град.	Долгота, град.	Глубина, км	События	
				число	%
A ₁	10,8 ю.	31,3 з.	900	89	14
A ₂	Юго-западный пояс (A _{9,23}) *			8	1,3
A ₃	Юго-западный пояс (A _{1,14})			6	1,0
A ₄	Восточный пояс (A ₇)			4	0,8
A ₅	Юго-западный пояс (A _{1,14})			13	2,0
A ₆	Восточный пояс (A ₇)			19	3,0
A ₇	11,8 с.	29,8 в.	909	27	4,5
A ₈	26,3 с.	32,4 з.	1000**	18	3,0
A ₉	5,3 с.	25,0 з.	913	36	6,0
A ₁₀	Юго-западный пояс (A _{9,23})			10	1,5
A ₁₁	13,2 с.	7,4 в.	1134	3	0,5
A ₁₂	Юго-западный пояс (A ₈)			9	1,5
A ₁₃	Юго-западный пояс (A ₈)			3	0,5
A ₁₄	22,5 ю.	35,3 з.	996	29	4,5
A ₁₅	0,5 с.	4,2 з.	824	20	3,0
A ₁₆	5,9 с.	6,8 в.	1068	23	3,5
A ₁₇	33,5 с.	33,1 з.	996	14	2,0
A ₁₈	20,7 с.	25,9 в.	888	48	8,0
A ₁₉	14,4 с.	35,8 в.	899	14	2,0
A ₂₀	20,8 с.	27,0 з.	915	38	6,0
A ₂₁	13,4 ю.	39,0 з.	1013	22	3,5
A ₂₂	23,7 с.	25,8 в.	900**	7	1,0
A ₂₃	1,6 ю.	26,9 з.	856	18	3,0
A ₂₄	30,0 ю.	33,5 з.	989	12	2,0
A ₂₅	25,3 с.	49,2 в.	941	7	1,0
A ₂₆	Восточный пояс (A ₁₈)			5	1,0
A ₂₇	16,6 с.	14,3 в.	954	10	1,5
A ₂₈	7,0 с.	24,2 в.	930	3	0,5
A ₂₉	19,1 с.	83,1 в.	900**	5	0,7
A ₃₀	11,8 с.	30,0 з.	910	34	5,0
A ₃₁	Восточный пояс (A ₁₈)			4	0,6
A ₃₂	20,7 с.	25,9 в.	888	5	1,0
A ₃₃	7,1 с.	105,0 в.	1081	39	6,0
A ₃₄	7,5 с.	6,7 з.	901	16	2,5
A ₃₅	Западный пояс (A ₁₇)			2	0,3
A ₃₆	Восточный пояс (A _{18,19})			3	0,5

Таблица 9 (окончание)

№ очага	Широта, град.	Долгота, град.	Глубина, км	События	
				число	%
A ₃₇	Восточный пояс (A ₁₈)			3	0,5
A ₃₈	Западный пояс (A ₁₇)			2	0,3
A ₃₉	11,0 ю.	5,8 з.	879	23	3,5
A ₄₀	0,9 ю.	10,2 з.	831	29	4,5
A ₄₁	11,2 с.	21,7 з.	963	15	2,5
A ₄₃	Западный пояс (A ₅₉)			5	0,8
A ₄₄	61,7 с.	16,8 в.	865	18	3,0
A ₄₅	16,0 ю.	36,2 з.	964	3	0,5
A ₄₆	13,6 ю.	32,5 з.	918	9	1,5
A ₄₇	15,0 ю.	40,4 з.	961	5	0,8
A ₄₈	17,7 ю.	39,6 з.	1020	12	2,0
A ₄₉	Восточный пояс (A ₁₈)			3	0,5
A ₅₀	16,5 с.	42,6 з.	961	11	2,0
A ₅₁	9,3 с.	25,7 в.	1084	4	0,6
A ₅₂	25,1 ю.	37,3 з.	900**	11	2,0
A ₅₃	28,2 ю.	27,3 з.	912	8	1,5
A ₅₄	8,7 с.	51,5 з.	997	4	0,6
A ₅₅	27,3 ю.	34,9 з.	900**	3	0,5
A ₅₇	42,6 ю.	25,5 з.	950**	7	1,0
A ₅₈	Южный пояс (A ₅₇)			4	0,6
A ₅₉	8,7 с.	43,3 з.	814	5	0,8
A ₆₀	29,5 с.	70,5 з.	900**	5	0,8

* Данных недостаточно для локализации эпицентров, в скобках указаны номера близлежащих локализованных эпицентров.

** Данных недостаточно для определения глубины очага. Указанная глубина условно принята при определении координат эпицентра.

Познанного и Моря Облаков (и даже слегка отклоняется к востоку по контуру Моря Облаков).

По своей структуре западный пояс неоднороден. В нем можно выделить четыре блока, отличающиеся периодичностью и связью момента толчков с максимумом и минимумом либраций и эксцентриситетом орбиты (рис. 26).

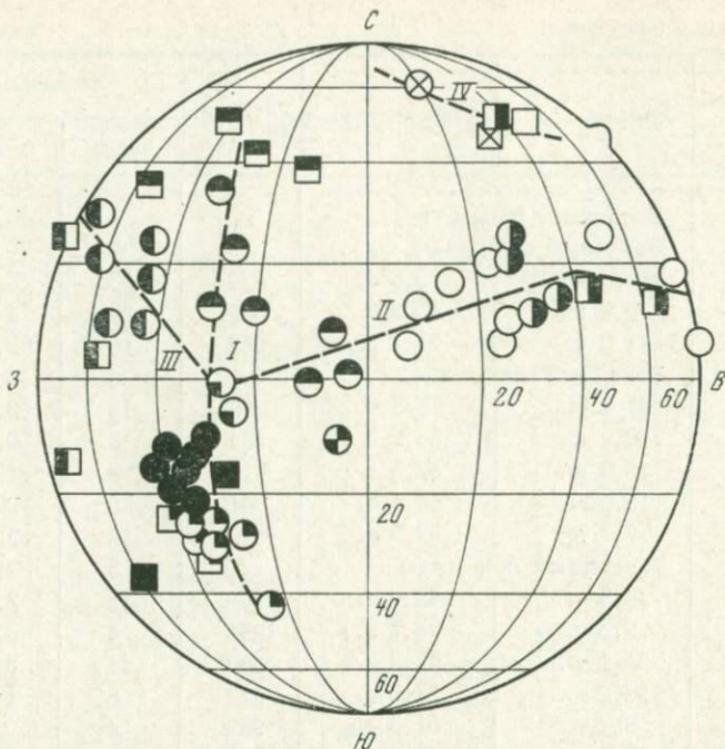


Рис. 26. Схема, иллюстрирующая сложную структуру поясов сейсмичности и пространственно-временную связь приливных (кружки) и тектонических (квадраты) лунотрясений

Эпицентры с одинаковыми знаками характеризуются сходным соотношением календаря лунотрясений, либрации и расстояния Земля — Луна. Римские цифры — основные пояса лунной сейсмичности.

Северный блок включает четыре выстроенных по меридиану эпицентра $A_{17}, 20, 30, 41$, в которых сотрясения происходят в основном близ перигея и в момент юго-восточной либрации, когда расстояние Земля — Луна меньше среднего. Судя по режиму сотрясений, близ северного находятся еще два эпицентра ($A_{35}, 38$), толчки в которых слабы, из-за чего их точное положение установить не удалось.

В районе экватора в западном поясе выделяется участок с очагами $A_9, 23$ (а также расположенными где-то поблизости очагами $A_2, 10$). Очаг A_9 относится к числу довольно активных, в течение 1971—1972 гг. здесь каждый месяц

регистрировалось 1—2 толчка. Через 3 года после самого сильного толчка вновь произошло сотрясение, возможно, означающее начало нового цикла активности. В экваториальном блоке толчки происходят в моменты южной широтной и восточной долготной либрации. Блок занимает, как будет видно впоследствии, узловое место в схеме лунной сейсмичности.

Следующий к югу блок между 10° — 25° ю. ш. включает 9 очагов (из них 7 локализованных), в которых произошло почти 30% лунотрясений. Причем половина из них — в очаге A_1 ($10^{\circ}, 8^{\circ}$ ю. ш., $31,3^{\circ}$ з. д.). Этот очаг не имеет подобных. К счастью, именно здесь расположены две, причем первые, сейсмические станции «Аполлон-12 и -14», так что его «родословная» протягивается на 5,5 года. В календаре жизни очага A_1 выделяется период 206 дней и 6 лет, наибольшие сотрясения происходят во время северной и западной либрации и в перигее.

Еще в первые годы регистрации лунотрясений, прогнозируя сейсмичность этого очага, сейсмологи предложили рост активности в 1975—1976 гг. Основанный на правильном понимании механизма приливных лунотрясений прогноз блестяще подтвердился.

В этом самом активном блоке Луны выделены три субпараллельных зоны северо-восточного — юго-западного простирания, возможно, соответствующих плоскостям разрывов — A_{21-47} , A_1 , 46 , 45 , 48 и A_{14} .

На юге западный пояс обрамляет довольно плотно расположенные 8 эпицентров (A_8 , 12 , 13 , 24 , 52 , 53 , 57 , 58). Их действие приурочено к апогею в момент северного максимума широтной либрации.

Восточный пояс сейсмичности (выделялся и ранее) шириной более 300 км тянется от экватора в точке 10° з. д. (A_{40}) на восток-северо-восток на 1800 км. Пояс субпараллелен крупным морским бассейнам от Моря Дождей на западе до Моря Смита и Моря Краевого на востоке. На его продолжении находится единственный эпицентр A_{33} , обнаруженный на обратной стороне*. Он относится к числу довольно активных (6% всех лунотрясений). Пояс включает 13 локализованных очагов и 9, положение которых определено приблизительно. По существу он состоит

* По-видимому, на обратной стороне существуют и другие очаги, но волны от них экранируются размягченной центральной зоной.

из двух субпараллельных ветвей (A_{11} , 27, 32, 22, 18, 25, 29) на севере и (A_{16} , 28, 51, 7, 19, 23) на юге, разделенных асейсмичной зоной.

По режиму сотрясений пояс также неоднороден. Эпицентры, расположенные в долготном интервале $5-25^{\circ}$ в. д. и $50-105^{\circ}$ в. д., имеют сходные характеристики. Толчки в них приходятся на апогей при максимальной северной широтной и восточной долготной либрации. Это объясняется подобием характера приливов на указанных долготах. Иначе выглядят приливное воздействие и сейсмичность узкого блока $25-35^{\circ}$ в. д. Здесь точно установлены и намечены еще 7 очагов, в которых сотрясения происходят в момент максимума западной либрации.

Регион сочленения восточного и западного поясов на экваторе западнее центра видимого диска Луны включает эпицентры $A_{34}, 40, 15, 39$, временные характеристики которых напоминают и северный и центральный блоки западного пояса.

Новый пояс сейсмичности открыт в последнее время в северо-западной части Океана Бурь. Он включает 7 эпицентров от A_{59} до A_{60} . В нем происходит около 10% всех лунотрясений, как правило, в момент максимальной южной широтной и западной долготной либрации.

Самый высокоширотный эпицентр A_{44} ($61,7^{\circ}$ с. ш., $18,8^{\circ}$ в. д.) представляет хорошо выраженный очаг, в котором зафиксировано уже 18 толчков. Имеются основания включать его в особый, четвертый пояс лунной сейсмичности, параллельный Морю Холода.

1 тыс. сейсмограмм пришлось проанализировать сейсмологам США, чтобы в итоге определить глубины 36 очагов. Для увеличения отношения сигнал/шум записи суммировались по 10 штук, благо приливные точки из одного очага имеют видно повторяющуюся форму. В итоге перезаписи сигнал стал сильнее в 3 раза.

Все очаги приливных лунотрясений глубокофокусные. Они находятся в довольно узком интервале 800—1150 км. Средняя глубина 943 км. Две трети очагов находятся в еще более узком «сейсмическом пласте» 850—1000 км.

На рис. 27 показаны вертикальные профили вдоль главных сейсмических поясов. Очаги западного пояса погружаются в северной и южной частях. Самые мелкие очаги находятся в районе экватора на стыке трех поясов (A_{23}). Уменьшение глубин очагов отмечается в этом ре-

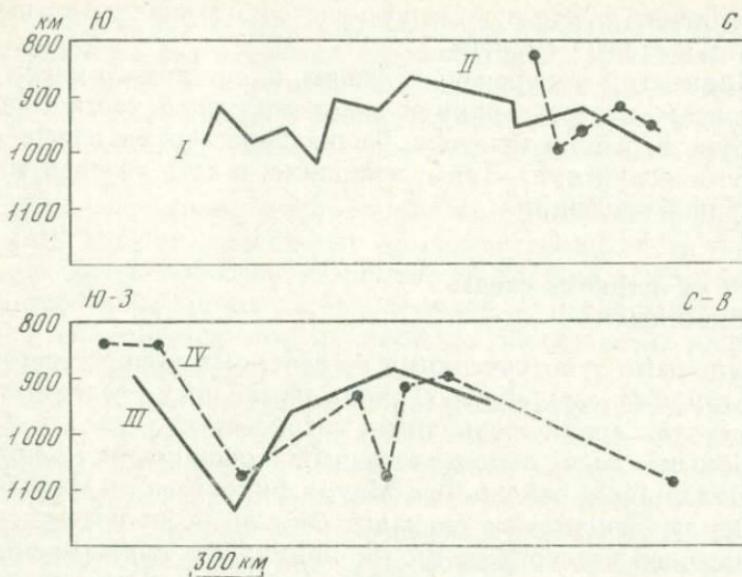


Рис. 27. Глубины очагов приливных лунотрясений

I — западный пояс, II — северо-западный пояс, III — восточный пояс (северная ветвь); IV — восточный пояс (южная ветвь)

гионе и на краях восточного (A_{34} , A_{40}) и северо-западного (A_{59}) поясов. Полагая, что глубины поясов соответствуют первовому рельефу зоны сочленения литосферы и астеносферы Луны, можно заключить, что в узловом экваториальном регионе (30° з. д.) их глубины наименьшие, во все стороны от этого очагового купола очаги погружаются. Особенно резкое погружение происходит на северо-восток. Восточный пояс имеет и самый контрастный рельеф — глубины его очагов различаются на 300 км. Эта контрастность проявляется и на северной и на южной ветвях восточного пояса. Наблюдается также некоторая связь глубин очагов с блоками, из которых состоят пояса: на контактах блоков очаги имеют наибольшие и наименьшие глубины.

Неоднородная структура зоны сочленения литосферы и астеносферы Луны, проявляющаяся в контрастности глубин гипоцентров, играет решающую роль в механизме приливных лунотрясений.

Отметим, что все глубокофокусные приливные лунотрясения оказываются в трех квадрантах видимой стороны, характеризующих молодые морские бассейны. Они

совершенно отсутствуют в юго-восточном квадранте, районе гор и старых «морей».

Эпицентры приурочены к узким, планетарного масштаба поясам, пересекающимся в юго-восточной части Океана Бурь в районе экватора. Точка пересечения поясов — «сейсмический пуп» Луны, возможно, и есть узловая точка лунной эволюции.

Долго ли остаются следы в лунной пыли?

Приливными лунотрясениями не исчерпывается естественная сейсмичность Луны. Кроме приливных — «земных», существуют еще и «солнечные» сотрясения.

Больше года высокочастотный сейсмометр станции «Аполлон-14» в районе Фра-Мауро фиксировал и посыпал на Землю непонятные сигналы. Они не были похожи ни на падения метеоритов, ни на приливные лунотрясения. На этот раз что-то щелкало недалеко и несильно, но с за-видной регулярностью.

Толчки «пробуждались» через 48 ч после восхода Солнца, точнее, после пересечения станции линией терминатора, и продолжались весь лунный день, длящийся две земные недели. Ночью они становились реже и постепенно прекращались. Было обнаружено более 40 типов записей. Каждая отмечалась не реже 1 раза в месяц строго в моменты, когда Луна находилась в одной и той же фазе, и записи совершенно не меняли свой вид от толчка к толчку. По-видимому, очаги располагались где-то недалеко от станции. Но природа их была неясна.

Вскоре обнаружилось, что толчки из некоторых очагов хотя и сохраняют форму, но каждый следующий начинается чуть позже, как будто их источник смешается по отношению к сейсмической станции метров на 10—20 за время одного оборота Луны. И тогда пришла отгадка: непривычные сигналы — это тепловые лунотрясения.

Поскольку Луна не защищена атмосферой, палящее Солнце нагревает днем ее поверхность до +130°C, а ночью она остывает до -170°C. Правда, как показали специальные измерения теплового потока в скважинах, эти вариации температур не проникают глубже 1 м. Но в этом приповерхностном слое из-за сжатия и расширения пород возникают термоупругие напряжения. Породы трескают-

ся или же грунт соскальзывает по склонам кратеров — следующий раз источник оказывается на несколько ином расстоянии. Такое объяснение подтверждается и тем фактом, что на станции в районе лунных Апеннина, где рельеф контрастнее, таких сотрясений оказалось на порядок больше.

Эти сотрясения очень слабы по сравнению с приливными. Но они происходят по всей поверхности Луны, а она почти такая же, как плоскость Африки. В итоге набирается очень много слабых толчков, и их общая энергия уже оказывается соизмеримой с сейсмической энергией приливных лунотрясений.

На VII лунной конференции в Хьюстоне Ф. Дюнебье и Г. Саттон (США) представили новые данные о регистрации тепловых лунотрясений в районе Тавр-Литтров. Сейсморазведочные приборы, те самые, с которыми проводил сейсморазведку экипаж «Аполлона-17», в течение 1973—1974 гг. 10 раз включались по команде с Земли и регистрировали в течение четырехдневных сеансов тепловые сотрясения. Так как сейсмометров было четыре, удалось установить очаги 140 эпицентров и даже построить карту минисейсмичности в радиусе около 300 м от станции. Получен новый вывод — очаги находятся не только в малых кратерах, но и на относительно ровных участках поверхности.

Обнаруженный феномен позволяет иначе оценить метаморфозу лунной поверхности. Основные формы ее рельефа были созданы ударами метеоритов. Бесчисленные кратеры всевозможных масштабов — память о былых эпохах жизни Луны, когда ее «поливал» метеоритный ливень. Теперь поток метеоритов иссяк. И казалось, практически нет сил, способных менять облик поверхности. Действительно, таких энергичных агентов эрозии, как воздушные вихри и водные потоки Земли, на Луне нет.

И все же есть агент эрозии лунной поверхности: «солнечные» лунотрясения неуклонно выравнивают ее. Правда, как показали расчеты, процесс этот чрезвычайно медленный. Склон 200-метрового кратера, имеющий крутизну 20° , становится менее покатым всего на 1° за 4 млн. лет.

Так что колеи луноходов и следы астронавтов останутся на Луне надолго. И если бы кто-то когда-то не слишком давно побывал на Луне, люди Земли нашли бы эти следы на ее поверхности.

И если кто-то когда-нибудь при подлете к Земле сперва заглянет на Луну, колеи луноходов и следы астронавтов расскажут о лунной одиссее землян, о том, что недалеко обитают разумные и пытливые существа, с которыми стоит установить отношения.

Тектонические лунотрясения

Пассивный сейсмический эксперимент на Луне был ориентирован на регистрацию тектонических лунотрясений. С этой целью сейсмические станции устанавливались в районах стыка крупномасштабных поверхностных структур. Вначале тектонисты разочаровались: казалось, что лунотрясений не бывает совсем.

Правда, весной 1971 г. дважды были зафиксированы сейсмические события необычной силы. Их записи резко отличались от уже привычных записей приливных лунотрясений как большой амплитудой, так и высокочастотным составом колебаний. Они скорее походили на удары метеоритов. Но тогда как объяснить высокочастотный спектр и другие особенности записи, ведь обычно волны от падений метеоритов сильно рассеиваются в поверхностном слое и четкие фазы поперечных волн на них отсутствуют?

Приходилось вводить довольно искусственное предположение, что метеориты попадали на некие экзотические, очень твердые участки поверхности, где нет рыхлого слоя реголита. Или что эти метеориты врезались на необычную глубину под рассеивающий слой.

По мере накопления данных уточнялись свойства этих так называемых высокочастотных телесейсмических событий и увеличивались основания отнести их к разряду лунотрясений и притом тектонической природы. За 5 лет зафиксировано 25 таких необычных явлений. По сравнению с тысячами приливных лунотрясений их число невелико. Однако обратить на них внимание следует не только потому, что это явления иной природы, но и потому, что они, даже при малом числе, вносят весомый вклад в сейсмичность Луны, поднимая общую годовую энергию лунотрясений до 10^{15} — 10^{18} эрг.

Характеристики этих высокочастотных телесейсмических событий приведены в табл. 10.

Таблица 10
Очаги тектонических лунотрясений

№	Год	День года	Время, ч, мин, с	Эпицентр *		глубина, км	магниту- да (по земной шкale)
				широта, град.	долгота, град.		
I	1971	107	07 00 50	47 с.	33 в.	25	2,8
				49,8 с.	34,9 в.		
II	1971	140	17 26 10	39 с.	24 з.	25	2,0
				39,2 с.	16,0 з.		
III	1971	192	13 24 40	43 с.	47 з.	25	1,9
				42 ю.	60 з.		
				35,1 с.	56,7 з.		
				32,5 ю.	65,6 з.		
IV	1972	002	22 29 30	55 с.	97 в.	25	1,9
				45 с.	120 в.		
V	1972	261	14 35 50	13 с.	43 в.	154	1,0
				13,3 с.	60,5 в.		
VI	1972	341	23 08 30	43 с.	42 в.	1	1,4
				50,4 с.	44,7 в.		
VII	1972	344	03 50 10	29 ю.	74 в.	25	1,2
				37 ю.	58 в.		
VIII	1973	039	22 52 10	43 с.	28 в.	121	0,8
				48,6 с.	33,4 в.		
IX	1973	072	06 56 20	82 ю.	113 з.	217	3,2
				81,1 ю.	142,0 з.		
X	1973	171	20 22 00	0°	68 з.	278	2,2
				15,5 с.	72,3 з.		
XI	1973	274	03 58 00	35 ю.	27 з.	25	1,1
				31,2	34,3 з.		
XII	1974	054	21 16 50	34 с.	15 з.	25	0,7
				43 с.	30,7 з.		
XIII	1974	086	09 10 50	49 ю.	103 з.	—	1,6
XIV	1974	109	13 35 20	37 ю.	38 в.	—	0,9
XV	1974	149	20 42 10	30° к вост. от Апеннин		—	0,6
XVI	1974	192	10 46 20	21 с.	86 в.	247	2,7
				15,9 с.	42 в.		
XVII	1975	003	01 41 50	30 с.	96 з.	46	3,2
				25 с.	97,3 з.		
XVIII	1975	012	03 14 10	64 с.	51 з.	292	1,7
				50,1 с.	45,9 з.		

