

Р· БОЛДУИН

ЧТО
МЫ
ЗНАЕМ
О ЛУНЕ ?

THE MOON
A FUNDAMENTAL SURVEY

by
R. Baldwin

LONDON 1965

Р. БОЛДУИН

Что
мы
знаем
о Луне?

Перевод с английского
К. А. ЛЮБАРСКОГО

Послесловие
А. А. ГУРШТЕЙНА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА
1967

Не составляет секрета, что, как правило, лучшие популярные книги пишут специалисты, сами активно работающие в той области, о которой они рассказывают. Автор настоящей книги, американский ученый Ральф Болдуин — одна из ведущих фигур в современной науке о Луне, и факты, о которых он сообщает, — это сведения из первых рук.

В книге затронуты почти все связанные с Луной вопросы — от затмений до свойств лунной поверхности. Особенно эффектно написаны и читаются с неослабевающим интересом главы о формировании лунного рельефа под действием метеоритных ударов — недаром именно в этой области исследования автора уже давно стали классическими.

Книга написана очень доступно, и для ее чтения почти не требуется специальной подготовки.

Из предисловия автора

Эта книга является сводкой современных сведений о Луне. Цель ее — дать читателю исчерпывающий обзор по этому вопросу.

Следует учесть, что астрономия — это не застывшая наука. Напротив, она развивается сейчас чрезвычайно энергично. Новые факты и теории появляются в научных журналах так часто, что даже специалисту трудно поспевать за их потоком. Человек более не довольствуется своим местом на дне воздушного океана. Его приборы уже вторглись на Луну. Русские взглянули на Луну с обратной стороны. Фотографии, сделанные американскими зондами «Рейнджер», дали нам изображения лунной поверхности в тысячу раз лучшие, чем любые из полученных раньше. Скоро на Луне высадится человек.

В преддверии этой новой эры, которая во многих отношениях окажет влияние и на ученого и на обывателя, полезно на время остановиться и попытаться подытожить то, что нам известно. Такой попыткой и является эта книга. Мы ограничимся исключительно Луной, если не считать тех случаев, когда будет необходимо обсудить и другие вопросы, важные для изучения Луны. Автор старался сделать все для того, чтобы изложение было научно обоснованным и находилось на современном уровне. Оно достаточно полно, но не до такой степени, чтобы читатель запутался в несущественных подробностях. Рассказ о Луне ведется на историческом фоне, так что читатель сможет понять, как были получены те или иные выводы, а не просто запоминать скучные факты.

В этой книге я изложил историю развития Луны так, как она мне сейчас представляется. В любой работе такого рода всегда проявляются пристрастия автора. Подытоженные здесь теоретические выводы

сейчас, когда я о них пишу, кажутся мне вполне обоснованными. Они принимаются почти всеми, кто серьезно изучает Луну. Однако они не общепризнаны, и это обстоятельство следует учитывать. Например, большинство астрономов сейчас не сомневается, что большие лунные кратеры образованы ударами и последующими взрывами метеоритов, крупных тел из космического пространства, которые с громадной скоростью сталкиваются с Луной. Эта теория будет изложена более подробно. Я не отношусь серьезно к основной конкурирующей гипотезе о вулканической природе больших кратеров. Однако имеется незначительное меньшинство ученых, которые энергично поддерживают эту гипотезу и целиком или полностью отвергают идею о том, что главенствующим процессом являются метеоритные удары. Я согласен, что в пользу вулканической активности Луны есть много доводов.

Читатель должен иметь в виду эту оговорку, какие бы теории относительно Луны ни обсуждались. В этой книге изложены только теории, получившие широкое признание, так как и автор и издатели надеются дать очерк природы Луны в том виде, в каком она сейчас единодушно представляется.

Если читатель хочет ближе познакомиться с вопросом, отсылаем его к следующим книгам, в которых представлены многие точки зрения:

Baldwin R. B., The face of the Moon, The University of Chicago Press, Chicago, 1949.

Baldwin R. B., The measure of the Moon, The University of Chicago Press, Chicago, 1963.

Fielder G., The structure of the Moon's surface, Pergamon Press, New York, 1961.

Kopal Z., Physics and astronomy of the Moon, Academic Press, Inc., New York, 1962.

Kuiper G. P., Middlehurst B. (eds.), The Moon, meteorites and comets, vol. IV in «The Solar System», The University of Chicago Press, Chicago, 1963.

Луна, сборник статей под ред. А. В. Маркова, М., Физматгиз, 1960.

РАЛЬФ Б. БОЛДУИН

Из истории изучения Луны

На современном уровне знаний наука о Луне во многом сходна с экономическими науками. Ответы на многие вопросы по необходимости гласят «мы не знаем» или начинаются со слов «видите ли...» Это не удивительно, ибо мы изучаем Луну с достаточной полнотой лишь очень короткое время.

Луна висит в небе, доступная взорам всех. Невооруженным глазом она видна лучше, чем любая планета в крупнейший в мире телескоп. Телескопические наблюдения и крупные фотографии показывают, что ее красивая поверхность неровная и чрезвычайно сложная. На ней видны мириады деталей, создающие иллюзию, что мы действительно знаем лунную поверхность. На самом деле мы ее в подробностях не знаем, ибо расстояние до Луны все же чрезвычайно велико, хотя по обычным астрономическим масштабам оно и мало.

Разрешающая сила телескопов ограничена дифракцией света и приблизительно определяется формулой

$$\text{Разрешающая сила} = \frac{11'',58}{D}, \quad (1.1)$$

где D — диаметр зеркала или линзы телескопа в сантиметрах. Формула, строго говоря, применима к точечным источникам света и выводится из того факта, что изображение звезды (практически точечного источника), создаваемое идеальным телескопом, не является математической точкой, а имеет определенный диаметр, зависящий от диаметра объектива и относительного отверстия телескопа. Изображение

окружено светлыми кольцами. Формула определяет минимальное угловое расстояние между точечными источниками света, которые еще могут быть разделены. Хотя к протяженным объектам, таким, как Луна, формула применима с меньшей точностью, она все же показывает, что в любой телескоп в идеальных условиях на Луне можно различить объекты только больше определенного размера. Например, в 11,5-сантиметровый телескоп можно теоретически различить на Луне объекты диаметром 1", что соответствует примерно 1340 м. С таким телескопом мы едва можем заметить лунный кратер диаметром немного более полутора километров и практически ничего не можем сказать ни о его форме, ни о том, в каком состоянии он находится. В идеальный 5-метровый телескоп теоретически можно было бы увидеть объекты величиной до 30 м, однако, хотя у этого огромного инструмента и хорошая оптика, в него все же нельзя различить объекты размером меньше Пентагона*. При фотографических работах разрешающая сила телескопа еще больше понижается из-за зернистости эмульсии. Получается, что для подробного изучения лунной поверхности детали ее структуры должны быть в несколько раз крупнее теоретического минимального размера, хотя в редких случаях для малых телескопов теоретический предел может и достигаться.

На практике оптическим методом можно исследовать объекты с поперечником более 800 м. Для наглядности представьте себе, что вы мысленно поднялись на 8000 км над Землей и затем попросили геологов описать происхождение и историю Земли, природу видимых на ней деталей, химические свойства горных пород или сделать выводы о распределении вещества, температуры, давления и магнитных полей внутри Земли. При этом наши геологи могут пользоваться биноклями, различными приспособлениями к ним или радиотехническими приборами.

Этот пример будет еще более впечатляющим, если учесть, что Земля непосредственно изучалась на протяжении столетий. Мы можем пощупать и подверг-

* То есть меньше полукилометра в диаметре. — *Прим. перев.*

нуть анализу многие ее породы и произвести тончайшие исследования их химических, электрических, магнитных и гравитационных свойств. Следовательно, мы можем собрать о Земле такие данные, которые при изучении Луны издалека получить нельзя. Однако при всех этих преимуществах геологи сталкиваются со многими крупными проблемами, касающимися Земли, которые все еще не разрешены. Например, нет общего согласия относительно причин вулканизма. Занимают ли континенты постоянное положение, или они движутся? Как образуется магнитное поле Земли? Почему существуют континенты? Каков механизм изостазии* и насколько распространено это явление? Существует много и других вопросов.

Насколько же труднее изучать природу Луны! Мы в сущности ничего не знаем о ранней ее истории. Образовалась ли Земля вместе с Луной как двойная планета или Луна была захвачена позднее? Однако нам известно, что Луна медленно удаляется от Земли, и в какой-то мере мы можем предсказать ее будущее.

Степень разреженности атмосферы Луны почти такая же, как у лучшего вакуума, который можно создать в земных лабораториях, однако мы можем только строить догадки о ее составе и происхождении. Химическая природа лунных пород до сих пор является предметом споров. Физическое их состояние изучено лучше, однако все еще существует много проблем, ибо физические условия на Луне совершенно отличны от известных нам на Земле. По-видимому, у Луны нет магнитного поля; во всяком случае, оно очень слабо. Луна ничем не защищена от электромагнитного излучения Солнца различных длин волн, сильно поглощаемых земной атмосферой. Ее поверхность бомбардируется корпускулярным излучением Солнца и космическими лучами. На нее дождем падают из космоса метеорные частицы: крупные

* Изостазия — равновесное состояние коры, при котором отдельные блоки ее как бы плавают в более пластичном подкоровом веществе. Глубина погружения зависит от веса блока. Чем он массивнее, тем глубже погружен в соответствии с законом Архимеда. Поскольку подкоровое вещество очень вязко, то при нарушении изостазии она восстанавливается очень медленно. — *Прим. перев.*

образуют кратеры, мелкие тоже должны оказывать воздействие на поверхность. Каково же это воздействие? Из-за отсутствия атмосферы в поверхностных слоях периодически происходят колоссальные изменения температуры. Под влиянием совокупности всех этих эффектов создается поверхность, которая отличается от любого известного земного вещества по теплопроводности, по цвету и по зависимости между альбедо (отражательной способностью), поляризационными характеристиками и углом фазы.

Мы перечислили эти проблемы в наших знаниях, чтобы подчеркнуть, что Луна все еще бросает нам вызов. Это лаборатория, совершенно отличная от любой земной. Она ставит перед нами много требующих разрешения проблем.

Когда ученые наконец достигнут Луны и начнется ее планомерное исследование, многие из этих проблем будут решены. Но можно быть уверенным, что установление каждого факта или доказательство каждой теории вызовет новые вопросы. Нет предела тайнам Луны, как нет предела изучению Земли. Луна является частью извечного вызова человеку, побуждающего его познавать и действовать.

Если на этом прекратить чтение книги, вполне можно сделать вывод, что Луна — сияющее с небес таинственное тело, ставящее ученых в тупик. Это было бы совершенно неверным. Специалисты изучают Луну столетиями. Многие знали о ней уже древние греки. Демокрит считал, что пятна на Луне — суть огромные долины и горы. Аристотель показал, что Луна имеет форму шара. Греки понимали, что Луна обращается вокруг Земли и что она вращается вокруг своей оси с тем же самым периодом. Аристарх жил раньше Коперника примерно на 1900 лет, однако это он предложил гелиоцентрическую теорию солнечной системы и вычислил, что расстояние до Луны в 56 раз превосходит радиус земного шара. Гиппарх нашел, что орбита Луны — овал, наклоненный на 5° к плоскости земной орбиты, т. е. к плоскости эклиптики. Он показал также, что сама орбита Луны (линия ее узлов) совершает один оборот за $18\frac{2}{3}$ года. Гиппарх уточнил относительное расстояние до Луны, оценив его в 59 земных радиусов, а угловой диаметр

Луны — в $31'$, с почти телескопической точностью. Во II в. н. э. Птолемей значительно уточнил параметры лунной орбиты. Так около 2000 лет назад древние философы-ученые, наблюдавшие лишь невооруженным глазом, но обладавшие лишенным предрассудков разумом, пришли к выводу, что Луна — это планета, шар, состоящий из пород, подобных земным горным породам, испещренный большими долинами и горами и обращающийся вокруг Земли по овальной орбите на умеренном расстоянии от нее. Они также поняли, что Луна поворачивается вокруг своей оси один раз за время обращения вокруг Земли, и поэтому люди могут видеть только одну сторону нашего спутника. Они знали, что Луна светит не своим собственным светом, а отраженным светом Солнца. На яркой части Луны — день, а на невидимой — ночь. Последовательная смена фаз Луны от новолуния до полнолуния и затем в обратном порядке вызвана изменением относительного положения трех тел при обращении Луны вокруг Земли.

Затем наступил перерыв в 14 столетий вплоть до работ Тихо Браге (1546—1601). Этот прославленный наблюдатель вновь привел в движение научную мысль. Наряду с другими открытиями он значительно улучшил наши знания о движении Луны, но его главной заслугой был сбор огромного количества наблюдательных данных, что оказалось существенным для тех успехов, которые были достигнуты в следующем веке.

Однако наука оставалась в основном эмпирической, пока три человека своими наблюдениями и теориями не осуществили мощный взрыв, вырвавший человечество из затишья мрачного средневековья. Кеплер (1571—1630) сформулировал свои знаменитые три закона планетных движений, а Ньютон (1642—1727) выяснил, что они являются естественным следствием из его столь же знаменитых трех законов движения и закона всемирного тяготения. Галилей (1564—1642) первым применил телескоп для изучения неба. Великий триумvirат полностью революционизировал научный мир, его взгляды, способ мышления и подход к научным и техническим вопросам. Без работ древних астрономов, хотя часть их в средние

века была утеряна или не пользовалась доверием, научное возрождение было бы задержано, а без достижений Кеплера, Ньютона и Галилея оно было бы невозможно. Наши современные знания о вселенной восходят к их основополагающим работам. В частности, сведения о движениях Луны, о ее основных физических характеристиках, таких, как масса и размеры, унаследованы нами от Кеплера и Ньютона. Изучение поверхности Луны стало возможным благодаря оптической трубе и ее «потомкам».

Начиная с того времени, наши знания о Луне непрерывно обогащались. Большую часть этого периода прогресс шел медленно, но последние 25 лет новые работы поистине хлынули потоком. Новые наблюдения и теоретические исследования Луны установили настолько много фактов и закономерностей, что мы сейчас впервые обладаем достаточно полной информацией о Луне, о происходящих на ней физических процессах и в какой-то степени об ее истории. Конечно, некоторые наши представления окажутся неверными, но другие выдержат проверку временем. Основные черты нашей модели Луны определены хорошо; тонкие детали известны менее точно. Когда же мы от наблюдений переходим к теории, возникает множество противоречивых точек зрения.

Закон всемирного тяготения и орбита Луны

Широко известно, что Земля обращается вокруг Солнца и что ее орбита является эллипсом. В действительности, конечно, Земля обращается вокруг центра тяжести системы Земля—Солнце—Луна, но Солнце столь массивно, что смещается очень незначительно, тогда как Земля путешествует по огромной орбите.

Точно так же мы знаем, что путь Луны представляет собой эллипс. Это является следствием того, что сила тяготения есть центральная сила, изменяющаяся обратно пропорционально квадрату расстояния. Знание исторического развития этих представлений важно для понимания движения тел в космическом пространстве.

Датский астроном Тихо Браге, работавший также в Праге, посвятил свою жизнь изучению положений и видимых движений планет. Он работал в XVI в., до изобретения телескопа. Из его наблюдений, сделанных невооруженным глазом, в особенности из наблюдений Марса, его помощник Иоганн Кеплер в начале XVII в. вывел знаменитые три закона планетных движений. Эти законы гласят:

1. Радиус-вектор любой планеты с началом в Солнце ометает за равные промежутки времени равные площади.

2. Орбита любой планеты есть эллипс с Солнцем в одном из его фокусов.

3. Квадраты периодов обращения планет относятся друг к другу как кубы больших полуосей соответствующих орбит.

В течение полувека после Кеплера его три закона оставались необъясненными. Трудными Ньютона

Наконец было показано, что они являются следствием закона всемирного тяготения. В своей работе он изложил три закона движения тел под действием внешних сил, поставившие механику на прочный фундамент. Эти законы таковы:

1. Всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

2. Изменение количества движения тела происходит в направлении действующей на тело силы и пропорционально величине этой силы.

3. Для каждого действия существует равное и противоположно направленное противодействие.

Сопоставляя эти законы, три закона Кеплера и тот факт, что Солнце притягивает Землю, Ньютон пришел к чрезвычайно важному выводу. Он заключил, что если Солнце притягивает Землю, то Земля тоже должна притягивать Солнце с равной и противоположно направленной силой. Сила притяжения Земли Солнцем пропорциональна массе Земли. Следовательно, сила притяжения Солнца Землей должна быть пропорциональна массе Солнца. Это привело к закону всемирного тяготения, который гласит:

Любые две частицы вещества во вселенной притягивают друг друга с силой, действующей вдоль соединяющей их линии, и величина силы прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Формулировка этого закона — последний штрих, нанесенный рукой гения. Произошло это почти вчера, немногим менее 300 лет назад. Закон записывается в виде

$$f = \frac{GMm}{r^2}; \quad (2.1)$$

G называется постоянной тяготения и является универсальной мировой постоянной. В системе СГС она имеет значение $6,67 \cdot 10^{-8}$ дин·см²/г².

Ньютон впервые пришел к идее всемирного тяготения в 1665 г. и сразу же попытался проверить ее наблюдениями. Он считал, что расстояние до Луны примерно в 60 раз больше радиуса Земли. Он знал также, что у поверхности Земли падающее тело проходит в первую секунду примерно 490 см. Следовательно, Луна должна падать к Земле, т. е. отклоняться от касательной к своей орбите, на $1/3600$ от 490 см, т. е. на 0,136 см в секунду. Так ли это?

Ньютон подставил известные величины в формулу и нашел, что Луна падает по направлению к Земле только на 0,112 см в секунду. Расхождение было слишком велико, и он, совершенно естественно, отказался от теории, столь противоречащей фактам.

Затруднение состояло в том, что в 1665 г. считалось, что длина одного градуса на Земле равняется, грубо говоря, 97 км. Шестью годами позже, в 1671 г., Пикар нашел, что длина дуги меридиана во Франции соответствует 111 км на градус. Когда Ньютон услышал об этом, он немедленно попытался повторить свои расчеты, но пришел в такое возбуждение, что за него их должен был закончить его друг. Согласие между наблюдениями и теорией теперь было удовлетворительным, и закон всемирного тяготения вскоре получил всеобщее признание.

В качестве простейшего примера применения закона всемирного тяготения мы можем рассмотреть только два тела, такие, как Земля и Луна, обращающиеся вокруг друг друга, причем каждое из них действует так, как если бы вся его масса помещалась в точке. Если мы знаем их массы, положения и движения в какой-либо момент, то положения тел и их движения будут известны и в любой момент в будущем. Эти два тела будут описывать орбиты вокруг центра тяжести, который сам будет находиться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения. Траектории обоих тел вокруг этой точки будут одинаковы по форме, а по размерам — обратно пропорциональны их массам. Орбита меньшего тела относительно большего будет тоже иметь такую же форму, но размеры ее будут пропорциональны сумме масс.

Приближенные значения характеристик Луны
и ее орбиты вокруг Земли

Среднее расстояние в экваториальных радиусах Земли . . .	60,2673
Среднее расстояние (a — большая полуось)	384 402 \pm 1,5 км
Истинное расстояние	от 406 697 до 356 410 км
Сидерический период обращения	27 сут 7 час 43 мин 11,5 сек
Среднее наклонение орбиты к земной орбите (i)	5°8',33
Средний эксцентриситет (e)	0,05490
Диаметр Луны	3476 км
Отношение массы Луны к массе Земли	1/81,56
Плотность Луны	3,34 г/см ³
Ускорение силы тяжести на поверхности Луны	162 см/сек ²
Скорость ускользания на поверхности Луны	2,38 км/сек

Сразу видно, что в списке отсутствуют две другие величины, необходимые для определения простран-

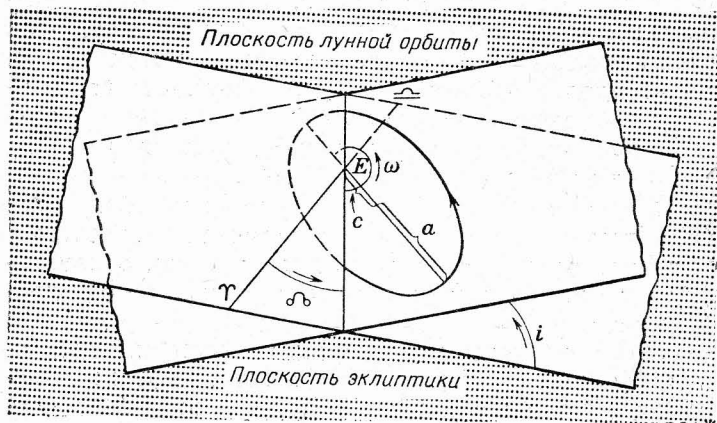


Рис. 1. Элементы лунной орбиты.

a — большая полуось; $e = c/a$ — эксцентриситет; i — наклонение к эклиптике; Ω — долгота восходящего узла; ω — расстояние от восходящего узла до перигея; P — период обращения; T — момент прохождения перигея.

ственного расположения орбиты, а именно долгота восходящего узла и долгота перигея. Восходящий узел — это точка, в которой Луна пересекает пло-

скость эклиптики (плоскость земной орбиты), двигаясь с юга на север. Долгота его измеряется от определенной точки на эклиптике, точки весеннего равноденствия, и обозначается знаком Ω . Долгота точки перигея π измеряется от точки весеннего равноденствия, или же расстояние перигея можно измерять от узла, и тогда оно обозначается ω . Любая из этих величин определяет ориентацию орбиты в ее плоскости.

Причина, по которой эти две величины опущены в таблице, состоит в том, что в законе всемирного тяготения имеется одна тонкость. Она заключена в фразе: «Любые две частицы вещества во вселенной притягивают друг друга...» Очевидно, что Земля и Луна не одиноки в космическом пространстве и каждая сторонняя масса должна влиять на их движение. Телом, обладающим огромной возмущающей силой, является Солнце. Если к системе добавлено третье тело, движения всех трех тел становятся невероятно сложными и орбита наименее массивного тела испытывает сильные искажения. В общем решении проблемы трех тел число неизвестных больше числа уравнений для определенного момента*. Говоря другими словами, траектории, проходимые любым из этих трех тел конечной массы, никогда точно не повторяются и решения для трех или более тел могут быть получены только последовательными приближениями или в виде большого числа бесконечных рядов, которые должны сходиться при увеличении числа членов.

Из-за возмущающего влияния Солнца на траекторию Луны она никогда не проходит дважды по той же самой орбите, и все элементы ее орбиты изменяются. Долготы узла и перигея меняются наиболее сильно и всегда в одном направлении; другие элементы, a , e и i , подвержены колебаниям.

* Это, конечно, не так. Как любая задача классической механики, задача трех тел принципиально разрешима. Задача любых n тел сводится к системе $6n$ дифференциальных линейных уравнений с $6n$ неизвестными. Другое дело, что решение этой системы представляет огромные математические трудности и в общем виде до сих пор не получено. — Прим. перев.

Математические методы расчета движения Луны разрабатывались многими авторами. Изложение этих теорий выходит за пределы настоящей книги, но здесь будет уместно вкратце рассказать о работе Э. Брауна. Его жизнь была посвящена математическому решению этой проблемы. Его «Таблицы Луны» составляют три тома in quarto общим объемом более 360 страниц. Точный расчет движений Луны представляет собой одну из наиболее сложных и трудоемких задач во всей прикладной математике. Браун сравнивает его сложность с «игрой вслепую в трехмерные шахматы». Было рассмотрено несколько тысяч членов, для того чтобы оценить, достаточно ли они велики, чтобы внести существенный вклад в движение Луны. Например, в выражении для долготы Луны имеется 155 периодических членов с коэффициентами, большими $0''$, 1, и более 500 меньших членов. Хотя каждый из них в отдельности невелик, временами они могут давать при сложении сумму, пренебрегать которой нельзя. Если мы хотим рассчитать долготу с точностью до $0''$, 1, необходимо рассмотреть их все. Каждый из этих членов имеет свой собственный период.

Когда были рассмотрены все действующие на Луну существенные силы, Браун нашел, что перигей лунной орбиты смещается вперед, а узел — назад в соответствии со следующей таблицей.

Среднее годовое смещение перигея и узла лунной орбиты

Причина	Перигей	Узел
Основное действие Солнца	+146 426",92	-69 672",04
Масса Земли	-0,68	+0,19
Прямое влияние планет	+2,69	-1,42
Косвенное влияние планет	-0,16	+0,05
Фигура Земли	+6,41	-6,00
Фигура Луны	+0,03	-0,14
	+146 435",21	-69 679",36

Возмущения, вызванные Солнцем, преобладают. Другие возмущения связаны с тем, что масса Земли не сконцентрирована в точке; остальные планеты тоже притягивают Луну, а также влияют на движение Луны косвенно, притягивая и смещая Землю. Земля сплюснута из-за вращения и обладает экваториальным вздутием высотой 21 км. Поэтому Земля действует на Луну так, как если бы она была шаром, окруженным бубликом, и траектория Луны соответственно меняется. Луна также не строго сферична, и это искажение формы слегка влияет на ее орбиту.

Если подсчитать влияние релятивистских эйнштейновских эффектов, то движения узла и перигея будут отличаться от рассчитанных по ньютоновской теории менее чем на $2''$ в столетие каждое.

Если сложить все эффекты вместе, согласие получается достаточно хорошим, но не идеальным. Все еще остается необходимость ввести ряд небольших эмпирических поправок.

Линия апсид, соединяющая точки перигея и апогея, перемещается вперед, но не непрерывно, а так, что в среднем, согласно Брауну, совершает один оборот за 8,8503 года. Узлы отступают назад, делая один оборот за 18,6123 года.

Эксцентриситет лунной орбиты в среднем равен $1/18$, но из-за возмущений меняется от $1/15$ до $1/23$. Наклонение плоскости орбиты Луны к эклиптике меняется от $4^{\circ}59'$ до $5^{\circ}18'$.

Если все это недостаточно сложно, добавим еще один эффект другого рода. Луна вызывает приливы на поверхности и в теле Земли. Эти приливы создают трение, действующее на вращение Земли как гигантский тормоз. Следовательно, вращение Земли замедляется и сутки становятся длиннее. Но это означает, что Земля теряет угловой момент, а эта величина не может исчезать, а только перераспределяется. Угловой момент поглощается Луной, ее орбита становится больше и Луна постепенно удаляется от Земли. Итак, вследствие замедления вращения Земли орбита Луны испытывает искажения и движение Луны меняется.