Таблица 10 (окончание)

№	Год	День года	Время, ч, мин, с	Эпицентр *		глубина, км	магнитуда (по земной шкале)
				широта, град.	долгота, град.		
XIX	1975	013	00 26 40	1 ю.	48 з.	25	1,1
				25 ю.	40 з.		
XX	1975	044	22 03 50	18 ю.	23 з.	160	1,4
				16 ю.	27 з.		
XXI	1975	127	06 38 40	44 ю.	47 з.	—	1,3
XXII	1975	147	23 29 00	5 с.	55 з.	—	1,4
XXIII	1975	314	07 53 00	7 ю.	60 в.	—	1,8
XXIV	1976	004	11 18 50	47 с.	30 в.	—	1,8
XXV	1976	012	08 18 10	34 с.	41 в.	—	1,1

* Для каждого очага первая строка — данные Накамуры, вторая — Ламбайна.

Наиболее яркая отличительная особенность записей этих событий, перешедшая в их название, — высокочастотный состав колебаний. Их спектр равномерный в диапазоне частот 0—5 Гц и далее до 10 Гц уменьшается лишь на 10 дБ. При этом спектр поперечных волн высокочастотнее продольных, а затухание очень незначительное (у приливных же лунотрясений и ударов метеоритов частоты колебаний ниже 1 Гц). Это может быть связано как с высокочастотным спектром излучения, так и с малым затуханием на пути распространения волн. По затуханию амплитуд волн с расстоянием получены независимые оценки добротности лунной литосферы (7000), хорошо сходящиеся с добротностью по затуханию амплитуд во времени.

Другая важная особенность — вступления продольных и поперечных волн очень четкие, даже в сравнении с приливными лунотрясениями, тем более с ударами метеоритов. Это значит, что рассеяние невелико, т. е. очаг находится ниже рассеивающего слоя.

Календарь тектонических лунотрясений не имеет характерных периодических максимумов и минимумов, свойственных приливным лунотрясениям. Здесь трудно рассмотреть месячный или семимесячный циклы — распреде-

ление по времени скорее случайно. Отсюда следует, что высокочастотные события меньше зависят от приливов.

Правда, если рассмотреть тектонические лунотрясения в зависимости от фазы аномалистического месяца, то при фазовом угле 0,7 рад от перигея обнаруживается статистически значащий максимум (вероятность 0,91), к тому же взаимосвязанный с быстротечными явлениями на поверхности. Однако этот феномен пока трудно объяснить, поскольку максимум активности не соответствует какой-либо определенной сейсмической зоне Луны. Намечается также минимум числа сотрясений в апогее, но он статистически не обоснован (вероятность 0,44).

В пространственном распределении эпицентров тектонических лунотрясений намечаются некоторые закономерности.

Больше всего очагов в северо-восточном (вероятность 0,57) и юго-западном (статистически не обоснован) квадрантах. Почти отсутствуют высокочастотные сотрясения в юго-восточном квадранте, где также не отмечено ни одного приливного лунотрясения.

Энергия 15 (из 25) тектонических лунотрясений выше приливных. Магнитуда тектонических лунотрясений находится в диапазоне 0,6—3,2 (по лунной магнитудной шкале, дающей оценку на 1 единицу меньше принятой для замледрессий шкалы). Энергия максимального толчка, произошедшего в марте 1973 г. вблизи южного полюса на обратной стороне Луны, достигала 10^{18} эрг. Возникшие в нем волны пронзили Луну в южном полушарии. Новые сейсмограммы подтвердили заключение о существовании внутренней зоны с резким ослаблением (пропаданием) поперечных волн. На трассах к сейсмическим станциям «Аполлон-12, -14 и -16», где луч не проник глубже 640—680 км, выделены очень интенсивные вступления поперечных волн. На более далеком пути к станции «Аполлон-15» на глубине 1100 км амплитуда волны уменьшилась в десятки раз.

График зависимости числа толчков от их энергии (кривая повторяемости) имеет у тектонических лунотрясений наклон (тангенс угла 0,5) много меньший, чем у приливных лунотрясений и ударов метеоритов. В то же время он близок к значению для тектонических землетрясений. Экстраполируя правую часть графика до пересечения с горизонтальной осью, можно определить магнитуду максимально

возможного тектонического лунотрясения 3,5—4 (4,5—5 по земной шкале). Его энергия во много раз меньше самого сильного землетрясения, характеризующегося магнитудой 8,5—9.

Судя по характеру записи и относительному времени пробега продольных и поперечных волн, очаги тектонических лунотрясений расположены глубже рассеивающего слоя (25 км), но выше зоны, где начинает заметно уменьшаться скорость поперечных волн (300 км). Ориентировочные глубины некоторых очагов также приведены в табл. 10. На глубинах тектонических гипоцентров температура заведомо ниже точки плавления. Отсутствие взаимосвязи с приливами и большая энергия тектонических лунотрясений заставляют думать, что их источник не приливные деформации, а вековое накопление напряжений. В частности, энергию для них может дать остывание Луны, конвекция или проседание масконов.

Поразительный феномен — отсутствие лунотрясений в интервале глубин 300—800 км между очагами тектонических и приливных лунотрясений — может означать, что векового накопления напряжений в этой зоне не бывает или же снятие напряжений происходит не резкими сейсмическими толчками, а механическим «течением» — ползучестью пород. Причину этого мы покажем дальше, когда сведем все геофизические данные о недрах Луны.

Пространственное сопоставление тектонических лунотрясений с другими сейсмическими событиями, а также быстротечными явлениями на поверхности Луны затруднительно из-за неточного определения их эпицентров (± 5 — 10°).

Вначале казалось, что взаимосвязь приливных и тектонических лунотрясений просто отсутствует. Однако по мере увеличения числа точно установленных эпицентров мелкофокусных сотрясений и в особенности после сопоставления календаря приливных и тектонических лунотрясений с фазами либраций и апогея — перигея появились основания говорить о такой связи.

Обратимся снова к карте эпицентров (см. рис. 25). Очаги мелкофокусных лунотрясений привязаны к тем же четырем поясам, что и приливные лунотрясения. Пять из них находятся непосредственно в зоне поясов: очаги V и XVI — па восточном крыле восточного пояса, XI, XIX и XX — в южной части западного пояса. Кроме того, 14 мел-

кофокусных эпицентров удалены от поясов приливной сейсмичности не более $10-30^\circ$. При этом они концентрируются в направлении концов сейсмических поясов. Очаги II, XII, XVIII находятся на северном продолжении западного пояса, очаги VII, XIV, XXI, XXIII продолжают его на юг, являясь как бы проекцией глубокофокусных очагов на поверхность Луны. К востоку от очаговой зоны А₄₄ приливных лунотрясений, почти вытянувшись в линию, расположено 5 мелкофокусных очагов: XXIV, VIII, I, VI, IV. Очаги III, XVII, XXII обрамляют соответственно с севера, запада и юга новый северо-западный пояс.

В отрыве от поясов сейсмичности оказываются очаги: IX, XV и XXIII. Очаг IX расположен на обратной стороне близ южного полюса, здесь произошло самое сильное тектоническое лунотрясение (магнитуда 4,2 по земной шкале). Этот эпицентр наиболее удален от сети сейсмических станций. Быть может, в районе южного полюса происходят и приливные лунотрясения, но они слишком слабы, чтобы раскачать маятники сейсмометров продольной волной, и слишком удалены — поперечные волны не проходят сквозь астеносферу.

Два тектонических очага «пробрались» в асейсмичный юго-восточный квадрант Луны, правда, не далее 10° на юг от экватора. Из них толчок XV совсем слабый, его записали только ближние сейсмические станции в кратере Декарт и Апеннинах и не заметили станции в Океане Бурь.

Связь глубокофокусных и мелкофокусных толчков проявляется и во временной последовательности лунотрясений. Практически каждый блок приливных эпицентров имеет «свой» мелкофокусный очаг, «срабатывающий» вместе с ним (см. рис. 25 и 26).

Очаг VI, хотя и находится близ А₄₄, по своему временному режиму соответствует блокам $0-25^\circ$ в. д. и $50-105^\circ$ в. д., в частности, действует одновременно с очагом на обратной стороне А₅₃. Толчки в очагах V и XVI, расположенных в восточном поясе, и по времени совпадают с глубокофокусными лунотрясениями А₁₈. Во время максимальных глубокофокусных толчков центрального блока восточного пояса произошло и лунотрясение в очаге I, удаленном на 30° к северу.

Расположенные в южном блоке западного пояса очаги XI, XIX действовали одновременно с А_{53,57,58}. Очаг XX

в центральном блоке действовал вместе с соответствующими приливными очагами А₂₁, 47, 48 и за 2 мес до двух самых сильных толчков 1975 г. в очаге А₁. Близ времени лунотрясений А₂₁ сработал и несколько удаленный на юго-запад мелкофокусный очаг VII.

Тектонические очаги, обрамляющие с севера Океан Бурь, действовали в согласии с календарем эпицентров северного блока западного сейсмического пояса: II и III — близ минимума и максимума перигея, XII и XVIII — близ апогея.

Наконец, мелкофокусные очаги X, XII и XVII, хотя и удалены от северо-западного пояса сейсмичности на 22—30°, срабатывали в период максимальных приливных сейсмических трясений в этом поясе.

Пространственно-временная связь лунотрясений может быть обусловлена общими процессами, проявляющимися на разных этажах лунного здания. Намечается связь времени тектонических лунотрясений с эффектами увеличения содержания аргона в сверхразреженной атмосфере Луны. Судя по соотношению энергий, истечение аргона скорее не причина, а следствие тектонических лунотрясений.

По многим качествам высокочастотные лунные толчки близки к тектоническим землетрясениям. Отсутствие приливной периодичности, наклон кривой повторяемости, мелкофокусность, относительная энергичность — все это доводы в пользу их отнесения к разряду тектонических планетотрясений.

В то же время масштабы тектонических сейсмических трясений на Земле и на Луне существенно различны. На Земле максимальное планетотрясение достигает магнитуды 8,5—9. Его энергия (10^{26} — 10^{27} эрг) в миллиарды раз больше самого энергичного лунотрясения. Что касается количества землетрясений с магнitudой 3,5—4,5, то в сейсмоактивных зонах их происходит не десятки, а десятки тысяч в год.

Сейсмоактивные зоны Земли представляют узкие протяженные пояса, обрамляющие литосферные плиты, а также пояса, соответствующие срединным океаническим хребтам. Два глобальных пояса сейсмичности — Альпийско-Гималайский и Тихоокеанский — опоясывают всю планету. В этом смысле они напоминают очаговые зоны приливных лунотрясений. Очаги большинства землетрясений находятся в литосфере, из них больше половины — в земной коре,

т. е. не глубже 50 км. На промежуточные глубины (80—300 км) приходится 22% очагов, на большие глубины (350—720 км) — только 6%. Очаги землетрясений в рифтовых зонах неглубоки — 5—10 (не более 40) км. Глубокие очаги (глубже 100 км) расположены вдоль глубоководных желобов, их зона (так называемая зона Бенюффа) погружается от океана под континент. Глубокие очаги отмечены также в районе Памира — Гиндукуша.

Закономерности времененного распределения землетрясений чрезвычайно сложны. Их поиск — суть труднейшей задачи предсказания землетрясений, решение которой еще не близко. Ряд исследователей подмечает взаимосвязь сейсмической активности Земли с фазами Луны, т. е. выявляет «триггерный» эффект приливных сил Луны.

Однако основной источник землетрясений — во внутренних процессах. В некоторых сейсмоактивных регионах отмечаются длинная и короткая периодичности катастрофических землетрясений, а также выявлены сейсмические и другие предвестники землетрясений. О том, какую лепту вносит в эту проблему изучение лунотрясений, мы поговорим в заключительных разделах книги.

Механизм лунотрясений

Теперь, когда собраны все факты, можно попытаться понять природу и механизм лунотрясений.

Наиболее существенная черта лунной сейсмичности состоит в том, что толчки бывают двух типов — приливные (многочисленные, но слабые) и тектонические (редкие, но мощные). Они разнесены по разным этажам лунного здания, заняты очагами разного типа, не перекрываются. На глубинах 300—800 км не зафиксировано ни одного толчка. Эту особенность лунной сейсмичности нужно объяснить.

Другая черта — эпицентры толчков обоих типов локализуются в узких протяженных поясах планетарного масштаба, а вне их практически отсутствуют. Ни одно лунотрясение не произошло, например, в горной юго-восточной четверти видимого диска Луны. Тектонические эпицентры располагаются по периферии поясов сейсмичности, на их концах и сбоку, и отсутствуют в центре видимого диска внутри круга с радиусом 30—35° (до 1000 км).

На Земле фокальный механизм, т. е. то, что происходит вблизи очага землетрясения, изучают, сравнивая направ-

ление первого движения грунта в момент прихода продольных и поперечных волн. Регистрация проводится на многих станциях, удается составить карту первых движений, очертить форму и режим работы очага. На Луне все сложнее: наблюдения ограничены малым числом станций, толчки слабые и волны сильно рассеиваются на пути пробега, что затрудняет выделение отдельных фаз.

И все-таки кое-что удается понять и про лунотрясения. Отмечено, что толчки в каждом очаге приливных лунотрясений в течение многих лет направлены в одну сторону. Это свидетельствует о прогрессивной дислокации, вековом накоплении напряжений. Правда, есть одно яркое исключение из правила — самый богатый толчками очаг А₁, южнее сейсмической станции «Аполлон-12» в 1972—1974 гг. поменял полярность толчков, а с 1975 г. восстановил прежнюю. Но можно думать, как это отметил М. Токсоц, что и в этом очаге приливное движение направлено всегда в одну сторону, но складывается по-разному, с постоянно существующим «фоновым» тектоническим напряжением, и результирующий вектор меняет свой знак.

Форма записи на каждой станции из одного и того же очага также удивительно устойчива. «Лунотрясения-близнецы» — уникальная особенность глубокофокусных толчков. Они настолько похожи, что десятки записей можно складывать и таким образом увеличивать отношение полезного сигнала к шуму. Неизменность формы сигнала означает, что очаг в течение нескольких лет не меняет своего местоположения и что размеры зоны, в которой возникают разрыв и смещение пород, небольшие, не более нескольких длин сейсмических волн, т. е. 10—20 км. Это увязывается с предположением Г. Латема о том, что низы средней мантии Луны сложены первоначально скомпактованным метеоритным материалом, который никогда полностью не переплавлялся и не сцементировался. Возможно, что 10—20 км — преобладающие размеры метеоритов.

Столообразный характер частотных спектров записей лунотрясений (как и у землетрясений) свидетельствует о том, что в очаге происходит сдвиг блоков пород относительно друг друга вдоль одиночного сброса или серии близко расположенных параллельных сбросов.

Сдвиговый характер дислокации подтверждается преобладанием в записях обоих типов лунотрясений (как и в землетрясениях) фаз поперечных волн.

Крутой наклон кривой повторяемости у приливных лунотрясений означает: условия в глубоких недрах такие, что Луна «предпочитает» сотрясаться часто и слабо, а не редко и сильно. Это становится понятным, потому что сильные лунотрясения происходят не в любой апогей и перигей, а лишь в моменты характеристических фаз, которые относительно редки.

Ключевая (уникальная, собственно лунная, сразу отличающая ее от Земли) закономерность — гравитационное «расписание» приливных лунотрясений. Теоретически предсказано, что приливная энергия, которая возникает от притяжения Земли, концентрируется на стыке твердой и жидкой фаз состояния вещества. И ведь именно таковы или примерно таковы условия на границе лунной литосферы и астеносферы. Ситуация усугубляется, или, лучше сказать, облегчается контрастным рельефом этой «границы» (резкие перепады глубин близко расположенных очагов).

На рис. 28 приведены расчетные кривые распределения в недрах Луны приливных напряжений, смещений и деформаций. Как видно, притяжение Земли вызывает смещение лунной поверхности в направлении радиуса более чем на полметра и вбок на треть метра.

На глубинах очагов приливных лунотрясений имеется локальный максимум плотности энергии деформаций — $0,1 \text{ эрг}/\text{см}^3$, или $10^{14} \text{ эрг}/\text{км}^3$. Если считать, что разрыв происходит в километровом блоке (а он скорее всего десятикилометровый, так что энергия на $2-3$ порядка больше) и в сейсмические волны уходит 1% приливной энергии, то энергии хватит для индивидуального приливного толчка (его сейсмическая энергия $< 10^9 \text{ эрг}$). Другое дело, что сами приливные напряжения на глубинах $800-1000 \text{ км}$ не так уж велики — всего $0,5$ бара, т. е. $5 \cdot 10^5 \text{ дин}/\text{см}^2$. Это максимальное значение сжимающих напряжений, а их амплитуда варьирует в соответствии с приливным циклом: раз в месяц максимум, раз в месяц минимум. На рис. 29 видно, как хорошо совпадают эти периодические колебания величины напряжения с периодическими изменениями амплитуды записи приливных лунотрясений из очага А₁₈.

Такое напряжение не сможет расколоть монолит породы, но оно может управлять разрывами вдоль уже существующих трещин или зон ослабления.



Рис. 28. Действие приливных сил в недрах Луны (расчеты Лэмлейна)

По горизонтали: относительное расстояние от центра; по вертикали: слева — плотность энергии деформации, эрг/см³ и смещение, см; справа — напряжение, дин/см² и деформация, × 10⁻⁷;
 1 — радиальное смещение,
 2 — горизонтальное смещение, см,
 3 — плотность энергии деформации,
 4 — радиальная деформация,
 5 — радиальное напряжение.
 Расчеты сделаны для модели с размягченной центральной областью размечтом 0,4 радиуса Луны

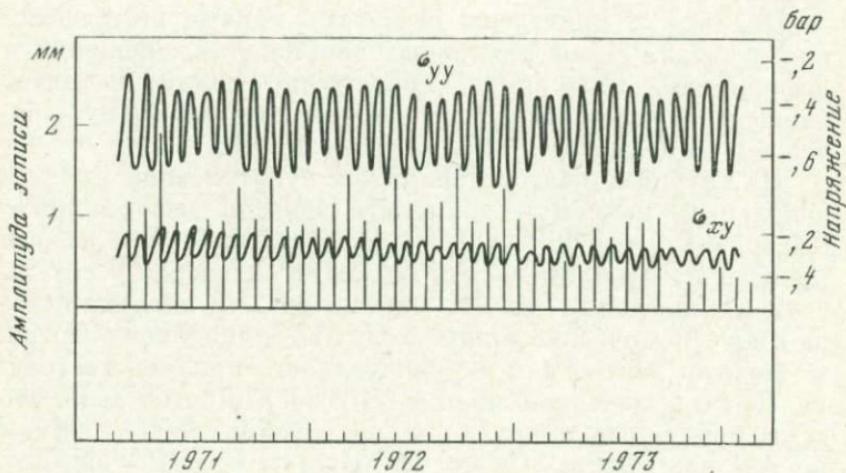


Рис. 29. Календарь лунотрясений очага 18 (см. рис. 25) в соответствии с периодическим изменением компонент напряжения. Иллюстрируется их тесная взаимосвязь

Приливные напряжения в недрах Луны меняются не только во времени, но и по направлению. Сдвиговая компонента приливных напряжений уменьшает или увеличивает напряжения, существующие на трещинах, на крыльях сбросов. По-видимому, во время характеристической фазы не только величина напряжений наибольшая, но и

их ориентация наиболее благоприятна. Она способствует резкому сдвигу блоков — происходит слабое приливное лунотрясение.

Картина подготовки приливных лунотрясений примерно такова. Специфика движения и вращения Луны, ее гравитационное расписание вызывают большие градиенты приливных напряжений. Они концентрируются на контакте жесткой, холодной литосферы и разогретой, пластичной астеносферы. Этому способствует сложный, контрастный рельеф переходной зоны. В астеносфере существуют конвективные потоки вещества. Быть может, положение эпицентральных зон отражает их направление.

Разогретое вещество астеносферы неравномерно проникает в переходную зону. В периоды увеличения гравитационного взаимодействия в литосферу импульсами «впрыскиваются» горячие флюиды. Они образуют своего рода «смазку» для последующего движения блоков по разрыву.

Согласно представлениям американских сейсмологов, в очагах землетрясений действует механизм дилатации (расширения, растяжения), при этом вода способствует скольжению по разрыву. Если применить формулы этой теории для Луны, то размеры очагов, интервалы между лунотрясениями и их энергиями неплохо согласуются.

Разрывы происходят в небольших однородных блоках, возможно, первичного, но во всяком случае недостаточно сцепленного вещества (судя по тому, как хорошо сохраняется форма колебаний). Из-за малых размеров блока сотрясения тоже не получаются большими. А их частота во времени полностью регулируется гравитационной «указкой» Земли и Солнца. Не успеет напряжение как следует накопиться, как тут же впрыскивается «смазка» из глубин и происходит слабый «щелчок».

Можно сказать, что именно приливные силы Земли заставляют Луну трястись часто и слабо, не давая ей накопить силы для могучего толчка.

На Луне, по-видимому, имеется единый «организм» планетарной сейсмичности, управляемый приливными гравитационными силами. По отношению к мелкофокусным тектоническим лунотрясениям они играют лишь роль спускового механизма. Действительно, на глубине мелкофокусных очагов энергия приливной деформации $0,01$ эрг/см³, или 10^{43} эрг/км³. Даже при размерах очага около 10 км и

при 100%-ном превращении тепловой энергии в сейсмическую ее не хватит для сейсмического толчка с энергией 10^{15} — 10^{18} эрг. Но приливное напряжение может быть «последней каплей», переполняющей чашу «тектонического терпения» Луны. В большинстве зарегистрированных случаев мелкофокусные лунотрясения происходят в момент минимума или максимума приливных напряжений. При этом существенным оказывается достаточная величина как сдвиговой, так и радиальной, сжимающей компоненты напряжения. Отсутствие гипоцентров в 30-градусном круге в центре видимого диска и на промежуточных глубинах (300—800 км) объясняется именно слабостью сжимающих напряжений, уменьшающихся от $5 \cdot 10^5$ дин/см² в центре до нуля на поверхности. На уровне мелкофокусных очагов имеется местный максимум (10^5 дин/см²), а на промежуточных глубинах — минимум радиальных напряжений. К тому же сюда не проникают в достаточном количестве флюиды из астеносферы, а также в процессе переплавления «завариваются» первоначальные трещины.

В ходе изучения сейсмичности Луны назывались разные источники энергии: тектонические напряжения, выкачивание магмы с больших глубин, вековое расширение или сжатие Луны, изменение эллиптичности ее орбиты, газовый вулканизм, концентрация напряжений из-за некомпенсированных масс, термические перегрузки. Нам будет удобнее вернуться к этому вопросу в заключительной главе, при обсуждении новейшей тектоники Луны.

Можно ли предсказать лунотрясение?

Земля «больна» землетрясениями. Летописи красноречиво описывают страшные катаклизмы в жизни человечества. 800 тыс. жизней унесло землетрясение 1500 г. в Китае. Больше 100 тыс. — Лиссабонское 1755 г. В 1923 г. в Японии от тряски, пожаров и наводнения погибло около 100 тыс. жителей. В 1960 г. гигантская волна цунами опустошила берега не только Чили, но и Японии. В Перу в 1970 г. в результате подземного толчка ледяная глыба в 1 млн т, рухнувшая с вершины горы, похоронила цветущий город. Свежи в памяти ашхабадское и ташкентское землетрясения.

К счастью, сверхкатастрофы происходят не так часто. Но и в 1976 г. люди были потрясены волной разрушений, прокатившейся по Земле — в Гватемале, Китае, Румынии, Турции.

Сейсмологи установили многие закономерности землетрясений. Происходят они не повсеместно — сейсмические пояса сосредоточены по периферии литосферных плит и отсутствуют в центре. Их очаги сосредоточены в литосфере (чаще даже в коре) и лишь в местах стыка плит протягиваются глубже астеносферы (вплоть до 700 км).

Энергия самого сильного землетрясения — 10^{26} эрг. Такие землетрясения редки. Большинство слабее. Их насчитываются сотни тысяч в год. Выделяемая при этом общая энергия равна $10^{25}—10^{26}$ эрг.

Энергия приливных лунотрясений (если суммировать их по очагам и предположить, что лунотрясения с очагами на обратной стороне в среднем такой же силы) — всего $10^{11}—10^{12}$ эрг, т. е. в миллионы раз меньше энергии землетрясений. Таким образом, по сравнению с Землей Луна асейсмична. И причина этого кроется в особенностях режима ее недр. Слишком мощная и слишком жесткая литосфера парализует ее тектоническую активность. В ответ на конвективное вспрыскивание и приливные всплески Луна лишь слабо потрескивает.

Истоки приливных лунотрясений — во внешних, экзогенных космических факторах.

Природа землетрясений иная. Они — тектонические, внутренние. Их подготовляют перенапряжения, возникающие в недрах в результате сложных механических и физико-химических процессов. Они не поддаются столь точному расчету, как орбиты небесных тел. Предсказать землетрясение трудно, это — одна из основных забот сейсмологов.

Прогноз землетрясений предусматривает определение силы максимально возможного в каждом районе сотрясения и определение его момента. Первая часть задачи в значительной степени решается. Во второй также намечаются многообещающие находки. В ряде районов обнаружены предвестники землетрясений. На Памире и в Калифорнии перед сильным толчком резко уменьшается отношение скоростей поперечных и продольных волн. В районе Ташкента, в Дагестане и других местах перед землетрясением и в ходе его увеличивалась концентрация

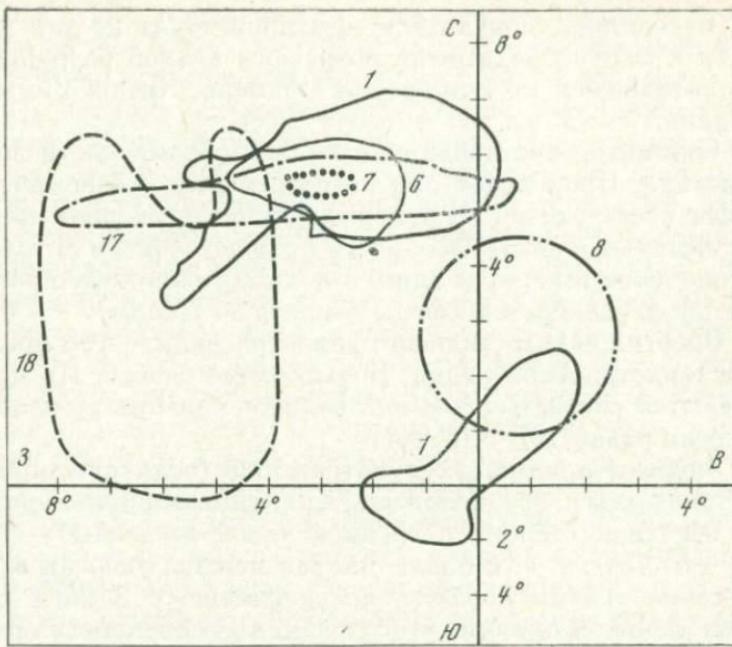


Рис. 30. Положение ближайшей к Земле точки лунного диска в момент толчка в очаге с указанным номером (см. рис. 25). Данные приведены к одинаковой условной амплитуде лунотрясений

в подземных водах микроэлементов благородных газов (радий, гелий, аргон), соединений фтора, урана и изменился их изотопный состав.

Приближение землетрясений диагностируется в ряде районов по поведению магнитного поля, изменению вида сейсмических волн и т. д. Словом, здание прогноза строится.

На Луне, как мы видели, предсказание лунотрясений (только приливных) — не проблема. Здесь обнаружена зависимость момента толчка в соответствующей очаговой зоне от положения на поверхности точки, лежащей на линии, соединяющей центры масс планет.

Эта точка в центре видимого диска Луны совершает сложные эллипсовидные колебания. Они вызваны оптической либрацией, которая представляет не истинное покачивание Луны, а эффект для земного наблюдателя, связанный с несферичностью орбиты Луны, наклоном ее оси к экватору и вращением наблюдателя. На рис. 30 показан

ны положения ближайшей к Земле точки в моменты, когда в соответствующих очаговых зонах отмечается максимальная активность приливных лунотрясений.

Таким образом, на Луне при отсутствии затеняющих картину внутренних тектонических процессов легко предсказать время, место и силу сейсмических толчков.

Метеоритный «дождь» стихает

Луна испытала встречи с метеоритами разных калибров. Падение гигантов-планетезималей объясняет глобальные особенности рельефа Луны, например возникновение Моря Дождей и окружающих его гор. Метеориты помельче распахали и размельчили брекчии, насыпанные гигантами, создав лунную почву — реголит.

Два крупных метеорита весом более 1 т, упавшие на Луну 13 мая и 17 июля 1972 г., сыграли выдающуюся роль в сейсмических исследованиях. Первый помог открыть границу кора — мантия, второй — астеносферу.

Поток метеоритов изучался независимо на записях длиннопериодных и короткопериодных сейсмометров. Чувствительность длиннопериодных станций позволяла заметить в любой точке Луны удар 10-килограммового метеорита (со скоростью падения около 20 км/с), падение маленького метеорита весом всего 100 г ощущалось на расстояниях до 50 км.

За 400 дней на станции «Аполлон-12» было записано 64 удара. По ним определена зависимость амплитуды записи от расстояния, позволяющая оценить, как можно использовать падение метеоритов различного веса для сейсмических просвечиваний.

Была также построена кривая повторяемости, позволяющая оценить поток метеоритов с массой от 100 г до 1 т. Параметры кривой хорошо совпали с независимыми оценками, полученными при изучении кратеров. Однако поток оказался слишком скучным по сравнению с априорными оценками при наблюдении метеоритов с Земли.

Новое исследование проведено по записям высокочастотного сейсмометра «Аполлона-14». Были сделаны записи падений метеоритов гораздо меньшей массы — от 0,1 г до 1 кг.

Из 1165 событий, записанных за 313 дней 1972 г., 825 были определены как тепловые сотрясения, 183 имели

близкие к ним параметры и 127 оказались ударами метеоритов. Из-за относительно небольших удалений форма записей сложная и время нарастания амплитуд незначительное. Видимая частота колебаний более 5 Гц, амплитуды сильно варьируют, форма не повторяется, не наблюдается какой-либо периодичности. Имеет место разброс скоростей: короткие волны опережают длинные, из этого следует, что волны распространяются в основном вблизи поверхности.

Свыше 70% упавших метеоритов имели массу от 1 до 100 г, из них около 50% — менее 10 г. При скорости полета метеорита 22 км/с и чувствительности сейсмометра 2 Å удар 10-граммового метеорита ощущался на удалении 30 км. Зависимость числа малых метеоритов от их массы хорошо согласуется со спутниковыми и радарными измерениями с Земли и на 1—3 порядка выше оценок метеорного потока по длиннопериодным сейсмометрам. В чем причина различий — в особенности ли приборов, специфике подсчета или в физике явлений — до конца не ясно. Возможно, существует две группы метеоритов: большие метеориты возбуждают в основном низкочастотные поверхностьные волны, малые — высокочастотные объемные.

Была сделана попытка изучить траекторию метеорного потока в космическом пространстве. С этой целью анализировались записи, полученные на сейсмических станциях «Аполлон-12 и -14» с декабря 1969 по июль 1973 г. За это время было зафиксировано 394 падения метеоритов массой более 5 кг.

Статистическая связь числа метеоритов с фазой Луны отражает направление их влета в околосолнечное пространство. Максимальное число ударов приходится на фазы полнолуния и новолуния. Это означает, что наибольшее скопление метеоритов оказывается в плоскости эклиптики. Афелий метеорных орбит имеет пределы 2,8—5 астрономических единиц. Отсюда следует, что метеориты движутся между поясом астероидов и Юпитером.

«Сейсмозвон» — микросейсмы Луны

Тиха лунная ночь. Вернее, — земная ночь на Луне. Еще точнее — тихо на Луне ночью при свете Земли. В совершенном безмолвии, как в немом кинофильме, испокон веков совершились на лунной поверхности катаклизмы.

Однако в лунных недрах шум все-таки есть, по его могут услышать лишь приборы. Конечно, уровень микросейсмических помех на Луне чрезвычайно низкий и природа их иная, чем на Земле. На Земле это шумы океана, ветра и промышленных механизмов, на Луне — «игра хвостов» записей лунотрясений и падений метеоритов. Эти записи из-за большой неоднородности и одновременно добротности лунных пород делятся часами. И поскольку сейсмических событий происходит в год сотни и даже тысячи, можно думать, что на Луне всегда найдется место, в котором «звенит».

Лунный фон микросейсм отличается от земного прежде всего неустойчивостью во времени. Здесь регистрируется от 600 (юго-восточная часть Океана Бурь) до 3 тыс. (район кратера Декарт) приливных лунотрясений в год, но приурочены они в первом приближении к периодам апогея — перигея. Тогда их происходит по 10—20 в 1 сут. А поскольку время, за которое амплитуда колебания ослабевает в 10 раз, составляет 0,5—4 ч, то получается непрерывный сейсмический фон колебаний достаточно ощущимой амплитуды.

Другая особенность лунотрясений — их пространственная мозаичность: эпицентры сосредоточены в нескольких узких протяженных поясах. Число регистрируемых событий зависит от локальных сейсмогеологических условий.

Метеориты падают на поверхность Луны в среднем равномерно в пространстве и времени, но гораздо реже, чем следовало ожидать из оценок по наблюдениям с Земли.

Исходя из графиков повторяемости числа лунотрясений и ударов метеоритов можно ориентировочно оценить уровень фона микросейсм на Луне в разных ситуациях. В сейсмичных зонах для малочувствительных станций в период между пиками сейсмической активности микросейсмы обусловлены «метеоритным звоном» (их амплитуда превышает 0,01 Å). Максимальный фон микросейсм отмечается чувствительными станциями в пределах сейсмических поясов в период апогея — перигея. В этом случае фон должен превышать 0,07 Å.

Для записи таких слабых сигналов нужно на 1 порядок поднять чувствительность аппаратуры или хорошо знать статистику внутреннего шума регистрирующего канала, чтобы выделять из шумоподобных сигналов сейсмическую компоненту. Тогда удастся решать задачи, совершенно но-

вые для земной сейсмологии. Во-первых, по записям одной станции, не определяя эпицентр, можно оценивать сейсмичность региона по уровню фона микросейм. Во-вторых, по пространственным аномалиям фона удастся картировать сейсмическую добротность недр. Ведь на Луне в отличие от Земли шумно не там, где «плохая» погода, а там, где добротная среда — именно здесь «хвосты» у записей длиннее.

* * *

«Сейсмические родственницы» по устройству недр, Земля и Луна оказались весьма непохожими по сейсмичности. Луна практически асейсмична. Общая годовая энергия лунотрясений в миллиарды раз меньше, чем землетрясений.

Основной энергетический баланс в лунной сейсмичности составляют редкие мелкофокусные толчки тектонической природы. Большинство же лунотрясений — приливной природы, это — глубокофокусные, очень слабые и закономерно периодичные лунотрясения-близнецы.

Всей сейсмичностью Луны правит гравитационная «указка» Земли и Солнца. Энергия приливных деформаций концентрируется на неровностях границы жесткой литосферы и пластичной астеносферы Луны. Приливные силы обусловливают слабые глубокофокусные толчки и играют роль спускового механизма для относительно интенсивных мелкофокусных толчков, которые черпают энергию в процессах векового накопления напряжений.

Распределение в недрах Луны приливных напряжений объясняет уникальные особенности лунной сейсмичности: отсутствие любых толчков на промежуточных глубинах и отсутствие тектонических эпицентров в центральном круге видимого диска Луны. Как и на Земле, очаги лунотрясений закономерно локализованы. На Луне они составляют несколько узких, глубоко захороненных поясов сейсмичности глобального размера, пересекающихся в узловой точке (30° з. д. на экваторе), где глубины очагов минимальные. Эпицентры приурочены к районам распространения базальтовых морей и отсутствуют в горном регионе юго-восточного квадранта Луны.

Заметная роль внешних космических факторов в сейсмичности Луны дает основания и надежды для поисков подобных закономерностей в календаре землетрясений, вносит свой вклад в проблему их предсказания и предотвращения.

МАГНЕТИЗМ. ТЕПЛО. ГРАВИТАЦИЯ

Было ли лунное «динамо»?

Первый космический аппарат — «Луна-1», пролетевший в январе 1959 г. неподалеку от Луны, не обнаружил в ее окрестностях усиления магнитного поля по сравнению с межпланетным (около 6 гамм на расстоянии Земли от Солнца). В том же году «Луна-2» провела измерение магнитного поля вплоть до 55 км от поверхности Луны. В 1966 г. спутник «Луна-10» при измерениях на 350 км и выше не обнаружил ни ударного фронта, ни зависимости напряженности магнитного поля от расстояния до поверхности Луны. «Эксплорер-35» в течение 5-летнего вращения вокруг Луны на высоте 800 км убедительно подтвердил отсутствие на Луне дипольного магнитного поля.

Величина магнитного момента диполя составляет здесь лишь миллиардные доли земного. Такой момент создает на поверхности Луны поле напряженностью в миллионную часть эрстеда * и неразличимо на фоне межпланетного магнитного поля (сумма солнечного и земного полей).

Планета Земля, как известно,— большой магнит. Она имеет самое сильное среди планет земной группы дипольное магнитное поле. Его напряженность на поверхности у экватора 30 тыс. гамм. Взаимодействуя с солнечным ветром, оно образует магнитосферу в виде тупого цилиндра, рассекающего солнечный ветер. Она протягивается на 10 земных радиусов на дневной стороне, более 1 тыс. радиусов на ночной и имеет ширину 60 земных радиусов.

Лишенная магнитосферы Луна при своем вращении вокруг Земли периодически оказывается в новолуние в невозмущенной магнитосфере Земли, дважды по два дня в переходном ударном слое и в полнолуние в солнечном ветре.

Измерение магнитного поля Луны проведено со спутников и на ее поверхности. На спутнике «Эксплорер-35»

* 1 эрстед равен 10^5 гаммам.

измерялись вертикальная компонента внешнего поля и локальные так называемые лимбовые ударные волны, образованные отталкиванием протонов слабым полем Луны. Проекция лимбовых ударных волн на поверхности представляет карту магнитных аномалий. В приэкваториальном поясе, ограниченном широтами $\pm 45^\circ$, аномалии достигают величины ± 60 гамм. Они сконцентрированы на «континентах» и отсутствуют в «морях» Луны.

Прямые магнитные съемки были проведены небольшими спутниками, запущенными вручную с орбиты «Аполлона». Спутники имели магнитовариационные станции с чувствительностью в сотые доли гаммы. Спутник «Аполлона-15» работал 1 мес, его измерения подтвердили идентичность поля на высоте 100 км и на поверхности, а также выявили устойчивые аномалии напряженностью 1 гамма и меньше. Спутник «Аполлона-16» действовал полгода. Перед падением на высоте 13 км он выявил аномалии размером 100—200 км, интенсивностью 20 гамм. В районе падения с высоты 400 м была отмечена аномалия напряженностью 50 гамм, размером 100 км.

Измерение на поверхности производилось сетью стационарных магнитометров в местах посадки «Аполлон-12, -14, -15 и -16».

Постоянное лунное магнитное поле было впервые измерено лунным стационарным магнитометром экспедиции «Аполлон-12» в юго-восточной части Океана Бурь. Его величина составила 38 ± 3 гаммы, источник локальный. В районе Фра-Мауро в двух точках на расстоянии 1 км обнаружено поле 103 ± 5 гамм и 43 ± 6 гамм. Стационарный магнитометр «Аполлона-15» вблизи Борозды Хэдли показал напряженность поля $3,4 \pm 2,9$ гаммы. В районе кратера Декарт экспедицией «Аполлон-16» на дистанции 7 км проведено пять измерений. Поле имело напряженность 112—327 гамм, однако аномалии, связанной с кратером Декарт, не оказалось.

По взаимодействию остаточного магнитного поля с плазмой солнечного ветра и показаниям магнитометра на орбите определены характерные размеры магнитных аномалий: 2—200 км в Океане Бурь и 5—100 км в районе кратера Декарт. В периоды, когда динамическое давление солнечного ветра возрастало на $1,5 \cdot 10^{-17}$ дин/см², напряженность магнитного поля увеличивалась в 1,5 раза.

В январе — апреле 1973 г. были проведены магнитные

измерения во время 30-километрового маршрута «Лунохода-2» в кратере Лемонье, в зоне сочленения «моря» и «континента». При этом использовался трехкомпонентный магнитометр, позволяющий производить измерения в диапазоне ± 580 гамм с точностью ± 1 гамма.

Советские магнитологи Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Б. А. Окулесский и другие тщательно изучили полученные в ходе измерений уникальные материалы. Прежде всего пришлось найти способы избавления от магнитных помех, вызываемых колесами лунохода и термотоками корпуса и штанги магнитометра, затем ввести поправки на поле солнечного ветра и магнитного шлейфа Земли.

В результате по всему маршруту «Лунохода» построена наиболее детальная карта горизонтальной составляющей магнитного поля. Для вертикальной составляющей определена относительная величина по двум главным профилям маршрута. По первому профилю «Луноход» прошел 6 км с севера на юг, пересек границу днища кратера Лемонье с валом и углубился в пределы «материка». Это дало возможность изучить эффект крутого контакта магнитных базальтов, слагающих днище кратера, с немагнитными или слабомагнитными породами вала. Второй профиль длиной 9 км «Луноход» прошел вдоль вала на восток и вернулся на днище. Он остановился в разломе Борозда Прямая и изучил магнитные аномалии, связанные с краевым эффектом на бортах этого тектонического разлома.

В целом магнитное поле в районе кратера Лемонье оказалось слабым и маловыразительным. Его напряженность в среднем 5—30 гамм. Помимо краевых эффектов, обнаружены аномалии, связанные с небольшими кратерами. «Луноход» пересек пять таких кратеров, превышающих 100 м в диаметре. И каждый раз отмечался максимум или минимум напряженности поля над чашей и максимум над бровкой кратеров. Причем магнитная аномалия кратера оказалась связанный с его размером. У 100-метрового кратера амплитуда вертикальной и горизонтальной составляющей была 15 гамм, а над кратером диаметром 450 м горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля возросла в 2, а вертикальная в 3 раза. Это может свидетельствовать о том, что намагниченность возникла при ударно-взрывном вторжении метеоритов.

Данные «Лунохода-2» дополнили картину лунного магнетизма.

Современному магнитному полю Луны присущ пестрый узор — аномалии разного размера, рожденные местными источниками. Отмечена некоторая упорядоченность аномалий, в частности устойчивое значение поля сохраняется в пределах десятков и первых сотен километров. Магнитное поле более неоднородно на «континентах» Луны по сравнению с «морями» и на обратной стороне по сравнению с видимой.

Пространственный спектр лунных магнитных аномалий в диапазоне размеров до 2 тыс. км показал интересную зависимость. При размерах аномалий 600 км напряженность поля не превышает 1 гаммы, с уменьшением размеров до 200 км поле усиливается до единиц гамм, при размерах в десятки километров — до нескольких десятков гамм и, наконец, аномалии размером менее 10 км могут достигать сотен гамм.

На Земле тоже отмечается рост поля с уменьшением размеров аномалий, но напряженность его существенно больше, чем на Луне.

Обнаружена прямая связь между гравитационным и магнитным полями. Она свидетельствует о глубинном, внутреннем происхождении региональных магнитных аномалий Луны.

На «Луноходе-2» не было специальных приборов для определения намагниченности коренных пород. Однако контакт днище — вал и Борозда Прямая представили объекты, позволяющие сделать такие оценки методами, разработанными для описания магнитных эффектов тел различной геометрической формы. В результате было определено направление вектора намагниченности слагающих днище кратера базальтов: вниз под углом $30-45^\circ$ с намагниченностью 10^{-5} Гс. Величина на первый взгляд слишком большая — впору усомниться в правильности теоретических расчетов.

Однако привезенные на Землю образцы лунного грунта подтвердили это странное явление: весьма высокую остаточную намагниченность ($10^{-3}-10^{-4}$ Гс у брекчий, $10^{-5}-10^{-6}$ Гс у базальтов, $10^{-2}-10^{-3}$ Гс у реголита). Такое устойчивое остаточное намагничивание образуется, когда породы кристаллизуются, остывая в присутствии магнитного поля.

В лунных образцах основным носителем магнетизма является самородное железо, тогда как на Земле — окисел железа, магнетит. Концентрация чистого железа в лунных базальтах доходит до 0,1% по весу, в брекчиях — до 0,3—0,7%.

Высокая остаточная намагниченность лунных пород была не сразу признана ученым миром. Возникли подозрения, не результат ли это их намагниченности космическим кораблем. Чтобы исключить этот эффект, астронавты одной из экспедиций возили на Луну и снова возвратили на Землю образцы лунного грунта, собранного в предыдущем рейсе.

Феномен подтвердился. Он оказался чрезвычайно важным для понимания ранней эволюции Луны. Высокая остаточная намагниченность лунных пород может быть объяснена существованием на ранней стадии эволюции Луны магнитного поля высокой интенсивности. Его напряженность, по разным оценкам, колебалась в широком диапазоне значений от $2 \cdot 10^{-3}$ до 1,3 эрстед.