Разработка теории движения Луны была, как уже говорилось, выдающимся достижением. В будущем

эта теория должна периодически обновляться или подправляться, ибо движения тел в солнечной системе постепенно отклоняются от предсказанных из-за накопления вековых ошибок. Математическое решение уравнений теперь не столь утомительно, как раньше, ибо современные вычислительные машины можно запрограммировать для быстрого и точного выполнения этой работы.

Несмотря на все изменения лунной орбиты, Луна настолько близка к Земле по сравнению с расстоянием от Земли до Солнца и период обращения Луны настолько велик, что в действительности Луна движется по волнообразной траектории, колеблющейся относительно орбиты Земли. Однако эта волнообразная траектория всегда обращена вогнутостью к Солнцу.

Приливы

Народы древности, зависевшие от моря, были знакомы с капризами водной стихии. Они изучили приливы и их воздействия на течения и мели. Воздействия эти сохраняют огромное значение и по сей день.

Давно уже было известно, что Луна тесно связана с приливами, но причины этой связи были выяснены только Ньютоном.

У берега можно наблюдать, как вода убывает и прибывает. Убывающая вода называется *отливом*, прибывающая — *приливом*. Названия *высокая* и *низкая вода* соответствуют максимальному и минимальному уровню воды в данном приливном цикле.

Каждый день происходит два прилива. Средний промежуток между соответствующими высокими приливами в два смежных дня составляет примерно 24 час 51 мин. Этот промежуток совпадает со средним интервалом между двумя последовательными прохождениями Луны через меридиан, что указывает на причинную связь между Луной и приливами. Один приливный горб, грубо говоря, опережает Луну и расположен на стороне Земли, обращенной к Луне. Другой находится с противоположной стороны.

Какова природа действия Луны на океан? Очевидно, что это гравитационное притяжение. Луна притягивает каждую частицу Земли. Вода подвижна и вздувается горбом по направлению к Луне. Но в чем причина прилива с противоположной стороны Земли? Объяснение обоих приливов одинаково. Нарисуем соответствующую диаграмму сил. Луна притягивает центр Земли C с силой, изображаемой стрелкой CL . Таким образом, длина CL представляет собой ускорение, придаваемое Луной телу Земли. Поскольку

Земля в первом приближении жесткая, она движется как твердое тело, и AE и BH равны и параллельны CJ . Отрезки AD и BG по длине пропорциональны ускорениям, создаваемым Луной в точках A и B , и направлены к Луне, но так как A ближе к Луне, чем C , а C ближе, чем B , ускорение AD больше, чем CJ , которое в свою очередь больше, чем BG . Построив параллелограммы сил, мы убеждаемся, что в точке A существует составляющая ускорения, направ-

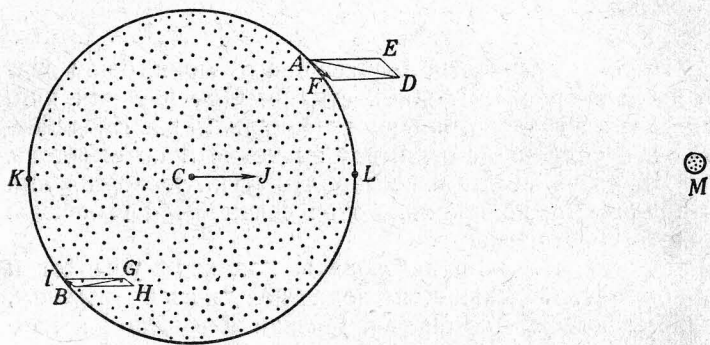


Рис. 2. Объяснение приливов.

вленная вдоль земной поверхности к подлунной точке, а в точке B — ускорение, направленное от подлунной точки к точке, ей противоположной.

Если A и B — частицы воды, то движение их свободно, и вода будет перетекать по направлению к тем двум областям Земли, где Луна находится прямо над головой или прямо под ногами. Если бы Земля была целиком покрыта океаном постоянной глубины и вращалась бы с такой скоростью, что была бы всегда обращена к Луне одной стороной (так же как Луна по отношению к Земле), то два приливных горба находились бы на одной линии с Луной и минимальные глубины воды располагались бы вдоль большого круга с полюсами в вершинах приливных горбов. Разница в уровне между самой высокой и самой низкой точкой, вызванная притяжением Луны, была бы около 60 см.

Это объяснение лунных приливов совершенно правильно, но, как это бывает для многих явлений, при-

менение теории крайне осложняется сторонними влияниями. Мы рассмотрим по порядку некоторые из этих влияний.

Пусть Земля вращается медленно. Приливные горбы будут располагаться на одной линии с Луной и, следовательно, вокруг покрытой водой Земли будут медленно перемещаться две огромные волны. Если теперь вообразить, что скорость вращения Земли увеличилась до ее современной величины, приливные горбы будут двигаться, опережая Луну, из-за того, что воздействует трение. Земля вращается вокруг оси гораздо быстрее, чем Луна обращается вокруг Земли. Это трение фактически удерживает приливный горб впереди Луны на протяжении значительной части пути вокруг Земли. Промежуток времени от прохождения Луны через меридиан в верхней кульминации до ближайшего следующего за ним высокого прилива называется *прикладным часом порта*. Прикладной час порта Нью-Йорк равен в среднем 8 час 13 мин, но колеблется на целых полчаса в ту и другую сторону.

Известно, что обычно два прилива в данном месте не равны по высоте. Месячный путь Луны проходит по орбите, наклоненной на $5^{\circ}08'$ к плоскости эклиптики, а экватор Земли наклонен к эклиптике на $23^{\circ},5$. Полмесяца Луна находится севернее экватора, а остальное время — южнее. Предположим, что Луна находится далеко к северу от экватора, например на 20° . Приливный горб будет расположен на 20° с. ш. на стороне Земли, обращенной к Луне, но в то же время противоположный горб будет находиться на 20° ю. ш. При вращении Земли пункт, расположенный на 20° с. ш. под высоким приливным горбом, будет оставаться по-прежнему на той же широте. Однако, переместившись на другую сторону, противоположную Луне, этот пункт окажется в 40° от второго приливного горба, так как второй горб находится на 20° ю. ш. Второй прилив будет очень умеренным, гораздо ниже первого. Вообще говоря, высоты двух приливов в данном месте неравны, но дважды в месяц, когда Луна пересекает небесный экватор, суточное неравенство исчезает.

Земля — далеко не идеальное тело для анализа приливных явлений. Океаны имеют разную глубину. Приливное возмущение распространяется как волна со скоростью, зависящей от глубины. Приливный горб поэтому искажается, и прикладной час порта от места к месту меняется. Чем меньше глубина, тем медленнее движется волна; вследствие этого моменты наступления высокой воды могут сильно отличаться в местах, разделенных всего лишь несколькими десятками километров. На мелководье высота приливной волны часто увеличивается.

Форма береговой линии может оказывать огромное влияние на время и высоту прилива. Иногда приливная волна (не цунами) направляется в воронкообразно сужающийся залив или бухту, и высота прилива пропорционально увеличивается. В бухте Фанди* максимальная высота прилива в среднем равна примерно 15 м. Подобные же приливы можно наблюдать на восточном берегу Патагонии. Громадные приливы происходят в Бристольском заливе, у берегов Нормандии и в Гудзоновом проливе.

В приливных эстуариях и некоторых больших реках, таких, как Амазонка, прилив наступает в виде *бóра*, круто обрывающейся волны высотой в метр или более, которая может проникать далеко вверх по течению. У расположенного в Нью-Брансуике (Канада) города Сент-Джон река того же названия во время прилива течет вверх, а во время отлива — в обычном направлении.

В некоторых местах приливы удивительно отличаются от нормальных. В районе Северной Атлантики высоты последовательных приливов в сущности равны и отделяются периодами низкой воды тоже, грубо говоря, равной высоты. Во многих морях, например в Мексиканском заливе или в северной части Тихого океана, существует заметное суточное неравенство в высоте, и отклонения от моментов наступления высокой и низкой воды гораздо больше, чем обычно.

Тем не менее если имеются все необходимые данные о влиянии на приливные воды местных условий,

* П-ов Новая Шотландия на Атлантическом берегу Канады. — *Прим. перев.*

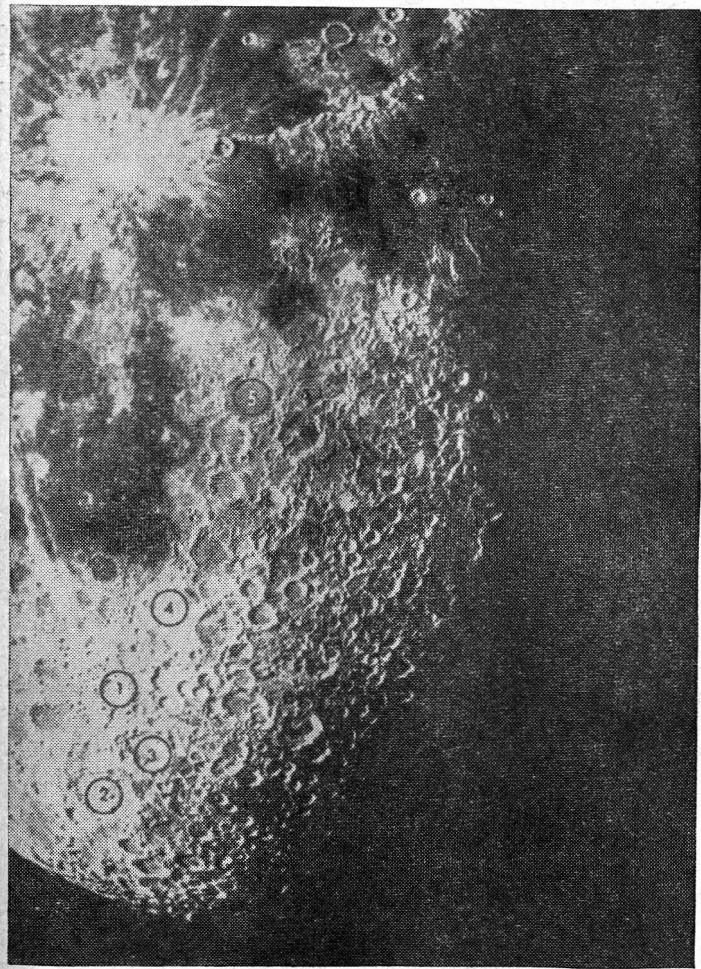


Фото 1. Южная область Луны (Ликская обсерватория).
1 — Тихо, класс 1; 2 — Клавий, класс 2; 3 — Магин, класс 3;
4 — Деландр, класс 4; 5 — Птоломей, класс 5.

то и эти сложные приливы полностью объяснимы возмущающим действием гравитационных сил.

Высота приливов чрезвычайно чувствительна к силе ветра. Северо-восточный ветер поднимает уровень воды в западной части узкого пролива, отделяющего остров Лонг-Айленд, прилив движется медленнее и время наступления высокой воды задерживается. Юго-западный ветер вызывает противоположный эффект.

Тропический ураган представляет собой большую, быстро вращающуюся массу воздуха, часто размером в сотни километров. Давление воздуха в его центре сильно понижено, и уровень воды может быть много больше, чем обычно. Если зона низкого давления в урагане достигает береговой линии в момент высокого прилива, это может вызвать огромные разрушения, что и произошло в 1900 г. в Галвестоне (США).

Теоретический расчет приливов для определенного места на Земле — дело безнадежное, если только точно не известны периоды приливных колебаний. За долгие годы наблюдений над приливами получены достаточно надежные данные, которые можно использовать для предсказания приливных изменений во многих местах.

Расчет приливной силы прост. Пусть M — масса Луны в единицах земной массы, R — расстояние до Луны в единицах земного радиуса, а g — ускорение силы тяжести на поверхности Земли. Ускорение, вызванное лунным притяжением в центре Земли, равно gM/R^2 , а в подлунной точке поверхности $gM/(R-1)^2$. Приливообразующая сила — это сила растяжения; она определяется разностью приведенных выше ускорений, и ее можно записать как

$$f = \frac{gM(2R-1)}{R^2(R-1)^2}. \quad (3.1)$$

Поскольку значение R очень велико, оно практически равно $R-1$. Следовательно, приведенная выше формула упрощается до

$$\frac{f}{g} = \frac{2M}{R^3}. \quad (3.2)$$

Приливообразующая сила обратно пропорциональна кубу расстояния между Землей и притягивающим телом. Для Луны $M=1/81$ и $R=60$, что дает $f/g=1/8\ 800\ 000$. Это означает, что приливная сила, создаваемая Луной, в среднем более чем в 8 млн. раз слабее силы тяжести на поверхности Земли. Приливная сила — это всего лишь возмущение гравитационного потенциала.

Из формулы (3.2) видно, что приливная сила должна быть очень чувствительна к изменению расстояния до Луны, которое колеблется от перигея к апогею. Луна в перигее на целых 10% ближе, чем в апогее, и теоретическая приливная сила на меньшем расстоянии примерно на 30% больше. Наблюдения показывают, что, когда Луна находится в перигее, масштабы приливов приблизительно на 20% превышают масштабы приливов в апогее.

До сих пор мы рассматривали только приливы, вызываемые действием Луны. В действительности же любое другое тело в солнечной системе должно оказывать приливное воздействие, но во всех случаях, за исключением одного, это воздействие пренебрежимо мало. Все планеты настолько далеки, что по отношению к расстояниям до них диаметр Земли очень мал. Масса любой из планет также слишком мала, чтобы вызвать заметный прилив на столь огромном расстоянии. Мощный Юпитер с массой, более чем в 300 раз превышающей массу Земли, и ближайшая планета Венера с массой, немного меньшей, чем у Земли, вызывают ничтожные приливы, соответственно в 10^7 и 10^6 раз меньшие по высоте, чем лунные. Величины эти слишком малы, чтобы их можно было измерить. Единственное тело, кроме Луны, образующее на Земле ощутимые приливы, — это Солнце. Для него $M=332\ 000$ и $R=23\ 400$, и из (3.2) имеем $f/g=1/19\ 300\ 000$. Таким образом, солнечная приливообразующая сила составляет только $5/11$ силы, создаваемой Луной. Следует подчеркнуть, что абсолютная величина притяжения Солнца на обеих сторонах Земли существенно больше, чем абсолютная величина притяжения Луны, но, так как Луна гораздо ближе к Земле, чем Солнце, разница в притяжении между обеими сторонами Земли для нее

больше, чем для Солнца. Следовательно, Луна создает большие приливы.

Хотя солнечные приливы слабее лунных, существование двух систем приливов имеет серьезные последствия, ибо периоды обеих систем различны. Период лунных приливов равен 24 час 51 мин, тогда как солнечные повторяются каждые 24 час. Это означает, что в новолуние и в полнолуние солнечные приливы складываются с лунными. Образующиеся в результате этого высокие приливы называются *сизигийными*. Во время первой и последней четверти обе приливные системы действуют в противоположном направлении. При этом образуются *квадратурные* приливы. Величина квадратурного прилива составляет обычно менее половины сизигийного.

Все эти земные и небесные влияния на приливы столь сложны, что теоретический расчет их в общем виде невозможен. Чтобы вполне оценить эти трудности, следует еще учесть, что Земля вращается настолько быстро и приливообразующая сила в данном месте меняется с такой скоростью, что уровень воды не поспевает за ее изменениями.

В 1913 г. выдающийся американский ученый Майкельсон чрезвычайно изобретательно измерил эти ничтожные приливообразующие силы. Он пользовался уложенной в траншею чугуной трубой. Труба была очень тщательно установлена по уровню и на обоих концах ее было по окошку. Наполовину труба была заполнена водой. Колебания уровня воды, вызванные приливными силами, наблюдались при помощи микроскопа. Хотя эти колебания были всего лишь порядка $\frac{1}{500}$ см, их можно было измерить с точностью до 1%. Наблюдались все приливные явления: сизигийные и квадратурные приливы, перигейные приливы, суточное неравенство. Фактически Майкельсон пользовался двумя трубами: одной, расположенной с востока на запад, и другой — с севера на юг, так что приливные силы можно было измерять в обоих направлениях.

Хотя относительные высоты и периодичность прекрасно согласовывались с теорией, абсолютные высоты водных приливов в трубах составляли только 69% предсказанной величины. Этот странный резуль-

тат позволил оценить твердость и упругость Земли. Твердое тело Земли упруго, и его поверхность поднимается, опускается и меняет наклон, деформируясь под действием приливных сил. Ее смещение составляет всего лишь 30% того, на сколько сместилась бы поверхность жидкой сферы. Отсюда следует, что твердость Земли как целого несколько больше, чем твердость стали. Земля должна быть почти идеально упругой, ибо почти не наблюдается какого-либо запаздывания по фазе ее смещений. Приливы в теле Земли направлены почти точно по линии равнодействующей приливных сил Луны и Солнца.

Во время сизигийных приливов поверхность Земли поднимается и опускается примерно на 23 см.

Хотя обычно приливы рассматриваются как явления, происходящие в океанах, их можно наблюдать даже в озерах. Озеро настолько мало, что приливообразующие силы фактически одинаковы по всей его поверхности, и задача решается просто. Когда Луна на горизонте, уровень озера не возмущен. Когда она поднимается над горизонтом, вода стремится двигаться по направлению к Луне и, таким образом, перетекает на сторону озера, ближайшую к Луне. При движении Луны к западу прилив перемещается вдоль берега. Низкая вода движется вдоль противоположной стороны озера. Когда Луна под горизонтом, возникает обратный эффект: высокая вода располагается на стороне, противоположной Луне.

На озере Мичиган высота приливов приблизительно 4,5 см, и прикладной час порта Чикаго составляет только 30 мин. Приливы в закрытом Средиземном море в основном того же типа, но высота их примерно 30 см, поскольку оно все же больше озера Мичиган. В некоторых местах Средиземного моря приливы могут достигать 90 см из-за местных особенностей очертаний суши и профиля дна.

Интересно отметить, что и Солнце и Луна вызывают также приливы и в нашей атмосфере. Полусуточный лунный прилив существенно меньше солнечного. Приливная сила, создаваемая Луной, в 2,2 раза больше создаваемой Солнцем. Следовательно, солнечный прилив в основном не гравитационный, а вызван нагревом атмосферы Солнцем.

На дне атмосферы полная величина прилива несколько превышает 1 миллибар и максимумы его наступают в 10^h утра и в 10^h вечера по местному времени. Небольшая часть прилива, вызванная действием Луны, имеет максимум примерно через 0,5—1,0 час после прохождения Луны через местный меридиан. Эти атмосферные приливы увеличиваются с высотой, и на уровне 80—100 км они по величине на два порядка больше, чем у поверхности Земли.

4

Приливное трение и форма Луны

Известно, что Земля не является идеальными часами. Вращение ее переменное: временами оно ускоряется или замедляется. Эти изменения ясно обнаруживаются при длительных точных наблюдениях за движением других тел солнечной системы. Случайные колебания длины суток могут быть вызваны небольшими изменениями радиуса Земли. В среднем же Земля замедляет свое вращение.

Если воспользоваться наилучшими современными определениями видимых движений Солнца и Луны и рассчитать различные затмения, относящиеся к нашему времени, то это можно сделать с большой точностью. Но по мере продвижения в будущее ошибки в расчетах будут нарастать. Аналогично древние затмения происходили не тогда, когда им полагалось происходить, исходя из экстраполяции современных расчетов, даже проведенных с точностью до 1—2 мин. Эти расхождения можно использовать для определения вековых изменений скорости вращения Земли. Такие наблюдения можно найти в различных древних документах. Например, многие затмения описаны в Библии. Еще более древние затмения отмечены в китайских хрониках. Все эти древние тексты говорят о том, что затмения происходили в более позднее время суток, чем дают наши вычисления. Это означает, что Земля в прошлом вращалась быстрее, чем сейчас.

Современные темпы уменьшения скорости вращения Земли эквивалентны увеличению длины суток примерно на 1 сек за 120 000 лет. На первый взгляд кажется, что это пренебрежимо малая величина, и

для большинства практических целей так оно и есть; но эти изменения накапливаются, и за долгие промежутки времени могут стать заметными. Например, 2000 лет назад сутки были на $2000/120\,000 = 1/60$ сек короче современных. В течение этого промежутка времени сутки в среднем были на $1/120$ сек короче, чем сейчас. Однако за этот период прошло 2000×365 суток, так что ориентация Земли при вращении постепенно смещалась на $2000 \times 365 \times 1/120$ сек, т. е., грубо говоря, на 6000 сек, или на 1 час 40 мин. Такая ве-

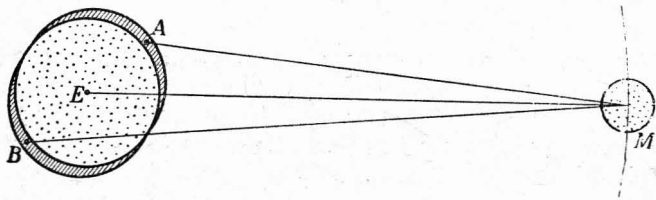


Рис. 3. Действие приливного трения.

личина должна быть легко заметна даже в несовершенных наблюдениях древних. Расхождение нарастает как квадрат промежутка времени. Если судить по последним работам Манка и Макдональда, вращение Земли замедляется несколько быстрее, чем указано выше*.

Наблюдаемое запаздывание затмений слишком велико, чтобы быть вызванным чем-либо иным, нежели замедлением вращения Земли. Однако, когда твердое тело теряет энергию вращения, оно теряет и угловой момент. Эта величина есть произведение угловой скорости на момент инерции. Она обычно записывается как $I\omega$, где I — момент инерции, а ω — угловая скорость.

Угловой момент в замкнутой системе должен оставаться постоянным. Поскольку Земля теряет угловой момент вращения, какое-то другое тело должно приобрести потерянное ею количество. На рис. 3 показано, как это происходит. Луна вызывает приливы в водах и в теле Земли. Земля вращается быстрее,

чем Луна обращается вокруг нее. Современные угловые моменты вращения Земли и обращения Луны вокруг Земли относятся как 1:4,82. Трение выносит приливный горб вперед, так что он опережает Луну. Приливный горб A притягивается Луной, и, поскольку он не находится на линии центров, возникает составляющая силы, стремящаяся замедлить вращение Земли. Подобным же образом Луна притягивает второй приливный горб B . В этом случае Луна стремится ускорить вращение Земли, но, так как горб A ближе к Луне, чем B , суммарный эффект приливного трения увеличивает длину суток и таким образом понижает угловой момент вращения Земли.

В то же время горбы A и B сами притягивают Луну. A стремится ускорить движение Луны по орбите, а B действует как тормоз. Влияние A больше, чем влияние B , и поэтому орбитальная скорость Луны слегка увеличивается. Это увеличение приводит к тому, что Луна немного удаляется от Земли, в результате чего угловой момент движения Луны по орбите увеличивается ровно на столько, сколько потеряла Земля. Луна будет двигаться по большей орбите немного медленнее, чем раньше. Увеличение энергии как раз таково, чтобы удалить Луну на большее расстояние.

Торможение из-за приливного трения, вызывающее замедление Земли, приблизительно соответствует рассеянию мощности более 1,5 млрд. киловатт.

Угловой момент, передаваемый от Земли к Луне, целиком идет на увеличение потенциальной энергии Луны. Кинетическая энергия Луны, ее среднее движение и линейная скорость уменьшаются, когда Луна медленно удаляется от Земли по спирали. Если время отсчитывать по абсолютным часам, то среднее движение Луны уменьшается, но если время измерять по замедляющемуся вращению Земли, то оно фактически увеличивается. Астрономы всегда рассматривают вековой приливный эффект как возрастание средней долготы Луны.

В будущем Луна будет удаляться от Земли, вообще говоря, с уменьшающейся скоростью, и в конце концов большая часть углового момента вращения Земли перейдет в угловой момент движения

* См., например, У. Манк, Г. Макдональд, Вращение Земли, М., изд-во «Мир», 1964. — Прим. ред.

Луны по орбите. Земля будет обращена к Луне всегда одной стороной, так же как сейчас Луна по отношению к Земле. Расстояние между двумя телами будет равно примерно 540 000 км, а сутки и месяц станут одинаковыми и будут составлять 47 современных суток. Согласно расчетам, такое положение наступит в 50 000 000 000 г.

Мы можем математически обратить процесс и получить некоторые сведения об истории Луны. Ясно, что в прошлом Луна была ближе к Земле, чем сейчас. Но без добавочной информации, которой мы, может быть, никогда и не получим, мы не можем ничего сказать о том, каково было кратчайшее расстояние до Луны.

Мы видели из формулы (3.2), что высота приливного горба обратно пропорциональна кубу расстояния между Землей и Луной. Кроме того, гравитационная пара сил, действующая на вращение Земли через лунные приливы, также обратно пропорциональна кубу расстояния и пропорциональна высоте приливного горба. Это означает, что трение, порождаемое приливным действием Луны на Землю, изменяется обратно пропорционально шестой степени расстояния до Луны.

В прошлом Луна была ближе к Земле, а Земля вращалась быстрее, чем сейчас. И то и другое верно, но мы не знаем, как далеко в прошлое мы можем продолжить наш анализ. Ключевым вопросом является вопрос о происхождении Луны. Оторвалась ли Луна от Земли, меньшем, чем современное? Захватила ли Земля Луну в какой-то момент? По-видимому, таковы представляющиеся возможности, и мы обсудим их в следующей главе. В этой главе мы будем предполагать, что Луна возникла близко к Земле и удаляется от нее из-за приливного трения.

Закон обратной пропорциональности шестой степени чрезвычайно чувствителен к расстоянию. В принятой модели Луна сначала быстро отдалялась от Земли, а позднее это удаление замедлилось.