Весьма заманчиво, изучая остаточную намагниченность и радиоактивный возраст пород, реконструировать магнитную историю Луны. Такие попытки предпринимались разными авторами. Некоторые исследователи считают, что напряженность древнего поля падала от 1,3 эрстед на рубеже 4 млрд. лет до 0,05 эрстед на рубеже 3 млрд. лет назад.

Б. А. Окулесский предлагает иной вариант. Судя по образцам базальтов (возраст менее 3,8 млрд. лет), магнитное поле имело напряженность 0,01—0,1 эрстед, а более старые образцы брекчий (4,1—3,7 млрд. лет) свидетельствуют о более сильном поле (0,002—1,3 эрстед), зато у них больший разброс значений.

Если же отдельно рассматривать термораскристаллизованные, т. е. возникшие из местного расплава при ударах, брекчии и брекчии катакластические, нераскристаллизованные, то картина проясняется, разброс данных уменьшается.

Ударная намагниченность присуща брекчиям возраста 4 млрд. лет, у более поздних она уменьшается в десятки раз. Это соответствует максимальной метеоритной бомбардировке поверхности Луны. Терmostатическая же намагниченность базальтов и брекчий обнаруживает тенденцию к явному росту.

Вопрос о природе остаточной намагниченности Луны продолжает обсуждаться. Одни ученые считают, что намагниченность возникла в процессе образования Луны. Другие полагают, что намагничивание пород произведено внешними магнитными полями в период ранней эволюции (например, полем некогда более близкой Земли или каким-либо иным космическим полем). Ряд ученых считает, что намагничивание имеет местный характер, другие считают, что на Луне действовал механизм динамо.

Принято считать, что именно механизм динамо, действующий во внешнем ядре Земли, приводит к образованию ее сильного магнитного диполя. При этом несущественно, какое вещество во внешнем ядре: железо или металлизированные силикаты. Важно, что оно — эффективно жидкое и имеет высокую электропроводность. Процесс этот сложный, и в общих чертах заключается в следующем.

В ядре Земли существуют конвективные потоки проводящего материала. А поскольку в ядре имелось некое, хотя бы слабенькое, изначальное магнитное поле (межпланетное или оставшееся от времен, когда шло образование Земли), то его силовые линии оказываются «вмороженными» в проводящую жидкость. Беспорядочный характер движения «жидкости» приводит к сближению и запутыванию силовых линий и в итоге к усилению магнитного поля. Такой механизм генерации магнитного поля напоминает динамо-машину с самовозбуждением и по аналогии назван механизмом магнитного динамо Земли.

Имеется много доводов, что такой механизм и впрямь действует в Земле.

Конвекция вещества в земном ядре может иметь разную природу. Как говорят физики, существует слишком много способов, которыми можно возбудить конвекцию в ядре, чтобы допустить однозначную интерпретацию. В их числе — тепловая или гравитационная конвекция, или прецессия земной оси.

В случае Луны дело осложняется тем, что большое железное ядро в ней «запрещено» величиной момента инерции, а электронная проводимость в силикатах не допускается, так как давление в недрах слишком мало.

Ш. Ш. Долгинов провел расчеты, свидетельствующие о том, что даже небольшое «живое» (расплавленное) железное ядро могло под действием прецессионных движе-

ний Луны возбудить на какой-то период устойчивое поле напряженностью 0,1 земного. Оно и намагничило породы Луны. Не его ли полужидкие «остатки» подсекли сейсмические волны от удара метеорита 19 сентября 1973 г., замедлившие свой бег неподалеку от центра Луны?

Глубинная электропроводность

Ни одна из лунных экспедиций не провела непосредственных измерений электрического поля Луны. Оно было рассчитано по вариациям магнитного поля на станциях «Аполлон-12, -15, -16» и «Луноходе-2».

Флуктуации внешнего межпланетного магнитного поля проникают в Луну и возбуждают противоположно направленное поле вихревых токов. Время нарастания этого поля зависит от распределения электропроводности в лунных недрах. Одновременные измерения внешнего переменного поля на спутнике и вторичного поля на поверхности позволяют вычислить лунную проводимость.

Луна устроена удобно для электромагнитного зондирования. Межпланетное магнитное поле, вытянутое из Солнца, однородно, фронт его можно считать плоским, а потому для исследования не нужна, как на Земле, сеть лабораторий. Благодаря тому что электрическое сопротивление пород Луны на 2—3 порядка больше, чем земных пород, для ее зондирования достаточно двухчасовых наблюдений, тогда как на Земле нужны годовые. В итоге при малом количестве измерений электропроводность Луны, как это ни странно на первый взгляд, изучена лучше, чем Земли. Высокая проводимость (удельное сопротивление десятые доли ома на 1 м) обтекающего Луну солнечного ветра не выпускает на поверхность возбуждаемые в недрах магнитные поля. Луна как бы окутана слоем фольги. Поэтому на ее освещенной стороне полезной оказывается лишь касательная компонента магнитного поля. Наочной стороне «работает» и вертикальная компонента — ситуация, больше похожая на земную.

Магнитометрами «Аполлон» были проведены измерения наочной и дневной сторонах Луны, в солнечном ветре и геомагнитном шлейфе. Новейшие, опубликованные американскими магнитологами результаты основаны на совместной обработке наблюдений поверхностных магнитометров в Апеннинах и в кратере Декарт. Исследовате-

лям повезло — 20 апреля 1970 г. был зарегистрирован исключительный по силе и четкости электромагнитный импульс. Благодаря ему суждение о структуре недр стало более обоснованным. Верхний слой толщиной несколько десятков километров характеризуется чрезвычайно низкой электропроводностью (10^{-9} ом·м $^{-1}$). На глубинах 200—300 км, соответствующих сейсмической границе между верхней и средней мантией, электропроводность резко увеличивается (до 10^{-3} ом·м $^{-1}$). В средней мантии вплоть до перехода к астеносфере электропроводность возрастает более плавно и в центральной зоне Луны предположительно составляет $1-0,03$ ом·м $^{-1}$.

«Луноходом-2» в кратере Лемонье на солнечной стороне Луны были зарегистрированы «вспышки» солнечного магнитного поля.

При анализе этих наблюдений советские геофизики Л. Л. Ваньян, И. В. Егоров и другие предложили методику, не требующую использования синхронных спутниковых измерений.

Дело в том, что магнитное поле, распространяющееся от Солнца, часто линейно поляризовано. Это дает возможность использовать отношение горизонтальной компоненты на освещенной поверхности Луны к ее установившемуся значению. При этом вертикальная компонента характеризует изменение внешнего поля. Таким образом, отпадает необходимость измерения на спутнике.

Электрические свойства недр Луны охарактеризованы кажущимся электрическим сопротивлением, представляющим усреднение истинного удельного сопротивления до глубины проникания поля данного периода.

Новая методика была использована при анализе ряда магнитных импульсов, зарегистрированных магнитометров «Лунохода-2». Например, импульс, отмеченный в 0 ч 31 мин, 35 с 23 марта 1973 г., характерен тем, что вертикальная компонента, несколько отличаясь от прямоугольного скачка, приближается к установившемуся значению примерно через 16 с, а горизонтальная компонента сначала резко возрастает, затем спадает и через 3 мин также устанавливается на постоянном уровне.

Импульс 23 марта был зарегистрирован при скорости солнечного ветра, превышающей 730 км/с (по данным советского искусственного спутника Земли «Прогноз-3» и американской межпланетной автоматической станции

«Пионер-9»). Это означает, что для колебаний с периодом, превышающим 20 с, можно не учитывать время пролета мимо Луны и возмущения в солнечном ветре.

Л. Л. Ваньян и И. В. Егоров сопоставили все опубликованные результаты электромагнитного зондирования Луны. Наиболее полные статистические данные, полученные во время синхронной работы магнитометров «Аполлона-12» и «Эксплорера-35», опубликованы в виде четырех независимых характеристик магнитного поля. Группа американских геофизиков под руководством П. Дайела исследовала дневное усиление и ночное ослабление поля во времени. Группа П. Сонетта опубликовала данные об аналогичных характеристиках отклика Луны на вариации магнитного поля в частотном представлении. Все данные были пересчитаны к единому виду — частотным характеристикам дневного усиления. Сводка данных представлена на рис. 31. Отмечается неплохое согласие данных «Аполлона-12» и «Лунохода-2». Кажущееся сопротивление достигает величины 10^4 Ом·м при периоде 25 с и уменьшается примерно до 10^3 Ом·м при периоде 10 с.

Кривая на рис. 32, расположенная внутри полосы экспериментальных значений кажущегося сопротивления, рассчитана теоретически для следующей модели электропроводности Луны:

Таблица 11

Электропроводность недр Луны

Слой	Кажущееся сопротивление, Ом·м	Мощность слоя, км
1	10^6	170
2	600	130
3	$3,5 \cdot 10^5$	200
4	$1,4 \cdot 10^3$	240

Таким образом, модель Луны характеризуется до глубин 700—800 км удельными сопротивлениями свыше 10^3 Ом·м. Это значит, что литосфера не содержит расплавов, поскольку в лабораториях показано, что появление 5—10% расплава в породе с удельным сопротивлением 10^3 Ом·м понижает его до 15—40 Ом·м.

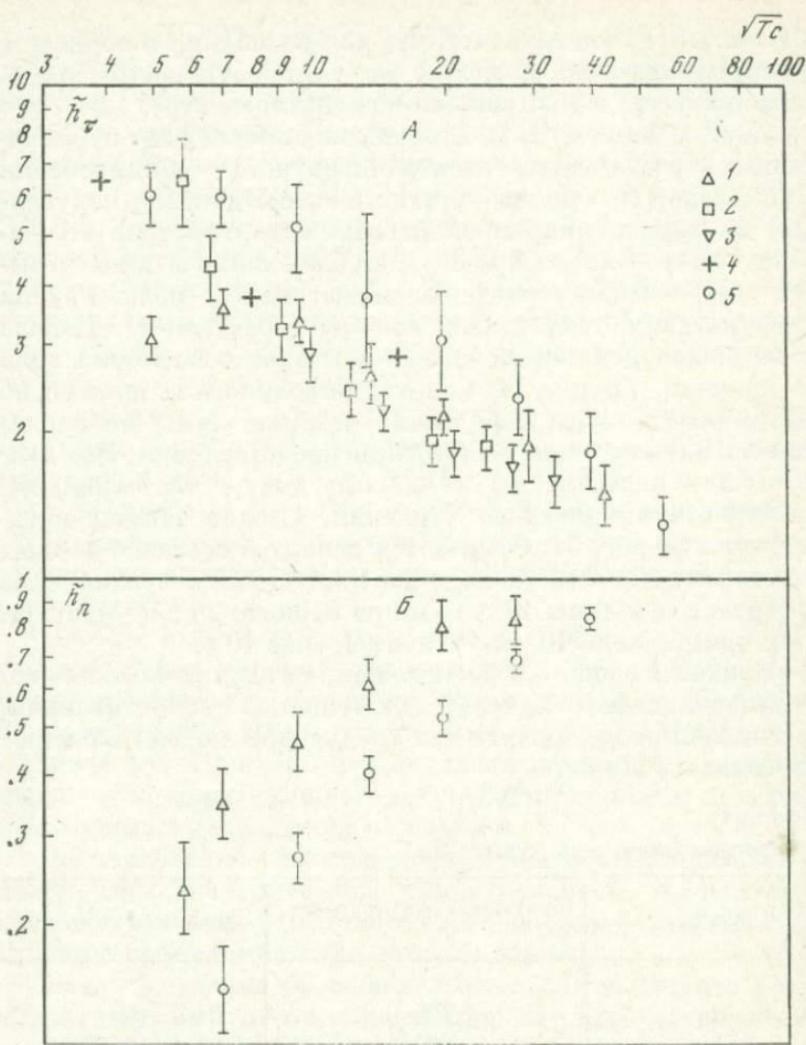
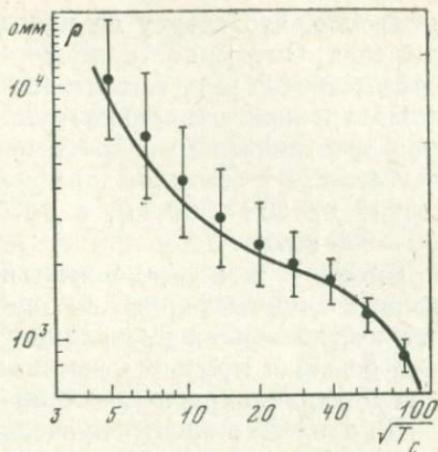


Рис. 31. Результаты изучения электропроводности Луны. Сводные графики горизонтальных (вверху) и вертикальных (внизу) магнитных вариаций

1 — измеренное дневное усиление и ночное ослабление (данные Сонетта и др.), 2 — дневное усиление, пересчитанное из ночного ослабления, 3 — данные «Аполлона-15», 4 — данные «Лунохода-2», 5 — трансформация Фурье от переходного процесса дневного усиления и ночного ослабления (данные Дайела)

Рис. 32. Суммарная кривая кажущегося электрического сопротивления Луны (по вертикали) в зависимости от периода колебаний (по горизонтали) (данные Л. Л. Ваньина и др.)



Кроме оценки общей мощности литосферы, по результатам электромагнитного зондирования внутри нее удается выделить наружную весьма высокоомную (10^6 Ом·м) оболочку толщиной около 100—200 км, а также относительно проводящий слой (10^3 Ом·м) на глубинах 200—300 км.

Полученное распределение электропроводности имеет глобальный характер. Это следует из совпадения кривых зондирования для разных районов Луны. Выше отмечалось согласие кривых становления поля для «Аполлона-12» (Океан Бурь) и «Лунохода-2» (Море Ясности), расстояние между которыми превышает 1500 км. Результаты зондирования в Море Дождей («Аполлон-15») на расстоянии около 800 км также совпадают с наблюдениями в Океане Бурь.

Слоистость оболочки по электрическим свойствам, возможно, является следствием разделения первичного перидотитового вещества Луны. Высокоомная базальтовая оболочка, выплавилась из слоя шпинелевых перидотитов, обогащенных окислами железа. Шпинель устойчив в диапазоне давлений 10—20 кбар, соответствующих лунным глубинам 200—400 км. Судя по удельному сопротивлению, температура на глубине 400—500 км достигает 600—700 °C, следовательно, температура в литосфере возрастает каждый километр на 1,5°.

Электрическое зондирование Луны выявило следующие основные особенности.

Электрическое сопротивление Луны в целом на несколько порядков больше, чем Земли. В особенности су-

щественно, что сверху ее находится мощный изоляционный слой. С глубиной кажущееся сопротивление падает и соответственно растет электропроводность.

Обнаружено радиальное расслоение Луны по кажущемуся электрическому сопротивлению. Границы слоев почти соответствуют сейсмическим разделам верхней и средней мантии на 200—300 км, а литосфера и астеносфера на 800—900 км.

Вместе с тем установлена и неоднородность электрического сопротивления в горизонтальном направлении. Так, выделена плохо проводящая чаша Моря Дождей, отмечена большая мощность высокоомного слоя в районе кратера Декарт по сравнению с кратером Лемонье и т. д.

По профилям электропроводности и зависимости проводимости от температуры оценена температура внутри Луны для разного состава мантии. При оливиновом составе на глубине 700 км температура около 1000°C . При использовании новейших лабораторных данных по пироксенам и оливинам получаются более высокие температуры — 1000°C на глубине 400 км и 1400°C на глубине 800 км.

Во всех случаях до глубины 700—1000 км температура ниже точки плавления базальтов, т. е. получается такая же оценка мощности литосферы, как и по сейсмическим данным. Рост температуры, как и электропроводности, с глубиной становится менее резким.

По измерениям магнитного поля на станциях «Аполлон» и на спутнике «Эксплорер-35» определена относительная магнитная проницаемость Луны: $1,012 \pm 0,006$. То, что она несколько превышает 1, означает, что Луна в целом обладает параметрами и (или) слабыми ферромагнитными свойствами. Соответствующее содержание свободного железа равно $2,5 \pm 2,0\%$ по весу. Общее содержание железа в Луне оценено в $12,8 \pm 1,0\%$ (для артопироксеновой модели плотностью $3,34 \text{ г}/\text{см}^3$ с равномерно распределенным свободным железом) или $5,51 \pm 1,2\%$ по весу для модели из оливина и свободного железа.

Проведенные измерения не отвергают и не подтверждают существование небольшого железного ядра, ибо его намагниченность маскируется близповерхностными магнитными телами.

Динамическая фигура Луны отличается от гидростатически уравновешенной, т. е. такой, какой становится однородная вращающаяся жидкость. В этом случае она была бы трехосным эллипсоидом с отклонением полуосей от среднего на несколько десятков метров, и его поверхность была бы перпендикулярной вектору силы тяжести.

В действительности различия в длинах главных осей лунного эллипса хотя и намного меньше земных, но все же превосходят 1 км (полярный радиус — ось вращения — равен 1736,04 км, а направленный к Земле — 1739,23 км). Поэтому-то мы и наблюдаем оптическую либрацию, она не была бы заметна, если бы сжатие у полюсов не превышало 1 км. Из-за того, что Луна повернута к Земле одной стороной, ее приливное экваториальное вздутие не передвигается по поверхности, в результате у экватора видимой стороны образовалось вздутие высотой несколько сот метров и в теле Луны возникают касательные напряжения величиной около 100 бар.

Но главная особенность фигуры Луны — центр ее масс смещен от геометрического центра на 3 км по направлению к Земле и на 1 км влево (если смотреть с Земли). У Земли тоже имеется сдвиг, но он составляет лишь десятки метров. Сдвиг центра масс Луны не объясняется действием масконов (их суммарная избыточная масса сдвигает центр лишь на 40 м), а вызван существенной неоднородностью структуры ее недр.

Рельеф поверхности Луны также асимметричен: на видимой стороне он на несколько километров ниже уровенной поверхности, на обратной — выше. При этом максимальный размах рельефа на Луне достигает 12—14 км, а самая высокая вершина в горах Лейбница имеет высоту 9 км, подстать гималайской Джомолунгме. Уровень различных лунных «морей» разнится на сотни метров. Единой «океанической» поверхности на Луне, разумеется, нет. Однако систематическое превышение уровня менее плотных «континентов» над более плотными «морями» позволяет многим исследователям предполагать существование на Луне так называемых условий изостазии. Это значит, что на некоторой глубине в недрах вес столба вышележащих пород в любом месте Луны оказывается одинаковым.

Детальное изучение гравитационного поля Луны стало возможно после выведения космических кораблей на орбиту искусственных спутников Луны (ИСЛ), начиная с «Луны-10».

Наблюдения за спутниками Луны, выполняемые с Земли, в известном смысле вести удобнее, чем за искусственным спутником Земли. Благодаря медленному вращению Луны ее спутник находится в стабильном гравитационном поле в течение пяти оборотов (15 ч), а средние параметры его орбиты определяются за два оборота. Трех рационально расположенных станций достаточно для наблюдений.

В то же время из-за большого удаления ИСЛ угловые измерения их орбит с Земли неточны, поэтому используется эффект Доплера: сдвиг частоты передатчика в зависимости от скорости удаления или приближения спутника. Гравитационное поле Луны изучено по «лучевым ускорениям» силы тяжести и ее проекциям на направление спутник—станция.

Большую сложность представляет учет возмущения орбиты ИСЛ полем Луны. Так, экваториальное вздутие Луны вплоть до расстояний 1600 км от ее поверхности чувствуется сильнее, чем земное сжатие.

Первые построения гравитационной карты Луны были сделаны советскими исследователями по результатам полета «Луны-10» в марте 1966 г. Существенные корректизы в ней были внесены в ходе полета «Аполлона-8» в декабре 1968 г. Это был первый пилотируемый облет Луны по орбите ее искусственного спутника с возвращением на Землю. Селеноцентрическая орбита «Аполлона» рассчитывалась в соответствии с текущими значениями коэффициентов гравитационного потенциала. «Аполлон-8» совершил десять оборотов вокруг Луны на высоте 112 км. Расчеты предполагали постепенное уменьшение эксцентриситета орбиты, однако он систематически возрастал. С такой орбитой нельзя было посадить корабль на Луну. В дальнейшем карта была уточнена по мере наблюдений за долгопериодическими вариациями орбитальных элементов «Лунар Орбитеров». Использовались также те участки трасс «Аполлонов», где экипажи не выполняли маневров.

Гравитационное поле Луны оказалось неоднороднее земного, его поверхность равного потенциала более неровна, а источники аномалий расположены ближе к поверхности. Это вызывает периодические вариации эксцентриси-

тета орбит ИСЛ и величины периселения, так что спутники Луны не могут без коррекции обращаться вокруг нее более 8 мес.

Большая шероховатость поверхности равного потенциала Луны побудила исследователей США внимательнее рассмотреть мгновенные ускорения на орбитах спутников. Это привело в 1968 г. к открытию глобальных особенностей Луны — масконов (от английского «концентрация масс»). Масконы выявлены по большим аномалиям силы тяжести (до 200 мгал). При подлете к маскону скорость спутника возрастает, после пролета — спутник затормаживается. Масконы вызывали вариации высоты спутников на 60—100 м и изменения скорости полета до 0,02% (0,5 м/с). Эти важные результаты были получены с помощью сети дальнего слежения, включающей три станции. Доплеровские измерения проводились 10 сут на 80 последовательных оборотах «Лунар Орбитер-5» при частоте 2300 мГц с интервалами 1 мин, 30 с и 10 с.

Вначале были открыты масконы в «морях» видимой стороны: Дождей, Ясности, Кризисов, Влажности, Нектара. Самый крупный из них — маскон Моря Дождей, его избыточная масса порядка $(1,5-4,5) \cdot 10^{-5}$ массы Луны (рис. 33).

Большинство масконов находится в круглых «морях» видимой стороны. Впоследствии были открыты более крупные масконы на границе видимой и обратной стороны в «морях» Восточное и Краевое, а также огромный маскон в экваториальной зоне центра обратной стороны. В этом месте «моря» нет, поэтому маскон назван «Скрытым». Его диаметр достигает 1 тыс. км, масса в 5 раз превышает маскон Моря Дождей. Скрытый маскон способен отклонить на 1000 м спутник, летящий на высоте 100 км.

Гравитационное поле Луны можно описать большим числом точечных аномалий разного знака. Ряд аномалий, помимо «масконовых морей», получает при этом хорошую привязку. Так, отрицательные аномалии наблюдаются в областях лунных гор: Юра, Кавказа, Тавра, Алтая. Глубины вызывающих их точечных масс, как правило, — несколько десятков километров, во всяком случае — менее 300 км.

Суммарная масса всех масконов превышает 0,0001 массы Луны. Явление такого масштаба требует объяснения, но как раз здесь-то и расходятся мнения ученых.

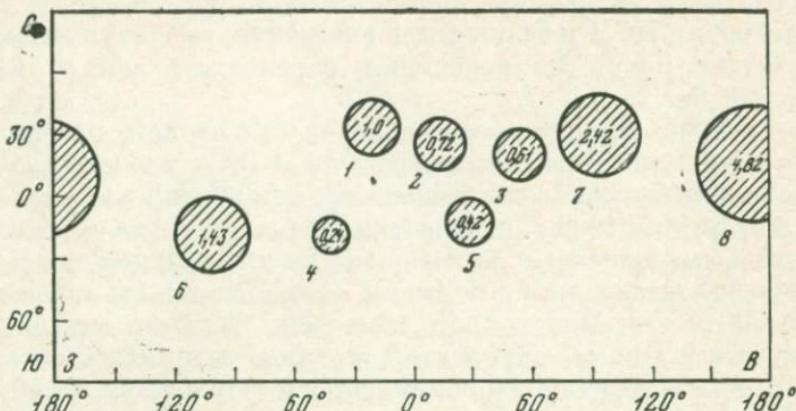


Рис. 33. Схема лунных масконов

1 — Море Дождей, 2 — Море Ясности, 3 — Море Кризисов, 4 — Море Влажности, 5 — Море Нектара, 6 — Море Восточное, 7 — Море Краевое, 8 — Скрытый маскон. Цифры в кружках — масса по отношению к массе Моря Дождей

Маскон Моря Дождей притягивает, как железо-никелевый шар диаметром около 100 км, расположенный глубже 50 км. Такая аналогия приводит к мысли — не захоронены ли в круглых морях тела плотных метеоритов? Правда, при ближайшем рассмотрении оказывается, что при ударе сверхметеорита из недр «вырывается с мясом», испаряется и разбрасывается масса, намного большая упавшей. И все же рождение масконов может иметь отношение к падениям метеоритов. Только главную роль играет не их вещество, а то, что они дробят монолит коры, приводят к образованию многих, подчас весьма глубоких трещин. Причем, то, что большинство масконов находится на видимой стороне, возможно, объясняется большей мощностью коры на обратной стороне — там ее труднее ослабить или пробить. По одной гипотезе, в ударные впадины лунной коры поднимается плотное вещество мантии, по другой — заполнение происходит с поверхности, базальтовые лавы (плотнее материала коры) заливают топографические понижения.

Существует точка зрения, что образование масконов никак не связано с ударными процессами, однако протекающие при этом процессы химической дифференциации до конца не ясны.

Странную по современным понятиям точку зрения отстаивают некоторые исследователи, рассматривая мас-

коны как отложения плотных осадков на дне бывших лунных морей. Однако для обоснования и такой гипотезы можно найти аргументы («морские побережья», размытые борозды и кратеры на снимках ИСЛ).

По гравитационным аномалиям Луны определяется мощность лунной коры, поскольку на границе кора—мантия происходит резкий скачок плотности вещества (от 2,9 г/см³ до 3,4 г/см³).

Разобраться в гравитационных аномалиях не просто. Необходимо учитывать рельеф поверхности и уметь выделять гравитационные эффекты отдельных слоев. Ряд советских (Е. Д. Корякин, В. Е. Фадеев, А. В. Огородникова и др.) и зарубежных (Мюллер и Сьюран — США; Восс — ФРГ) авторов опубликовали оценки мощности коры Луны, исходя из гравитационных аномалий. Получается, что в восточном полушарии мощность коры больше, чем в западном, примерно 100 км. В Море Дождей ее мощность 45 км, в Море Кризисов и Море Ясности — 70—80 км. Примерно такая толщина коры и предполагается во всех немасконовых морях.

Продолжается дискуссия относительно слоистости и состава коры. Предполагая различие плотности базальтов и апортозитов 0,4 г/см³ и вводя поправки на рельеф, можно заключить, что базальтовый слой не должен быть столь толстым, как полагали ранее, — 25 км. В масконовых «морях» он вряд ли превышает 10 км, а в немасконовых сокращается до 1 км. Если при истолковании масконовых аномалий силы тяжести допустить, что они создаются идеализированными точечными массами, то их глубина составляет в Море Дождей около 200 км, в Море Ясности — 280 км, в Море Кризисов — 160 км, в Море Спокойствия — 180 км, в Море Изобилия — 100 км, в Море Познанием — 80 км, Океане Бурь — 60 км.

Таким образом, налицо явная горизонтальная неоднородность плотностной структуры верхней части литосферы Луны.

Аномальный тепловой поток

До полетов космических кораблей представления о тепловом состоянии Луны были весьма ориентировочными. Еще более туманно выглядело ее термическое прошлое. Считали, что содержание радиоактивных элементов ²³⁵U, ²³⁸U, ²²²Th и ⁴⁰K в недрах Луны в среднем такое же, как в хон-

дритовых метеоритах или в мантии Земли. При их распаде выделяется тепло, способное поддержать состояние расплава на глубине. Тепловой поток через поверхность Луны оценивался по аналогии с Землей, где ежесекундно через каждый квадратный сантиметр поверхности «улетучивается» в космос $1,5 \cdot 10^{-6}$ кал тепла. При одинаковых тепловых потоках из единицы объема планет для Луны предсказывалось его значение $0,36 \cdot 10^{-6}$ кал/см² в 1 с.

В 1964 г. было опубликовано сенсационное сообщение. Астрономы из г. Горького во главе с В. С. Троицким измерили тепловое излучение Луны на очень коротких волнах длиной от 1 мм до 3 см и получили неожиданно высокое значение среднего теплового потока $(0,85-0,95) \cdot 10^{-6}$ кал/см² в 1 с, почти втрое превышающее расчетное. Это могло свидетельствовать о более высоком содержании радиоактивных изотопов или о том, что источники тепла сконцентрированы вблизи поверхности.

Неожиданный результат оспаривался. Но настойчивость авторов, проявленная при его защите, окупилась с лихвой — непосредственные измерения теплового потока на Луне подтвердили физическую интуицию исследователей.

Прямые измерения теплового потока на поверхности Луны были проведены в двух экспедициях: в июле 1971 г. в районе Хэдли Рилл на восточном краю Моря Дождей («Аполлон-15») и в декабре 1972 г. в районе Тавр-Литтров в узком заливе на юго-востоке Моря Ясности («Аполлон-17»). Астронавты пробурили скважины, вставили фиброгласовые трубы и поместили в них термозонды для измерения температуры и теплопроводности. Каждый зонд обеспечивал измерение на 11 глубинах и состоял из восьми платиновых термометров сопротивления и четырех термопар. Зонды были установлены на глубинах 1, 1,4 и 2,3 м. Отсчеты передавались на Землю каждые 7 мин.

Обработаны данные за 3,5 года по первой и за 2 года по второй станциям. Анализировать сигналы начинали лишь через месяц после запуска приборов, когда установилось их тепловое равновесие с реголитом. Несмотря на огромные тепловые контрасты на поверхности (+130°C днем, -170°C ночью), суточные температурные колебания практически затухали на глубине 0,8 м, тогда как годовые вариации температуры ощущались на всех исследованных глубинах. Для измерения теплопроводности лунного грун-

та по команде с Земли на 36 ч включались электронагреватели. По тому, как росла температура, определяли величину теплопроводности.

Теплопроводность реголита оказалась очень низкой и сильно зависящей от температуры. У поверхности она составляла лишь $0,24 \cdot 10^{-5}$ кал/см в 1 с на 1° , глубже по мере уплотнения она возрастила, достигая на глубине 1—2 м значений $0,15 \cdot 10^{-4}$ кал/см в 1 с на 1° . В 250-метровом верхнем слое теплопроводность, по-видимому, остается очень низкой: на 2—3 порядка меньше, чем в недрах Луны, в 10 раз меньше, чем в воздухе на Земле, и в 40 раз меньше, чем в воде. Таким образом, реголит Луны, образовавшийся в результате перемалывания обломочных пород ударами метеоритов, представляет своеобразное одеяло, играющее роль термостата для планеты и уменьшающее потерю ею тепла. При образовании Моря Дождей, например, обширные прилегающие к нему территории были покрыты таким рыхлым термостатом. Благодаря этому за последние 100 млн. лет температура на глубине 25 км должна была подняться с 300 до 480°C .

По величине теплопроводности и температурному градиенту был рассчитан тепловой поток через поверхность Луны. Его первые оценки по 2,5-годичным сериям наблюдений дали $2,5 - 3,1 \text{ Bt} \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$. Результаты оказались сходными с предсказаниями Троицкого и, казалось, свидетельствовали об аномально высоком потоке через поверхность Луны. Однако в дальнейшем, по мере накопления данных и применения более аккуратных методов анализа, результаты подверглись пересмотру. Были скорректированы коэффициент тепловой диффузии в реголите ($0,73 - 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$) и величина теплопроводности ($0,9 - 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Bt}/\text{см на } 1^\circ$).

Тепловой поток оказался различным для изученных регионов: $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ Bt} \cdot \text{см}^{-2}$ для района Апеннин и $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Bt} \cdot \text{см}^{-2}$ для района Тавр-Литтров. Это различие на 40 % превосходит погрешности измерений и характеризует горизонтальную изменчивость содержания долгоживущих радиоактивных изотопов в лунной коре.

Ситуация изменилась: оценки, сделанные по астрономическим наблюдениям, оказались завышенными, а тепловой поток района Тавр-Литтров примерно равным расчетному и, как и предполагалось, в 3—4 раза меньше теплового потока через поверхность Земли. Впрочем, пока не

ясно, насколько полученные в двух регионах результаты правильны для Луны в целом.

Можно думать, что сегодняшний тепловой поток из недр Луны создается радиоактивными изотопами, причем вследствие того что процесс дифференциации вещества Луны был ранним и давно завершился, тепловой поток может характеризовать их полное содержание в Луне.

Величина теплового потока — важное граничное условие восстановления тепловой истории Луны. Любая схема ее нагревания и охлаждения может вызвать недоверие, если в итоге не получается сегодняшнего значения тепло-потерь.

Тепловой истории Луны посвящено множество работ (Б. Ю. Левин, М. Лангсет, Е. А. Любимова, С. В. Маева, О. И. Орнатская, М. Токсоц и др.). Исследования ученых основываются на решении уравнения теплопроводности с заданными начальными и граничными условиями и источниками тепла. Вначале раздельно изучались однородные и расслоенные модели. В настоящее время разработана схема расчета на ЭВМ, в которой учтены дифференциация вещества, вынос радиоактивных элементов к поверхности, а также изменение теплоемкости и теплопроводности в ходе плавления.

Многозначность и противоречивость полученных результатов касается подбора физических констант в уравнении теплопроводности: плотности, теплоемкости, кривой плавления, а также начальной температуры и концентрации радиоактивных элементов.

В качестве граничных условий используются современные значения теплового потока, мощность литосфера, возраст самых древних и самых молодых пород, период выплавления морских базальтов.

В многочисленных моделях тепловой истории Луны намечаются общие черты: ранний разогрев и частичное расплавление верхней толщи мощностью в первые сотни километров; последующее отступление зоны расплава на глубину — остывание и затвердевание литосфера; высокая начальная концентрация радиоактивных изотопов, их вынос в ходе эволюции в лунную кору; образование центральной расплавленной зоны и ее постепенное сокращение.

Исходя из величины теплового потока и концентрации урана некоторые исследователи предполагают небольшие (по сравнению с земными) изменения периметра Луны

в ходе ее эволюции. В первые полмиллиарда лет, по-видимому, происходило расширение Луны. Затем, вплоть до возникновения расплавленной центральной области,— сокращение ее радиуса. Последние 2—3 млрд. лет Луну опять «распирает» изнутри со скоростью 10^{-6} см/год. Это в 10 тыс. раз меньше скорости изменения радиуса Земли, которая сейчас переживает эпоху сжатия.

* * *

Планетарные «странные» естественного спутника Земли были известны астрономам еще в докосмический период: аномально большая масса, сложная орбита, неизменный поворот к Земле одной стороной, неравновесная динамическая фигура.

В ходе полетов космических аппаратов и экспедиций на Луну были измерены главные селенофизические поля: тяготения, электромагнитное, теплового потока. В результате получены важные данные, дополняющие представления о скоростной структуре лунных недр.

Ее момент инерции, близкий по величине к значению для однородной сферы, указывает на незначительный рост плотности от поверхности к центру и накладывает ограничение на размеры внутреннего железного ядра. В этом Луна весьма непохожа на Землю, где разделение оболочек по плотности достигло большой выразительности.

В то же время электромагнитное зондирование недр Луны, условия для которого там благоприятнее земных, укрепляет представление об изменчивости физических свойств от поверхности в глубь Луны. Несомненной оказалась и горизонтальная неоднородность первых сотен километров толщи Луны.

Крупные сюрпризы преподнесло и магнитное поле. В настоящее время в нем отсутствует стабильная дипольная компонента, подобная земной, однако высокая палеомагнитичность пород свидетельствует о ее былом существовании.

И, наконец, достаточно высокий тепловой поток намекает на раннюю, уже завершившуюся дифференциацию недр Луны, в ходе которой радиоактивные элементы сконцентрировались в лунной коре.

Теперь собраны все экспериментальные данные для того, чтобы построить картину планетарной эволюции Луны.

ЭВОЛЮЦИЯ ЛУНЫ

Говорит лунный камень

Геолого-геофизические исследования Луны дали в руки ученых новые важные аргументы, без которых гипотезы ее происхождения носили подчас умозрительный характер и их успех зависел в значительной степени от энтузиазма авторов.

Физические свойства недр свидетельствуют о высокой начальной температуре Луны и ее ранней дифференциации с выделением легкой коры, а также о существовании и по сию пору центральной зоны по крайней мере частично расплавленного вещества.

Почти 400 кг образцов лунных пород доставлены на Землю из девяти точек видимой стороны, находящихся на больших расстояниях одна от другой. По составу пород Луна, по-видимому, однороднее Земли, так что привезенные образцы характеризуют ее в целом, хотя совсем не исследованы еще высокоширотные районы и обратная сторона Луны.

Каждый из лунных камней исследуется в земных лабораториях самым тщательным образом. Ни один земной образец не удостаивался столь пристального внимания. Строго говоря, изучаются не все образцы. Часть из них еще во время пребывания астронавтов на Луне была упакована в специальные герметичные контейнеры. Они будут вскрыты лишь через 10—15 лет, когда техника лабораторных измерений усовершенствуется настолько, что можно будет делать более тонкий анализ уникального материала.

Изученные образцы показали, что породы Луны, хотя и разные на ее «морях» и «континентах», в общем напоминают земные. Нет ни одного элемента, выходящего за рамки таблицы Менделеева. Найдено всего четыре новых минерала.

Темные породы лунных морей — кристаллические базальты. Их небольшие различия для разных регионов свидетельствуют об общности происхождения — излияние лавы из жерла древних вулканов или пробоин, создаваемых при соударении с крупными космическими телами. Они во многом похожи на земные так называемые примитивные базальты, образующие ее кору. Основные минералы в них: плагиоклаз, оливин, пироксен, ильменит. Базальты Луны имеют несколько повышенное содержание железа и титана. Например, в первых же пробах образцов из Моря Спокойствия титана оказалось 10 %, но в образцах базальта из других районов его было меньше. Золото и серебро как химические элементы на Луне присутствуют, но лунному «клондайку» не бывать: золота в лунных базальтах в 100 раз меньше, чем в земных, а рассыпных месторождений, связанных с отложениями рек, на Луне быть не может.

Особую группу составляют базальты, обогащенные калием, редкоземельными элементами и фосфором.

Для понимания происхождения Луны важное значение имеет установленный факт обеднения лунных базальтов легкоплавкими компонентами (цинк, индий, таллий), а также летучими (вода, щелочи и др.). Их на Луне в 100—1000 раз меньше, чем на Земле. Отсутствие в лунных породах воды, а также окисной формы железа позволяет предположить, что в период их кристаллизации активность кислорода в расплаве была в тысячи раз ниже. И наоборот, присутствие самородного железа и меди, возможно, вызвано восстановляющим эффектом протонов солнечного ветра.

Обеднение летучими компонентами сопровождается обогащением лунных пород тугоплавкими элементами, такими, как уран, торий, барий, цирконий, ниобий и др. По-видимому, дефицит летучих компонентов в значительной мере имелся в исходном материале, из которого сооружалась Луна.

Светлые участки Луны — высокогорные области — слагают анортозиты, более чем на 50% состоящие из силикатов алюминия и кальция. На лунных «морях» они не найдены, а вершины гор обратной стороны, по-видимому, анортозитовые. Анортозиты встречаются и на Земле (на Балтийском, Алданском, Украинском щитах), их возраст свыше 2 млрд. лет, но происхождение до конца не выясне-

но. Возможно, изучение лунных апортозитов прольет свет на эту земную проблему.

Состав реголита, покрывающего «моря» и горы Луны, соответствует составу лежащих под ним коренных пород, значит он образовался при ударах и тепловых взрывах, вызванных падением метеоритов.

Все изученные образцы лунных пород представляют собой продукты выплавки и разделения некоего первичного вещества. Само оно в явном виде пока не найдено. Есть, как мы помним, предположение, что оно слагает среднюю мантию Луны, отличающуюся высоким коэффициентом Пуассона.

Породы Луны не так разнообразны, как земные, это означает, что процесс дифференциации исходной магмы был мало интенсивен, это и естественно, если учесть низкое содержание в расплаве летучих компонентов. Все это не благоприятствовало образованию месторождений полезных ископаемых.

Самый распространенный на Луне, впрочем как и на Земле, окисел — кремнезем SiO_2 — имеет наиболее стабильную концентрацию в разных образцах около 40 %. Но его соотношение с железом совсем иное, чем на Земле.

У Луны резкий дефицит планетарного содержания железа: на Земле его более $\frac{1}{3}$ массы, на Луне — менее $\frac{1}{6}$. Уже простое сравнение средних плотностей планет свидетельствует о глобальном различии их химического состава. И сейсмические исследования обнаружили лишь совсем небольшое, да и то пока проблематичное, центральное железное ядро.

Кстати уместно заметить, что будь ядро Земли не железным, а металлизированно-силикатным, система Земля — Луна выпала бы из закономерного ряда, в котором планетарное содержание железа уменьшается от Меркурия к Марсу.

Возраст лунных образцов определен по радиоактивным часам. Время затвердения из расплава рассчитывается по соотношению родительских радиоактивных элементов — урана, калия-40, рубидия-87 — и их дочерних элементов — свинца, аргона, стронция — с погрешностью более 100 млн. лет.

Горы Апеннины подарили землянам самый древний кусок апортозита. Ему 4,0 млрд. лет. Он «видел» младенческий возраст планет Солнечной системы (напомним, что

самый старый камень Земли до последнего времени имел возраст 3,5 млрд. лет и лишь недавно в гранитах Гренландии и чарнокитах Антарктиды нашли еще более древние — с возрастом 3,8 млрд. лет). А частички реголита имеют абсолютный возраст 4,6 млрд. лет, равный возрасту метеоритного материала, из которого скомпоновались планеты солнечной системы.

Очень существенно, что на Луне пока не обнаружено пород моложе 3 млрд. лет (по некоторым оценкам — 2 млрд. лет). Это значит, что так давно прекратилась активная тектоническая, магматическая и вулканическая деятельность. А в том, что Луна была активной и горячей, ученые не сомневаются. Об этом говорят непосредственно наблюдаемые астронавтами застывшие потоки лавы, прорывавшие стеки кратеров. Многие крупные кратеры диаметром более нескольких километров имеют вулканическое происхождение.

Любопытно, что в определениях возрастов имеется пробел между 4,0 и 4,5 млрд. лет. Возможно, что это итог космических катастроф — падений планетезималей и крупнейших метеоритов на Луну. Самое крупное из них — ударное образование Моря Дождей. Оно, судя по возрасту брекчий, долетевших до кратера Фра-Мауро, насчитывает 3,85—3,95 млрд. лет. Все другие крупные «моря», кроме Моря Восточного, по морфологическим признакам образовались раньше. Краткая и интенсивная бомбардировка, ударный метаморфизм и разброс обломков на огромные территории изменили характер размещения радиогенных изотопов. Радиоактивные «часы» на Луне часто показывают не то время — не от эпохи аккумуляции Луны или излияний на поверхность континентальной коры, а от момента крупных катаклизмов, которые пришли на рубеж 3,9—4,0 млрд. лет. Именно так получилось при определении возраста одного образца из района Фра-Мауро. Возраст исходных конгломератов в нем равен $(4,47 \pm 0,02) \cdot 10^9$ лет, а $3,95 \cdot 10^9$ лет назад произошла перекристаллизация.

Быть может, закономерно важным является вывод ряда исследователей о том, что время аккумуляции Луны (4,5 млрд. лет) не совпадает со временем образования метеоритов и Земли (4,6 млрд. лет).

Во всяком случае радиоактивному датированию возрастов лунных образцов предоставляется далеко не последнее слово в спорах о происхождении Луны.

Откуда пришла Луна

Проблема эта — одна из самых захватывающих в науках о Луне. Она далеко выходит за рамки тематики книги, и мы коснемся ее лишь вкратце и главным образом с точки зрения влияния новых геофизических наблюдений, проведенных в космический период изучения Луны.

Новые факты, в том числе самые фундаментальные, касающиеся различия химического состава Земли и Луны, существования в Луне внутренней расплавленной зоны и т. д., представляются многим ученым далеко не бесспорными и не всегда статистически обоснованными. В связи с этим имеет место довольно типичная для науки ситуация, когда на определенном этапе развития науки добавление некоторого количества (явно недостаточного) новых данных только усложняет и запутывает картину.

По отношению к разбираемому вопросу известная сложность возникла, в частности, в связи с противоречивостью некоторых аргументов небесной механики и новых геохимических и геофизических наблюдений.

Так или иначе, в период космического этапа исследования, так же как и задолго до его начала, бытуют многие точки зрения и гипотезы о происхождении Луны. Их можно объединить в три группы: отрыв Луны от Земли, захват ее с другой орбиты и образование на околоземной орбите. Гипотезы подстраиваются под новые факты, рождаются гибридные варианты.

Наиболее заслуженная (по времени) и менее теперь популярная — гипотеза отрыва. Ее высказал в конце прошлого века Дж. Дарвин. Он исходил из ориентировочного анализа приливной эволюции лунной орбиты, согласно которому Луна была много ближе к Земле. Предполагалось, что собственные колебания Земли, войдя в резонанс с солнечными приливами, приведут к неограниченному росту приливного выступа вплоть до отрыва. Позже предпринимались попытки обосновать эту гипотезу расчетами из механики жидких сред: вследствие ротационной неустойчивости могло происходить истечение вещества с экватора в тонкий диск или отрыв грушевидного выступа. Однако вскоре были найдены ошибки в расчетах, а также стало ясно, что тела планет далеки от гидростатически равновесной формы.