Обратим этот процесс. При перемещении назад во времени орбита Луны сокращается, а Земля вращается быстрее, угловой момент переходит от Луны

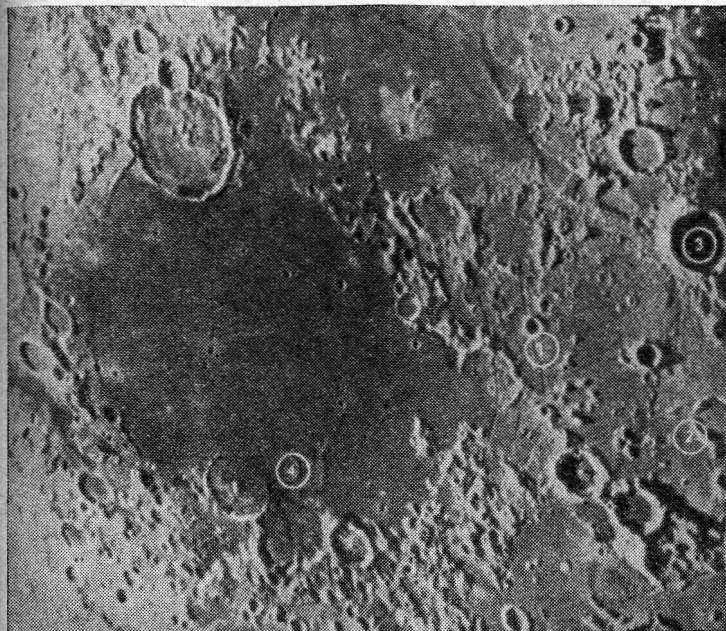


Фото 2. Область Моря Влажности (Йеркская обсерватория). 1 — борозды, параллельные краю Моря Влажности; 2 — купол; 3 — Буллиальд и радиальные образования вокруг него; 4 — посморской кратер, возникший до лавовых излияний.

к Земле. В какой-то момент в прошлом сутки и месяц могли сравняться и составлять примерно по 4,8 час. В это время Луна оказалась бы на расстоянии всего лишь 14 500 км, фактически внутри предела Роша, т. е. внутри области, где спутник разрушается приливными силами, создаваемыми центральным телом.

Джеффрис рассчитал, что Луна могла удаляться с минимального расстояния в течение 4 млрд. лет, что довольно близко к принимаемому возрасту Земли. Но этот промежуток времени, прошедший с момента наибольшей близости Луны к Земле, с необходимой точностью не известен.

История Луны не является предметом этой главы. Однако изменения расстояния до Луны должны оказывать несомненное воздействие на ее форму. Когда

Луна была ближе к Земле, приливные искажения ее играли большую роль, чем сейчас. Форма Луны, искаженная приливами, — это трехосный эллипсоид с наибольшей осью, направленной к Земле. В картинной плоскости полярная ось короче экваториальной. Формула для лунной поверхности на заданном расстоянии такова:

$$r = r' \left(1 + \frac{5}{12} \frac{M}{M'} \frac{r'^3}{c^3} \frac{7x^2 - 2y^2 - 5z^2}{r'^2} \right), \quad (4.1)$$

где полуоси Луны x , y и z равны соответственно

$$r' \left(1 + \frac{35}{12} \frac{M}{M'} \frac{r'^3}{c^3} \right), \quad r' \left(1 - \frac{10}{12} \frac{M}{M'} \frac{r'^3}{c^3} \right), \quad (4.2)$$

$$r' \left(1 - \frac{25}{12} \frac{M}{M'} \frac{r'^3}{c^3} \right).$$

Здесь r — радиус Луны;

r' — радиус средней эквивалентной лунной сферы;

M — масса Земли;

M' — масса Луны;

c — расстояние до Луны в лунных радиусах.

При современном расстоянии Луны формулы дают приращения $+38$, -11 и -27 м. Если бы форма Луны соответствовала всем гравитационным потенциалам и центробежным силам, три оси отличались бы от среднего именно на эти величины. В действительности же Луна даже приближенно не имеет формы, определяемой действующими сейчас силами.

Главные моменты инерции Луны должны в первом приближении иметь значения:

$$\frac{C' - A'}{C'} = 5 \frac{M}{M'} \frac{r'^3}{c^3} = 0,0000375, \quad (4.3)$$

$$\frac{C' - B'}{C'} = \frac{5}{4} \frac{M}{M'} \frac{r'^3}{c^3} = 0,0000094, \quad (4.4)$$

где $M/M' = 81$, а $c/r' = 221$.

Измеренная величина

$$\frac{C' - A'}{C'} = 0,000629 \quad (4.5)$$

в 17 раз больше, чем предсказывает теория.

Эта формула указывает на то, что у Луны есть значительный горб, направленный к Земле.

Величина в (4.5) получена по исследованиям физических либраций Луны. Либрации Луны — это реальные или кажущиеся колебания Луны, из-за которых наблюдатель на Земле в разное время может увидеть до 59% лунной поверхности. Например, наблюдатели на двух полосах Земли будут видеть Луну под несколько различными углами и, следовательно, детали на ее поверхности будут казаться смещенными. Подобным же образом Луна вращается вокруг оси с постоянной угловой скоростью, но из-за эллиптичности орбиты она обращается вокруг Земли с переменной скоростью. Сочетание того и другого вызывает смещение видимых невооруженным глазом деталей лунной поверхности. Существуют и другие сходные оптические либрации.

В противоположность им существует несколько небольших физических либраций, вызванных наличием у Луны трех неравных моментов инерции: A' , B' и C' . Из детального изучения этих физических либраций можно заключить, что Луна обладает динамическим вздутием, эквивалентным физическому горбу, возвышающемуся на 700 м над средней сферой в направлении Земли. Иными словами, этот радиус на 1070 м больше среднего радиуса в картинной плоскости.

Существует несколько путей для интерпретации динамического вздутия. Внешние слои могут быть неоднородными по плотности, и область с наибольшей плотностью может быть обращена к Земле. В этом случае видимого горба может и не существовать; при соответствующем подборе плотностей радиус, направленный к Земле, может быть даже наименьшим, а не наибольшим.

Горб может быть случайным нарушением формы Луны при ее охлаждении или случайным местным отклонением в количестве вещества, захваченного извне.

Но он может быть также и древним приливным горбом. Согласно такому истолкованию, Луна некогда была столь близка к Земле, что горб, образованный в ее теле приливным воздействием Земли, был равен наблюдаемому сейчас горбу или даже был еще большим. Предполагается, что в какой-то момент в прошлом Луна затвердела до такого состояния, что форма ее больше уже не могла приходить в соответствие с уменьшающимся приливным воздействием Земли при удалении Луны от нее. Горб, образованный древними приливами, сохранился в виде структурной аномалии.

Если динамическое вздутие действительно является древним приливным горбом, то, учитывая наблюдаемый факт, что отношение $(C' - A')/C'$ в 17 раз больше современного теоретического равновесного значения, можно определить расстояние между Землей и Луной, соответствующее этому отношению. Оно получается равным $a/\sqrt[3]{17}$, или $0,39 a$, т. е. $150\,000$ км (a — современное расстояние). Если горб — это застывший прилив, то Луна некогда приближалась к Земле до $150\,000$ км. Месяц тогда продолжался 6,3 наших современных суток.

Существуют ли другие наблюдения, подтверждающие реальность горба? Да, существуют. Форму обращенной к нам стороны Луны можно определить двумя методами. Простым глазом можно заметить, что терминатор, т. е. линия восхода или захода Солнца на Луне, разделяющая освещенную и темную стороны, имеет неправильную форму. Теоретически, точное изучение формы этой линии при разных фазах может показать, какие части Луны расположены выше среднего уровня, а какие ниже и насколько. Терминатор проходит через точки, в которых солнечные лучи касательны к поверхности Луны, и практически крайне трудно измерить точное положение места, где кончается солнечное освещение. Этим методом построены карты лунного рельефа, но с относительно низкой точностью.

В другом методе используется принцип стереоскопа. При разных либрациях поверхность Луны можно видеть под углами, отличающимися примерно

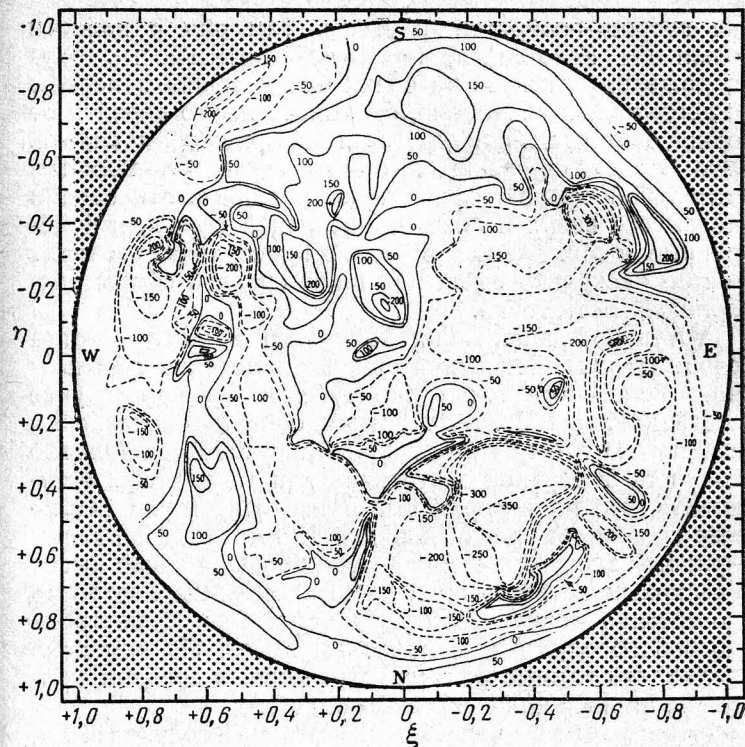


Рис. 4. Карта рельефа видимой стороны Луны.

Сплошные линии соответствуют областям, расположенным выше среднего уровня, пунктирные — пониженным областям. Отметки высот в единицах $0,00001$ радиуса Луны ($17,38$ м). (R. V. Baldwin, The measure of the Moon, The University of Chicago Press, Chicago, 1963.)

на 14° . Эти либрации происходят как в направлении восток — запад, так и в направлении север — юг.

Представьте себе фотографии, полученные при крайних либрациях. Если мы очень точно измерили положение лунных деталей на одной фотографии, и если для каждой фотографии мы знаем точную ориентацию Луны относительно наблюдателя, и если Луна является идеальной сферой, то мы, исходя из измеренных положений деталей на первой фотографии, можем рассчитать, где эти объекты будут расположены

на втором изображении Луны. Там они и должны были бы находиться, но в действительности, если положения объектов на обеих фотографиях измерены с достаточной точностью, оказывается, что перейти от одной фотографии к другой таким способом нельзя. Это происходит из-за того, что Луна не является идеальной сферой. Существуют реальные отклонения по высоте вверх и вниз от идеальной сферы, и измеренные расхождения в положениях точек говорят о том, насколько выше или ниже средней сферы расположены эти точки.

Осуществление таких измерений и их обработка очень трудны. Вероятная ошибка измерения абсолютного положения точки на Луне в лучшем случае составляет ± 200 м. Вероятная ошибка определения высоты по этому методу примерно ± 700 м. Однако точность измерений достаточна для того, чтобы установить, что на поверхности Луны существуют реальные колебания уровня порядка 10 км; когда по всему лунному диску было определено большое число высот различных деталей, оказалось возможным построить достаточно точную карту рельефа. Рис. 4 построен по 696 абсолютным измерениям высот. На нем ясно видно, что темные области, или моря, в среднем примерно на 3 км ниже светлых областей.

Динамическое вздутие имеет высоту только 1070 м. Это гораздо меньше местных колебаний уровня поверхности. Можно ли в этих условиях выявить реальный горб? По-видимому, да. Из анализа карты рельефа автор получил, что по измерениям светлых возвышенностей горб имеет высоту примерно 2140 м, а по измерениям морей 1220 м. Другие наблюдатели по менее точным данным получили для высоты горба сходную величину. Например, Франц нашел, что она равна 1980 м. Автор пересмотрел данные Франца и по возвышенностям получил 2260 м, а по морям 2040 м. Хейн нашел 3960 м. Пикеринг определил высоту в 2260 м, Саундер — в 920 м, Шрутка-Рехтенштамм и Хопман дали 2900 м. Риттер по деформациям терминатора получил 7020 м, так же как и Ваймер, тогда как Виртц нашел, что высота горба равна 2440 м. Вероятные ошибки всех этих определений велики.

Ценность каждого из этих определений, взятого в отдельности, мала, поскольку точность, с которой должны производиться измерения, приближается к теоретическому пределу точности, возможному для применявшихся оптических систем. Любое из них само по себе указывает лишь на то, что форма Луны близка к сферической. Однако когда девять различных исследований проведены двумя различными способами, по разным лунным объектам и с применением различных математических методов обработки и все они указывают на удлинение радиуса Луны, направленного к Земле, то следует признать весьма вероятным, что Луна действительно имеет такой горб и высота его составляет примерно 2100 м, что лишь немногим больше высоты динамически определенного горба. Доверие к такому выводу возрастает, если учесть, что и по возвышенностям и по низинам высота горба получается сходной, несмотря на различие в среднем уровне, превышающее размеры искомого горба.

Если в согласии с этим мы предположим, что высота горба равна 2100 м и он образован приливом, то Луна некогда приближалась к Земле на 110 000 км. Многие астрономы считают этот вывод интересным, но пока еще только вероятным. Правильность его не доказана, и на современном уровне знаний сделать этого нельзя.

Этот вывод подвергался критике на том основании, что тело лунных размеров не может быть твердым. Горб такой величины не находится в гидростатическом равновесии. Он должен вызывать напряжения в теле Луны. Если напряжения распределены по всему телу Луны вплоть до центра, то Луна должна выдерживать разность давлений в $1,3 \cdot 10^7$ дин/см², что равно примерно 13 атм, или давлению 130 м воды. Такое давление выдерживает хорошая каменная кладка. Если разность давлений поддерживается только 300-километровым внешним слоем твердых пород, а в центре напряжения отсутствуют, то необходимая прочность внешних слоев должна быть лишь на порядок больше.

Недавно было обнаружено, что земная кора обладает упругими, а не пластическими свойствами для

разностей давлений порядка $3 \cdot 10^9$ *дин/см²* или меньше и что это предельное значение медленно уменьшается с увеличением глубины. Такой предел упругости более чем достаточен для поддержания лунного горба. Таким образом, аргументов нет причин, почему бы лунный горб не мог быть застывшим образованием, созданным несколько миллиардов лет назад Землей в теле Луны, которое тогда было пластичным. Прежде чем расстояние Луны от Земли достигло 110 000 км, Луна затвердела до такого состояния, что форма ее больше не могла приходить в соответствие с уменьшающимся приливным воздействием Земли при удалении Луны на ее современное расстояние.

Такая интерпретация очень интересна, а может быть, и правильна, но изложенная версия истории Луны не является единственно возможной. Некоторые другие варианты лунной истории будут рассмотрены в следующей главе.

Какова бы ни была история системы Земля—Луна, она должна находиться в согласии с наблюдаемой формой Луны.

Происхождение Луны

В этой главе мы не придем ни к каким выводам, а просто рассмотрим несколько возможных вариантов истории Луны. Мы будем исходить из современной длины суток, современных орбит Луны, Земли и планет и из наблюдаемого замедления вращения Земли.

Много лет назад Дж. Дарвин заметил, что если бы большая часть углового момента движения Луны по орбите перешла в угловой момент вращения Земли, сутки и месяц составляли бы по 4,8 час и центры Луны и Земли были бы удалены друг от друга немногим более чем на 150 000 км. Тут Дарвин сделал блестящее предположение. (В то время думали, что Земля начала свое существование в виде горячей, жидкой массы). Дарвин заметил, что если бы массы Луны и Земли соединились, наименьший период собственных колебаний жидкой первичной Земли был бы примерно равен 2 час, тогда как объединенная планета Земля—Луна совершала бы один оборот за 4 час. Так как каждые сутки происходит два солнечных прилива, Дарвин пришел к заключению, что при 4-часовых сутках частота солнечных приливов могла приблизиться к основной частоте Земли. Если совпадение было точным, то возник резонанс. Резонанс беспредельно увеличивал высоту приливов, и, когда она достигла определенной величины, один из приливных горбов оторвался и сделался Луной.

Эта теория казалась идеальной и стала общепринятой. Некоторые даже думали, что бассейн Тихого океана — это рубец, оставшийся после отрыва Луны.

Плотность Луны и плотность верхней мантии Земли очень близки. Считалось также, что эта модель объясняет, почему Луна по сравнению с Землей гораздо больше, чем спутники других планет по сравнению с их центральными телами.

Несколькими годами позже было установлено, что Земля была слишком вязкой, чтобы приливный горб мог подняться до высоты, необходимой для его отделения, даже если бы резонанс и наступил.

Современные работы указывают на то, что основная частота Земли значительно меньше 2 час . Более того, если бы Земля замедлилась приливным трением от 4 до 24 час , внутри Земли выделилась бы энергия $1,2 \cdot 10^{10} \text{ эрг/г}$. Этой энергии достаточно для того, чтобы поднять температуру всей Земли до 1000°C . Место и время выделения этой энергии могли серьезно повлиять на термическую историю Земли.

Вполне естественно, что идея о рождении Луны из Земли была отброшена. Она была мертва вплоть до 1963 г., когда несколько ученых сделали попытку ее оживить.

Если скорость вращения деформируемого тела увеличивается, первоначальная сфера превращается в сплюснутый сфероид, называемый эллипсоидом Макпорена. Таким сфероидом является современная Земля, полярная ось которой меньше равных между собой экваториальных осей. При еще более быстром вращении тело деформируется в трехосный эллипсоид Якоби. При еще более быстром вращении достигается предельное отношение осей $8 : 10 : 23$; после этого возникает форма грушеобразного тела Пуанкаре с большой осью, расположенной в плоскости вращения. Вытянутый конец груши отрывается.

Такая последовательность событий была недавно предложена Уайзом для объяснения происхождения Луны. Уайз предположил, что первичная Земля вращалась с периодом $2 \text{ час } 39 \text{ мин}$. Первая трудность заключена именно в этом. Угловой момент молодой Земли в $3,7$ раза превышал бы полный угловой момент, содержащийся сейчас в системе Земля—Луна. Чтобы объяснить потерю углового момента, Уайз предположил существование некоего неизвестного процесса.

После того как деление произошло, Земля все еще продолжала бы вращаться с периодом $2 \text{ час } 39 \text{ мин}$. Замедление до 24 час привело бы к выделению энергии в количестве, достаточном для нагрева всей Земли до температуры 2500°C и для расплавления ее. Большая часть этой энергии выделилась бы вскоре после отделения Луны.

Уайз предположил, что, когда Земля только образовалась, она была однородной и вращалась быстро, но все же медленнее, чем за $2 \text{ час } 39 \text{ мин}$. Гравитационное опускание более плотного вещества с образованием ядра и уплотнение Земли понизили момент инерции, причем Земля стала расслоенной по плотности. Для сохранения углового момента сутки должны были сократиться примерно на $0,5 \text{ час}$. Таким образом, критический рубеж для вращения в $2 \text{ час } 39 \text{ мин}$ был перейден, и родилась Луна.

О'Киф, используя более детальные расчеты Роберта, нашел, что для того, чтобы было возможно деление, Земля должна была вращаться еще быстрее. По его модели молодая Земля превратилась бы в трехосный эллипсоид Якоби, если бы она была однородной по плотности и вращалась с периодом $2 \text{ час } 39 \text{ мин}$. Если земное ядро образовалось путем опускания железа к центру, критический момент для деления достигался при периоде $2 \text{ час } 18 \text{ мин}$, тогда как образование ядра могло укоротить сутки до $2 \text{ час } 11 \text{ мин}$. Однако как раз в этом нет уверенности, ибо этому противодействовали два эффекта. Во-первых, при опускании железа к центру Земли его потенциальная энергия превращалась в тепло. Масса 1 г , опускающаяся на 2000 км , выделяет примерно $8 \cdot 10^{11} \text{ эрг}$. В результате Земля становилась гораздо горячее и, вероятно, расширялась, стремясь замедлить скорость вращения на величину, способную предотвратить деление. Во-вторых, когда железо замещает в ядре силикаты, они поднимаются вверх. Так как силикаты более сжимаемы, чем железо, при поднятии они расширяются больше, чем сжимается опускающееся железо, что также ведет к увеличению объема Земли и, следовательно, ее момента инерции. Оба эти эффекта меньше, чем эффект, вызванный образованием плотного ядра, но их может оказаться

достаточно для того, чтобы предотвратить распад молодой Земли из-за слишком быстрого вращения.

Из этой дилеммы возможен выход. Большинство геологов считает, что земное ядро не является железным. Некоторые специалисты полагают, что химический состав Земли повсеместно практически одинаков и что плотное ядро образовано фазовым переходом. Фазовый переход — это изменение кристаллической структуры до более плотного состояния при увеличении давления. Фазовый переход при высоких давлениях может происходить во многих веществах, в том числе и в горных породах, обычно встречающихся в Земле. При конденсации, сжатии и быстром вращении Земли мог наступить момент, когда увеличение давления вызвало фазовый переход. Это могло быть катастрофическим событием, способствовавшим делению.

Существуют и другие теории, основанные на модели этого типа. Все они сталкиваются с той трудностью, что для того, чтобы первичная Земля могла разделиться, она должна была вращаться столь быстро, что ее угловой момент должен был в несколько раз превосходить момент современной системы Земля—Луна. Трудно предложить приемлемый способ удаления этого избытка из системы.

Вдобавок столь быстрое вращение означает, что Земля после образования Луны должна была очень сильно нагреться приливным трением. Хотя тепло выделялось очень близко к поверхности и, следовательно, излучалось в пространство, Земля должна была нагреться гораздо сильнее, чем при распаде радиоактивных элементов.

Трудности, присущие различным теориям отделения, привели других ученых к предположению, что Земля и Луна — это двойная планета и обе они возникли как отдельные тела, связанные в пространстве друг с другом. Все согласны с тем, что Земля и Луна возникли путем аккреции* частиц вещества в косми-

* Аккреция — постепенный захват телом пылевой или газовой материи из космического пространства (звездой, планетой или даже небольшой глыбой или случайным сгущением, как в случае образования Луны). — *Прим. перев.*

ческом пространстве. Сейчас считается, что, по-видимому, частицы были холодными. По этой модели Земля и Луна первоначально были небольшими. Их маленькие массы создавали и небольшое гравитационное притяжение. По мере роста они притягивали друг друга все сильнее и в результате тесно сблизались. В конце процесса аккреции они были относительно близки друг к другу. Впоследствии приливное трение их разделило.

Возражение против этой теории состоит в том, что плотности Земли и Луны совершенно различны. Земля гораздо плотнее Луны, даже если учесть эффект сжатия. Полагают, что это указывает на то, что оба тела не могли образоваться из одной и той же части первичного солнечного облака.

Юри пытался отвести это возражение, предположив, что Земля и Луна сформировались как отдельные планеты и что некогда, на раннем этапе развития солнечной системы, Луна прошла достаточно близко от Земли и была ею захвачена на орбиту с прямым движением.

Если бы Земля и Луна были одни в пространстве, одно тело не могло бы захватить другое. Луна либо столкнулась бы с Землей, либо прошла бы близко от нее, а затем удалилась. Другими словами, Луна при прохождении близ Земли в любом случае имела бы слишком большую кинетическую энергию, чтобы быть захваченной. Для того чтобы захват произошел, часть энергии движения Луны должна быть удалена. Юри предположил, что это могло произойти либо при помощи приливного трения, либо путем взаимодействия с Солнцем. При захвате любого типа должно было соблюдаться очень точное равновесие сил.

Наиболее тщательно разработал эту проблему Герстенкорн. Подобно Юри, он предположил, что Луна некогда была отдельной планетой. Некогда на ранних этапах истории Земли, Луна была захвачена. После захвата она двигалась по орбите с большим эксцентриситетом и обладала обратным движением, т. е. двигалась в направлении, противоположном современному и противоположном направлению вращения Земли. Приливное трение постепенно приблизило Луну к Земле. В то же время эксцентриситет

орбиты уменьшался, а наклонение орбиты увеличивалось.

В течение долгого времени Луна имела обратное движение по орбите. Приливное трение непрерывно замедляло вращение Земли, и при этом Луна постепенно приближалась к Земле. Наконец, так как приливное трение обратно пропорционально шестой степени расстояния, Луна подошла к Земле совсем близко, на несколько тысяч километров. После того как была пройдена стадия полярной орбиты, наклонение орбиты превысило 90° и движение стало прямым. С этого времени приливное трение стало удалять Луну от Земли и продолжало замедлять вращение Земли.

Как и все подобные теории, гипотеза Герстенкорна сопряжена с трудностями. Для нее требуется, чтобы начальный период вращения Земли был равен 2,6 час. Это значение следует из необходимости сохранения вектора углового момента на протяжении эволюции системы Земля—Луна. Такое большое значение первоначального вращательного углового момента Земли необходимо, чтобы скомпенсировать угловой момент, связанный с обратным движением захваченной Луны. Кроме того, должен существовать значительный запас углового момента, сосредоточенный во вращении Земли в момент наибольшего сближения с Луной, чтобы Луна могла удалиться на современное расстояние.

Рассеяние кинетической энергии вращения могло поднять температуру Земли до 2500°C и расплавить ее. Большая часть этой энергии должна была выделяться в тот короткий период, когда Луна устремилась к Земле и затем быстро от нее удалась.

При обсуждении всех этих теорий ничего не было сказано о шкале времени. Сейчас общепринято, что возраст Земли порядка 4,5 млрд. лет. Во всех моделях, кроме последней, Луна фактически должна иметь тот же возраст, что и Земля. Все это время она удалялась от Земли по увеличивающейся орбите.

Ранние работы Джеффриса об эффектах приливного трения привели к грубой оценке возраста Луны в 4 млрд. лет. Казалось, это находится в прекрасном согласии с возрастом Земли. Недавно, однако,

Манк и Макдональд в результате анализа наблюдений показали, что силы приливного трения более значительны, чем это считалось, и для того, чтобы приливное трение удалило Луну с любого возможного минимального расстояния на современное, достаточно не более 1,78 млрд. лет. По сравнению с возрастом Земли этот период столь короток, что относительно большинства предложенных гипотез происхождения и развития Луны возникают серьезные сомнения.

Наиболее остроумное подтверждение уменьшения скорости вращения Земли недавно было найдено Уэллсом. Он заметил, что у различных ископаемых кораллов в кольцах роста обнаруживаются годовые и суточные циклы. Если вращение Земли замедляется, в далеком прошлом год должен был содержать больше суток, чем сейчас. Есть основания считать, что в пенсильванский период*, вероятно 280 млн. лет назад, в году было 390 суток, в девонский период, 345 млн. лет назад, год содержал 400 суток. Эти значения согласуются с наблюдаемой сейчас скоростью увеличения длины суток.

Ученые сейчас не сомневаются, что распространение в прошлое современной скорости приливного торможения дает максимальную оценку возраста системы Земля—Луна. Однако все еще не ясно, типична ли современная скорость. Она может быть гораздо больше средней, и это позволило бы согласовать между собой возрасты Земли и Луны. Если скорость типична, то не возникает вопроса об отделении Луны от Земли или об образовании их вблизи друг друга. Этого не могло бы произойти. Луна должна была быть захвачена Землей. Гипотеза Герстенкорна согласуется с новыми оценками скорости приливного торможения: Луна, двигаясь попятно по первоначальной орбите, максимально сблизилась с Землей 1,78 млрд. лет назад.