Гипотезам отрыва противоречила величина вращательного момента системы Земля—Луна и несовпадение плоскости лунной орбиты с земным экватором.

Небезынтересно, что в качестве одного из источников энергии отрыва предполагался мгновенный фазовый переход силикатного вещества ядра в металлическое состояние, при котором могла выделиться гигантская энергия около 10^{38} эрг. Однако, как мы помним, аргументы сторонников металлизированного ядра далеко не бесспорны.

Несмотря на то, что изучение приливной эволюции Луны и формулы механики вращающихся масс почти «похоронили» гипотезу отрыва, она «воскресла», как только выяснилось, что средняя плотность Луны близка к плотности пород верхней мантии Земли. Тем не менее тщательное изучение в лунных образцах содержания летучих компонентов и элементов, сопутствующих железу (cobальт, никель, платина, иридий, осмий, редкие земли и др.), указывает на весьма существенное отличие химического состава планет.

Что же, гипотеза отрыва окончательно отвергнута и ее место лишь в фолиантах историков науки? Нет. Продолжаются попытки возродить ее в новой форме, например в такой: первоначальная жидкость из-за ротационной неустойчивости разделилась на планеты Землю и... Марс (?), а перешеек между ними стал Луной.

Странность спутниковых качеств Луны и в особенности новые данные об отличиях ее химического состава от Земли побудили ряд астрономов и физиков считать Луну пришельцем из солнечной системы. Полагают, что уже готовая планета с сильно вытянутой орбитой, например, из района Меркурия, приблизилась к Земле и была захвачена ее полем тяготения.

Однако если отвлечься от совсем уж экзотических гипотез (сверхизвержение лунного вулкана, толкнувшее Луну в гравитационные «объятия» Земли), то в качестве причин такого захвата выдвигается приливное изменение орбиты и столкновение луноподобных тел. При этом запреты небесной механики подчас игнорируются. Большинство исследователей все же полагает, что захват Луны Землей целиком, в готовом виде, крайне маловероятен. Признаются смешанные варианты, например: приближение к Земле некоего космического объекта, разрушение его приливными силами Земли, постепенное отодвигание осколков и их

повторная аккумуляция в Луну. В этом случае предусматривается процесс образования Луны на околоземной орбите.

Похоже, что гипотезы этой, третьей группы меньше грешат против законов небесной механики и одновременно объясняют геолого-геофизические факты. Образование спутника представляется составной частью процесса превращения околосолнечного газо-пылевого облака в систему планет.

Однако у авторов этой группы гипотез нет единства по вопросу о времени роста самой Земли (от 100 тыс. до 100 млн. лет), времени аккумуляции Луны (от 100 до 10 тыс. лет), начальном удалении «новорожденной» от Земли (от 5—8 до 30 радиусов Земли).

Обсуждаются варианты поэтапного уплотнения элементов в тело планеты и спутника из первоначально горячего (около 2000 К) газового околосолнечного облака.

Вариант, опирающийся лишь на химические данные, предусматривает одностадийную аккумуляцию Земли с одновременным выделением железного ядра. Земля при этом образуется «изнутри наружу». Вначале внутри находилось первичное метеоритное вещество, снаружи — мощная атмосфера из окиси углерода, водорода и испарившихся силикатов. Эта атмосфера создала парниковый эффект, благодаря чему произошло химическое восстановление металлов из окислов и они в силу своей тяжести провалились в ядро. Луна образовалась при последующей конденсации мощной атмосферы Земли.

По-видимому, наименее противоречивой оказывается модель, разработанная в Институте физики Земли АН СССР академиком О. Ю. Шмидтом и развитая его учениками и последователями: В. С. Сафоновым, Е. Л. Рускол. Согласно этой гипотезе, Земля сформировалась за 100 млн. лет путем слипания из газово-пылевых частиц протопланетного околосолнечного облака. Вначале она была однородной и относительно холодной.

К моменту, когда сформировались $\frac{3}{5} - \frac{2}{3}$ массы Земли, вокруг нее образовался спутниковый рой. Специфика неупругих соударений частиц на скоростях несколько километров в секунду вела к росту железных и железо-окисных и к дроблению кремнистых частиц. Именно поэтому Земля оказалась относительно более обогащенной железом по сравнению с Луной, которая сформировалась

несколько позже из частиц околоземного спутникового роя. Более мелкие частицы этого роя дольше подвергались влиянию космических лучей, протоны с высокими энергиями «выдули» и унесли прочь легкоплавкие и летучие компоненты, обеспечив преобладание в материнском лунном веществе тугоплавких элементов.

Так еще до формирования Луны возникли условия, определившие особенности ее химического состава.

А дальше околоземный рой эволюционировал в соответствии с законами небесной механики. Частицы роя вращались, непрерывно сталкиваясь, сбивааясь и дробясь, и те из них, размеры которых превысили 1 тыс. км, могли уцелеть и в дальнейшем стать зародышем Луны. Похоже, что таких зародышей, «протолун», было несколько — два или три. В ходе приливного взаимодействия они сблизились и столкнулись. Энергия ударного слипания и обеспечила высокую начальную температуру Луны, вытекающую из реконструкции ее тепловой истории.

Существование небольшого числа исходных праглыб, естественно, объясняет и горизонтальную неоднородность Луны, выявленную при изучении сейсмических волн и по другим геофизическим данным.

Прослеживание приливной истории Луны говорит о том, что при своем рождении она была ближе к Земле (где-то в интервале 10—30 земных радиусов), а эксцентриситет ее орбиты и наклон к экватору были меньше.

Точка зрения, развивающаяся в Институте физики Земли, возможно, лучшая, но, конечно, не окончательная. Здесь тоже свои сложности: еще не ставились эксперименты для изучения эффекта соударения частиц окислов в нужном диапазоне скоростей; непонятно, как удалось Луне сохранить тепло при столь длительном процессе слипания частиц, и т. д.

Проблем много. Именно для их обсуждения собирались в Москве ученые на советско-американскую конференцию по космохимии Луны и планет в июне 1974 г.

«Скульпторы» лунного лика

На конференции выступил геолог Харрисон Шмитт. Он развивал свой взгляд на основные этапы эволюции Луны. В зале гас свет, и на экране появлялся астронавт Харрисон Шмитт. Он собирал образцы драгоценных лунных пород.

Как обрадовался Шмитт, обнаружив оранжевую породу, казалось, неопровергимое свидетельство недавнего лунного вулканизма. Такие же оранжевые пятна он заметил в других местах поверхности Луны при прощальном ее облете. Увы, породы оказались не моложе, чем образцы предшествующих экспедиций: им было более 3 млрд. лет.

Около 4,6 млрд. лет назад в окрестностях молодого Солнца закончились важные, до конца не выясненные учеными события — рождение планет и их спутников. Закат Солнца на Луне тогда не был таким величаво-спокойным, как сейчас. Светило погружалось в пылающее, плещущее море расплавленных горных пород. Град метеоритов сыпался в него, перемешивая, дегазируя, закаляя и переплавляя материнское вещество Луны. В расплавленной оболочке шло фракционное разделение фаз — формировались кора и верхняя мантия Луны. При этом радиоактивные элементы концентрировались в коре, обусловливая необычно высокий поток тепла, подмеченный термозондами «Аполлон-15 и -17». Породы коры обогащались кальцием и алюминием (анортитовый плагиоклаз), в верхней мантии преобладали окислы железа и магния (пироксен и оливин).

Период магматической «бурной молодости» Луны длился не более 1,5 млрд. лет. В это время извергались на Луне вулканы и совершались катастрофические планетотрясения, только не было сейсмометров, чтобы их зафиксировать. Впрочем, следы этих событий можно найти на современной лунной поверхности. Безусловно вулканического происхождения: кратер Баргентин, до краев заполненный лавой; центральная горка кратера Альфонс; несколько мелких кратеров на его дне. Земные вулканы связаны обычно разломами и трещинами, по которым поднимаются магматические расплавы. Похожие структуры есть и на Луне. Так, на Борозде Гигинус насчитывается 23 кратера, а на обратной стороне Луны имеются кольцевые горы диаметром от 10 до 30 км. Разрывные тектонические нарушения хорошо различимы на фотографиях лунной поверхности. Это знаменитая Прямая Стена в Море Облаков — 240-метровый уступ, протянувшийся на 125 км. Горизонтальными сдвигами с амплитудой в несколько километров разорваны кратеры Каполла и Кассенди.

Со временем внешняя расплавленная оболочка Луны, остывая, затвердевала. Темп роста толщи литосферы составлял 200 км в 1 млрд лет.

Где-то, по-видимому, в конце первого миллиарда лет жизни Луны возникло центральное расплавленное ядро. Вероятно, что в нем действовал саморегулирующийся механизм «электромагнитного динамо». Свидетельство его было величия — высокая остаточная намагниченность лунных пород.

В ходе остывания внешней корки Луны и продолжения ее бомбардировки метеоритами 4,4—4,1 млрд. лет назад образовывался типичный лунный кратерный рельеф, ее бледный лик покрывался оспинами диаметром до 50—100 км. Кора теперь состояла из ударно-распыленного, переплавленного и перекристаллизованного плагиоклаза. Катахлические брекчи из этого возраста несут в себе следы остаточной намагниченности. Трешины в коре от ударов метеоритов протягивались до 15—25-километровой глубины, а мегареголит имел гигантскую мощность — до 10 км.

По мере вычерпывания космического «сора» из околоземного спутникового роя частота падений обломков на Луну уменьшилась. Но именно напоследок (4,1—3,9 млрд. лет назад) произошли катаклизмы, оставившие неизгладимый след на поверхности в виде Больших Бассейнов, впоследствии заполненных темными базальтами. Причем, более древние бассейны, такие, как Море Спокойствия, имеют неправильную форму, неглубокое днище и не содержат концентрации или недостатка масс. А относительно молодые бассейны, такие, как Море Ясности, крупные и глубокие — масконовые. Похоже, что 4 млрд. лет назад что-то переменилось в механических свойствах коры, быть может, завершились подъем и кристаллизация расплавов оболочки.

Большие Бассейны и связанные с ними «моря» — генеральные черты лика Селены, структуры первого порядка, как океаны и континенты на Земле. «Моря» обнаружены лишь на видимой стороне Луны, их отсутствие на обратной стороне — неразрешенная до конца загадка. На обратной стороне отмечены неизвестные ранее мореподобные структуры без базальтового покрова — так называемые талассоиды (впадины до 500 км в поперечнике). Характернейшая форма лунного рельефа — кольцевые горы, кратеры и цирки. В отличие от Земли здесь нет линейно вытянутых хребтов — следов горизонтальных сжатий коры. Горы Луны — кольцеобразные края кратеров разной величины (рис. 34). Кратеров с диаметром более 1 км на поверхно-

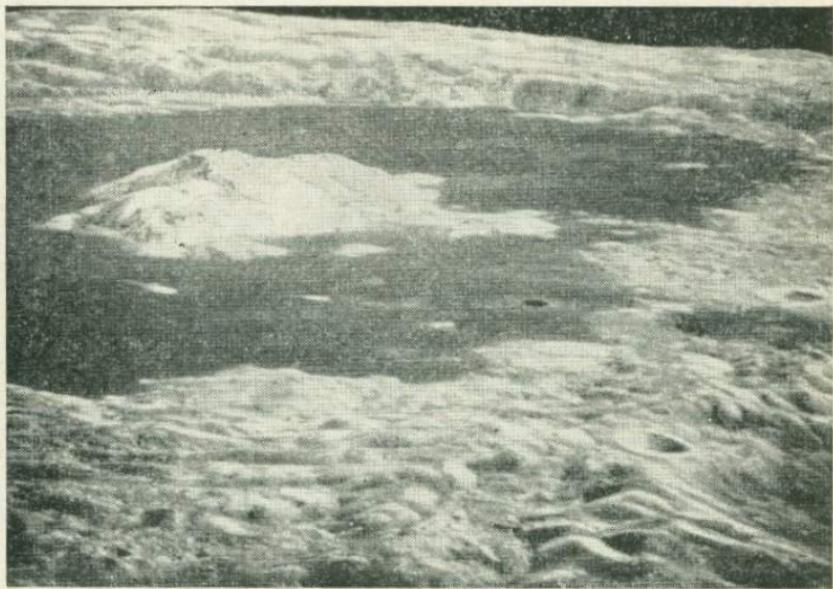


Рис. 34. Вид кратера Циолковского на обратной стороне Луны

сти Луны около миллиона, ими покрыто почти 10% поверхности, в основном в горных районах. Сплошь покрыта кратерами обратная сторона Луны, здесь свыше 600 кратеров с поперечниками 5—20 км, около 200 размерами до 50 км и около десяти — свыше 100 км диаметром.

Самый крупный лунный кратер (Клавий) имеет диаметр 254 км при высоте 0,5—1,5 км. Обычно глубины кратеров колеблются в пределах 1,5—4,5 км, достигая в отдельных случаях 9 км (Ньютон). Выдающиеся вершины, превосходящие Джомолунгму, отмечены в южнополярной области Луны.

Амплитуда лунного рельефа (12—14 км) намного больше полярного сжатия оси вращения. На Земле, наоборот, расстояние различных точек поверхности от центра за счет сжатия превышает контрасты рельефа.

Происхождение форм лунного рельефа до сих пор вызывает дискуссии между сторонниками эндогенного, вулкано-тектонического и метеоритного происхождения. В последнее время к спору присоединились сейсмологи. При дешифрировании спутниковых снимков поверхности Луны обнаружились формы рельефа иного вида: борозды, трещи-

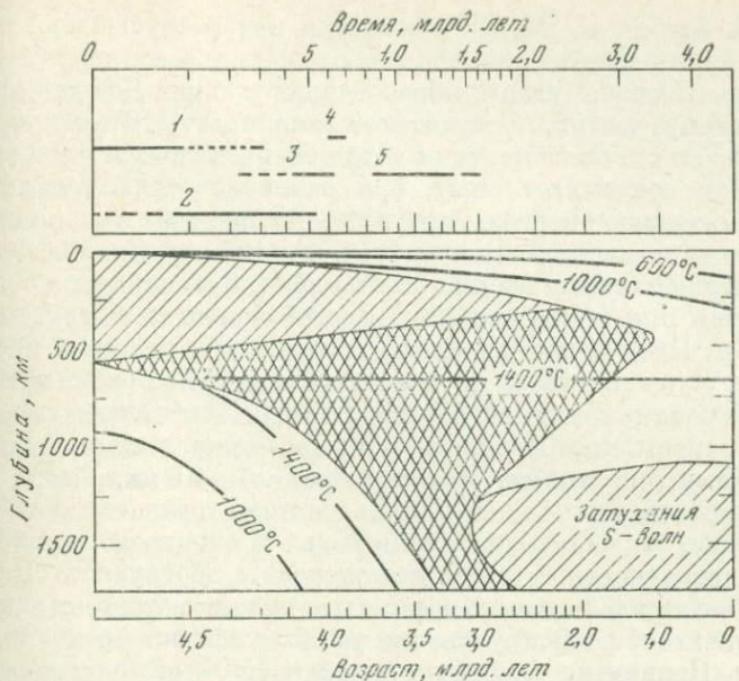


Рис. 35. Основные этапы эволюции Луны (вверху) и распределение температуры по времени (внизу) по М. Токсоцу

1 — дифференциация и образование коры, 2 — образование аортозитов, 3 — магматическая активность, метеоритная бомбардировка, 4 — образование Большых Бассейнов, 5 — заполнение «морей» базальтами. Косая штриховка — зона частичного плавления вещества лунных недр; клетка — зона полного плавления

ны, разрывы, оползни. Похоже, что удары происходили не извне, а изнутри. Какие силы породили такой рельеф, вызвали гравитационный откол грунта, прорыли борозды, переместили по склонам кратеров пласти пород?

На первый взгляд, никакой связи с ударами метеоритов. И все же связь есть. Дело в том, что подобные же особенности морфологии обнаружены в районах, расположенных на противоположной стороне Луны, в так называемых антиподальных по отношению к Большим Бассейнам, в частности лунному бассейну Моря Дождей (более 600 км в поперечнике) и Морю Восточному. Более того, новейшие съемки «Маринера-10» заметили такие же формы рельефа на Меркурии, и здесь они — антиподы Бассейна Калорес около 1300 км в поперечнике.

Д. Галт и Р. Шульц высказали интересную идею: эти загадочные формы рельефа имеют сейсмическое происхождение. Энергия удара, образовавшего Море Дождей, по-видимому, достигала гигантской величины — 10^{34} эрг. Будь она раз в сто больше, Луна могла бы расколоться на части.

Как показывает опыт, при баллистических ударах в сейсмическую энергию упругих волн переходит миллионная часть кинетической. Получается, что сейсмический эффект гигантского столкновения был на несколько порядков больше, чем при самом сильном, Лиссабонском землетрясении 1755 г. Продольные волны от такого удара первыми пронзили Луну насеквозд и, достигнув антиподальной точки, подбросили грунт вверх на 10 м. За несколько секунд поверхность преобразилась, покрылась морщинами, ямами, холмами, оползнями. Позже, через 20—40 мин, сюда по баллистическим траекториям долетели разного калибра осколки, вырванные из толщи коры. И еще позже «прибыли» поверхностные сейсмические волны, обогнувшие Луну. Пробежав вдоль поверхности тысячи километров, отражаясь от нее и фокусируясь, они усилили эффект продольных волн. Причем не только на поверхности — они образовали швы и ослабленные зоны в лунной коре до глубины нескольких километров. Не исключено, что именно по таким «заготовкам» при последующих ударах развивались разломы, по которым изливалась, заполняя лунные моря, базальтовая лава.

Последняя глава активной, внутренней жизни Луны — затопление Больших Бассейнов видимой стороны ныне замершими «морями» темных базальтов. Базальты поднимались из недр, где распад радиоактивных элементов обеспечил необходимую для их расплава температуру. Излияния носили скорее всего пульсационный характер. Пространственные вариации в составе и температуре недр Луны привели к тому, что время заполнения «морских» бассейнов затянулось от 3,8 до 3,0 млрд. лет.

На рубеже 3 млрд. лет на Луне воцарилось относительное спокойствие. Основные этапы эволюции Луны, по современным данным, представлены на рис. 35.

Данные, полученные при измерении физических полей на поверхности Луны, позволяют составить представление о том, что творится в ее недрах сегодня (рис. 3б, а также см. рис. 15).

В целом Луна однороднее Земли. Об этом свидетельствует величина момента инерции (она близка к значению для однородной сферы), а также малое различие средней плотности планеты и плотности пород мантии. Но вместе с тем, исходя из сейсмических, электромагнитных и других данных, не приходится сомневаться в радиальной зональности физических свойств Луны. Однако расслоение на оболочки здесь менее резкое и четкое, чем у Земли.

Глобальной особенностью глубинной структуры Луны является ее разделение примерно пополам по радиусу на мощную, жесткую, холодную внешнюю сферу и разогретую, частично расплавленную и пластичную внутреннюю область, между которыми выделяется переходная зона.

Внешняя оболочка Луны названа по аналогии с земной литосферой. Здесь сравнимые термодинамические условия: давление 35—40 кбар и температура около 1200°C (ниже точки плавления базальтов). Однако достигаются эти условия на глубинах 800—900 км, и это во много раз превышает мощность литосферы Земли (50—70 км под океанами, 100—200 км под континентами). В целом литосфера Луны — гипертрофированная по мощности, жесткости и сейсмической добротности литосфера Земли. Она так жестка, что миллиарды лет удерживает масконы, и так добротна, что сейсмические сигналы звенят часами и слабые толчки просвечивают Луну насквозь.

Структура литосферы слоистая, но отчетливая сейсмическая граница всего одна — раздел коры и мантии. Скачкообразное увеличение скорости сейсмических волн здесь объясняется изменением химического состава пород, переходом от богатых алюмосиликатами габбро-анортозитов к ультраосновным породам оливиново-пироксенового состава, содержащим больше окислов железа и магния.

Уникальное по сравнению с Землей явление представляет верхний слой лунной коры толщиной до 25 км. Он отличается очень низкой электропроводностью (этот своеобразный изолятор способствует успеху электромагнитных зондирований), низкой теплопроводностью (такой

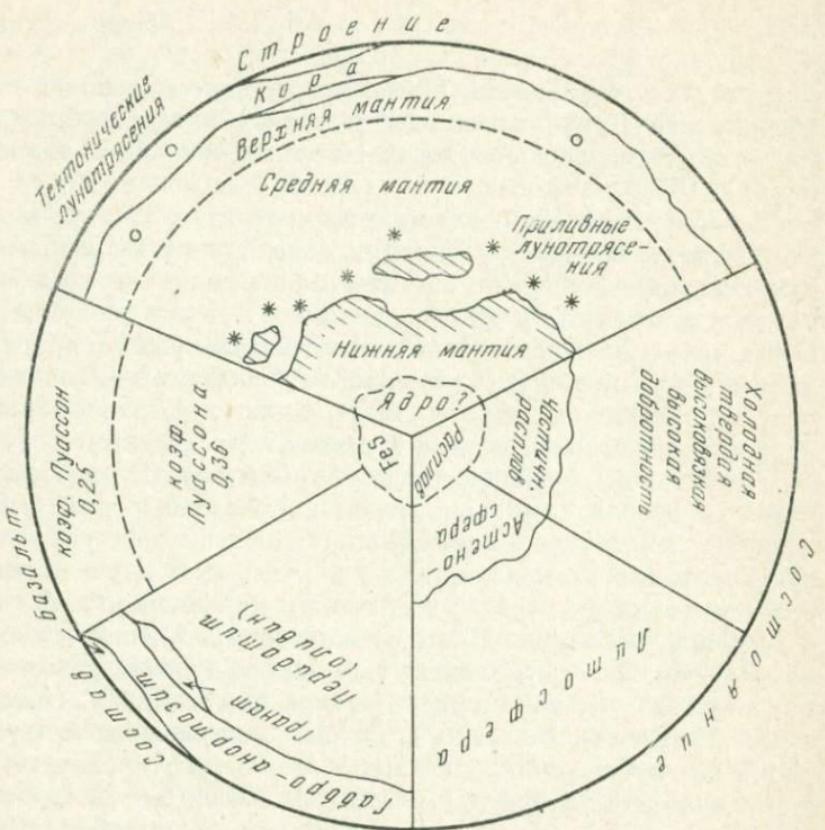


Рис. 36. Схема внутреннего строения Луны по геофизическим данным

«термостат» мешает Луне остывать слишком быстро), низкими величинами и большими градиентами роста скоростей сейсмических волн, большой скоростной неоднородностью и слабым затуханием сейсмической энергии, высокой сейсмической добротностью (отсюда долгий сейсмозвон и сверхдалнее распространение лунных сейсмических сигналов). Все это объясняется особенностью физических условий на поверхности Луны: вакуум, сухость, малая сила тяжести, сильная трещиноватость, свободное обдувание поверхности солнечным ветром.

В отличие от Земли, где скорость сейсмических волн в целом растет с глубиной, на Луне рост скоростей отмечается лишь в пределах коры. В мантии Луны скорость продольных волн не увеличивается, а скорость попереч-

ных — даже убывает. За счет этого резко увеличивается коэффициент Пуассона, характеризующий способность пород претерпевать деформации формы. Столь высокий коэффициент Пуассона, а также уменьшение добротности и вязкости, свойственные аморфным, некомпактным породам, позволили техасским сейсмологам предполагать, что средняя мантия Луны состоит из первоначально скомпонованного, но никогда не переплавлявшегося метеоритного материала. Этот сейсмически аномальный слой выделяется по электромагнитным данным как слой пониженного сопротивления.

Низкие скорости сейсмических волн в недрах Луны объясняются тем, что из-за малой массы и силы тяжести на Луне влияние роста температуры в недрах оказывается существенное, чем рост давления. В низах коры Луны давление такое же, как и в низах океанической коры Земли, имеющей в несколько раз меньшую мощность. На границе верхней и средней мантии Луны давление, как и в низах континентальной коры Земли. А в центре Луны давление такое, как в верхней мантии Земли, и на два порядка меньше, чем в центре Земли.

Переходная зона (глубже 500—600 км) характеризуется резким изменением физических свойств вещества Луны: заметно уменьшается добротность для продольных волн, более чем на порядок уменьшается электрическое сопротивление, в 100—1000 раз уменьшается вязкость, растет коэффициент Пуассона. Постепенный характер перехода от литосферы к центральной зоне подтверждается и отсутствием на записи лунотрясений фаз, отраженных от подошвы литосферы волн.

К переходной зоне относятся очаги приливных лунотрясений. Большой разброс глубин очагов и их локализация всего в трех-четырех «сейсмических швах» планетарного размера подчеркивают сложный характер перехода от литосферы к астеносфере Луны и неоднородное строение этой зоны. Повторяемость формы записи и малая энергия приливных лунотрясений увязываются с представлением о том, что средняя мантия Луны сложена из однородных блоков относительно небольшого (десятка километров) размера.

Внутренняя зона Луны (глубины более 800—1000 км), где резко ослабевает энергия поперечных волн, соответствует уменьшению сейсмической добротности поперечных

волны до величины 100—200, а продольных — до 500. Тем, что поперечные волны в ней не проходят, внутренняя зона Луны напоминает внешнее ядро Земли, которое на основании этого кардинального факта считается эффективно жидким. Однако на Луне она названа астеносферой, потому что давление здесь такое же (более 35 тыс. атм), как в астеносфере Земли на глубинах 100—150 км, и вязкость тоже падает до значений 10^{20} — 10^{21} пуз. По-видимому, астеносфера Луны частично расплавлена, капли расплавленного базальта появляются в перидотите при соответствующем давлении при температуре 1450—1550°С. В астеносфере Земли также отмечается частичное плавление зерен базальта, однако поперечные волны через нее проходят, хотя скорость их падает и энергия ослабевает. Эта разная реакция на распространение поперечных волн объясняется существенно различной мощностью астеносферы Земли и Луны и их различной ролью в тектонической жизни планет. Астеносфера Земли имеет толщину 100—200 км, что составляет $\frac{1}{30}$ — $\frac{1}{60}$ радиуса; астеносфера Луны в 10 раз мощнее и занимает половину лунного радиуса.

Современные представления о структуре центральной зоны Луны сугубо ориентировочные. Уменьшение скоростей продольных волн до значений 3,6—5,2 км/с не противоречит предположению о существовании в центре Луны расплавленного железо-сульфидного ядра радиусом 200—400 км. Ограничение на размеры ядра ставит величина момента инерции, которая измерена с высокой точностью. Расчеты показывают, что для модели с корой, имеющей плотность 3 г/см³, и однородной до самого центра мантией (плотность 3,43 г/см³) момент инерции должен быть 0,399. В случае железо-сульфидного ядра с радиусом 700 км момент инерции уменьшится до 0,391. Если же ядро чисто железное, то оно окажется незамеченным в величине момента инерции при радиусе не более 450 км.

Горизонтальная изменчивость физико-химических свойств Луны или ее так называемая латеральная неоднородность — не менее существенное качество, чем радиальное расслоение на сферические оболочки. Латеральная неоднородность, хотя и представляет структурную особенность второго плана, играет узловую роль в планетарной эволюции, являясь одновременно ее причиной и следствием. Ныне уже достаточно данных, чтобы не сомневаться в самом факте ее существования.

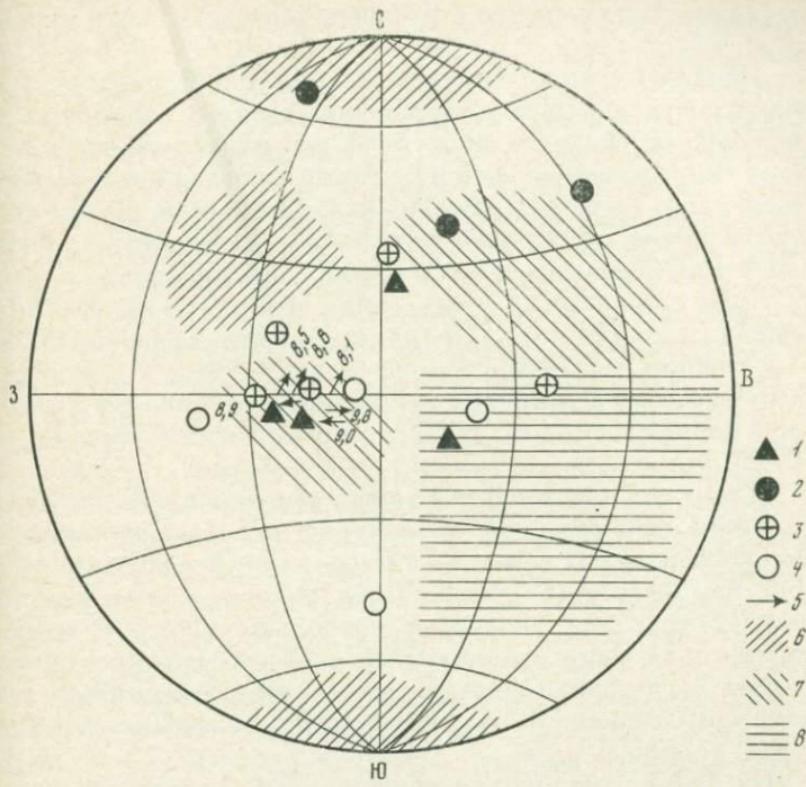


Рис. 37. Неоднородная структура Луны

1 — станции сейсмической сети «Аполлон», 2 — значение скоростей в верхней мантии от 8,5 до 9,2 км/с, 3 — то же от 7,4 до 8,0, 4 — то же от 6,3 до 6,7 км/с, 5 — направление и величина кажущейся скорости под границей кора — мантия, км/с, 6 — мощность коры, по гравитационным данным, менее 50 км, 7 — то же 50—70 км, 8 — то же более 100 км

О существовании латеральной неоднородности недр Луны, прежде всего в ее литосфере, свидетельствует гидростатическая неуравновешенность фигуры Луны и смещение центра масс от геометрического. Это подтверждается новыми геофизическими измерениями: существованием магнитных аномалий размерами до сотен километров, аномальной электропроводностью Моря Дождей и Моря Ясности, различающимися в 1,5 раза тепловым потоком районов Апеннин и Тавр-Литтров, наконец, присутствием масконов в гравитационном поле Луны.

Сейсмические данные надежно подтверждают неоднородность различных слоев (рис. 37). Прежде всего, чрез-

вычайно неоднороден за счет трещиноватости верхний слой коры.

Трещины ударного происхождения и кратерный рельеф поверхности вызывают отклонения свойств сейсмических сигналов от среднего и затрудняют анализ наблюдений. Кора Луны освещена сейсмическими волнами лишь в Море Познаний, здесь она двухслойная, мощностью 60 км. Распространение на другие регионы Луны гравитационных измерений показывает, что минимальная кора должна быть на Луне у полюсов (40 км), самая мощная — на обратной стороне (до 150 км). По данным ряда исследователей, в восточном полушарии кора мощнее, чем в западном. В Море Дождей и других масконовых «морях» ожидается кора мощностью около 50 км, в немасконовых «морях» — 70—80 км.

В верхней мантии Луны также отмечены региональные различия сейсмических характеристик. Прежде всего, в высокоскоростном блоке между станциями «Аполлон-12 и -14», как было уже показано, обнаружена тонкая неоднородная структура скоростей продольных волн в верхах мантии — высокие субширотные скорости и относительно низкие — субмеридиональные, что может объясняться как блоковым строением, так и сложным рельефом границы кора — мантия.

На VIII лунной конференции в Хьюстоне (март 1977 г.) группа Г. Латема привела данные о распределении величин скоростей продольных волн для верхней 200-километровой толщи литосферы. Величины скоростей варьируют в широких пределах (6,3—9,2 км/с). Область севернее 40° с. ш. характеризуется наибольшими скоростями, это увязывается с представлениями о более мелком залегании плотного подкорового субстрата в районах масконовых морей. Самые низкие скорости обнаружены в горных регионах асейсмичной юго-восточной четверти видимого диска Луны. Сейсмическая неоднородность структуры присуща, по-видимому, и более глубоким недрам, ее индикатор — выразительные зоны сейсмичности с контрастным рельефом границы литосферы и астеносферы.

Все данные говорят в пользу существования на Луне блоков планетарного масштаба, разделенных сверхглубокими разломами, это согласуется с развиваемой Е. Л. Рускол идеей образования Луны из нескольких протолун.

Есть ли на Луне «тектоника плит»?

«Тектоника плит» в применении к Земле подразумевает ныне популярную концепцию, объясняющую геолого-геофизические особенности ее лика. Она представляет возрожденную на новом, экспериментальном материале мобилистскую гипотезу дрейфа материков А. Вегенера и вкратце заключается в следующем.

Литосфера Земли, ответственная за геологическую жизнь поверхности, подобно скорлупе ореха, расколота на отдельные глыбы. Больших глыб немного, семь — десять. Внутри глыб все спокойно, геотектоника вершится на периферии.

Словно льдины в полярном море, глыбы движутся поступательно и вращательно, расходятся, сталкиваются, трутся друг о друга. Движение плит совершается независимо, а их взаимодействие приводит к поразительным по масштабам явлениям: землетрясениям, извержениям вулканов, образованию гор, рождению коры континентов.

Взаимодействие плит бывает трех видов. В одних местах (рифтовых зонах) плиты расходятся, из недр поднимается горячий пластичный материал мантии, рождая кору океанов (Атлантический океан, система Восточно-Африканских рифтов). В других местах при столкновении континентальной и океанической плит последняя, более тяжелая, ныряет глубоко в мантию, крошится, трещит землетрясениями. Ее сложная переработка в мантийном пекле приводит к извержению вулканов и в итоге к образованию континентальной коры (Курило-Камчатская зона). Если сталкиваются континентальные глыбы равной плотности, вздымаются горы (Гималаи). Наконец, взаимодействие третьего типа — глыбы скользят друг около друга, а на их контакте, в так называемом трансформном разломе, расступят напряжения, готовя катастрофические землетрясения (Сан-Андреас в Калифорнии).

Тектоника плит объясняет многие основные геолого-геофизические закономерности Земли, в особенности в океанических регионах.

Глубинные источники движения плит ученые видят в разных процессах: плотностной дифференциации вещества мантии, фазовых превращениях минералов, «растекании» коры под весом ее мощностных неоднородностей. Благо-

приятные для фазовых переходов сочетания давлений и температур имеют место в верхней мантии Земли на глубинах 300—700 км.

Многие исследователи думают, что «кухня» гравитационной дифференциации вещества Земли находится на половине радиуса планеты — в тонком слое на контакте твердой мантии и расплавленного ядра. Выплавившаяся из мантийного материала тяжелая фракция, как металл в доменной печи, опускается на дно слоя, наращивая ядро. А легкая — «шлак» пробирается тысячекилометровыми путями по расслабленным зонам мантии, штая «жизненные токи» планеты.

Предполагаются разные механизмы дифференциации и начинающейся затем конвекции. То ли это вслывание легкого материала крупными квантами с образованием больших зон верхней мантии, а потом вторичное плавление и разделение в верхних слоях, утолщение коры и ее горизонтальное «расплывание», подобно капле масла на воде. Или непрерывно действующие конвективные ячейки в нижней мантии с вертикальными восходящими и нисходящими токами и горизонтальными ветвями в астеносфере и на границе мантии и ядра порождают тектонику плит.

А скорее всего совокупно действуют многие процессы. Ведь природа «изощренна, но не злонамерена», чтобы утаить что-либо из арсенала своих сил и процессов.

В любом варианте признается, что разделение вещества и его движение в недрах — источник геотектоники. Планета «живая», пока хватает вещества для перемешивания и достаточно высоки его температуры.

А как обстоит дело с тектоникой Луны, происходят ли там и какие именно внутренние процессы?

Несколько лет назад казалось резонным мнение о «тектоническом сне» и «тепловой смерти» Луны. Однако открытие и изучение класса энергичных тектонических лунотрясений, инструментальные наблюдения быстропроявляющихся явлений на поверхности, высокий тепловой поток из недр, истечение из недр инертных газов (аргона и радона) показали, что в лунных недрах еще теплится «жизнь».

Сегодня можно говорить о процессах неотектоники на Луне, хотя их масштаб и темпы несоизмеримо меньше земных. Пространственно-временная связь сейсмических и скоротечных явлений, их приуроченность к базальтовым

морям, обрисовывает планетарную картину сейсмотектонической активности Луны.

С конца прошлого века астрономы, научная эрудиция и добросовестность которых не вызывают сомнений, сообщали удивительные факты. В разных точках поверхности видимой стороны Луны происходили заметные для глаза перемены: возникали, росли и сокращались темные пятна, появлялась красная окраска, менялся блеск участков размёром в несколько километров, а то и целые «моря» «затуманивались». Расширяющееся с восходом Солнца темное пятно на юге Моря Дождей так поразило нашего современника астронома Пикеринга, что он высказал прямотаки фантастическую гипотезу, что это — «полчища насекомых».

Большинство таких феноменов привязано к кратерам, происхождение которых, по мнению многих геологов, считается вулканическим. В ноябре 1958 г. пулковский астроном Н. А. Козырев наблюдал в кратере Альфонс линию углерода С₂, возможно, означающую истечение газов. Наблюдение повторилось почти ровно через год в октябре 1959 г. Через 5 лет, фотографируя в тепловых лучах затмение Луны, американские астрономы обнаружили, что в 80-километровом кратере Тихо температура была на 100° выше, чем в окружающей местности. Подобные же эффекты наблюдались в кратерах с лучевыми системами: Аристарх, Коперник, Кеплер, Прокл. Вспомним и об исчезнувшем в центре Моря Ясности кратере Линней или историю о том, как кратеры Близнецов Мессье перестали походить друг на друга.

Накопилось уже до 400 таких сенсационных сообщений. В XVI в.—два, в XVII в.—шесть, в XVIII в.—52, в XIX в.—113, в XX в.—210.

Но для того, чтобы эти загадочные события перешли из ранга сенсационных сообщений в категорию научных фактов, нужна их документальная фиксация и какой-то вариант объяснения.

Сотрудница Лунного института в Хьюстоне Барабара Миддлхарст много лет занята разгадкой быстротечных явлений на Луне, благо в последние годы более 20 из них инструментально зафиксированы. Когда явления изучили статистически, оказалось, что в их календаре имеется заметный пик в перигее и менее резкий — в апогее. Кроме того, концентрация истекающего из недр радиоактивного

газа аргона имеет заметную периодичность — 206 сут. Точки, в которых отмечены интригующие явления, приурочены к кратерам вулканического происхождения (хотя и давно потухшим) и тяготеют к базальтовым морям видимой стороной Луны.

Астрономы вздохнули с облегчением и начали выбираться из тутика нераспутанных «почему» после накопления сейсмограмм с записями глубокофокусных приливных и мелкофокусных тектонических лунотрясений. Сравнение карт сейсмичности и быстротечных явлений выявило закономерные связи между ними (рис. 38).

Двенадцать из быстротечных событий произошли поблизости (не далее 150 км) от таинственных поверхностных явлений в кратерах Манилиус, Атлас, Плато, Шевольер, Прокл, Геркулес (правда, происходили они в разное время). Что касается приливных эпицентров, то большой сейсмический пояс, протянувшийся между 20 и 30 меридианами западной долготы, окружен с запада меридиональным поясом лучевых кратеров от Тихо на юге до Аристарха на севере (они причислены к «таинственным быстротечным явлениям»), а на востоке окаймлен цепочкой кратеров: Птоломей, Альфонс, Арзахель, Табит, Пурбах, Региомонтан, Вольтер. Их расположение вдоль одной прямой резонно объясняет принадлежностью к одному древнейшему вулканическому поясу.

Возникла идея о существовании каналов связи между зонами действия природных явлений разного класса. Быть может, это вертикальные каналы, по которым распространялись газы. Подобные каналы известны на Земле в районах вулканических кимберлитовых трубок. Их протяженность по глубине в Сибири, Африке, на плато Колорадо достигает 100 км. Когда искусственные спутники Луны проводили съемки ее поверхности с высоты 100 км, в центре некоторых кратеров отмечались участки пород, как бы просверленные потоками газов. А в том, что газы обильно выделялись из расплавленных горных пород Луны 4 млрд. лет назад, сомнений нет. Кстати, их действие могло бы объяснить происхождение некоторых кратеров, для которых не годятся ни ударный, ни чисто вулканический вариант. Образование таких кратеров удалось воспроизвести в лаборатории, пропуская с разной скоростью струи газа через лунный грунт и пыль.

В первый миллиард лет после рождения Луны ее по-



Рис. 38. Схема современной тектоники Луны

1 — быстрые течения явления, 2 — эпицентры тектонических лунотрясений,
3 — пояса сейсмичности

верхность сильно деформировалась под ударами крупных метеоритов. В Луне возникали выбоины глобального масштаба — Большие Бассейны. Одновременно столь сильные сотрясения могли образовать серии весьма глубоких трещин. Эти трещины и тектонически ослабленные зоны послужили каналами для излияния лавы, заполнившей лунные моря. Они же стали зонами, вдоль которых до сих пор происходят подвижки, фиксируемые сейсмометрами.

По-видимому, на Луне существует глобальная система сверхглубоких разломов или ослабленных зон, которые разбивают ныне мощную литосферу Луны на гигантские глыбы. На контактах между ними проявляется разнообразная сейсмичность Луны. По ним происходило истечение базальтовой лавы, заполнившей «моря».

И хотя литосфера Луны уже давно остыла, хотя ее мощнейшая глыба почти полностью парализует тектоническую активность недр, этого «почти» достаточно, чтобы изумлять земных наблюдателей. Должно быть газы, вы свобождающиеся в центральной расплавленной половине Луны, как-то умудряются нет-нет да пробираться к поверхности, вызывая быстротечные явления. Их питает центральная разогретая и пластичная половина Луны, не дающая заглянуть глубже поперечным сейсмическим волнам. По-видимому, вязкость в той «астеносферной» зоне низка и соизмерима с вязкостью астеносферы Земли, и здесь существуют конвективные потоки вещества. Однако скорости перемещения вещества (десяти доли сантиметра) на 1—2 порядка ниже, чем на Земле в зоне контакта мантии и ядра.

Флюиды из центральной зоны, проникая в подошву литосферы в соответствии с гравитационным расписанием, впрыскивают в переходную область разогретый материал — смазку для мгновенных смещений блоков вдоль готовых трещин. Однако мощь этих «инъекций» невелика, а монолит литосферы огромен, так что ни расколоть, ни передвинуть его конвективные потоки лунной «астеносферы» не в состоянии. Мощная литосфера парализует «дыхание» лунных недр — «тектоники плит» на Луне заведомо нет.

Не исключено, что в вышележащей средней мантии конвекция может протекать в твердой фазе, а в жестком и холодном внешнем слое (коре и верхней мантии) перенос тепла происходит по механизму теплопроводности.

Многие ученые склонны называть конвективный процесс прогрессивным источником накопления тектонических напряжений. Их «брос» управляет приливными силами и реализуется по-разному на разных этажах лунного здания — слабыми периодическими толчками на больших и редкими сильными сотрясениями на малых глубинах.

Другим источником векового накопления упругой энергии может быть проседание «масконов», приводящее к образованию в зонах обрамления системы сбросов, уходящих далеко на глубину. Таким образом, на Луне имеют место медленные и неинтенсивные вертикальные движения, однако отсутствуют сколько-нибудь заметные горизонтальные смещения, свойственные тектонике плит.

В далеком прошлом лунные недра были горячее и их

жизнедеятельность активнее. 4,5—3 млрд. лет назад конвекция вещества охватывала в основном внешние зоны Луны, затем отступила на глубину. Могла меняться и структура конвективных ячеек.

Одноячейстая конвекция, имеющая восходящий поток в центре Океана Бурь и падающий на обратной стороне, могла бы объяснить асимметричное существование «морей» только на видимой стороне Луны, смещение центра масс, большую мощность коры на обратной стороне, «бутор» в рельефе обращенной к Земле половине Луны.

Интенсивная конвекция в недрах Луны в прошлом могла быть источником соизмеримого с земным магнитного поля. В дальнейшем, по мере исчерпывания внутренних тепловых ресурсов, конвекция в недрах затихла, пропало стабильное дипольное магнитное поле, потухли вулканы, ослабли и стали редкими лунотрясения.

Сегодняшняя Луна близка к состоянию теплового равновесия: излучение тепла через поверхность соответствует или слегка превосходит его генерацию в недрах. При наблюдаемом тепловом потоке расход энергии составляет 10^{26} эрг/год, т. е. около $2 \cdot 10^{36}$ эрг за всю планетарную историю Луны. Это превышает ее теплосодержание в состоянии полного плавления ($1,6 \cdot 10^{36}$ эрг) и энергию гравитационной связи Луны ($1,2 \cdot 10^{36}$ эрг).

На Земле теплопотери ежегодно достигают 10^{28} эрг, а суммарные — около $7 \cdot 10^{37}$ эрг. Это меньше энергии, выделившейся при образовании ядра (около 10^{38} эрг). Возможно, ключ к пониманию различий тепловых режимов планет кроется не только в различии абсолютного количества генерируемого тепла, но в их «способности» превращать его в другие виды энергии.

Общая энергия, выделяемая землетрясениями в год, лишь на 2—3 порядка меньше теплопотерь Земли. Если посчитать, что «тепловая машина Земли» имеет КПД 1%, то получается, что значительная доля тепловой энергии реализуется в землетрясениях (остальная — в других геотектонических процессах).