Если Луна — захваченная планета и она была захвачена на прямую орбиту, это могло случиться и после указанного момента. Если это произошло, то откуда пришла Луна? Существуют две возможности:

* Иногда каменноугольный период делится на два: пенсильванский и более древний миссисипский. — *Прим. перев.*

она была либо астероидом, либо независимой планетой, орбита которой проходила вблизи земной орбиты. В последнем случае можно показать, что планета Луна за промежуток времени, не превышающий примерно 100 млн. лет, была бы захвачена Землей или они столкнулись бы, распавшись в результате этого на меньшие тела. Если все планеты образовались одновременно (что кажется вероятным), то планета Луна могла существовать независимо лишь в течение 3% возраста, который имела Земля к моменту максимального сближения, т. е. до момента 1,78 млрд. лет назад.

Наоборот, если Луна была некогда астероидом с начальным средним расстоянием от Солнца порядка 2,8 астрономической единицы*, то в результате возмущений ее орбита могла приобрести эксцентриситет примерно 0,8, и захват мог произойти. Энергия, которая рассеялась бы при захвате на орбиту вокруг Земли, равнялась бы приблизительно $2 \cdot 10^{12}$ эрг/г для Луны или $2,5 \cdot 10^{10}$ эрг/г для Земли. Если такое количество энергии было рассеяно приливным трением внутри Земли, то это подняло бы ее среднюю температуру до 1700°С. Такая добавка энергии на ранних этапах истории Земли должна была бы до сих пор оказывать заметное влияние на современный тепловой поток.

Предполагалось даже, что Земля имела другую далекую маленькую луну. Планета Луна при одном из своих прохождений вблизи Земли столкнулась с маленькой лунной и потеряла орбитальную энергию, что сделало возможным ее захват Землей. Возражение против этого обычное: выделилось бы слишком много тепла и столкнувшиеся тела почти полностью испарились бы.

Никто еще не придумал приемлемого механизма для захвата Луны Землей.

Недавно была предложена еще одна теория. Вместо одной большой Луны Земля могла иметь целое семейство маленьких лун. Эти малые луны имели гораздо меньшее влияние на Землю, чем современная

* Астрономическая единица (а. е.) — среднее расстояние от Земли до Солнца, равное 149,6 млн. км. — Прим. перев.

Луна. Например, луна с массой в $1/4$ массы современной Луны создавала приливное торможение, в 16 раз меньшее, чем наша Луна на том же расстоянии. Следовательно, семейство маленьких лун могло в течение долгого времени оставаться относительно устойчивым. Они очень медленно удалялись от Земли. В конце концов внутренняя луна и следующая за нею захватили друг друга: столкнулись на малой скорости и объединились. Затем эта объединенная луна двигалась от Земли уже быстрее, ибо создавала в Земле большие приливные эффекты. Она в свою очередь завладела другими лунами и образовала современную Луну. Таким способом можно объяснить позднее появление Луны в системе Земля—Луна, как этого требуют результаты новейших измерений скорости увеличения длины суток. Не происходило бы также колоссального выделения тепла в Земле из-за приливного трения, и Земля не должна была вращаться так быстро, как этого требуют некоторые теории.

Против этой много объясняющей теории говорит недавно установленный факт, что число кратеров ударного происхождения на лунных морях столь велико по сравнению с современным потоком метеоритов различных масс вблизи Земли, что кажется невозможным, чтобы моря могли иметь возраст порядка 1 млрд. лет. А светлые возвышенные районы Луны значительно старше морей.

Таким образом, мы находимся в затруднительном положении. Не существует теории происхождения Луны, которая давала бы удовлетворительное объяснение системе Земля—Луна в том виде, как мы ее знаем.

Луна не оптическая иллюзия и не мираж. Она существует и связана с Землей. 4,5 млрд. лет назад Земли еще не было. В какой-то момент в течение этого периода два тела образовались и стали партнерами. Но как это произошло?

Основные образования на поверхности Луны

Если посмотреть на Луну невооруженным глазом, то кое-что о ней уже можно узнать. Сразу бросается в глаза существование двух областей, различающихся по яркости. Они не совершенно изолированы друг от друга, ибо отдельные темные пятна можно видеть в светлых областях, и наоборот. Хотя эти темные детали известны с древнейших времен, они не имели названий до начала XVII в. Примитивные телескопы того времени не могли четко выявить природу темных областей. Серые пятна быстро получили причудливые названия, такие, как *Mare Nubium*, т. е. Море Облаков. Вскоре было установлено, что моря эти не заполнены водой, как некогда думали, но до сих пор темные пятна известны под названиями «морей», «заливов», «болот» и даже «океана». Светлые области были сначала названы материками, но это название не прижилось, и лишь в последние годы получило вторую жизнь. Слово «материк» столь же условно, как «море», и является удобным обозначением для светлых областей Луны.

Невооруженным глазом заметно также, что терминатор, т. е. линия раздела между днем и ночью на Луне, имеет неправильную форму, на нем видны значительные неровности. Отсюда можно сделать вывод, что высота образований на поверхности Луны очень различна. При некоторых фазах можно обнаружить, что моря расположены ниже материков. Линия терминатора часто искривлена также горными цепями и отдельными крупными кратерами.

Даже в телескоп умеренных размеров видно, что мир Луны, этого таинственного и прекрасного шара,

абсолютно не похож ни на какой земной ландшафт. Наиболее многочисленными и разнообразными образованиями на ней являются кратеры.

КРАТЕРЫ

Лунные кратеры получили свое название от греческого слова, обозначающего «чаша». Это название удачно во многих отношениях, кроме одного. Этим словом стали обозначать земные вулканические кратеры. На Луне обычные кратеры — не вулканические, но название навело многих ученых на мысль, что они обязаны своим происхождением извержениям.

Было четко показано, что обычные лунные кратеры образованы ударами и последующими взрывами больших и малых тел, дождем падающих на Луну из космоса. Это не значит, что на Луне совсем отсутствуют вулканические кратеры, вовсе нет. Верно, что больших вулканов, подобных Фудзияме, на Луне нет; но есть много небольших деталей, возникших под влиянием внутренних сил.

Малые кратеры гораздо многочисленнее крупных. В первом приближении 10-километровых кратеров в 4 раза больше, чем 20-километровых, а 5-километровых — в 4 раза больше, чем 10-километровых. Это правило соблюдается с высокой точностью для видимых кратеров всех размеров.

Человека, смотрящего на лунный кратер в телескоп, обычно вводит в заблуждение красивая иллюзия. Кратеры кажутся гораздо глубже, чем на самом деле. Измерения показывают, что они по отношению к диаметру совсем неглубоки. На рис. 5, изображающем сечение большого кратера Феофил, показана форма такого кратера. Глядя на этот рисунок, можно сделать выводы, которые, как доказано, справедливы и для других кратеров. Лунный кратер — это огромная выемка, глубина которой мала по сравнению с диаметром. Дно углубления ниже окружающей поверхности. У кратера есть вал, высота которого над окружающей поверхностью меньше глубины кратера. Крутизна внутреннего склона кратерного вала больше, чем внешнего, но всегда меньше угла естественного откоса для сыпучего материала. Ширина вала от гребня до точки, где внешний склон достигает

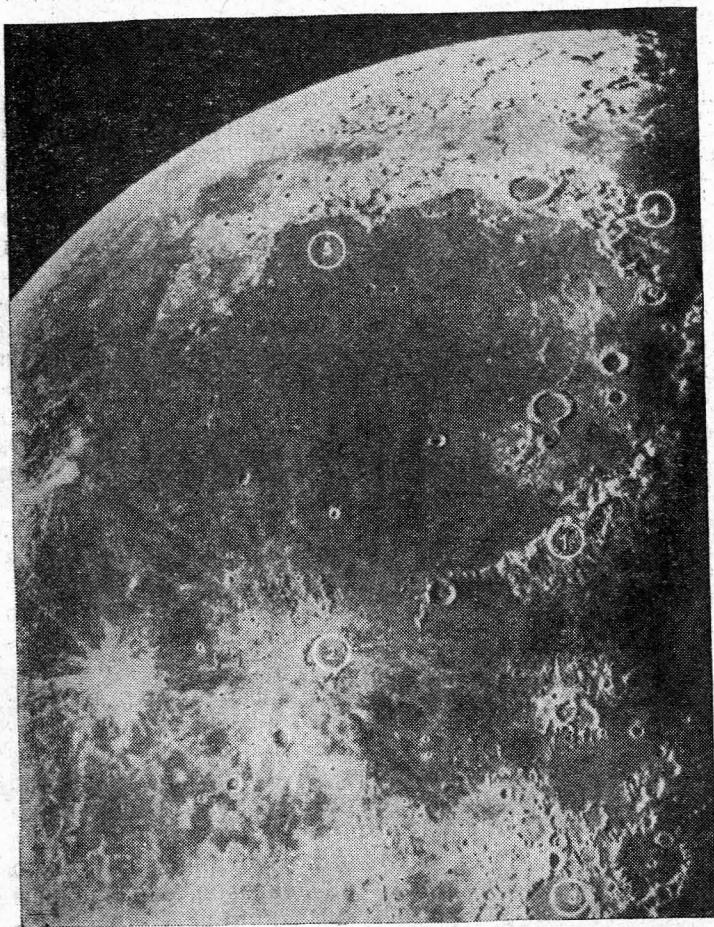


Фото 3. Область Моря Дождей (Ликская обсерватория).
 1 — Апеннины; 2 — Коперник и его лучи; 3 — Птолемей и соседние долины, радиальные к Моря Дождей; 4 — Долина Альп;
 5 — Залив Радуги.

практически уровня поверхности, составляет примерно $\frac{1}{5}$ ширины кратера от гребня до гребня. Объем вала лунного кратера практически равен объему подповерхностной части кратера, хотя на первый взгляд кажется, что это не так. У кратера может быть (хотя и не обязательно) центральная горка. У малых кратеров ее обычно нет. Очень крупные кратеры часто имеют горки, но они относительно невелики и, как

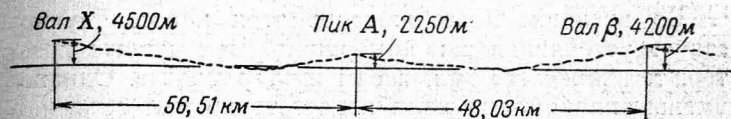


Рис. 5. Разрез через кратер Феофил по данным обсерватории Мак-Мас — Халберт (Publ. Obs. Michigan, vol. 6, № 8, 67, 1937).
 Вертикальный и горизонтальный масштабы одинаковы.

правило, довольно сложны по строению. Кратеры средних размеров обычно обладают центральными горками, часто очень заметными. У Феофила центральная горка очень массивна. По высоте центральная горка никогда не достигает уровня поверхности.

Некоторые кратеры имеют новый и «свежий» вид. Кажется, что они образовались только вчера. К этой категории относится большинство маленьких кратеров. Многие крупные кратеры также выглядят новыми, но большая часть их кажется старше.

Мы не умеем определять абсолютный возраст лунного кратера, но по общему виду его можно сказать, молод он или стар. Старые кратеры нередко имеют размытые очертания. Они более или менее плотно усыпаны более молодыми и меньшими кратерами. Их валы в среднем немного ниже, а чаши их менее глубоки, чем у соответствующих более новых кратеров.

На светлых областях кратеров, грубо говоря, в 15 раз больше, чем на темных морях. Признано также, что темные области образовались после того, как возникло большинство кратеров, ибо в тех местах, где слой темного вещества тонок, валы старых кратеров проступают над более молодой поверхностью.

Ударные кратеры можно разделить по их внешнему виду и по числу перекрывающих их более поздних кратеров на четыре возрастных класса. Кратеры 1-го класса выглядят самыми новыми и рассеяны по всей Луне практически случайно. Это ясно указывает на то, что они моложе морей, где бы на Луне они ни находились. Другие три класса ограничиваются светлыми областями, что указывает на то, что они старше морей.

Во внешнем виде кратеров этих классов существует устойчивая закономерность. Чем старше кратер, тем ниже его вал, а сам кратер мельче. Однако уменьшения объема вала недостаточно для объяснения уменьшения объема кратера. Это должно означать, что силы эрозии не являются главными в изменении формы кратера с увеличением возраста. Хотя какая-то эрозия несомненно происходит, форма кратеров изменяется в основном за счет изостатического выравнивания. Валы — это огромные кольца вещества. Они давят своим весом на ограниченную площадь, и эта площадь стремится опускаться под нагрузкой. Наоборот, образование кратера создает уменьшение нагрузки в самом кратере. Эти места под влиянием существующего давления стремятся подняться. Изостатический эффект проявляется наиболее сильно в 4-м классе, или у самых старых кратеров, и мал или совсем отсутствует у молодых образований.

Существует и 5-й класс кратеров, заполненных темным веществом и, следовательно, более старых, чем моря. Обычно кратеры 5-го класса находятся в наиболее низких частях лунной поверхности. Некоторые из кратеров этого класса практически погребены под лавой и часто называются *затопленными кратерами*. Любой заполненный лавой кратер доморского периода относится к 5-му классу.

Небольшие лунные кратеры 1-го класса имеют в сечении примерно параболическую форму, хотя в некоторых случаях, у самых маленьких объектов, она приближается к конической. С увеличением размеров строение кратеров меняется. Появляются центральные горки. У кратеров больших размеров эти горки

часто составные. На внутренних склонах стенок кратеров часто появляются террасы.

Типичный небольшой лунный кратер находится к северу от горы, известной под названием Питон. Этот крошечный кратер имеет в диаметре 2,1 км, глубину 310 м и высоту вала над поверхностью моря 90 м. Этот кратер по размерам приходится между Аризонским метеоритным кратером и кратером Нью-Квебек на полуострове Унгава в Квебеке (Канада).

Примером следующего по величине кратера после этого безымянного маленького углубления может служить кратер Бэр диаметром 10 км, глубиной 900 м с максимальной высотой вала 450 м. Бэр расположен к югу от двух подобных же кратеров между Архимедом и Тимохарисом. Кратер таких размеров виден с Земли под углом только 5"; не удивительно, что трудно много сказать о его тонкой структуре. Во внешних частях вала видны неправильности, как если бы кратерообразующая сила разбрасывала глыбы скал не совсем равномерно. Центральной горки у кратера нет. Бэр относительно неглубок по сравнению с его меньшими соседями.

На широких просторах Моря Ясности четко выделяется 16-километровый Бессель. Глубина его 1300 м, высота вала 500 м. Медлер не нашел у него центральной горки, но Уэбб утверждал, что он видел ее дважды. Стенки кратера (почти как у меньших кратеров) одиночные. Отношения глубины к диаметру для трех описанных кратеров равны соответственно $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{10}$ и $\frac{1}{12}$. Это отношение уменьшается с ростом абсолютных размеров кратера до величины $\frac{1}{50}$ у самых больших нормальных кратеров. При этом также медленно увеличивается высота вала.

На дне громадного Клавия лежит Клавий D диаметром 24 км, глубиной 1800 м и с валом, выступающим на 950 м. Он имеет маленькую, но четко выраженную центральную горку, которая, подобно всем горкам в лунных кратерах, не поднимается над уровнем окружающей поверхности. Вал явно неровный по высоте, на его внешних склонах видны желобки и возвышения, очень напоминающие те, что видны с самолета вокруг Аризонского метеоритного кратера.

Вдоль всего внутреннего склона кратера на нормальном уровне поверхности имеется слабый намек на террасу. Здесь впервые появляется эта деталь, столь заметная у многих более крупных кратеров.

Важно отметить, что эти тонкие детали исчезают на плохих фотографиях: на них вид Клавия D становится похожим на вид кратера Бэр.

На краю Моря Нектара находится великолепный кратер Медлер, названный так в честь одного из крупнейших исследователей Луны. Это углубление диаметром 32 км, глубиной 2300 м, с валом высотой 1100 м. Его центральное возвышение хорошо видно и состоит из главного и нескольких побочных пиков. На внутреннем склоне, несколько ниже главного вала, имеется хорошо выраженный гребень, проходящий вокруг всего кратера.

Здесь ясно видно, что в кратере имели место взрывные процессы, ибо из Медлера выброшено светлое мелкодробленное вещество. Оно хорошо заметно к юго-западу от кратера, в Море Нектара. Видны также следы гряд, исходящих из кратера, и часть внешнего вала; есть признаки крупных выбросов, окружающих главный кратер.

Во многих отношениях самым красивым кратером на Луне является Аристилл. Он среднего размера: 56 км в диаметре, 3150 м глубиной и обладает валом высотой 1350 м. Аристилл расположен в фокусе горной дуги, состоящей из хребтов Альп, Кавказа и Апеннин. Окружающая область Моря Дождей ровная и лишь случайно нарушается неглубокими бороздами. По этой площади разбросана система лучей, простирающихся до Платона. На круглой площади диаметром 300 км расположено бесчисленное множество борозд и гряд, радиально исходящих из кратера. Многие из них похожи на долины борозд пересекают кольца частично погребенных кратеров к северу от Аристилла. Хорошо развита обычная обломочная зона, на внутренних стенках кратера видны три главные террасы, причем линии раздела между ними выражены не столь четко, как у меньших кратеров. Центральная горка — это огромный горный комплекс, состоящий по меньшей мере из семи больших неправильных глыб.

Тип строения, намечавшийся в Клавии D, здесь достигает полного развития. У еще больших кратеров строение отличается только в деталях. На огромной южной возвышенности лежит Тихо, который Уэбб назвал «столичным кратером Луны». Его диаметр 86 км, глубина 3700 м, а максимальная высота вала 2400 м, хотя средняя высота меньше. Тихо в любое время представляет собой великолепное зрелище. Гигантская система лучей, видимая даже невооруженным глазом, придает Луне в полной фазе вид очищенного апельсина. Некоторые из лучей Тихо можно проследить на тысячи километров. Центральное возвышение довольно сложное, хотя в нем есть один пик, господствующий над остальными. Дно неровное, внутренние стенки поднимаются пятью террасами к четко выраженному гребню. Вал спускается наружу массивными террасами и уступами, являющимися логическим развитием образований, неясно просматривающихся на неправильных внешних склонах Клавия D.

Вся область в непосредственной близости от Тихо имеет размытый вид, вызванный совокупным влиянием тысяч мельчайших кратеров, кратероподобных образований и радиальных гряд и борозд. Несомненно, эта структура является побочным результатом действия мощных сил, высвободившихся при рождении Тихо. Через кору прошла мощная взрывная волна, и мириады осколков дождем выпали в окрестностях кратера, в результате чего первоначальная резкость очертаний была приглушена.

104-километровый Феофил — это укрупненный вариант Тихо. Его глубина 4400 м, высота вала 1160 м. У него можно найти все описанные выше свойства, включая слабую, но четко выраженную систему лучей.

Кратер Феофил представляет для нас интерес не столько из-за его собственных физических свойств, сколько из-за того, что он образовался значительно позднее другого, почти столь же большого кратера Кирилл. Феофил накладывается на это более старое образование. В районе перекрытия Феофил выглядит совершенно обычно, тогда как часть Кирилла исчезла. Это типично для тех немногих случаев, когда

перекрываются два почти равных кратера. Более молодой из двух кратеров сформирован собственными силами, тогда как более старый частично разрушен.

Ни один из крупнейших кратеров не находится в первобытном состоянии. Очевидно, очень большие кратеры стары и повреждены при образовании более молодых, меньших кратеров, возникавших в той же области. Величайший из нормальных кратеров на Луне — это Клавий, диаметром 234 км, глубиной 4900 м и с валом высотой 1650 м. Его радиально расположенные уступы образуют почти круговую горную цепь. Он имеет сложную центральную горку, которая не очень заметна по сравнению с размерами кратера. Дно его почти плоское, что типично для таких больших кратеров, и наблюдатель, находящийся вблизи его центра, не мог бы увидеть вала кратера из-за кривизны лунной поверхности.

Кратеры, сходные по строению с Феофилом, относятся к 1-му классу кратеров. Клавий, Магин и Деландр — типичные представители последовательно все более старых классов: 2-, 3- и 4-го; Птолемей — это кратер 5-го класса.

Ранее кратеры произвольно разделялись на множество типов, таких, как кратеры-лунки, просто кратеры, цирки, кратерные моря. Эти названия употребляются редко, ибо теперь ясно, что существует только одна большая последовательность кратеров; среди кратеров любых размеров есть разные виды, вызванные различием возрастов. Фотографии, полученные 31 июля 1964 г. зондом «Рейнджер-7», с чрезвычайной ясностью и подробностью показали, что эта последовательность кратерных форм продолжается непрерывно и в сторону меньших размеров, вплоть до кратеров диаметром менее 1 м.

ЛУЧИ КРАТЕРОВ

Примерно $\frac{1}{5}$ кратеров 1-го класса, образовавшихся в послеморской период, окружена белыми ореолами и полосками, которые называются *лучами*. Хотя для объяснения лучей было выдвинуто много причудливых теорий, обычно считается, что они состоят из лунных пород, измельченных и разбросан-

ных энергией, освободившейся при рождении кратера. Хорошо известно, что обычные породы в измельченном состоянии гораздо белее исходного вещества. По видимому, лунные породы обладают тем же свойством. В Аризонском метеоритном кратере такая каменная мука составляет заметную долю вещества, выброшенного из кратера. На Луне кратеры с лучами часто обладают небольшими нимбами светлого вещества, окружающими выемку и простирающимися от нее в стороны отдельными лучами. Диаметр системы лучей в среднем в 12 раз больше диаметра кратера.

Хотя луч от большого кратера тянется узкой полосой на несколько сот километров, он не является непрерывной дорожкой пыли. Тщательное исследование показывает, что луч состоит из большого числа отдельных удлиненных пятен. Взрыв, образовавший кратер, должен был раздробить скальные породы и разбросать большие сгустки пыли по касательным к поверхности траекториям, так что огибающая для данного луча очерчивает группу эллиптических пятен, направленных от кратера; каждое пятно отмечает место удара отдельного сгустка выброшенного вещества.

Кроме пятен «каменной муки», вдоль лучей часто видны вторичные кратеры, образованные при ударах с малыми скоростями кусков твердого вещества, выброшенных из кратера одновременно с пылью. У больших кратеров, таких, как Коперник, эти вторичные кратеры очень многочисленны; часто они неглубоки, с очень низкими валами и могут быть сильно вытянутыми. В среднем они направлены от главного кратера, но отдельные углубления могут иметь любую ориентацию. На фотографиях, полученных зондом «Рейнджер», видно много маленьких кратеров, расположенных на лучах.

КРУГОВЫЕ МОРЯ

На лике Луны четко выделяются пять огромных образований: Море Дождей, Море Ясности, Море Влажности, Море Нектара, Море Кризисов и несколько других, расположенных очень близко к лимбу. Эти объекты — просто огромные кратеры, образованные

ударами гигантских планетезималей. Используемый здесь термин «круговые моря» относится к кратерам, а не к последующим лавовым заполнениям. Они несколько отличаются по масштабам и сложности от обычных кратеров, но образовались таким же путем. Кратер Гримальди диаметром 192 км легко можно назвать маленьким круговым морем. Кратер Моря Дождей имеет в диаметре 674 км. Море Дождей образовалось при ударе тела с малой скоростью, ибо оно имеет заметную осевую симметрию. Соударения с большой скоростью образуют кратеры с большей центральной симметрией. Если скорость была минимально возможной, около 3 км/сек, то планетезималь, создавшая Море Дождей, имела диаметр 160 км. При больших скоростях она могла быть и меньше.

Каждое круговое море окружено гористым валом. За ним находится область понижения. Далее идет слабо выделяющийся вал, диаметром в 1,6 раза больше главного кратера; за этим валом находится более высокое кольцо, концентричное с кратером и превышающее его вдвое по диаметру. Такую структуру можно обнаружить вокруг некоторых крупнейших кратеров, однако отчетливо она проявляется только у круговых морей. На карте рельефа (см. рис. 4) ясно видно понижение вокруг Моря Нектара и внешний вал, самая высокая часть которого известна под названием Алтайских гор. Это объясняется тем, что при столкновении планетезимали с Луной в скальных породах возникла огромная волна, устремившаяся наружу и затем застывшая в таком положении. Эти структуры, по-видимому, аналогичны ряби, образующейся при падении камня в лужу воды. Где бы на Луне ни находилось основное образование, вокруг него расположено от одного до семи таких колец, но обычно два.

Колоссальные удары, образовавшие эти объекты, вызвали на Луне вторичные явления. Из центральной зоны было радиально выброшено большое количество вещества, которое выпало на разных расстояниях от места выброса. Воздействие этих выбросов из Моря Дождей можно проследить на большей части всего лунного диска. Они прорыли долины и бо-

розды и воздвигли гряды гор. Большие участки на Луне выглядят так, как будто их подмели метлой, а горы Гемуса, окаймляющие Море Ясности, были почти разрушены осколками, вылетающими из Моря Дождей.

Второй эффект — это образование грабеноподобных долин, также расположенных радиально к зоне соударения. Прекрасным примером системы, связанной с Морем Дождей, является долина Альп. Радиально к Морю Нектара расположено несколько огромных долин. Долина Рейта имеет в ширину около 25 км и простирается более чем на 150 км. Хотя механизм образования этих огромных долин и кольцевых складок, окружающих круговые моря, не вполне понятен, они свидетельствуют, что в местах соударений, образовавших крупнейшие лунные кратеры, выделялась фантастически огромная энергия.

ТЕМНЫЕ МОРЯ

Темные области бывают трех типов. Первый класс включает в себя обширные области, такие, как Море Облаков и Океан Бурь, и многочисленные небольшие пятна, расположенные между кратерами. Второй класс — большие круговые моря, также заполненные темным веществом. Это объекты типа Моря Дождей и Моря Нектара. Следует проводить строгое различие между гигантскими кратерами и их последующим заполнением. Третий обширный класс включает те кратеры, которые заполнены темным веществом.

Некоторые основные факты относительно морей известны твердо, а другие представления пользуются широким признанием. Вещество морей, судя по одинаковой частоте наложенных на него кратеров, имеет всюду приблизительно один и тот же возраст. По-видимому, моря образовались 2—3 млрд. лет назад, т. е. они примерно вдвое моложе Луны. На них видны все признаки лавовых выделений из недр Луны. Эти выделения не были вызваны образованием круговых морей-кратеров, а произошли существенно позднее. Происходило не одно, а много излияний лавы. Легко различить многочисленные отдельные потоки.