На Луне ситуация совершенно иная: менее одной миллиардной части ее тепловыделений превращается в сейсмическую энергию — остальное улетучивается в космос бесполезно для селенотектоники. Отсутствие на Луне механизма преобразования тепловой энергии в механическую согласуется с представлениями о важной роли в геотекто-

нике фазовых превращений кристаллов — на Луне не достигаются необходимые для этого температуры и давления. Тектоническая жизнь Луны парализуется мощной, жесткой, холодной литосферой. В ее разогретой астеносфере могут существовать конвективные потоки вещества, но они слабы и недостаточны, чтобы расколоть или передвинуть литосферу Луны, и лишь в состоянии вызвать слабые потрескивания близ подошвы и кровли литосферы, да редкие, слабые истечения газов — последние вздохи некогда горячего дыхания лунных недр.

Луна о будущем Земли

Луну недаром нарекли «космической сестрой» Земли. Ее рождение — процесс, логически завершающий создание самой Земли из околосолнечного протопланетного облака. Когда Земля в основном скомпоновалась, из околоземного спутникового роя возникла ее сестра, по рождению младшая.

Нет оснований думать, что младенческая пора обеих планет протекала по-разному. Дыхание раскаленных недр и метеоритные ливни могли поспорить по силе своего воздействия на тела и лик планет. Катализмы докеологической и доселенологической истории не раз путали и останавливали «радиоактивные часы». Ни на Земле, ни на Луне не найдены следы первого полмиллиарда лет их существования. Попытки осветить младенчество (первые 0,5—1 млрд. лет) истории Земли могли бы оказаться тщетными, если бы не беспримерные космические полеты автоматов и экспедиций последнего двадцатилетия.

Единственный вместе с ней рожденный спутник Земли, но в отличие от нее, не размытый с поверхности ветрами и водами и не переплавленный столь жарким дыханием недр, Луна явила геологам образ младенчества Земли. Здесь найдены самые древние образцы — ровесники планетной системе и получены недвусмысленные доказательства того, что 4 млрд. лет назад уже существовала кора и происходила интенсивная дегазация пород, однако сила притяжения маленькой Луны не довела ее до создания атмосферы.

Общность происхождения и идея сходства основного процесса эволюции планет, по крайней мере земной групп-

пы, вселяла геологам надежду отыскать следы «лунной» стадии и на Земле.

Еще не отозвенел сейсмическим звоном удар метеорита об обратную сторону Луны, позволивший впервые заглянуть до середины ее радиуса, как с Дальнего Востока нашей страны была принесена феноменальная новость — обнаружены земные реликты лунного рельефа и возраста.

В междуречье р. Сутама и Олекма на юге Алданского щита исследованы образцы катархейского времени — породы основного состава, близкие к габброноритам и кварцевым диоритам. Они залегают в виде пластов, линзообразных залежей, выклинивающихся прослоек. Комбинации минералов, высокая плотность и скорость сейсмических волн в образцах — все указывает на то, что породы подвергались высокой степени метаморфизации в условиях больших давлений (10—12 тыс. атм.) и температур (700—900° С). По содержанию главных окислов (кремния, алюминия, железа, магния, кальция, титана и др.) сутамские сланцы близки к толеитовым базальтам океанов Земли и в то же время к лунным базальтам. К тому же их возраст по радиогенным определениям более 4,0 млрд. лет. Даже имея в виду погрешности оценок, ясно, что в обнаружениях р. Сутам выходят на поверхность самые древние свидетели младенчества Земли. К тому же на Алданском щите господствуют окружные кольцевые структуры типа чащ с диаметрами около 100 км («лунные кратеры») и здесь же поблизости располагаются крупнейшие в мире массивы аортозитов, столь редкие на Земле и столь типичные для «континентов» Луны.

Таким образом, выделяется самая ранняя планетарная стадия Земли, по праву названная «лунной». Ее неверно считать докеологической, ибо она доступна изучению геологическими методами как на Луне, так и на Земле. 4,5—4 млрд. лет назад на поверхности Земли не было еще ни океанов, ни атмосферы. Каменно-голая, она была усеяна конусами вулканов и изолированных кольцевых впадин — древнейших кальдер, где накапливались продукты расплавления и дегазации.

Земная кора на этой стадии еще не имела горизонтальных напряжений, платформ и геосинклиналей. Поверхность была сложена магматическими породами основного состава, среди тектонических структур преобладали овальные впадины.

Еще незащищенная атмосферой поверхность Земли, как по сию пору лунная, «поливалась» потоком метеоритов. Сколько ни длительно смывали следы их мощных ударов волны и ветры последующих миллиардов лет, они и сегодня просвечивают сквозь толщу отложений. По-видимому, на самой ранней стадии Земля не избежала катаклизмов, подобных тем, которые образовали Большие Бассейны Луны.

Только эти планетарного масштаба формы рельефа сегодня на Земле не сохранились, слишком много утекло с тех пор воды, переплавилось вещества, передвинулось континентов.

Однако последующие судьбы сестер сложились по-разному.

Земля жила и продолжает жить содержательной жизнью, полной внутренних событий: землетрясений, извержений вулканов, вздыmania гор, движения континентов. На ней образовались атмосфера и гидросфера, возникла и совершенствовалась растительная и животная жизнь. Течение проводящего вещества в недрах создало «магнитный скафандр», сохраняющий все живое от смертоносного дыхания космоса.

У Луны все иначе. Внутренних сил ее ввиду малой массы и более низкой температуры недр хватило недолго. Нет на Луне магнитосферы, атмосферы, гидросферы, не было и не будет жизни. Не горные кряжи и не новые виды организмов расставили вехи на космическом пути Луны, а внешние события — удары метеоритов, создавшие структуру поверхности.

И все же было в эволюции планет нечто важное, общее, что позволяет через совсем еще мало изученную Луну взглянуть на будущее Земли.

Это общее — формирование оболочек планет, хотя у Луны процесс этот был более вялым и кратким. Из того факта, что, согласно гипотезе О. Ю. Шмидта, Земля образовалась из холодного протопланетного облака (правда, есть и другие точки зрения: конденсация из горячего облака, выделение ядра в процессе возникновения из частиц) и сперва была однородна, а теперь предстает перед учеными расслоенной на оболочки, следует, что 4,5 млрд. лет в ней действовал мощнейший механизм, способный двигать горы отнюдь не в переносном смысле. По большому счету это — механизм регулирования термического состояния

планеты, которым Земля «спасает» сама себя от перегрева.

Область самой резкой смены свойств вещества Земли находится при переходе от мантии к ядру. По мнению ряда исследователей, здесь — «сердце» планеты, разгоняющее по ее телу «токи» тектонической жизни.

Вначале, пока ядро было небольшим, тектоническая активность Земли была невысокой. С увеличением ядра процесс дифференциации ускорился, примерно 1 млрд. лет назад он достиг максимума. Затем в связи с уменьшением концентрации тяжелой фракции в мантии процесс начал затухать. И все же полагают, что пройдет еще около 2 млрд. лет прежде, чем Земля начнет остывать.

А с Луной это произошло давно, 3 млрд. лет назад. Ее меньшая планетарная масса и низкая температура недр привели к преждевременной старости. Младшая по рождению, Луна оказалась старшей сестрой Земли по развитию. Такой важный тектонический механизм, как движение вещества в ходе полиморфных превращений, который вносит заметный вклад в геотектонику, для сelenотектоники не существует.

На Луне тоже происходила плотностная дифференциация вещества, кристаллизация коры из расплава, катастрофические лунотрясения и извержения вулканов, но все это — в далеком прошлом. Старенькая, холодная и пассивная Луна предрекает будущее Земле.

Когда-нибудь и на Земле перестанут меняться очертания материков, затихнут вулканы, прекратятся землетрясения. Гигантская атмосфера своим давлением выровняет живописный рельеф нашей неповторимой планеты. Но будет это нескоро, и, надо думать, наука к тому времени откроет необходимые людям источники энергии для передвижения и устройства жизни в нужных местах и желательным образом.

* * *

Реконструкция эволюционного пути Луны проливает свет на ряд темных мест в прошлом и будущем Земли.

Земля и Луна возникли в едином процессе гравитационного объединения газово-пылевых частиц околосолнечного протопланетного облака. Несколько позднее образование Луны в околосземном спутниковом рое обусловило

дефицит железа и летучих веществ и преобладание кремнезема и тугоплавких элементов по сравнению с Землей.

Начальный этап эволюции планет, не зафиксированный радиоактивной памятью, по-видимому, имел много общего: интенсивная дифференциация вещества с выплавлением коры, ударное образование больших бассейнов и метеорных кратеров.

Луна дождалась посланцев с Земли в том виде, какой она стала 3 млрд. лет назад. К этому времени иссякли ее внутренние силы, ограниченные малой массой, низкой температурой и малым давлением в недрах.

Несмотря на слабую выраженность эволюционных процессов на Луне, их общая направленность подобна земной: расслоение первоначально однородного тела планеты на оболочки, различающиеся физическими свойствами.

Луна находится на более зрелой ступени лестницы планетарной эволюции. Она остывает — поток тепла через поверхность превосходит радиоактивный разогрев недр. Луна не обладает способностью Земли превращать тепловую энергию в тектонические движения и сотрясения. Ее жесткая, мощная, холодная литосфера парализует тектоническую активность немощной астеносфера — тектоники плит на Луне нет, лунотрясения тектонической природы крайне редки.

Взгляд на Землю сквозь «испещренное кратерами запыленное лунное окно» позволяет лучше понять докембрийский этап развития Земли и грядущие перспективы, когда Земля станет пассивной, остывающей планетой.

Луна в космосе, как древний текст, помогающий понять историю Земли, и как современный архив Солнца, хранящий в реголите записи, имеющие прямое отношение к будущему благополучию людей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почти 20 лет, прошедших с момента запуска к Луне первого космического корабля, принесли науке много нового и подчас неожиданного. Миллиарды лет неуклонно удаляясь от Земли, Луна в последние годы стала ближе и понятнее людям. Можно согласиться с метким замечанием одного из видных сelenологов: «Из астрономического объекта Луна превратилась в геофизический».

Приоткрылась завеса над тайнами ранней молодости Луны, Земли и, по-видимому, планет земной группы. С Луны привезен самый древний кристаллический образец — кусок аортозита, увидевший Вселенную более 4 млрд. лет назад. В девяти точках Луны изучен химический состав пород «морей» и «континентов». Точные приборы измерили силу тяготения, напряженность магнитного поля, поток тепла из недр, проследили за особенностями сейсмических трасс, обмерили формы рельефа. Физические поля засвидетельствовали радиальное расслоение и неоднородности вещества и свойств Луны.

Многое прояснилось, но многое осталось покрытым туманом неоднозначностей — открытия, как это часто бывает, породили новые вопросы.

Так, мало кто из исследователей сомневается в быстрой и короткой планетарной эволюции Луны, но по-прежнему идут горячие споры о ее происхождении. Ранний магматизм и особенности химического состава неплохо согласуются с гипотезой образования Луны из нескольких протолун в околосземном спутниковом рое в ходе создания самой Земли. Но никакие аргументы не могут заставить авторов взаимоисключающих гипотез забросить свое детище. Скептики же считают, что ввиду скучности наблюдений еще рано останавливаться на каком-то из вариантов.

По количеству дочерних радиоактивных изотопов восстановлен календарь возникновения лунных «морей», в семи из них достоверно измерены положительные аномалии

силы тяжести, однако тайна происхождения масконов до конца не раскрыта.

При помощи лазерных измерений обнаружена асимметрия рельефа видимой и обратной стороны, но непонятна причина 3-километрового смещения центра масс от геометрического — ведь все масконы вместе способны сдвинуть центр масс Луны к Земле лишь на 40 м.

Отсутствие пород моложе 3 млрд. лет говорит о давно замершем вулканизме, но тогда как понять истечение газов из кратера Альфонс?

Выяснилось, что долгий «сейсмозвон» рождается рассеянием волн в неоднородном, трещиноватом, но сухом и сейсмически добротном «покрывале» Луны, но непонятно исчезновение поперечных волн в ее внутренней зоне.

На Луне нет сильного стабильного дипольного магнитного поля, но не означает ли высокая остаточная намагниченность пород, что 3 млрд. лет назад в недрах Селены работала «динамо-машина»?

По многим важным особенностям Земля и Луна оказались космическими родственницами. Это касается как единого процесса образования и сходной молодости планет, так и направленности планетарного развития — расслаивания некогда однородного тела планет на сферические оболочки, различающиеся механическими свойствами и химическим составом. Правда, у Луны этот процесс уже завершился и притом на стадии меньшей выразительности. Кроме того, из-за низких давлений и температур в недрах Луны не действует такой существенный тектонический механизм, как полиморфные превращения минералов без изменения химического состава.

Достаточно сходен и химический состав пород планет. Базальты лунных морей и анортозиты континентов сродни земным. Во всяком случае на Селене не встречено химических элементов, выходящих за рамки таблицы Менделеева, и найдено всего четыре новых минерала.

Однако во многом родство Земли и Луны оказалось весьма дальним. Жизнь Земли полна тектонических бурь — землетрясений, извержений вулканов, вздыманий гор, движений континентов. Луна асейсмична и тектонически пассивна — тектоники плит на ней сейчас нет, а конвективные потоки в центральной зоне заведомо бессильны расколоть и передвинуть мощную холодную литосферу, парализующую тектоническую энергию планеты.

Заметно различаются и селенофизические поля. Резких сейсмических границ, кроме границы кора—мантия, в недрах Луны не обнаружено, скорость сейсмических волн в среднем не растет, как на Земле, а уменьшается с глубиной вследствие малого давления. Дипольное магнитное поле отсутствует, аномалии магнитов изостатически не скомпенсированы, тепловой поток неожиданно велик. Луна покрыта уникальным слоем реголита — термо- и электрическим изолятором, ловушкой сейсмических волн. Существование внутреннего железного ядра весьма проблематично, даже если оно есть, то это не отражается на измерениях момента инерции и средней плотности планеты.

Наблюдатель с Луны может увидеть всю Землю, с Земли мы видим лишь 60% территории Луны. У Луны есть такие образования, на ней происходят такие явления, которых не встретишь на Земле: гигантские «моря» без воды, масконы, сверхдальнее распространение сейсмических волн, бесчисленные кратеры и почти однородный слой реголита. Но в то же время на Луне нет атмосферы, гидросферы, жизни, большого железного ядра, сильных (тектонических) лунотрясений, современного вулканизма, магнитного полюса.

Можно сказать, что жизнь Земли и даже в известной мере формы ее поверхности определяются внутренними факторами, тогда как тектоника Луны в основном космического происхождения — большинство лунотрясений зависят от гравитационных полей Земли и Солнца.

Зачем понадобилась землянам Луна, не напрасно ли расходовались силы и средства на беспримерные космические полеты? Ведь лунные полезные ископаемые бесполезны для землян — лунному «клондайку» не бывать.

Нет, не напрасно. Луна вознаградила пытливых и отважных астронавтов и организаторов космических полетов, а вместе с ними и все человечество — паметилось решение ряда фундаментальных научных проблем. Приоткрыта занавеса над тайной рождения и первых шагов Земли и Луны во Вселенной. Найден самый древний образец и определен возраст Земли, Луны, планет солнечной системы. Нетронутая ветрами и водами поверхность Луны демонстрирует проторельеф Земли, когда еще не было океанов и атмосферы и метеоритный дождь свободно сыпался на Землю. Почти лишенная внутренних современных процессов, Луна представляет идеальную модель для изучения роли

внешних факторов. Особенности приливных лунотрясений помогают поиску землетрясений гравитационной природы, несмотря на то что на Земле картина осложнена и запутана сложнейшими тектоническими процессами. Выяснение роли космических факторов в сейсмотектонике поможет делу прогноза и предотвращения землетрясений.

Исходя из лунного опыта можно наметить ряд усовершенствований геофизических методов исследования: обоснование сейсмической модели детерминированно-случайной среды, разработка эффективных методов электро-телеутического зондирования недр и др.

Хотя тектоническая жизнь Луны не столь активна и сложна, как жизнь Земли, здесь еще остается немало нерешенных проблем. Их могли бы разъяснить новые наблюдения в узловых регионах лунной активности; желательно иметь геофизические маршруты, пересекающие масконы, определить мощность коры на континентах и обратной стороне, просветить переходную зону между литосферой и астеносферой, подтвердить или опровергнуть эффект внутреннего ядра Луны. Можно надеяться, что мы еще станем свидетелями новых геофизических экспериментов на спутнике Земли.

Однако сейчас геофизические измерения на Луне пристановлены.

Взоры ученых, приемные антенны, трассы космических кораблей обращены теперь к другим космическим соседям Земли — Меркурию, Венере, Марсу. Из космоса летят загадочные сигналы. Закладываются основы новой науки — сравнительной планетологии и планетофизики. Уже получены первые сейсмограммы с Марса, зарегистрированные аппаратурой «Викинга-2». И хотя голос марсотрясения еще не выделен на фоне ветровых помех, удается скорректировать настройку аппаратуры, методику и районы будущих марсианских экспедиций.

Текущие и грядущие полеты космических аппаратов к планетам солнечной системы дополнят и уточнят главы волнующей книги природы, важные страницы которой были прочитаны во время лунной космической одиссеи.

ЛИТЕРАТУРА

- Ваньян Л. Л и др. Кажущееся электрическое сопротивление Луны и его интерпретация.— Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли», 1973, № 11.
- Виноградов А. П. Кратко о Луне.— Вестник МГУ, 1973, № 6.
- Галкин И. Н., Шварев В. В. Строение Луны.— М.: Знание. Сер. «Космонавтика, астрономия», 1976, № 2.
- Жарков В. Н., Трубицын В. П., Самсоненко Л. В. Физика Земли и планет. М.: Наука, 1971.
- Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли, Луны и планет. М.: Знание. Сер. «Космонавтика, астрономия», 1973, № 2.
- Космохимия Луны и планет (труды советско-американского совещания). Под ред. А. П. Виноградова. М.: Наука, 1975.
- Куликов Н. А., Гуревич В. Б. Новый облик старой Луны. М.: Наука, 1974.
- Левин Б. Ю. Развитие Луны в свете современных данных.— Природа, 1971, № 12.
- Мельхиор П. Физика и динамика планет, ч. 1, М.: Мир, 1975.
- Николаев А. В., Галкин И. Н. Сейсмика Земли и Луны.— Природа, 1974, № 5.
- Рускол Е. Л. Происхождение Луны. М.: Наука, 1975.
- Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969.
- Физика и астрономия Луны. Под ред. З. Конала. М.: Мир, 1973.
- Латем Г. и др. Результаты активного сейсмического эксперимента по программе «Аполлон».— В кн.: Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975.
- Lammlein D. Lunar seismicity and tectonics.— Phys. Earth and Planet. Inter., 1977, v. 14, N 3.
- Nakamura J. e. a. Structure of the lunar mantle.— J. Geophys. Res., 1976, v. 81, n. 26.
- Nakamura J. HFT events: shallow moonquakes?— Phys. Earth and Planet. Inter., 1977, v. 14, N 3.
- Toksoz M. N. Lunar and planetary seismology.— Revs Geophys. and Space Phys., 1975, v. 13, N 3.
- Toksoz M. e. a. Moonquakes: mechanism and relation to tidal stresses.— Science, 1977, v. 196, N 4293.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Космическая одиссея	5
Сюрпризы лунной сейсмики	19
Кора в сейсмических «лучах»	40
Путешествие к центру Луны	58
Можно ли предсказать лунотрясение?	79
Магнетизм. Тепло. Гравитация	119
Эволюция Луны	140
Заключение	171
Литература	175

Игорь Николаевич Галкин

ГЕОФИЗИКА ЛУНЫ

Утверждено к печати редколлегией
научно-популярной литературы Академии наук СССР

Редактор В. К. Низковский. Художник Ю. Е. Фомин

Художественный редактор Н. В. Разина

Технический редактор Н. И. Плохова

Корректоры И. Г. Васильева, Л. В. Лукичева

ИБ № 7387

Сдано в набор 15.05.78. Подписано к печати 14.09.78. Т-14085
Формат 84×108^{1/32}. Бумага типографская № 1.

Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 9,24.
Уч. изд. л. 9,4. Тираж 31 700 экз. Тип. зак. 496. Цена 60 коп.

Издательство «Наука» 117485, Москва, В-485, Профсоюзная, 94а
2-я тип. издательства «Наука» 121099, Москва, Г-99, Шубинский, 10

60 коп.



ИЗДАТЕЛЬСТВО

«НАУКА»

ВЫШЛА ИЗ ПЕЧАТИ

КНИГА:

2593

Куликов В. А., Сидоренко Н. С.
ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ. (Серия «Планета Земля и Вселенная»).
1977. 62 к.

В книге рассматриваются основные астрономические и физические проблемы планеты Земля: движение ее вокруг Солнца, движение земной оси в пространстве, вращение Земли, движение полюсов и неравномерность вращения Земли, строение земных недр, гидросфера, атмосфера и околосземного космического пространства, а также протекающие в них процессы. Даются сведения о земном магнетизме и об энергии, получаемой нашей планетой от Солнца. Книга рассчитана на широкий круг читателей.

117464 Москва, В-464, Мичуринский проспект, 12, магазин «Книга — почтой» Центральной конторы «Академкнига»; 197110 Ленинград, П-110, Петрозав-

водская ул., 7, магазин «Книга — почтой» Северо-Западной конторы «Академкнига» или в ближайшие магазины «Академкнига».

Адреса магазинов «Академкнига»

480391 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97;
370005 Баку, ул. Джапаридзе, 13;
320005 Днепропетровск, проспект Гагарина, 24; 734001 Душанбе, проспект Ленина, 95; 664033 Иркутск, 33, ул. Лермонтова, 289, 252030 Киев, ул. Ленина, 42, 277012 Кишинев, ул. Пушкина, 31; 433900 Краматорск, ул. Марата, 1; 443002 Куйбышев, проспект Ленина, 2; 192104 Ленинград, Д-120, Литейный проспект, 57; 199164 Ленинград, Университетская наб., 5. 199004 Ленинград, 9 линия, 16. 103009 Москва, ул. Горького, 8; 117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7; 630090 Новосибирск, Академгородок, Морской проспект, 22; 630076 Новосибирск, 91, Красный проспект, 51; 620151 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137; 700029 Ташкент, ул. 50 лет Узбекистана, 11; 700029 Ташкент, Л-29, ул. Ленина, 11; 700100 Ташкент, ул. Шота Руставели, 43; 634050 Томск, наб. реки Ушайки, 18; 450075 Уфа, Коммунистическая ул., 49; 450075 Уфа, проспект Октября, 129; 720001 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42; 310003 Харьков, Уфимский пер., 4/6.