Современная поверхность морей имеет различную высоту. В местах, где более старые кратеры поднимаются над темным веществом, видно, что лава относительно тонка. Толщина ее от 300 до 1200 м. В других районах слой лавы гораздо толще, ибо валы старых кратеров здесь не видны. Те места, где слой лавы имеет наибольшую толщину, понижены относительно общего уровня морей. Этого и следовало ожидать, ибо лава при затвердевании сжимается примерно на 10%, и даже если жидкая поверхность была ровной, наиболее глубокие части должны были осесть. Вдобавок, вес лавы мог вызвать опускание лунной коры, которое должно было быть наибольшим там, где слой лавы самый толстый.

Кроме того, на карте рельефа на рис. 4 видно, что моря в среднем примерно на 3 км ниже светлых возвышенностей. Вероятно, последовательность событий была такова. Луна образовывалась в результате аккреции холодных частиц небольшого размера. За счет различных источников энергии, в том числе энергии сжатия, кинетической энергии соударяющихся частиц, радиоактивности, приливов и, возможно, за счет других источников Луна разогрелась. Ее внешние слои были тонки и первые возникавшие кратеры деформировались, как это и наблюдается. Существовавшие вначале источники энергии иссякали, и внешние слои стали твердыми и негибкими. В этот период происходили соударения с гигантскими планетоидами, создавшие круговые моря, и одновременно образовывалось большинство кратеров. По прошествии очень долгого времени внутренние части Луны расплавились, и расширение расплавленных пород погнало лаву наружу, к поверхности, через массу небольших трещин. Она прорвалась в местах с самым низким уровнем поверхности, и образовались моря. Заполненные лавой кратеры обычно расположены в низких местах, близ границ темных морей.

БОРОЗДЫ

На фотографиях Луны четко видны долины, совершенно отличные от тех, которые известны на Земле. Размеры их колеблются от едва видимых до

таких, ширина которых составляет 3—5 км, а глубина 0,5—1 км. Такие борозды часто тянутся по Луне на сотни километров, вне зависимости от рельефа поверхности. Они пересекают горы и хребты с той же легкостью, что и моря, и тесно связаны с краями лавовых излияний. Наиболее выделяющиеся борозды очерчивают границы морей; вероятно, эти границы являются областями напряжений, вызванных опусканием покрытых лавой площадей.

Стенки борозд относительно крутые, а дно обычно плоское. Они выглядят так, как будто опустился вырезанный в Луне клинообразный кусок. Хотя борозды часто простираются на сотни километров, они сохраняют практически одинаковую ширину по всей длине. Некоторые семейства борозд концентричны с круговыми морями.

СКЛАДЧАТЫЕ ЖИЛЫ

В центральных областях всех крупных лавовых излияний видны семейства складчатых жил. Это является, по-видимому, результатом сжатия, вызванного опусканием морей. Складчатые жилы по внешнему виду напоминают веревки. Они могут быть шириной до нескольких километров, а высотой всего лишь в сотни метров и простираются на сотни километров.

Часто складчатые жилы отмечают собой те места, где толщина лавовых излияний мала. Исчезнувший вал Залива Радуги, огромного кратера, захватывающего Море Дождей, очерчен группой складчатых жил. Существует много других примеров.

ГОРНЫЕ ЦЕПИ

На Земле горные цепи созданы внутренними силами. Они часто параллельны континентальной береговой линии и обычно образованы действием сил сжатия. На Луне таких гор нет. Все огромные лунные горные цепи являются частями колец и окаймляют круговые моря, возникшие в результате ударов. Например, Юра, Альпы, Кавказ, Апеннины, Карпаты и горы Гарбингера окаймляют Море Дождей. Другие цепи окаймляют другие круговые моря и

фактически являются частями валов этих образований. Они напоминают увеличенные варианты обычных кратерных валов. Можно было бы сказать, что горная цепь Алтай составляет исключение, но это только часть чрезвычайно увеличенного кольца, расположенного вне кратера и параллельного его краю. Центральным кратером здесь является Море Нектара.

Обычная высота лунных гор от нескольких сотен до немногих тысяч метров, однако некоторые особо выдающиеся цепи обладают многочисленными пиками, вполне сравнимыми с высочайшими земными вершинами. Апеннины увенчаны несколькими пиками высотой до 6000 м, а в горах Лейбница, вблизи лимба у южного полюса, есть несколько пиков еще большей высоты. Горы Лейбница, по-видимому, являются окаймлением огромного кругового кратера на еще не сфотографированной части обратной стороны Луны.

КРАТЕРНЫЕ ЦЕПОЧКИ

Хотя большинство кратеров — метеоритного происхождения, существует и другой класс углублений, несомненно связанных с вулканическими процессами. Это так называемые кратерные цепочки. Как показывает само название, эти небольшие углубления вытянуты в цепочки. Иногда они соприкасаются, как, например, в хорошо заметной группе, расположенной к северу от затопленного кратера Стадий в Море Дождей. Несколько десятков маленьких углублений, до 5 км в диаметре, тянутся один за другим примерно на 150 км. Такие углубления, вероятно, образованы истечениями газов из недр Луны. Поверхность Луны покрыта трещинами; когда трещина проникает в более глубокие слои, через нее начинает выходить газ и образуются кратеры.

В этой же области и в других районах морей существуют изолированные углубления, которые, по-видимому, слишком многочисленны в этих местах, чтобы их можно было объяснить метеоритными ударами, и, вероятно, имеют вулканическое происхождение. Насколько мы можем сказать, эти углубления и кратерные цепочки расположены в основном в морях, но некоторые сходные с бороздами трещины

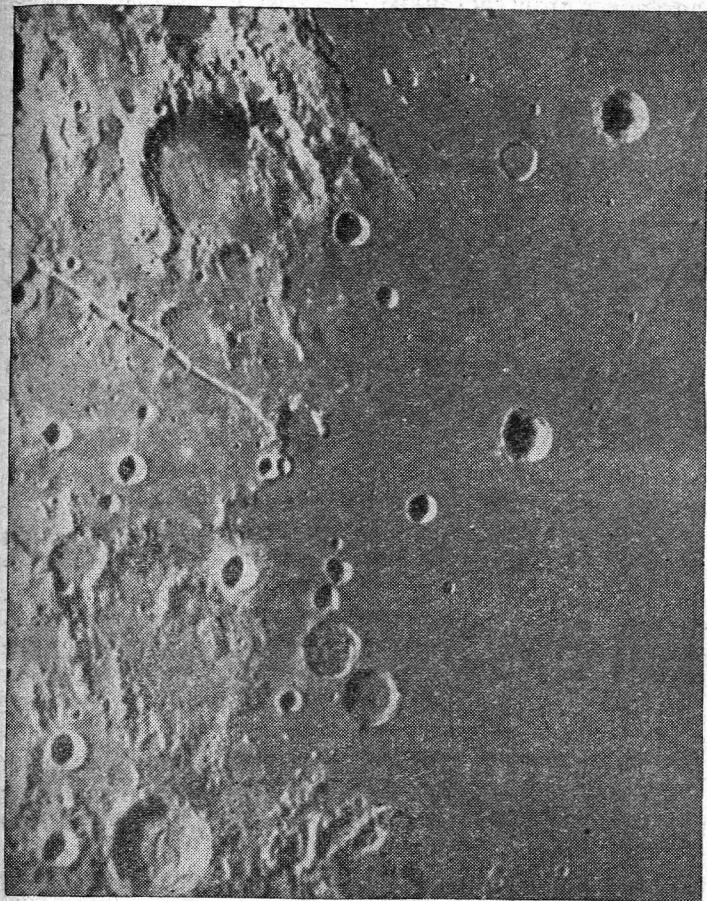


Фото 4. Борозда у Ариадея со следами эрозии, произведенной выбросами из Моря Дождей (Ликская обсерватория).

простираются и на материках, и вдоль этих трещин расположены отдельные случайные кратеры. Это позволяет астрономам сказать, что такие структуры, число которых невелико, образованы под действием внутренних сил Луны. Они напоминают земные взрывные провалы. Отличить изолированные вулканические кратеры на материках от многочисленных метеоритных кратеров было бы очень трудно.

СВРОСЫ

Существует несколько выдающихся мест, где лунная поверхность смещена вдоль линии сброса. Во всех случаях горизонтальное смещение отсутствует, но одна сторона поднята или опущена относительно другой так, что образовался крутой откос. Такова знаменитая Прямая Стена в Море Облаков. Она около 100 км длиной и максимальная высота ее около 400 м. Стена наклонена к горизонтали на 41° .

КУПОЛА

Особый класс деталей составляют купола. Их известно всего несколько десятков, и они, по-видимому, находятся только в областях, покрытых лавой. Обычно купола имеют в ширину около 15 км и возвышаются всего на несколько сот метров. Они имеют круглую форму и выглядят гладкими, но характер отражения света куполами при различных углах фазы говорит о том, что в действительности они покрыты многочисленными трещинами и неровностями. У некоторых куполов близ центра имеется небольшое кратерообразное углубление, но у большинства его нет. Некоторые крупнейшие объекты имеют неправильную форму, как если бы они состояли из многих слившихся меньших куполов.

Истинная природа куполов до сих пор является предметом споров, но, согласно наиболее признанной теории, это одна из стадий развития отверстий, через которые может выходить жидкая магма. Сначала поверхностные слои не пробиваются, а вздымаются куполообразно, а находящаяся под ними лава образует линзовидную массу. Иногда давление достигает ве-

личины, при которой поверхностные слои пробиваются, и при обрушении вершины купола в опустевшую линзу образуется кратероподобное отверстие.

Структуры такого типа известны и на Земле и называются *лакколитами*.

ОБРАТНАЯ СТОРОНА ЛУНЫ

4 октября 1959 г. Советский Союз успешно запустил третью из своей серии космических ракет. Вторая ракета упала на Луну. Третья была специально предназначена для того, чтобы дать человеку ответ на вековой вопрос: как выглядит другая сторона Луны? Ракета выполнила поставленную перед ней задачу. Комплекс приборов, телевизионные камеры и радиопередатчики помещались в ракете в почти цилиндрической капсуле размером 120×130 см, не считая антенн. Ракета должна была пронести свой груз по широкой дуге, проходящей за Луной. В нужный момент автоматическая межпланетная станция сориентировалась по Солнцу и Луне и, когда правильное направление было достигнуто, автоматически включила камеры. Фотографии были получены на пленке и тут же проявлены. Снимки были сделаны 7 октября между 3^h30^m и 4^h10^m мирового времени. Расстояние до центра Луны менялось за это время от 65 200 до 68 400 км.

Позднее была сделана развертка фотографий при помощи миниатюрной катодной трубки с высокой разрешающей силой, которая проецировала световое пятно на пленку. Свет, прошедший через пленку, регистрировался фотоумножителем, превращавшим его в электрический сигнал. Световое пятно колебалось от края к краю, в то время как пленка медленно перемещалась вдоль экрана катодной трубки. Была последовательно получена развертка каждого кадра.

Развертка была сделана по радиосигналу с Земли, когда станция находилась от нее на расстоянии 460 000 км. Электрические импульсы были преобразованы в радиолуч, который был направлен на Землю, где сообщение было записано на фотопленку, на магнитную ленту, принято на катодную трубку, в которой изображение на экране сохранялось некоторое время,

и на аппарат открытой записи, регистрировавший изображение на электрохимической бумаге.

Несмотря на относительно невысокое качество и низкое разрешение фотографий, советский эксперимент был технически великолепным и поведал нам много нового. Фотографии были получены в фазе полнолуния (если смотреть со станции) для того, чтобы увидеть возможно большую часть обратной стороны Луны. В полнолуние контраст понижен и трудно различить отдельные детали даже на фотографиях, полученных с Земли. Ранее скрытая от нас сторона Луны была заснята на 110° по долготе. Было сфотографировано также около 60° на известной стороне Луны, включая Море Кризисов и Море Гумбольдта, чтобы обеспечить привязку новых снимков. Примерно 70° обратной стороны все еще остаются неизвестными*.

Передняя и обратная стороны Луны отличаются друг от друга в одном важном отношении и по меньшей мере по двум своим свойствам сходны. На обратной стороне видно несколько темных морей, но таких областей здесь определено меньше, чем на видимой части Луны. Три таких образования заслуживают упоминания. Циолковский — это огромный заполненный лавой кратер, очень похожий на Гримальди. Его можно назвать маленьким круговым морем. Море Москвы — это другое круговое море, вероятно подобное Морю Кризисов и Морю Нектара. Море Мечты — это обширная серая область, возможно сходная с Морем Облаков. Внутри него обнаружены многочисленные кратеры. Существует несколько других областей, которые могут оказаться морями.

Первой чертой сходства между двумя полушариями является то, что в обоих случаях материка усыпаны множеством кратеров. Разрешение на фотографиях недостаточно, чтобы можно было увидеть мелкие кратеры, но крупных кратеров столь много, что большие материковые участки на обратной стороне, вероятно, сходны с хорошо нам известной южной полярной областью Луны.

* Они были засняты советской автоматической станцией «Зонд-3» 20 мая 1965 г. Подробнее см. послесловие. — *Прим. перев.*

Вторая черта сходства состоит в том, что, судя по распределению яркости по диску, микроструктура обоих полушарий одна и та же. Они отражают свет совершенно одинаковым и довольно необычным образом.

Мы, конечно, не можем сказать по этим фотографиям, обладает ли обратная сторона таким же горбом, как и обращенная к нам. Вероятно, надо подождать измерений со спутников, выведенных на лунную орбиту.

Одна довольно яркая область, длинная и узкая, была истолкована советскими астрономами как горная цепь, а западными — как гигантский луч или группа лучей. Если русские правы, то хребет Советский является горной структурой, совершенно отличной от известных до сих пор на Луне.

На этих снимках не оказалось больших сюрпризов, но ясно, что в будущем астрономам предстоит огромная работа, когда будут получены фотографии обратной стороны, сравнимые со снимками видимой стороны Луны, сделанными зондом «Рейнджер».

Как возникли лунные кратеры?

На протяжении всей книги мы повторяли: общепринято, что лунные кратеры образовались при ударах крупных и маленьких метеоритов. Как же астрономы пришли к этому выводу?

Мы знаем свойства земных кратеров, образованных метеоритными ударами, но не каждая яма в земле образовалась таким способом. Существует множество различных видов кратеров. Все они были подвергнуты изучению, чтобы выяснить, не напоминают ли они лунные кратеры.

В ледниковых областях известны многочисленные погребенные линзы льда, после таяния которого почва оседает и образует кратеры. Ясно, что ледников на Луне нет.

В известняковых слоях вода вымывает кратероподобные углубления. На Луне никогда не было океанов, в которых развивалась жизнь и в результате осаждался бы известняк.

На Земле существуют также различные типы вулканических кратеров. Обычный вулканический кратер развивается у вершины горы, стратовулкана, которая построена из материала, почерпнутого из расположенного под поверхностью резервуара магмы. Этот тип углублений обычно мал; дно кратера находится высоко над нормальным уровнем поверхности. Крутизна внешнего склона вала близка к углу естественного откоса для сыпучих веществ. Глубина кратера может быть больше ширины, и наоборот. На видимой стороне Луны нет ни одного гигантского стратовулкана, подобного Фудзияме.

На Земле есть также большое число уменьшенных вариантов стратовулканов, так называемых шлаковых конусов. Несколько подобных структур на Луне известны, но они совершенно не похожи на обычные лунные кратеры.

Земной вулкан с определенной частотой выбрасывает при извержениях такое количество вещества, что гора иногда лишается основы, на которой она стоит. Тогда происходит обрушение и возникает кратер, обладающий определенным сходством с лунными кратерами. Но существуют и очевидные различия. Кальдера обрушения обычно овальная. Она может лежать и целиком над уровнем поверхности и ниже его. Вал может быть и очень широким, и очень узким. Внутри кальдеры могут находиться небольшие структуры, подобные шлаковым конусам, которые знаменуют постепенное возрождение вулканической активности. Такие конусы по форме совершенно не похожи на центральные горки в лунных кратерах. Часто они расположены в кальдере далеко от ее центра. Лунные же центральные горки находятся в самом центре кратера или очень близки к нему. Примером кальдер обрушения является кратерное озеро в Орегоне (США).

В некоторых земных вулканах происходят спокойные выделения очень жидких лав. Это так называемые щитовые вулканы, такие, как Мауна-Лоа на Гавайских островах. При этом образуются гигантские купола со склонами малой крутизны. На Луне есть несколько куполоподобных структур, и в них часто, но не всегда виден небольшой центральный кратер, но такие структуры мало похожи на обычные кратеры. Вероятно, это даже не щитовые вулканы. Скорее они сходны с земными лакколитами.

На Земле есть один класс вулканических структур, которые вполне могут быть на Луне. Это взрывные провалы. Взрывной провал — это круглый кратер, возникший при мощном газовом извержении. Он вскрывается вырвавшимися газами, поверхностные слои сметаются, а стенки обваливаются в образовавшееся отверстие. Меньшие осколки разбрасываются далеко в стороны давлением газа и образуют низкий вал. Его внутренний край часто поглощается растущим кратером. Известны взрывные провалы от 75 м в

диаметре до самых больших — порядка 3 км. Следует ожидать, что такие процессы происходят и на Луне; некоторые из маленьких кратеров, особенно в цепочках, вполне могут быть взрывными провалами.

На Земле известно большое число кратеров метеоритного происхождения. Аризонский кратер, 1200 м в диаметре, является прекрасным и типичным примером такого кратера, но известны и другие, и больших, и меньших размеров. Установлено, что некоторые сильно эродированные земные ударные кратеры имеют возраст около полумиллиарда лет. Вероятно, большая часть более старых кратеров полностью эродирована или захоронена под позднейшими осадками или лавовыми потоками.

Частота, с которой земные метеоритные кратеры расположены в хорошо изученных районах мира, на Канадском щите или на Центральной равнине Соединенных Штатов Америки, хорошо согласуется с наблюдаемой частотой послеморских кратеров на Луне.

Если бы многие земные метеоритные кратеры не были известны и открытие их не продолжалось во все большем количестве, было бы трудно установить ударное происхождение лунных кратеров. Что особенно выделяет земные метеоритные кратеры и отличает их от всех прочих? Из рис. 6 хорошо видно, что происходит с поверхностными слоями горных пород, когда о них ударяется метеорит и внезапно выделяет всю свою энергию непосредственно под поверхностью. Здесь изображен кратер Одесса № 1 (США) примерно 170 м в диаметре и 25 м глубиной. Вероятно, метеорит ударился о землю со скоростью 10—16 км/сек. Если предположить наибольшую скорость, то железо-никелевый метеорит должен был иметь в диаметре примерно 4 м и массу 300 т.

Мощная энергия, выделившаяся при этой маленькой катастрофе, превосходила энергию химических связей в горных породах, и их слои были изогнуты, скручены, смещены и смяты, как если бы они были пластичными. Вздрыбившиеся слои образовали вал. Сразу же после удара слои горных пород вновь стали твердыми, но остались искаженными, такими, как мы их видим сейчас. Ниже дна метеоритного кратера

породы всегда на значительное расстояние сильно раздроблены.

Где бы ни образовался метеоритный кратер, в песчанике, песке, кварце или других породах, содержащих SiO_2 , высокие давления, развивающиеся при ударе, могут превратить часть SiO_2 в коэсит и стишовит — полиморфные модификации двуокиси кремния

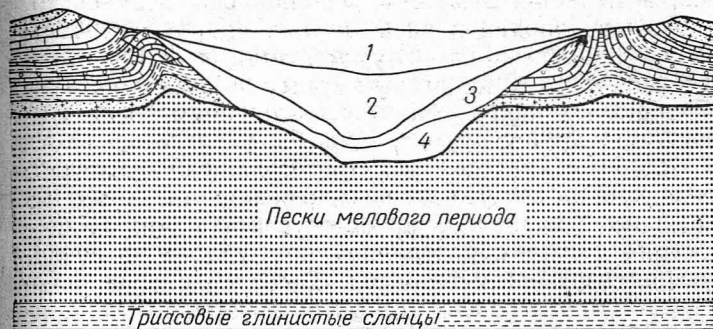


Рис. 6. Разрез через метеоритный кратер Одесса № 1.

1 — позднейшие наносы и песок; 2 — более ранние наносы, песок, известковые отложения и галька; 3 — раздробленные породы; 4 — каменная мука. (E. H. Sellards, G. Evans, Statement of progress of investigation at Odessa meteor craters, University of Texas, Bureau of Economic Geology, Austin, Tex., Sept. 1, 1941.)

с высокой плотностью. Эти вещества возникают в природе только при ударах, сравнимых по силе с ударом довольно крупного метеорита, и при их помощи можно опознать метеоритный кратер.

Когда камешек ударяется о ветровое стекло автомобиля, с внутренней стороны стекла может быть выбит конический кусочек. Вершина конуса указывает направление, откуда прилетел камешек. Точно так же удары метеоритов образуют конусы разрушения* в слоях горных пород. Эти конусы разрушения возвышаются над уровнем дна на сантиметры или метры в зависимости от толщины слоев.

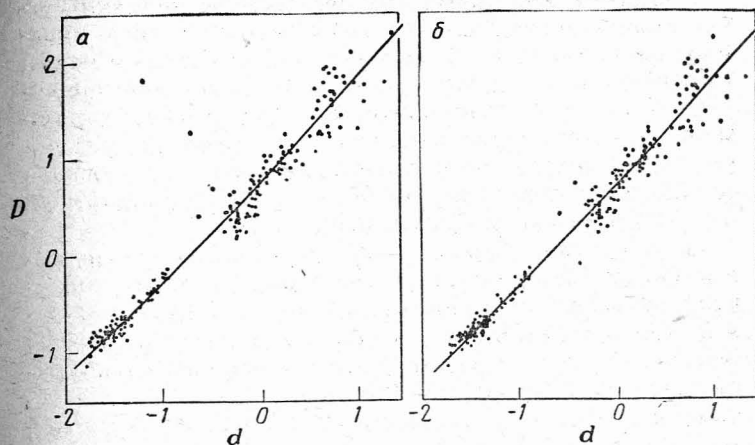
* В советской научной литературе их иногда называют конусами сотрясения. — Прим. перев.

С такими кратерами обычно связаны находки метеоритного вещества. Часто оно встречается в виде маленьких капелек, указывающих на то, что по крайней мере часть упавшего тела испарилась при ударе.

Форма земных метеоритных кратеров очень характерна и закономерно меняется с увеличением размеров. Пока человек не попадет на Луну и не исследует ее кратеров подробно, мы вынуждены ограничиться изучением их наружных размеров и вида.

Тем не менее мы не погрешим против очевидности, сказав, что ни один из известных на Земле типов вулканических кратеров не похож на обычные лунные кратеры настолько, чтобы их можно было отождествить друг с другом. Если бы удалось показать, что ударные кратеры на Земле столь сходны с лунными кратерами, что их нельзя различить, тогда мы могли бы с полным основанием считать, что лунные кратеры также образовались при ударах и последующих взрывах метеоритов. Такое сравнение было сделано, и оказалось, что земные метеоритные кратеры очень похожи на лунные кратеры тех же размеров.

Метеоритный кратер образуется при внезапном выделении энергии чуть ниже уровня поверхности. Кинетическая энергия быстро движущейся метеоритной массы, $E = \frac{1}{2} mv^2$, велика. Такие удары образуют кратеры, очень похожие на те, которые возникают при химическом или ядерном взрыве. Поэтому удобно изучать метеоритные кратеры при помощи взрывных кратеров. Поскольку диаметры кратеров — взрывных, метеоритных и лунных — находятся в пределах от нескольких сантиметров до 100—200 км, а глубина — от сантиметра до нескольких километров, то при построении графиков, содержащих эти величины, надо пользоваться логарифмическим масштабом. На рис. 7 представлены две кривые, показывающие зависимость логарифма диаметра от логарифма глубины (в метрах) для взрывных кратеров на Земле. Две кривые соответствуют двум разным глубинам центра заряда. В обоих случаях приведенная глубина взрыва дана в виде $H/W^{1/3}$, где H — геометрическая глубина центра заряда в метрах, а W — число килограммов тротилового эквивалента в заряде. Эти две приведенные



$$H/W^{1/3} = 0,00; \quad H/W^{1/3} = 0,04;$$

$$\lg D = 0,0315 \lg^2 d + 0,9679 \lg d + 0,6468; \quad \lg D = 0,0256 \lg^2 d + 0,9736 \lg d + 0,6368.$$

Рис. 7. Зависимость логарифма диаметра D от логарифма глубины d для взрывных кратеров (D и d — в метрах).

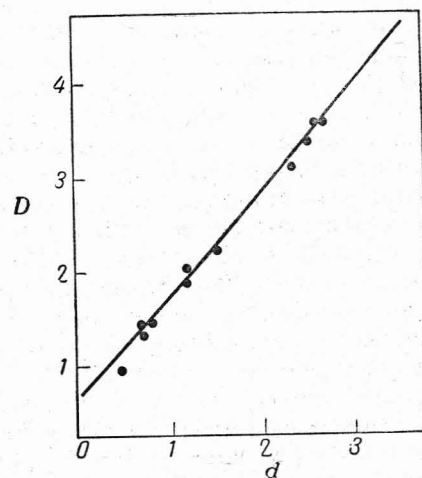


Рис. 8. Зависимость логарифма диаметра D от логарифма глубины d для земных метеоритных кратеров. Прямая — из рис. 7, б; точки — для земных метеоритных кратеров.

глубины взрывов выбраны так, чтобы они соответствовали взрыву на поверхности ($H/W^{1/3}=0$) и взрывам на приблизительно такой глубине, на которой взрываются метеориты ($H/W^{1/3}=0,04$). Взрывы на поверхности создают менее глубокие кратеры, чем подповерхностные взрывы.

На рис. 8 кривая для подповерхностных взрывов продолжена в сторону больших размеров кратеров. Несколько земных метеоритных кратеров было изучено столь тщательно, что оказалось возможным восстановить их первоначальные контуры, существовавшие до того, как кратеры подверглись эрозии и засыпанию. Данные для этих кратеров также нанесены на график. Они располагаются очень близко к кривой для $H/W^{1/3}=0,04$. Если железо-никелевый метеорит ударяется о поверхность со скоростью 16 км/сек, проникает вглубь на два своих диаметра и затем взрывается, то приведенная глубина взрыва будет равна 0,04. 1200-метровый Аризонский метеоритный кратер был, вероятно, образован метеоритом с малой скоростью. При скорости 16 км/сек приведенная глубина взрыва 0,04 соответствует геометрической глубине 79,5 м. Метеорит имел примерно 40 м в диаметре и весил 288 000 т.

На рис. 9 та же кривая продолжена еще немного в сторону больших кратеров. Видно, что она хорошо удовлетворяет лунным кратерам вплоть до диаметров порядка 30 км ($\lg D=4,5$). Данные для маленьких кратеров взяты по фотографиям, сделанным зондом «Рейнджер». Формы этих кратеров, а также земных метеоритных и ранее известных крупных лунных кратеров находятся в хорошем согласии. Уравнение

$$\lg D = 0,0256 \lg^2 d + 0,9736 \lg d + 0,6368, \quad (7.1)$$

где D — диаметр, а d — глубина (в метрах), прекрасно представляет ударные кратеры в интервале диаметров от 8 м примерно до 30 км. Размеры еще больших кратеров наводят на мысль, что для них центры взрыва становятся еще ближе к уровню поверхности. Для этого имеются физические причины, но рассмотрение их выходит за рамки этой книги.

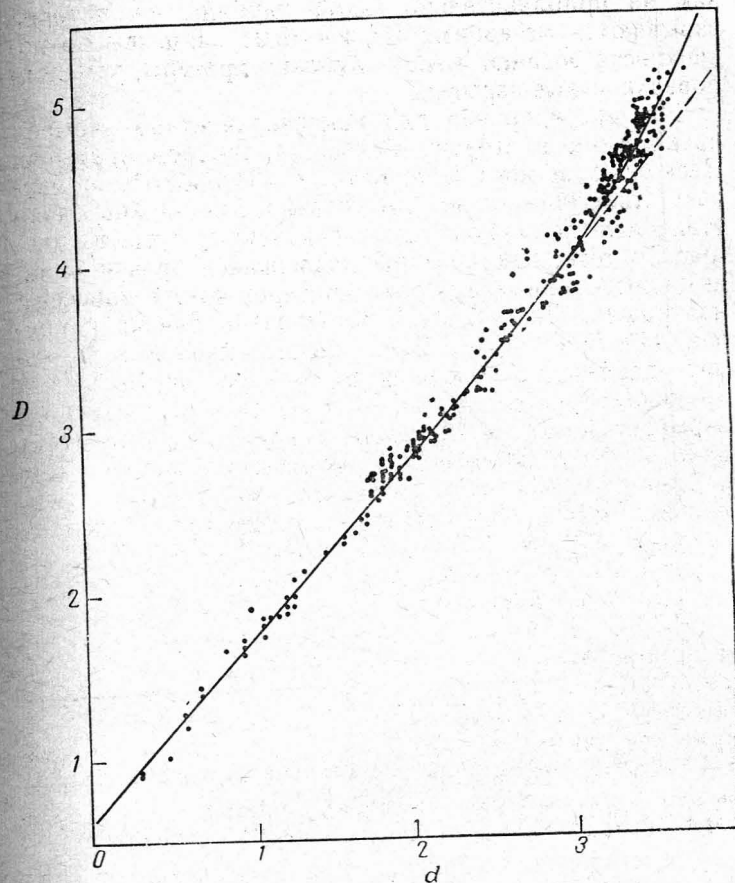


Рис. 9. Зависимость логарифма диаметра D от логарифма глубины d для лунных кратеров.

Точки, полученные по фотографиям зонда «Рейнджер», относятся к кратерам диаметром от 8 м до 42 км ($\lg D$ от 0,903 до 4,623). Точки, полученные по телескопическим и фотографическим наблюдениям, относятся к кратерам диаметром от 1,5 до 140 км ($\lg D$ от 3,176 до 5,146).

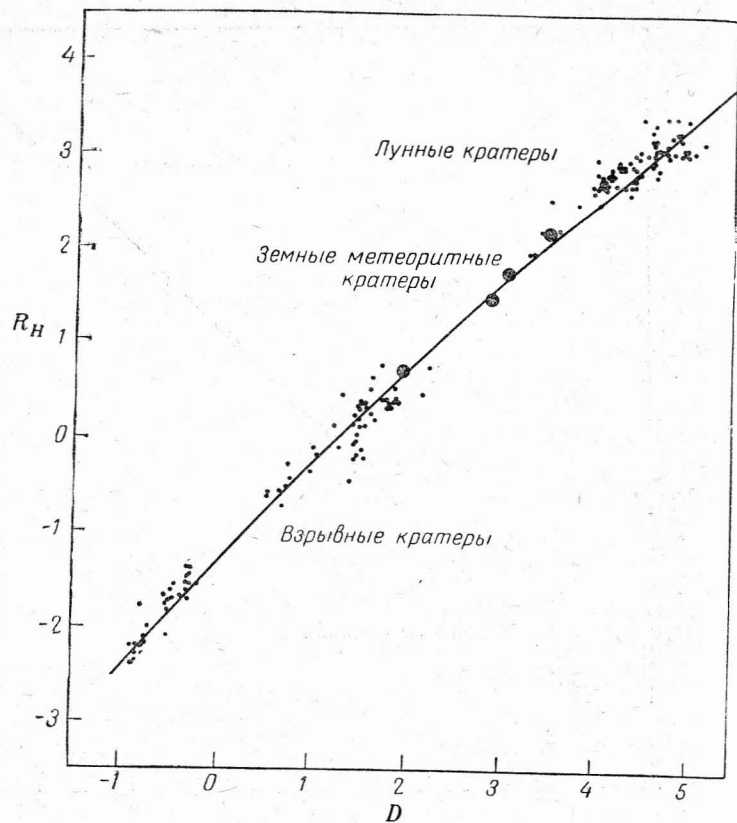


Рис. 10. Зависимость логарифма высоты вала R_H от логарифма диаметра D .

$$\lg R_H = 0,004366 \lg^3 D - 0,061330 \lg^2 D + 1,1914 \lg D - 1,4630.$$

Соответствующее уравнение для этих крупных кратеров:

$$\lg D = 0,4831 \lg^2 d - 2,4927 \lg d + 7,0948. \quad (7.2)$$

Эти три графика убедительно свидетельствуют о том, что лунные кратеры образовались при колоссальных взрывах и энергия их выделялась внезапно и неглубоко под поверхностью. Энергия, освобождавшаяся в крупнейших кратерах, гораздо больше, чем когда-либо наблюдавшаяся при земных вулканических взрывах. Такой колоссальной энергией обла-

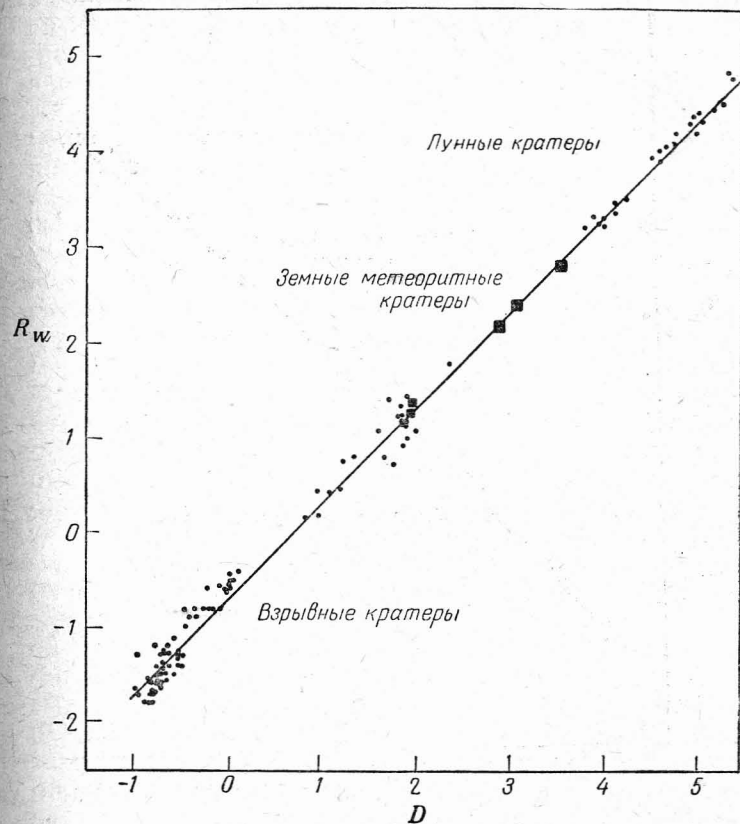


Рис. 11. Зависимость логарифма видимой ширины вала R_W от логарифма видимого диаметра D .

$$\lg R_W = \lg D - 0,70.$$

дают только огромные метеориты. Масса, движущаяся со скоростью всего 6,5 км/сек, обладает кинетической энергией 5000 кал/г, или энергией, заключенной в пятикратном количестве тротила. Энергия возрастает как квадрат относительной скорости. Большинство крупных метеоритов ударяется о Луну со скоростью около 16 км/сек, так что энергии для образования кратеров, очевидно, достаточно. Лабораторные опыты по моделированию ударов с большими скоростями показали, что такие снаряды про-

никают в грунт, до того как они испарятся, лишь на небольшое расстояние и возникающая при этом ударная волна образует кратеры ожидаемых размеров и форм.

Хотя изложенное выше является убедительным свидетельством в пользу метеоритного происхождения лунных кратеров, аргументы этим не исчерпываются. Следует измерить и другие части лунных кратеров. Например, по длине теней можно определить высоту кратерного вала от гребня до нормального уровня поверхности. Таким способом проведено большинство вертикальных измерений на Луне. Высоты валов лунных кратеров оказались логическим продолжением соответствующих высот для земных метеоритных кратеров и взрывных воронок. На рис. 10 высоты валов связывает с диаметрами кратеров одна гладкая кривая. Точно так же легко измерить ширину кратерного вала от гребня до места, где вал практически снижается до уровня поверхности. Зависимость ее от диаметра кратера представляется одной прямой линией одинаково хорошо для всех трех категорий углублений.

Можно найти и другие подобные зависимости, но этих трех для специалиста уже достаточно, чтобы показать, что большинство кратеров на Луне и земные метеоритные кратеры относятся к одному типу. Ни один другой тип земных кратеров не удовлетворяет всем этим зависимостям. Даже лучше всего приближающиеся к ним небольшие взрывные провалы не укладываются на эти кривые так хорошо, как метеоритные кратеры.

В качестве решающего довода отметим, что количество лунных кратеров увеличивается с уменьшением их размеров. Фотографии, полученные «Рейнджером», показывают, что эта закономерность соблюдается вплоть до самых маленьких кратеров, порядка метра в диаметре. Земные метеоритные кратеры также становятся более многочисленными при уменьшении размеров.

При столь большом количестве указаний, свидетельствующих об одном и том же, и в отсутствие противоречащих или несовместимых данных кажется невозможным, чтобы большая часть лунных углублений

могла быть вулканического происхождения. Они должны быть созданы потоком метеоритных тел, иногда крупных, а чаще небольших, которые сыпались на Луну в течение всей ее истории. О Луну ударились метеориты всех размеров, от микроскопических до нескольких десятков километров в диаметре. Мельчайшие частицы мы называем микрометеоритами. Самые крупные, те, которые образовали огромные кратеры круговых морей, имели в диаметре несколько десятков километров и по размерам приближались к маленьким астероидам.

Как образуется метеоритный кратер?

В предыдущей главе на основании ряда аргументов был сделан вывод, что огромное большинство лунных кратеров всех размеров было образовано метеоритными ударами. Но каким образом кусок обыкновенного камня или металла взрывается при ударе и как практически образуется кратер?

Как уже говорилось, метеорит и Земля или Луна движутся относительно друг друга. Скорости в солнечной системе довольно высоки. Земля мчится вокруг Солнца со средней скоростью 30 км/сек . Луна имеет ту же скорость, но вдобавок, в зависимости от положения на орбите, она движется то быстрее, то медленнее Земли примерно на $0,5 \text{ км/сек}$. Другие планеты также движутся быстро. Орбитальная скорость Марса 24 км/сек , а скорости астероидов только немногим меньше.

Метеорные тела обращаются вокруг Солнца по орбитам, которые иногда пересекают орбиту Земли. Орбиты некоторых из этих частиц, сталкивающихся с Землей и образующих яркие «падающие звезды», известны. Они часто напоминают орбиты астероидов, отличаясь лишь тем, что они подходят ближе к Солнцу, чем большинство астероидов, хотя и среди астероидов есть исключения. Когда они пересекают орбиту Земли, они движутся с немного большей скоростью, чем Земля. Однако обычно они движутся вокруг Солнца в том же направлении, что и Земля, так что они должны догонять Землю или Земля налетает на них, когда они пролетают мимо. В результате средняя относительная скорость Земли или Луны и метеорного тела порядка $13\text{—}15 \text{ км/сек}$, но неза-

долго до столкновения начинает действовать другой значительный эффект. Гравитационное притяжение Земли или Луны ускоряет метеорное тело. Тело, которое падает на Землю с очень большого расстояния, ударится об нее со скоростью около $11,2 \text{ км/сек}$, а такое же тело при падении на Луну — примерно со скоростью $2,4 \text{ км/сек}$. Эти скорости складываются с относительными орбитальными скоростями и в среднем метеорит ударится о Землю со скоростью примерно 26 км/сек , а о Луну 16 км/сек . Во всяком случае кинетическая энергия метеорита столь велика, что при ударе любой такой массы освобождается во много раз больше энергии, чем при взрыве такой же массы тротила. Многие маленькие метеорные тела, те, что вызывают обычные падающие звезды, имеют орбиты, близкие к кометным. Они могут сталкиваться с Землей и Луной даже с еще большими скоростями.

Это можно представить себе более наглядно, если вспомнить, что Джон Гленн летел по орбите вокруг Земли со скоростью 8 км/сек . Кинетическая энергия его движения была равна приблизительно 8000 кал/г . Если бы его корабль с такой скоростью ударился о Землю, то он почти целиком испарился бы в колоссальном взрыве. Этот взрыв был бы эквивалентен взрыву восьми таких кораблей, целиком состоящих из тротила. Понятно теперь, почему Гленн постепенно тормозил свой космический корабль в атмосфере на протяжении нескольких тысяч километров, чтобы его невероятная орбитальная энергия могла рассеяться, не создавая опасности. Ясно также, почему при входе в атмосферу корабль ярко светился, а его носовой защитный конус сиял как Солнце.

Метеорит при ударе о Луну не встречает противодействия атмосферы. Не меняя скорости, он ударяется о грунт и взрывается. Если скорость соударения 16 км/сек , то средняя скорость во время проникновения в грунт 8 км/сек . Теория и эксперимент говорят, что такая сверхбыстрая частица затормозится на расстоянии примерно двух своих диаметров. Тело диаметром в 30 см затормозится почти под самой поверхностью примерно за $1/13000 \text{ сек}$. Даже полуторакилометровый астероид затормозится менее чем за полсе-

кунды. Естественно, что происходит взрыв необычайной силы и появляется кратер. Кратер образуется частично под действием газа, возникшего при испарении метеорита и грунтовых пород, а частично под действием образующейся в грунте ударной волны. Ударная волна возникает, когда внезапно освободившаяся энергия распространяется в среде со сверхзвуковой скоростью.

Возникшие при этом силы выбрасывают часть грунта, расположенного выше точки взрыва, далеко от места соударения, но главным образом кратер образуется при мгновенном смещении слоев горных пород во всех направлениях от точки взрыва. Энергия столь велика, что далеко превосходит энергию химических связей в породах, и при распространении в них ударной волны породы становятся пластичными. Они сминаются, изгибаются и выдавливаются вверх и в стороны, образуя углубление и большую часть вала.

Из-за внезапности появления этих радиальных сил они встречают некоторое противодействие. На стенках крупных лунных кратеров имеются террасы, которые, по-видимому, возникли в результате реакции пород в направлении, противоположном испытанному ими удару. Центральные горки многих лунных кратеров и некоторых крупнейших земных метеоритных кратеров образованы подобной же реакцией на направленное вниз воздействие метеорита.

Может быть, природа и мощь процессов, определявших историю Луны, будут более ясными, если восстановит события, приведшие к образованию Моря Дождей.

До столкновения Моря Дождей не существовало. Море Ясности уже было, хотя еще не заполненное лавой. Оно было окаймлено двумя мощными и высокими горными цепями, горами Гемуса и частью современного Кавказа. Там, где должно было появиться Море Дождей, находилась обширная возвышенность, усыпанная тысячами больших и малых кратеров. Этот район, вероятно, был похож на современную южную полярную область. Массивные валы Залива Радуги еще не вздымались навстречу восходящему Солнцу.

Метеорит, создавший Море Дождей, был телом с малой скоростью, о чем говорит отсутствие радиальной симметрии у образованной им структуры. Если его скорость была 3 км/сек , что близко к минимально возможной, он имел в диаметре приблизительно 150 км . При такой скорости большая часть вещества в зоне соударения испытала мощный удар и раздробилась, но не испарилась. Произошло это примерно через 2 млрд. лет после образования Земли и Луны и за несколько десятков или сотен миллионов лет до появления морей. Тело это, вероятно, было астероидом, который в результате возмущений оказался на орбите, пересекающей лунную.

Тело упало, двигаясь с северо-запада под значительным углом к вертикали. Оно даже не раскалилось от трения, ввиду почти полного отсутствия лунной атмосферы. До момента удара ничего не происходило, а затем начались самые мощные процессы, когда-либо имевшие место на Земле или на Луне. В момент соударения сверкнула яркая вспышка. Из-за неровностей на поверхностях Луны и астероида две поверхности соприкоснулись под разными углами. Так как форма обоих тел в основном была сферической, вещество между двумя быстро сплюсцивающимися поверхностями сжалось. Гигантские струи измельченного и раскаленного вещества были разбросаны по всей Луне, но в основном в направлении движения падавшего тела. Эти струи двигались по почти математически правильным прямым линиям, неся с собой большое число кусков твердого вещества. Хотя скорость столкновения была примерно 3 км/сек , струи имели широкий спектр скоростей. Часть выброшенного материала двигалась довольно медленно, а часть так быстро, что покинула Луну навсегда. Где бы эти струи ни ударились о Луну, они пробивали множество протяженных долин. Все они сейчас указывают своими направлениями на центральную часть Моря Дождей как молчаливые свидетели события, вызвавшего разрушения по всей Луне.

В момент удара от передней части метеорита в глубь тела Луны со скоростью около 8 км/сек помчалась сильная ударная волна, а другая направилась вверх, внутрь метеорита. Столкнувшись

тело и ударная волна заставляли вещество Луны двигаться вниз и в стороны, чем было положено начало гигантскому кратеру. Несмотря на громадные размеры астероида, сопротивление лунных пород мешало ему углубиться на расстояние, сравнимое с его размерами. Вероятно, он не проник в глубь Луны больше чем на 15—25 км. После первого соприкосновения из-за сопротивления астероид становился все более сплюснутым, а его движение все более и более превращалось в горизонтальное. Тыловая часть астероида продолжала двигаться вперед со скоростью соударения еще примерно в течение 20 сек, после того как передняя часть ударилась о Луну. Пока идущая вверх ударная волна не прошла через все тело, тыловые слои не реагировали на соударение и продолжали двигаться. Эти слои вызывали отклонение идущей вверх ударной волны, усиливая тем самым превращение движения астероида в горизонтальное. Астероид в результате вывернулся «наизнанку». Поверхностные слои Луны были содраны и отброшены, и образовался гигантский цветок с чудовищными тычинками из пыли и камня. Возник огромный кратер шириной 678 км и всего лишь несколько километров глубиной.

При этом ударе химические связи в веществе обоих тел были полностью нарушены, так что горные породы текли, как жидкость. Когда действие ударных сил прекратилось, эти вещества вновь обратились в твердое состояние.

При дальнейшем развитии столкновения и взрыва (если только этот термин подходит для процесса такой длительности и силы) из углубления во всех направлениях и с самыми разнообразными скоростями вылетели мириады частиц: от отдельных атомов до глыб размером с гору. Некоторые из них выпали дождем во всех частях Луны. Другие никогда уже не вернутся. Образовалось много радиальных трещин. Некоторые из них привели к образованию провальных и грабеноподобных долин, таких, как Долина Альп, прорезающая насквозь лунные Альпы.

Через все тело Луны прошла гигантская ударная волна, и Луна еще много дней гудела как колокол.

Где бы ни происходил удар, как и при ударе камня о воду, во все стороны распространяются волны, а в центре появляется всплеск. Так было и здесь. Волны в горных породах распространялись в стороны от кратера на сотни километров. Первая волна была низкая и широкая. Она остановилась и застыла в таком положении на юге за пределами Моря Паров и Срединного Залива, а на севере — за Морем Холода и Заливом Росы. В этих областях волна осталась в виде кольца синклиналей*, пониженного относительно первоначального положения. Вторая, самая большая волна образовала кольцо антиклиналей, очерчивающее ныне границу покрытой лавой части Моря Дождей. Эти волны двигались быстрее многих выброшенных кусков и осколков, и когда последние из дождя обломков их достигли, они уже застыли. Третий, менее мощный вал лежит вблизи Архимеда, внутри основной границы. В центральной части находится собственно кратер. Он был расположен довольно высоко на куполе всплеска. Вскоре купол осел и вся центральная область опустилась на несколько тысяч метров. При дальнейшем опускании внутренней части образовалось основное кольцо разломов и гигантский откос. Этот откос ныне виден как крутой внутренний склон горной цепи Апеннин, но его следы можно заметить вокруг большей части Моря Дождей.

Это колоссальное оседание образовало большой бассейн в тысячи метров глубиной на юге и несколько меньше на севере. Диаметр его примерно 1200 км и границы его отмечены горами — остатками самой большой волны. Горы высотой до 6000 м все еще стоят на своих местах. Величайший лунный кратер лежит внутри этого бассейна к северу от центра.

Шло время. Меньше крупные метеориты падали в эту область и образовывали большие и малые кратеры. Один огромный метеорит упал близ северной части вала и возник Залив Радуги. Северный вал его находится в горном окаймлении Моря Дождей, а южный — в огромном понижении. Меньшее, но все

* Синклиналь — складка слоев горных пород, обращенная выпуклостью вниз. Обратный случай — складка выпуклостью вверх — называется антиклиналью. — Прим. перев.

же достаточно крупное тело привело к образованию великолепного Архимеда.

Прошло еще какое-то время, измерявшееся миллионами лет. Глубоко под поверхностью Луны радиоактивные элементы подняли температуру выше точки плавления силикатов. При плавлении жидкие лавы расширились и выдавливались к поверхности. Самый легкий путь наружу лежал через растрескавшиеся и разломанные слои под огромными ударными кратерами. Лава подымалась по таким трещинам и каналам и заливала самые низкие участки лунной поверхности. Море Дождей было переполнено вплоть до крутых горных склонов. Сам гигантский ударный кратер был похоронен, и над застывшими потоками лавы, отмечая положение вала, возвышаются сейчас только изолированные горные вершины.

Лавы заполнили примыкающее Море Ясности, стирая все следы, оставленные выбросами от удара, образовавшего Море Дождей. Они заполнили кольцевую синклиналь, окружающую Море Дождей. Ровная поверхность застывшей лавы покрыла величайший лунный бассейн и крупнейший на Луне кратер.

Мошь, огонь и бурная деятельность остались позади. Расследование, которое привело к восстановлению этой картины, началось с огромных борозд около Гиппарха и Птолемея; затем выяснилось, что эти долины чаще всего находятся на наиболее высоких участках, таких, как кратерные валы, которые вздымаются высоко над поверхностью и, таким образом, расположены на пути разлетающихся обломков. Долины и борозды такого типа исчисляются тысячами. Они указывают не на точку, а на целую площадь диаметром 678 км, которая теперь отождествлена с собственно ударным кратером Моря Дождей. Постепенно стало понятно, что основные черты Моря Дождей определяются наличием центрального всплеска и окружающих волнообразных подъемов и понижений. Понять это было нелегко, ибо на Земле нет чего-либо подобного Моря Дождей.

Масштабы таких процессов или размеры образовавшихся структур нельзя себе представить, глядя на красивое изображение Луны. Чтобы сопоставить их с чем-нибудь более знакомым, нарисуйте на карте

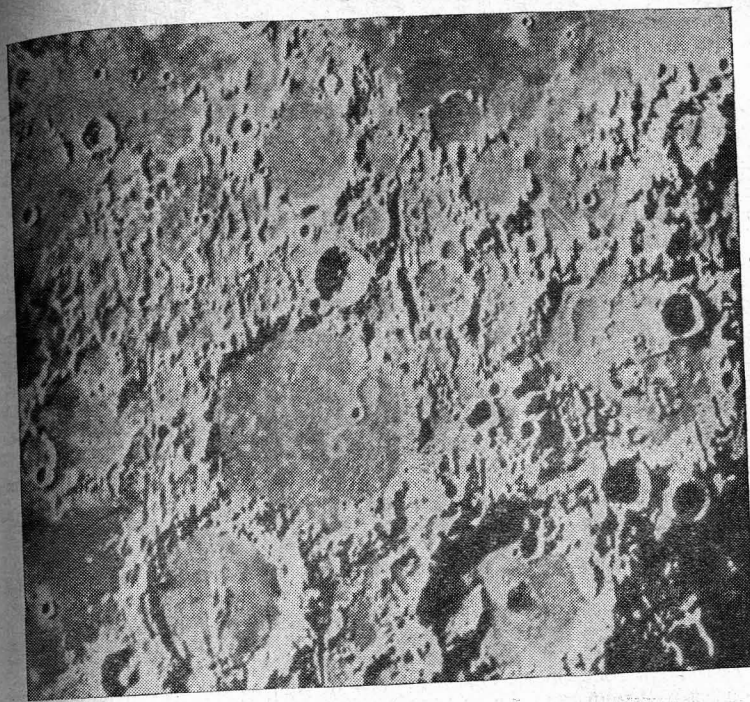


Фото 5. Область Птолемея. Линейные разрушения, произведенные выбросами из Моря Дождей и составляющие часть системы разломов. Видны две кратерные цепочки (Лаборатория Луны и планет Университета штата Аризона).

Соединенных Штатов Америки окружность. Начните с Гранд-Рапидс в Мичигане и двигайтесь далее через Детройт, Питтсбург, Линчберг в Виргинии и Гринсборо в Северной Каролине. Затем идите через Колумбию в Южной Каролине, Огасту и Колумбус в Джорджии, Монтгомери в Алабаме, Литл-Рок в Арканзасе. Наш путь пройдет почти через Канзас-Сити. Следующим пунктом будет Сидар-Рапидс в Айове, а затем через Милуоки мы вернемся в Гранд-Рапидс. Этот круг по размерам будет равен горной цепи диаметром 1200 км, окружающей Море Дождей. Центр будет близок к Луисвиллу в Кентукки. Захороненный ударный кратер Моря Дождей будет занимать треть

Иллинойса, две трети Индианы, треть Огайо, практически весь Кентукки и Теннесси и частично четыре других штата*.

Таков эквивалент гигантского образования на Луне, которое было создано за несколько минут одним гигантским ударом из космоса и окончательно сформировалось несколькими миллионами лет позднее. Все, что происходило в Море дождей, в уменьшенном масштабе происходило и при образовании многочисленных меньших кратеров. Если бы сейчас на нашей планете образовался 30-километровый метеоритный кратер, он мог бы стереть с лица земли целый американский штат.

В 1937 г., когда астероид Гермес диаметром, вероятно, 1200 м, прошел мимо Земли на расстоянии всего лишь 640 000 км, мы едва избежали опасности. Ударясь он о Землю, он создал бы копию выдающегося лунного кратера Кеплер.

* Советскому читателю легче будет представить себе масштабы такого круга по карте СССР. Если начинать из Ленинграда, то наш путь пройдет через Череповец, Кострому, Муром, Тамбов. Далее, оставив к западу Воронеж, мы проследуем через Харьков, Черкассы, Бердичев, Ровно. Около Гродно круг пройдет вдоль государственной границы и через Ригу и Нарву вернется в Ленинград. — *Прим. перев.*

Как образовались темные моря?

В предыдущих главах было сказано, что моря — это древние лавовые излияния, но этот вывод никак не был обоснован. Моря отличаются от материков своей малой отражательной способностью — альбедо. Они занимают около $\frac{1}{3}$ видимой части Луны. Моря, несомненно, моложе усыпанных кратерами материков по двум причинам. На единицу площади морей приходится лишь 6% соответствующего количества кратеров на материках. Так как кратеры — метеоритного происхождения, можно считать, что они распределены по поверхности Луны в основном случайно. Едва ли можно ожидать, что около 94% всех тел, приходящих из космоса, ударяется о светлые $\frac{2}{3}$ Луны и лишь немногие — о темные моря. Следовательно, моря возникли на сравнительно поздних этапах кратерообразования. Этот вывод подкрепляется тем, что в некоторых областях из-под вещества морей поднимаются валы многих древних кратеров.

Такие наблюдения наглядно показывают, что темные области образовались из какого-то вещества, которое заняло свое место после того, как возникло большинство кратеров, и многие из кратеров этим веществом были затоплены. Карта рельефа говорит о том, что все моря находятся в пониженных областях.

Как могло темное вещество появиться в этих областях? До сих пор были выдвинуты только три представляющие интерес гипотезы: моря состоят из очень тонкой пыли; они состоят из пыли и щебня; они состоят из некогда расплавленных пород, т. е. лавы.

По чисто пылевой гипотезе пыль образовывалась в результате эрозии лунной поверхности, происходившей

по различным причинам, но в первую очередь из-за ударов микрометеоритов. Тонкая грунтовая пыль становилась электростатически заряженной под действием ультрафиолетового излучения Солнца. Заряженные частицы будут отталкиваться одноименно заряженной поверхностью и постепенно осыпаться по склонам, пока не скопятся в понижениях. Таким образом, моря должны быть покрыты слоем почти текучей пыли, часто в тысячи метров толщиной. Более толстые участки должны, вероятно, в какой-то степени уплотняться, подобно осадочным слоям на Земле.

Против этой гипотезы существует много возражений, из которых здесь стоит упомянуть только три. На карте рельефа видно, что многие светлые области имеют уклон к лимбу, а не к морям. Лимб не темный, так что в этих направлениях не происходило значительного стекания пыли. Края морей часто отмечены огромными системами борозд. Объемы этих долин ничтожны в сравнении с объемом темного вещества. Следовательно, сейчас не происходит крупных перемещений пыли, ибо борозды пылью не заполнены. Фотографии, полученные «Рейнджером», ясно показывают, что наружный слой морей может быть покрыт пылью, но сразу же под поверхностью грунт твердый, хотя, возможно, и раздробленный. Бесчисленные мельчайшие кратеры, видные на фотографиях, не могли бы образоваться в толстом слое пыли.

Темное вещество появилось после того, как образовалось большинство кратеров и все великие круговые ударные моря. Было высказано предположение, что моря покрыты пылью, песком и щебнем, выброшенными из круговых морей при образовавших их ударах. Либо же соударение могло расплавить астероид и часть грунта и разбрызгать расплавленный камень по Луне. Даже если пренебречь невозможностью того, что такие продукты выброса скопятся исключительно в низинах, и предположить, что вещество, выброшенное с такой энергией, могло образовывать резкие границы многих морей, существует другой веский аргумент против того, что темные области покрыты выбросами из кратеров круговых морей. Этот

аргумент говорит также и о том, что тела, образовавшие круговые моря, не пробивали тонкую лунную кору до жидкого слоя и не вызвали выделения жидких лав сразу после столкновения.

Ход рассуждений таков. Внутри бассейна любого из великих круговых морей существуют меньшие кратеры, тождественные обычным ударным кратерам, и они более или менее полностью залиты темным веществом, заполняющим сейчас кратеры круговых морей. Эти меньшие кратеры старше темного вещества, так как оно их почти целиком покрывает. Они должны быть также моложе кратеров круговых морей. Если бы они были старше этих гигантских кратеров, они были бы полностью уничтожены энергией ударов и взрывов, образовавших кратеры круговых морей. Они не разрушены; следовательно, они моложе огромных кратеров, внутри которых они появились. Так как они моложе гигантских кратеров и старше темного вещества, то можно сделать вывод, что темное вещество появилось не в результате какого-то процесса, связанного с рождением кратеров круговых морей. Статистический подход к этому вопросу показывает, что круговые моря не были заполнены темным веществом в течение долгого времени после их образования.

Остается, по-видимому, единственный вывод, что темное вещество — это какой-то вид лавы, выделившейся из недр Луны в конце периода кратерообразования, подобно тому как образовались гигантский базальтовый щит в Орегоне и Айдахо или траппы Декана в Индии. Поскольку лавы выделялись из недр Луны независимо от каких-либо кратерообразующих процессов, мы должны сделать вывод, что внутренние части Луны в то время разогревались. Если они были горячи тогда, то они и сейчас еще должны быть горячими, ибо они не могли существенно остыть за 2 млрд. лет, прошедших со времени рождения морей.

Какова температура лунной поверхности?

Луна практически лишена атмосферы, и здравый смысл подсказывает нам, что дневная сторона Луны, непрерывно освещаемая Солнцем в течение двух недель, должна быть очень горяча. Ночная сторона должна быстро охлаждаться. На Земле воздух играет роль одеяла, смягчая резкие колебания температуры в обоих направлениях.

Колебания температуры на Луне измеряются со все возрастающей точностью, начиная с работ Росса в 1868 г. Солнечный свет, падающий на лунную поверхность, частично поглощается, и это поднимает температуру наружных слоев. Эти слои в свою очередь переизлучают энергию в длинах волн, соответствующих их температуре. Росс использовал две термометры, расположенные рядом в фокусе его 90-сантиметрового рефлектора и соединенные с гальванометром навстречу друг другу. Они служили приемниками тепла. Одна принимала свет от Луны, другая — от неба. Затем Росс вставил стеклянную пластинку, чтобы устранить инфракрасное излучение Луны, и, учтя потери при отражении от пластинки, нашел разницу в отклонениях гальванометра, т. е. тепловой поток от Луны. Сделав разумные предположения о прозрачности атмосферы и альбедо Луны, он получил для эффективной температуры Луны 397°K . Росс определил также изменения эффективной температуры Луны с углом фазы, и его результаты хорошо согласуются с данными более поздних наблюдений.

В 1930-х годах Петит и Никольсон, работая с 2,5-метровым телескопом и используя в качестве приемников тепла крошечные термометры, составили

температурные карты Луны. Они установили, что максимум температуры 407°K достигается в подсолнечной точке полной Луны (в центре диска). Как и ожидалось, к лимбу температура падает приблизительно до точки замерзания воды.

Полуночная температура в центре диска в новолуние равна около 120°K . Средняя инфракрасная

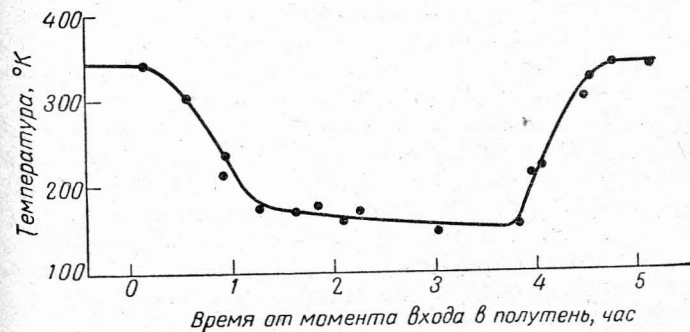


Рис. 12. Изменение температуры во время затмения 14 июня 1927 г. по наблюдениям Петита и Никольсона. (Physics and astronomy of the Moon, ed. Z. Kopal, Academic Press Inc., New York, 1962.)

температура по всей Луне, как по освещенной, так и по темной полусферам, низка, всего лишь около 228°K .

Петит и Никольсон измерили температуру подсолнечной точки, когда Луна была в четверти. Они нашли, что она равна только 358°K , что существенно ниже 407°K в соответствующей точке для полной Луны. Такое различие вызвано неровностью поверхности. Это означает, что, приписывая какому-то месту Луны определенную температуру, следует очень тщательно учитывать все условия, при которых она была получена.

Точнейшие современные измерения довольно близки к этим ранним результатам.

Вероятно, первый намек на то, что в лунной поверхности есть что-то явно необычное, был получен в 1927 г. В этом году во время лунного затмения 14 июня Петит и Никольсон измерили изменения

температуры в точке, находящейся всего в 48'' от южного лимба. Работы, проведенные позднее во время других затмений, подтвердили полученные странные результаты.

За час, в течение которого полутень Земли проходила через эту точку, к моменту начала полной фазы температура упала от 342 до 210° К. Быстрое падение продолжалось и в течение последующих 20 мин; температура снизилась до 170° К. Затем температура медленно падала вплоть до конца полной фазы, когда она достигла 152° К. Когда лучи Солнца вновь попали на эту точку, температура медленно поднялась до 160° К. Затем она быстро росла и к концу затмения фактически вернулась к первоначальной. Это было удивительное наблюдение. Ничего подобного не происходит на Земле во время полных солнечных затмений, хотя температуры воздуха и почвы падают на несколько градусов. Чтобы понять эти результаты, нужно учесть следующее обстоятельство. Если бы лишняя воздуха поверхность Луны была покрыта голыми скалами, их высокая теплопроводность не дала бы температуре так неистово колебаться. В действительности не более 5% лунной поверхности, а, вероятно, еще меньше, могут быть скалами, открытыми лучам Солнца. Луна должна быть покрыта каким-то другим веществом с сильными теплоизолирующими свойствами, и, вероятнее всего, этим веществом является пыль. Если взять мелкоиздробленный и распыленный камень, то лабораторным путем можно установить, что пылевые частицы соприкасаются друг с другом в относительно небольшом числе точек. В вакууме конвекция отсутствует. Тепло может передаваться только излучением, что при наблюдаемых температурах лунной поверхности не очень эффективно, и теплопроводностью через точки контакта, площадь которых ничтожна. Это означает, что тонкая пыль в вакууме является одним из лучших известных нам теплоизоляторов.

Если, как принято считать, лунная поверхность покрыта пылью, лучи Солнца будут быстро нагревать ее верхний слой до высоких температур. Изолирующие свойства пыли не позволят значительному количеству тепла проникнуть далеко в глубь поверх-

ностных слоев. Чтобы объяснить температуры, наблюдаемые во время затмения, достаточно слоя пыли примерно 0,5 см толщиной. Глубже температура будет очень низкой. Если слой пыли гораздо толще, то под ним солнечное тепло не будет ощущаться. Если пыль покрывает скальные породы, то какое-то количество тепла может проникнуть на глубину нескольких метров.

В действительности есть указания на то, что слой пыли тонок и подповерхностные слои лучше проводят тепло. Лунный грунт при данной температуре излучает не только инфракрасные лучи, но и радиоволны. Эти радиоволны можно легко обнаружить и определить температуру поверхностных слоев. Хотя горные породы непрозрачны для инфракрасного излучения, радиоволны они частично пропускают. Чем больше длина волны, тем больше глубина, с которой мы можем наблюдать радиоволны. Температуры, определенные по измерениям радиоизлучения, являются, таким образом, усредненными по глубине вплоть до глубин, в 3 раза больших длины волны.

Во время затмения колебания температуры, определенной по инфракрасному излучению, составляют примерно 290°. На радиоволнах длиной 1,5 мм эти колебания составляют только 130°. На волне 8,6 мм и еще более длинных волнах колебания температуры ничтожны.

За всю лунацию температура, определенная радиотехническими средствами, меняется только на 85°, но средняя температура такая же, как и по инфракрасным наблюдениям.

В сущности это означает, что температуры поверхности колеблются чрезвычайно сильно, но сразу же под поверхностью температура непрерывно падает, примерно до 228° К или даже ниже, и на нее накладываются лишь небольшие колебания, вызванные поглощением и излучением солнечного тепла. Эти колебания исчезают на глубине десятков сантиметров или нескольких метров. Самые верхние слои ночью охлаждаются до очень низких температур из-за излучения в пространство.

Внутреннее тепло Земли вызвано в основном радиоактивностью. Есть много оснований полагать, что

глубокие недра Луны тоже горячи. Однако при разумных количествах радиоактивных веществ в Луне глубинное тепло, медленно проходя через сотни километров теплоизолирующих пород, может поддерживать температуру лунной поверхности лишь на очень низком уровне, порядка 20°К . Это гораздо меньше наблюдаемой по радиоизлучению температуры подповерхностных слоев 228°К , и поэтому мы приходим к выводу, что эти слои нагреваются следующим образом. Радиоактивное тепло дает 20° , а солнечное тепло постоянно добавляет остальные 208° . Эта величина не меняется и температура является равновесной. Кроме того, существует ежемесячный приток тепла от Солнца. Наружный слой становится очень горячим, и за двухнедельный день какое-то количество тепла проникает в глубь Луны на десятки сантиметров или метры. Когда Солнце исчезает, тоже на две недели, тепло перемещается в обратном направлении, и недавно приобретенное тепло переизлучается.

Нам, вероятно, трудно представить себе такие резкие перемены, ибо мы живем под защитой атмосферы. Луна получает от Солнца такое же количество тепла, что и Земля. Единственное существенное различие создает воздух. Пылевая природа сильно изолирующей лунной поверхности есть следствие отсутствия воздуха. Многочисленные силы, такие, как микрометеориты, космические лучи, корпускулярное и ультрафиолетовое излучение Солнца, действуют на незащищенную лунную поверхность, но не действуют на земной грунт.

Космонавт, стоящий на Луне днем, отметит, что температура его освещенного Солнцем костюма выше точки кипения воды. Если он отступит в тень, температура упадет приблизительно до такого уровня, который нужен для сжижения воздуха.

Как выглядит поверхность Луны?

В гл. 10 мы видели, что поверхностный слой Луны обладает свойствами очень тонкой пыли, но ниже поверхности физическая природа грунта несколько меняется. Можно ли определить физическую и химическую природу этих веществ? Хотя для ответа на этот вопрос были предприняты огромные усилия, и физическая структура лунных пород становится известной все лучше и лучше, мы должны признать, что нам еще не удалось химически отождествить ни одного вещества на Луне.

Мы располагаем фотографиями обратной стороны Луны, полученными советскими учеными, на которых видны объекты порядка 55 км в диаметре. Мы имеем фотографии видимой стороны, снятые лучшими в мире телескопами; на них заметны детали размером около полукилометра. При визуальных наблюдениях в те же телескопы в хороших условиях видимости можно заметить образования и еще меньшие. Снимки, полученные зондами «Рейнджер», показывают природу очень маленьких участков двух морей и внутренней части древнего кратера вплоть до деталей размером 1 м . Но как же можно установить свойства лунной поверхности и подповерхностных пород?

Все сведения, которыми мы располагаем о Луне, получены в той или иной форме из анализа света или, точнее, электромагнитных волн. Если только длина волны не существенно меньше изучаемого объекта, она может дать нам информацию об этом объекте. Такие косвенные методы в противоположность прямым визуальным наблюдениям могут дать

удивительно много сведений. Они ставят также удивительно много новых проблем.

Какие методы применялись для установления химической природы лунных пород?

В первую очередь ясно, что следует получить спектрограмму небольшого участка лунной поверхности. Свет, отраженный Луной, — это солнечный свет. Вещества поверхности по-разному изменяют излучение различных длин волн. Красноватые породы отражают больший процент красных солнечных лучей, чем лучей других цветов. Каждый тип земных пород имеет свой собственный характерный спектр отражения; логично думать, что, если мы сфотографируем спектры небольших участков лунной поверхности, мы сможем сравнить их со спектрами известных пород и отождествить лунные вещества.

Единственная поправка к фотографиям таких спектров проста и ее легко сделать. У Луны практически нет атмосферы, так что она не может изменить лунный спектр. У Земли атмосфера есть, и свет от Луны должен через нее пройти. Но из долгого опыта астрономы научились учитывать влияние поглощения в нашем воздухе и устранять этот источник ошибок. Если спектрограммы Луны и земных пород получены одним и тем же инструментом, то влияние поглощения в определенных длинах волн внутри инструмента тоже может быть исключено. В результате мы можем получить хорошие четкие спектры многих участков лунной поверхности.

Какие же породы на Луне можно отождествить с земными при сравнении их спектров? Ответ гласит: никакие. Ни в одном случае мы не находим совпадения спектров. Есть несколько черт отдаленного сходства, но мы не можем определенно сказать, что на лунной поверхности присутствуют базальт, риолит, оливин или какая-либо иная порода. Это не означает, что их нет. Наоборот, мы почти уверены, что лавы, такие, как базальт, там имеются в изобилии. Это означает, что необычные условия на Луне изменили свойства поверхности до такой степени, что эти породы отражают свет по-иному, чем их земные родичи.

Советский ученый Ситинская очень простым способом пришла к ряду выводов. Она определила цвета и яркости многих участков Луны. И яркость и цвет можно выразить численно. Когда она нанесла на график яркость участков Луны в функции их цвета, все точки попали в область, ограниченную на рис. 13 кривой (1). Разброс значений как яркости, так и цвета очень невелик. Для сравнения она нанесла данные для гранита (2), основных и ультраосновных пород (базальтов и т. п.) (3), известняка (4) и конгломератов (5). Все они составляют удивительный контраст с данными для Луны, вновь свидетельствуя об отличии лунной поверхности от земной.

Поскольку спектры отражения ничего не говорят нам о природе веществ лунной поверхности, существуют ли какие-либо другие критерии, позволяющие прийти к определенным выводам? Существует один внушающий надежды метод.

В 1946 г. Линк обратил внимание на хорошо известный факт, что Луна во время полного затмения никогда не бывает совершенно темной. Этот факт отмечали многие наблюдатели, но не придавали ему значения, считая, что он обусловлен светом, падающим на Луну из-за преломления в земной атмосфере. Несомненно, что это так и есть на самом деле. Воздух действует подобно большой собирающей линзе. Однако яркость Луны сильно меняется от одного затмения к другому. Линк нашел, что иногда от затмившейся Луны приходит больше света, чем можно объяснить преломлением в земной атмосфере. Он сделал вывод, что поверхность Луны, по крайней мере местами, люминесцирует.

Хорошо известно, что Земля и Луна бомбардируются высокоэнергичным излучением Солнца, электромагнитным и корпускулярным. Когда солнечное ультрафиолетовое и рентгеновское излучение и потоки протонов от Солнца и его короны достигают лунной поверхности, они должны поглощаться; затем породы могут переизлучить поглощенную энергию в форме видимого света. Наблюдения такой люминесценции проводить нелегко, но они, по-видимому, показывают, что это излучение иногда происходит в виде отдельных цветных полос в спектре и, следо-

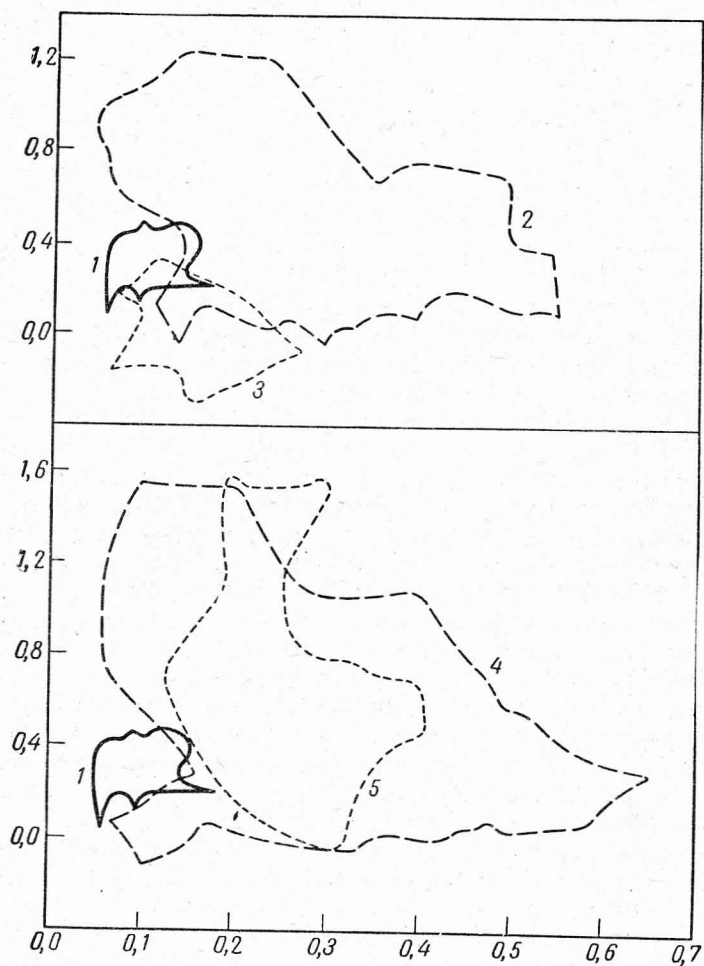


Рис. 13. Диаграмма цвет — яркость для лунных и земных пород. (В. В. Шаронов, Природа планет. М., 1958.)

вательно, мы когда-нибудь сможем отождествить излучающие лунные породы.

В 1964 г. Копал получил фотографии района Аристарха на Луне. Аристарх — один из самых молодых крупных кратеров, и его внутренняя часть и особенно лучи, исходящие от кратера, обнаруживают отчетливую люминесценцию. Это наводит на мысль, что люминесценция возбуждается наиболее сильно, когда облучению подвергаются относительно свежие породы, и что с увеличением времени облучения этот эффект угасает. Это вполне можно увязать с изменениями лунной поверхности, препятствующими химическому отождествлению ее пород.

Мы не смогли до сих пор отождествить химическую природу веществ на Луне, но много узнали об их физическом состоянии.

Одно из самых больших достижений в этом вопросе было получено при изучении степени поляризации лунного света. Лучи Солнца, освещающие Луну, представляют собой поперечные колебания, интенсивность которых одинакова во всех плоскостях. Когда солнечный свет падает на Луну, он отражается, преломляется, рассеивается и поглощается и часть его отбрасывается обратно во всех направлениях. Из-за этих взаимодействий с лунной поверхностью интенсивность колебаний в разных плоскостях более не остается одинаковой, и свет, как говорят, становится частично поляризованным.

Изучение поляризации производится инструментом, содержащим две призмы Николя или два других фильтра, свободно пропускающих световые колебания в одной плоскости, небольшую часть света с колебаниями в других плоскостях и совершенно не пропускающих колебаний в плоскости, перпендикулярной к первой. Вращением двух поляроидов относительно друг друга можно измерить степень и тип поляризации.

Разность $I_1 - I_2$ между максимальной интенсивностью света, прошедшего поляриды, и интенсивностью света в направлении, перпендикулярном направлению максимальной интенсивности, определяет количество поляризованного света. Отношение

поляризованного света к полному количеству света

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (11.1)$$

называется степенью поляризации. Она должна зависеть от природы поверхности Луны. Если исследовать поляризацию света от различных частей лунного диска при разных фазах, можно определить поляризационные свойства веществ, покрывающих лунную поверхность, и, сравнивая их с лабораторными измерениями, воссоздать природу этой поверхности.

Поляризационные явления обусловлены микроструктурой поверхности, а не большими неровностями и другими крупными деталями. Они могут, таким образом, показать ее тонкую структуру примерно так, как она выглядит под микроскопом.

Первую попытку изучения поляризации света Луны сделал еще в 1811 г. Араго, но серьезных исследований не производилось вплоть до работ Лио в 1934 г. Именно они заложили основу современных исследований.

Поляризация света от различных частей Луны систематически меняется с фазой, и максимум всегда имеет место во время первой и последней четвертей. Величина поляризации меняется обратно пропорционально яркости поверхности. Поляризация темных морей вдвое больше, чем светлых материков.

Характер кривой изменения поляризации с углом фазы говорит о физических свойствах отражающей поверхности. Например, если бы на Луне было заметное количество веществ со стекловидной поверхностью, то поляризационная кривая имела бы резкий максимум в направлении зеркального отражения. Поскольку такого явления не наблюдается, мы должны исключить возможность наличия стекловидных веществ на Луне, даже в очень небольших количествах.

Подобным же образом сравнение измерений поляризации Луны с лабораторными указывает на отсутствие на Луне полупрозрачных порошкообразных веществ, таких, как кварц и меловые отложения.

Луна поляризует свет точно так же, как и зернистые непрозрачные вещества. Лио и Дольфус при-

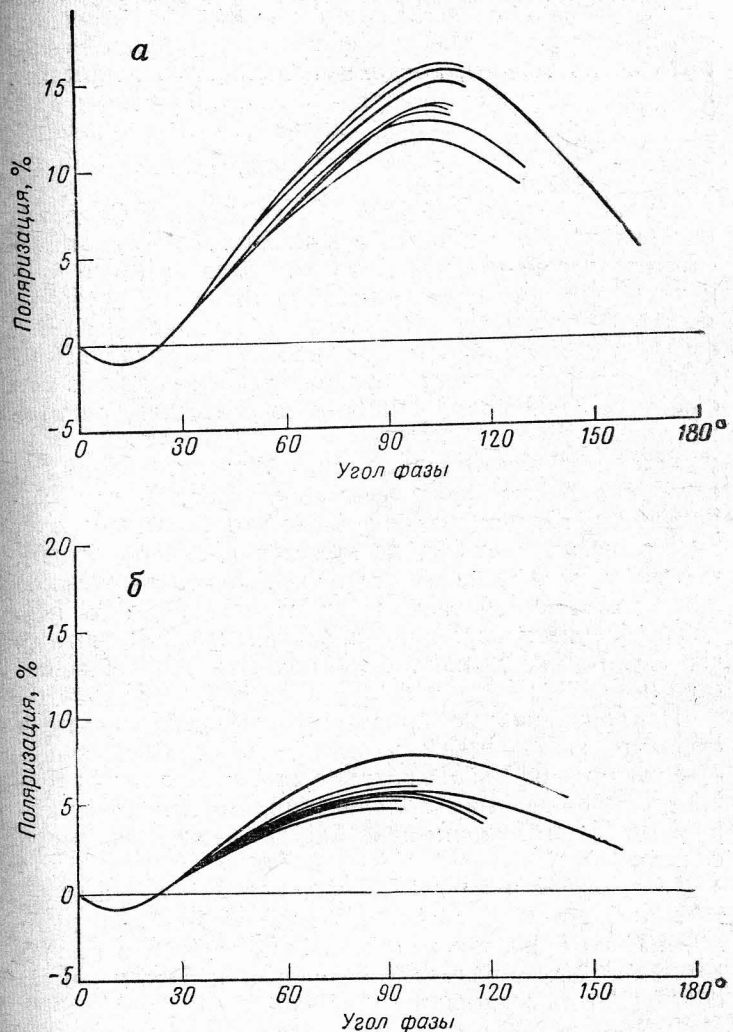


Рис. 14. Поляризационные кривые для лунных морей (а) и лунных материков (б). (The Moon, meteorites and comets, eds. B. M. Middlehurst and G. P. Kuiper, The University of Chicago Press, Chicago, 1963.)

шли к выводу, что лунная поверхность целиком покрыта сильно поглощающим слоем, по строению сходным с вулканическим пеплом. Этот слой может быть очень тонким, но должен полностью покрывать поверхность, даже ее крутые склоны. Порошок должен прилипать к таким склонам, в том числе к 41-градусному склону Прямой Стены и к еще более крутым стенкам борозд.

Здесь следует сделать два замечания. Сходство поляризационных кривых с кривыми для вулканического пепла не означает, что вся пыль на Луне вулканического происхождения. Значительная часть ее может образовываться из других источников и все же физически быть подобной вулканическому пеплу. При отсутствии какой-то части вулканического пепла можно ожидать, если моря, как обычно считается, состоят из лав.

Лио нашел, что поляризация Луны, Меркурия и астероида Весты практически одинакова. По всей вероятности, нельзя предположить, что Веста покрыта вулканическим пеплом, но кажется правдоподобным, что на этом маленьком теле имеется значительное количество метеоритной пыли и связанных с нею раздробленных пород; по аналогии можно считать, что Луна тоже должна быть покрыта такими веществами.

Поляризационные кривые показывают, что пыль очень тонка. Размеры частиц должны быть существенно больше длины волны света, чтобы могла возникать наблюдаемая поляризация, но ясно, что наружный слой лунной поверхности измельчен очень сильно.

Существует и другой подход к этому вопросу, не только подтверждающий, что поверхность Луны запылена, но и позволяющий сказать кое-что о происхождении пыли, размерах ее частиц и о том, каким образом пыль осаждается на Луне.

Давно уже известно, что полная Луна примерно в 9 раз ярче Луны в четверти, хотя площади освещенных частей относятся как 2:1. В основном это вызвано тем, что близ терминатора лучи Солнца падают на поверхность очень наклонно. И горы, и камни отбрасывают длинные тени, уменьшающие

среднюю яркость поверхности. Простая иллюстрация этого явления такова: истоптанная дорожка, покрытая неровным, но чистым снегом, кажется темнее окружающей ровной поверхности снега, если смотреть в направлении Солнца, и ярче, если смотреть в другую сторону.

Если мы нарисуем кривую изменения яркости Луны от новолуния до новолуния, то обнаружим, что яркость медленно растет до максимума в полнолуние, а затем быстро падает.

Было высказано мнение, что, определив зависимость абсолютной яркости от фазы для некоторой точки Луны, мы получим кривую, очень похожую на кривую для Луны в целом, но общая форма кривой будет меняться от места к месту, главным образом в зависимости от расстояния, на которое точка удалена от лунного экватора к северу или к югу. По такого типа изменениям можно сделать выводы о природе отбрасывающих тень объектов.

Подобно многим другим хорошим теориям, эта теория оказалась несостоятельной. Оказалось, что независимо от положения точки на Луне формы кривых хода относительной яркости с углом фазы одинаковы. Единственное существенное отличие состояло в том, что максимальная яркость точек на морях меньше, чем на материках, что и ожидалось. Кривые этого типа показаны на рис. 15.

Это был удивительный и совершенно неожиданный результат. Он означает, что независимо от угла зрения, под которым мы смотрим на лунную поверхность, ее структура выглядит одинаково.

Астрономы долго и безуспешно пытались объяснить этот вывод. Была сделана попытка удовлетворить этим кривым при помощи поверхности, беспорядочно усеянной полусферическими углублениями, т. е. мельчайшими кратерами. Но эта модель не соответствовала наблюдаемой кривой в ее крутой части близ максимума. Тогда было высказано предположение, что лучшей моделью могут оказаться более глубокие ямки. Соответствие стало лучшим, но все еще недостаточно хорошим. Еще лучшее приближение дали углубления, разделенные ровными, покрытыми пылью участками.

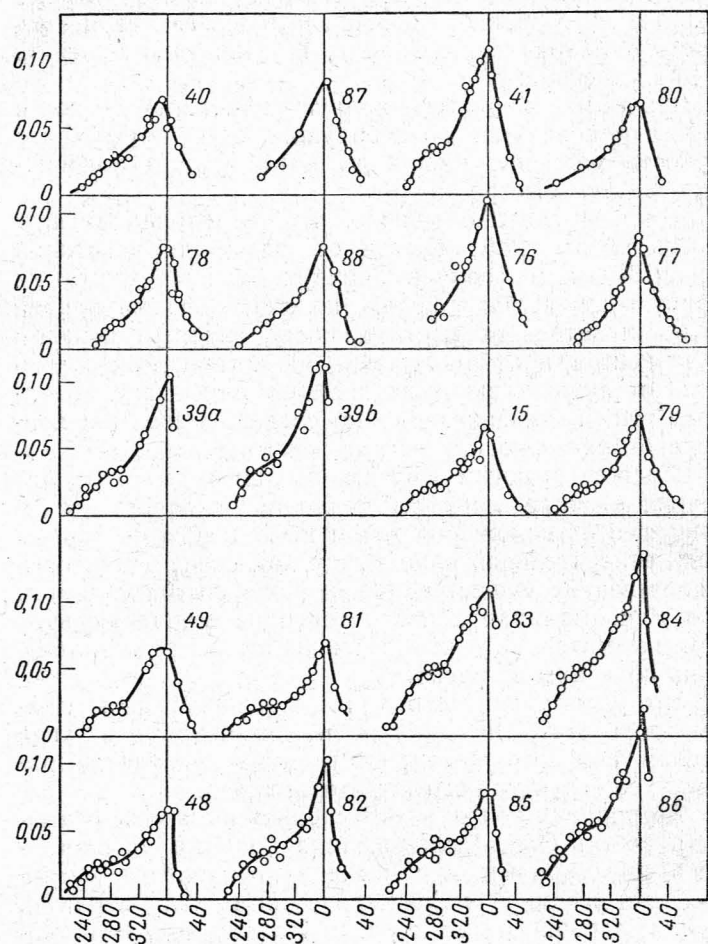


Рис. 15. Кривые, представляющие изменение яркости различных деталей лунной поверхности, в функции угла фазы α . (Н. Н. Ситинская и В. В. Шаронов, Ученые записки ЛГУ, № 153, 1952.)

Ван-Диггелен провел серию лабораторных экспериментов. Он исследовал вулканический пепел, который сходен по отражающей способности с дном некоторых кратеров. Он изучил также маленькие стеклянные шарики, аналогичные тектитам, и металлические пластинки, покрытые маленькими углублениями или бугорками. Ни один из объектов не согласовывался с изменениями яркости Луны, пока не было исследовано губчатое вещество, обладающее бесчисленными мельчайшими порами. Это было живое растение, лишайник *Cladonia Rangiferina*.

Ван-Диггелен, конечно, не считал, что на поверхности Луны есть живые лишайники, но он пришел к выводу, что на ней существует не просто слой пыли, о чем говорили другие наблюдения. Луна должна иметь неправильный, пористый верхний слой со множеством случайно расположенных крошечных дырочек и бугорков. Кроме того, в поверхности должно быть много мельчайших сообщающихся пустот.

Было не ясно, соответствуют ли эти лабораторные наблюдения реальным физическим условиям на Луне, пока недавно Хапке не исследовал большое число поверхностей. Он нашел несколько типов, обладающих необходимым свойством сильного обратного рассеяния. К таким поверхностям относятся лишайники, трава, губка, тонкие темные порошки, насыпанные так, что они образуют сложную поверхность с малой плотностью. Все эти вещества имеют пористую макроструктуру с сообщающимися пустотами. Ни одна поверхность, не обладающая такой макроструктурой, не воспроизводила функции рассеяния для Луны. Из этих веществ на Луне логично ожидать только тонкие темные порошки.

Если размельчить диэлектрик, например кусок камня, на частицы больших средних размеров и порошок насыпать на поверхность, возникнет не особенно сложная макроструктура, напоминающая кучу щебня. Если же частицы меньше определенного критического размера и если они накапливаются так, что каждая частица падает отдельно и ударяется о поверхность с небольшой скоростью, то такие маленькие частицы создают фантастически сложные

структуры. Эти ажурные структуры, похожие на волшебные замки, столь же сложны, как и лишайники, и несомненно обладают свойством сильного обратного рассеяния света.

Если порошок уложен в виде кучи гравия, каждое зерно опирается на несколько ближайших соседних зерен, но в ажурных структурах зерна часто поддерживаются только одной-двумя прилегающими частицами. Таким образом, максимальный размер зерна для ажурной структуры определяется отношением его веса к силам сцепления между зёрнами. Для обычных веществ, например для измельченного камня, осаждающегося в воздухе, критический диаметр, по-видимому, составляет около 15 мк.

Даже в обычных атмосферных условиях такие мельчайшие зерна слипаются друг с другом и образуют ажурные структуры. Однако недавно лабораторным путем было установлено, что при малой плотности атмосферы, порядка 10^{-8} и 10^{-10} мм рт. ст., частицы способны слипаться друг с другом гораздо лучше. Это можно приписать дегазации их поверхностей: незагрязненная пыль может вступать в непосредственный контакт. Поскольку давление лунной атмосферы очень близко к указанному нижнему пределу, можно предположить, что в условиях Луны частицы столь же мало загрязнены и построение ажурных структур более вероятно. Пылевые частицы на Луне, несомненно, могут прилипнуть к крутым склонам.

Пылевые частицы будут слипаться друг с другом с силой, пропорциональной произведению фактической площади соприкосновения на величину межмолекулярных поверхностных сил. Обе эти величины в первом приближении не зависят от размера частиц, но вторая величина зависит от чистоты поверхностей. Следовательно, если в лунных условиях адсорбированная поверхностная пленка отсутствует, силы адгезии*, вероятно, могут увеличиться на порядок вели-

* Адгезия — слипание частиц при соприкосновении, вызванное действием поверхностных молекулярных сил. Наблюдается особенно хорошо в вакууме, так как в нем соприкасаются чистые поверхности, не загрязненные молекулами газа. — Прим. перев.

чины. Одинаковые частицы на Луне будут весить в 6 раз меньше, чем на Земле. Для незагрязненной каменной пыли на Луне критический диаметр может возрасти в $(6 \times 10)^{1/3} = 4$ раза, так что верхний предел для размеров лунных частиц, способных слипаться в структуры, напоминающие «волшебные замки», можно оценить примерно в 60 мк.

Однако небольшая степень поляризации света, отраженного лунной поверхностью, свидетельствует о том, что значительная часть пылевых частиц должна иметь размеры, не слишком превышающие предел, поставленный дифракцией. Кажется вероятным, что средний диаметр частиц в самом верхнем слое лунной поверхности имеет порядок 10 мк.

Прежде чем считать эту модель полностью доказанной, мы должны ответить на несколько вопросов. Откуда появилась пыль? Недавние измерения показывают, что количества метеорного вещества, выпавшего на Луну за всю ее историю, должно быть достаточно для образования оптически плотной поверхности. Но этого не произошло. Поляризационные же измерения показали, что пыль на поверхности непрозрачна. Следовательно, мы должны заключить, что происходило довольно заметное перемешивание лунного и метеоритного веществ. Материки и моря до сих пор обладают отчетливо различными альбедо и в какой-то степени разным цветом; часто между двумя формами поверхности существует резкая граница. Если только моря не крайне молоды, а с этим не согласен никто, то альбедо различных частей Луны обусловлено собственно лунными породами, а не метеоритным веществом.

Когда метеорит ударяется о Луну, он имеет среднюю скорость порядка 16 км/сек. Выбросы, образовавшиеся при этом столкновении, будут двигаться с широким спектром скоростей. Скорость самых быстрых будет превышать скорость соударения, но большая часть разбрасываемого вещества будет двигаться со скоростью меньше 0,5 км/сек. Однако лабораторные эксперименты показывают, что пылевые частицы не будут слипаться друг с другом, если их относительные скорости больше 1 м/сек. Возможно, происходит каскадный процесс первичных, вторичных,

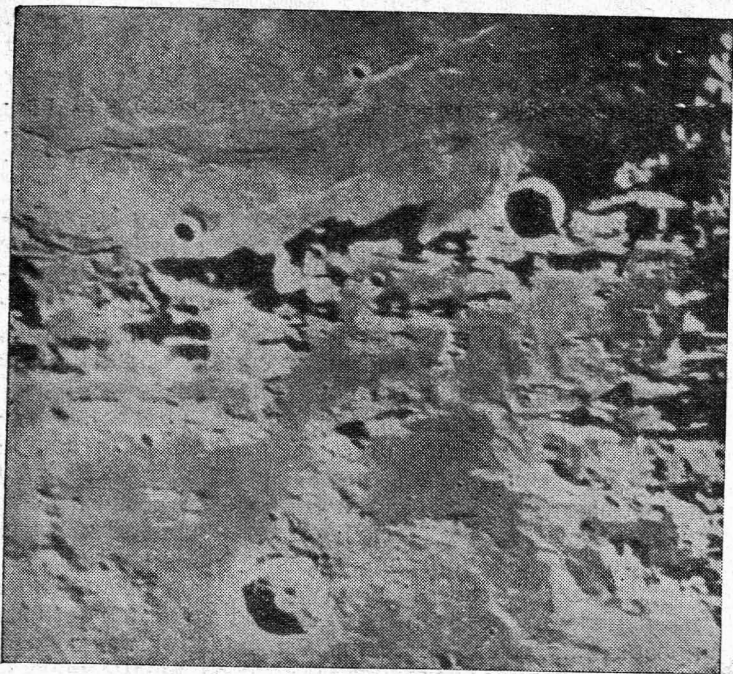


Фото 6. Море Ясности и горы Гемуса (Лаборатория Луны и планет Университета штата Аризона).

третичных и т. д. столкновений, которые на первых этапах разрушают, а на последних — создают ажурные структуры. Ясно, что побочными продуктами метеоритных ударов являются обломки, большая часть которых слишком велика для построения ажурных структур.

Самая серьезная проблема состоит в следующем. Крупных метеоритов при современной частоте падения недостаточно для полного перемешивания лунного вещества. Микрометеориты не могут проникать достаточно глубоко в поверхность, чтобы создать пыль в количестве, необходимом для образования сильно пористых внешних слоев. По-видимому, модель Хапке дает разумные решения многих запутанных проблем и пригодна для наружного слоя в не-

сколько миллиметров. Но для объяснения высокой пористости как материков, так и морей необходим все же несколько иной механизм, особенно если будет обнаружено, что пористость простирается вглубь значительно более чем на метр.

Во всех предыдущих рассуждениях подразумевалось, что эти процессы все еще происходят на Луне. Наблюдения показывают, что практически все районы Луны покрыты пылью, образующей ажурные структуры. Известно также, что одни детали моложе других и, вероятно, некоторые кратеры, такие, как Тихо, Аристарх, и их лучи относительно молоды.

При возникновении Тихо и Аристарха углубления были вырыты в глубинных твердых породах. Для подповерхностных слоев никакой другой вариант и невозможен. Новые кратеры, несомненно, не были покрыты пылью. Их лучи состояли из распыленных пород, определяющих их окраску, и из некоторого количества кусков твердого вещества. Они не были покрыты ажурными структурами. Рождение кратера — слишком мощный процесс, чтобы позволить им образоваться; однако сейчас все части Луны покрыты ажурными структурами пыли. Это должно означать, что в геологических масштабах времени такие структуры образуются быстро, а также то, что пыль — это в основном продукт переработки местного материала. Если бы интересующая нас пыль образовывалась в одном месте и разбрасывалась в стороны, было бы наивно ожидать, что светлые частицы опустятся на лучах, а темные — на лавовых излияниях. Какие бы силы ни вызвали образование пыли, будь то микрометеориты, космические лучи или излучение Солнца, они должны действовать достаточно быстро, чтобы залечивать раны, наносимые ударами метеоритных снарядов из космоса*.

Луна — это не мертвый, застывший мир. На ней происходит многое. В предыдущих главах говорилось, что у многих кратеров, образовавшихся позднее, чем

* Изложенные здесь представления существенно изменились в результате исследований, проведенных в последние годы, особенно после осуществления СССР и США мягкой посадки на Луну. Подробно об этом см. в послесловии. — *Прим. перев.*

моря, видны венцы лучей. У других кратеров, выглядящих точно так же, лучей нет. Отношение числа кратеров с лучами к числу остальных кратеров, возникших после образования лавовых излияний, равно примерно 1:4. Только 20% послеморских кратеров имеют лучи. Это могло бы означать, что лучи образуются только в одном столкновении из пяти, но против этого говорят два наблюдения. Ни один из множества доморских кратеров не имеет лучей. Это наводит на мысль, что существует какой-то процесс, ослабляющий со временем лучи и приводящий в конце концов к их исчезновению. Это заставляет вспомнить наблюдение Сытинской, что диапазон яркостей и цветов на Луне очень мал, а также то, что от Луны отражается менее 10% падающего на нее солнечного света. Средняя яркость Луны примерно такая же, как у угля. Кажется вероятным, что существует процесс, приводящий к потемнению не только лучей, но и всех частей лунной поверхности. Сейчас астрономы склонны думать, что механизм потемнения заключается в распылении поверхности, происходящем при облучении Луны потоками протонов от Солнца*.

В 1946 г. Де-Витт (из армейского корпуса связи США) впервые провел радиолокацию Луны, нарушив этим уединение нашей Селены.

В видимом свете полная Луна в среднем ярче всего в центре диска и постепенно темнеет к лимбу, если не считать местных колебаний яркости. В микроволновом диапазоне яркость Луны падает по ламбертовскому закону косинуса. В радиочастотах потемнение к лимбу гораздо больше, чем в оптическом диапазоне.

Если бы Луна была полированным шаром, она казалась бы глазу слабо светящимся диском с необычайно ярким солнечным бликом, отраженным от соответствующего участка. Визуально этого не наблюдается; следовательно, Луна неровная и масштаб неровностей немногим больше длины волны видимого света; но когда от Луны отражаются волны радиолокатора, вдобавок к диффузному ламбертовскому рассеянию наблюдается очень сильное зеркаль-

ное отражение от центра диска. Оно содержит около 98% отраженной энергии.

Локатор отличается от обычного радиопередатчика в основном тем, что он излучает волны мощными, но короткими дискретными импульсами. Точные измерения времени, необходимого, чтобы короткий импульс прошел до Луны и обратно, показывают, что зеркальное отражение происходит от ближайшей к нам части Луны. Этот резкий отраженный пик длится всего лишь несколько сот микросекунд и, следовательно, образуется при отражении от центральной зоны Луны, внутри которой склоны относительно пологи. 50% энергии приходит от области, расстояния до которой меняются в пределах 8 км, т. е. от круга радиусом только 170 км.

Тщательное изучение зеркального отражения указывает на то, что оно содержит отражение от 20—30 отдельных площадок. Ближайшие к центру площадки — это, вероятно, очень плоские участки, а более далекие могут быть еще не отождествленными кратерами. Область зеркального отражения по крайней мере частично приходится на относительно плоское небольшое море, так называемый Срединный Залив.

Волновой фронт импульса локатора на расстоянии Луны практически плоский, и в любой момент отраженный сигнал приходит к нам от некоторого кольца на поверхности, которое со временем расширяется. Все части этого кольца находятся от Земли на одинаковом расстоянии, и, таким образом, можно построить радиокарту Луны. Если наблюдения проводятся при разных либрациях, можно определить положения отдельных отражающих областей и отождествить их с известными деталями, такими, как Тихо.

Хей и Хьюз нашли, что средний уклон ровных участков поверхности составляет примерно $1/20$. Эванс, работая на длинах волн от 3 м до 10 см, пришел к выводу, что поверхность ровная, но в большей своей части волнистая, со средним уклоном $1/10$. Он же вместе с Петенджиллом показал, что на длинах волн около 1 м приблизительно 5% поверхности состоит из неровностей с размерами того же порядка.

* Аналогично катодному распылению. — Прим. перев.

На длине волны 3,6 см поверхность Срединного Залива гораздо более неровная, со средним уклоном 1:3.

Эти выводы были получены до полета «Рейнджера-7» и относятся к другому морю, но оба определения свойств поверхности, сделанные разными методами, находятся в хорошем согласии между собой.

Сейчас известны некоторые электромагнитные постоянные для пород лунной поверхности. Они отличны от постоянных для метеоритов, тектитов, стекол и земных горных пород. Гораздо лучше они отвечают раздробленным веществам с размерами частиц такого же порядка, какой получается из оптических, инфракрасных и микроволновых наблюдений. Этот результат является основательным подтверждением рыхлости лунного вещества близ поверхности. Он указывает на высокую степень пористости, по крайней мере у внешнего слоя толщиной порядка метра.

Работы по изучению природы Луны сейчас ведутся широким фронтом. Многочисленные применяемые методы дают с каждым днем все более определенные результаты. Сорок лет назад большинство специалистов смотрели на Луну просто как на висящий в небесах кусок камня. Теперь видно, что это мир почти невероятной сложности. Судя по той частоте, с которой делаются новые открытия, Луна заготовила для нас еще много сюрпризов.

Изменения на Луне

Измерения температурных колебаний на Луне показывают, что практически вся она покрыта пылью. Изучение свойств обратного рассеяния лунной поверхности говорит о том, что все ее участки покрыты ажурными пылевыми структурами.

Для поддержания таких условий на Луне должен существовать активно протекающий процесс. Таким процессом являются происходящие с большой частотой удары метеоритов. Мы говорим об этом вполне определенно, хотя до сих пор неизвестно ни одного достоверного наблюдения удара метеорита о Луну. Откуда же мы тогда знаем, что Луна по сей день подвергается бомбардировке?

В астрономическом смысле Луна — очень близкая соседка Земли. Она находится в тех же условиях, что и Земля. Из более чем столетних наблюдений, проводившихся со все возрастающей точностью, мы знаем, что с Землей ежедневно сталкивается около 15 000 метеорных тел с массой, большей 10 г. Такие тела вызывают падающие звезды яркостью с Юпитер. Расположенная рядом Луна также сталкивается с этими метеорными телами. Площади Земли и Луны относятся примерно как 13:1. Кроме того, Луна гораздо менее массивна, чем Земля, и ее ускоряющее влияние несколько меньше земного. Число метеорных тел, падающих на единицу поверхности Луны, составляет $\frac{1}{2}$ — $\frac{3}{4}$ числа тел, падающих на Земле на площадь тех же размеров. Все же примерно 300 таких метеоритов, с массой 10 г и более, ежедневно ударяются о видимую сторону Луны. Это означает один удар в день на 70 000 км² поверхности.

Каждое из этих тел образует кратер диаметром полметра и более.

С ростом размеров метеоритов число их резко уменьшается. Если масса метеорита 1 т, то на видимой стороне Луны один удар такого тела происходит раз в 3 года. Для того чтобы метеорит образовал на обращенной к нам стороне Луны кратер размером 1,5 км, нужно ждать приблизительно 7 млн. лет. Такой кратер едва виден в крупные телескопы. Удивительно ли, что мы никогда не видели образования нового кратера? И все же на Луну, несомненно, падает непрерывный дождь снарядов из космоса, а ее поверхность испытывает множество ударов, особенно от падения малых частиц, и способна залечивать повреждения пылевого слоя, имеющего ажурную структуру.

Рискуя произвести мрачное впечатление, скажем, что наши космические корабли подвергаются ударам такого же потока частиц. Но если микрометеориты ударяются о них часто, то опасность столкновения с крупным телом ничтожно мала. Она гораздо меньше, чем вероятность попасть в автомобильную катастрофу на Земле.

Наблюдались ли когда-либо крупные изменения деталей на Луне? Вероятно, нет. Единственная серьезная попытка обнаружить такие изменения — это история с исчезновением маленького кратера Линней. Лорман в 1823 г., Медлер в 1831 и Шмидт в 1841—1843 гг. часто описывали Линней как глубокий кратер размером около 8 км. Все трое были опытными наблюдателями. Однако в 1866 г. Шмидт обнаружил, что Линней имеет вид белого пятна с маленьким черным пятнышком вблизи центра. Позднее, с лучшими инструментами, было доказано, что черное пятно — это крохотный кратер. Вблизи находится также несколько валов. Группа лежит на куполе примерно 100 м высотой и 1 км в диаметре.

Фаут изучил все, что было написано по этому вопросу, и пришел к выводу, что Лорман и Медлер ошиблись, а Шмидт усугубил ошибку, согласившись с их наблюдениями. Ранние описания были сомнительными, и позднее астрономы неверно их истолковали.

Что это объяснение правильно, было окончательно доказано в 1903 г., когда была найдена зарисовка, сделанная в 1788 г. художником-профессионалом Джоном Ресселом, который изобразил Линней в виде белого пятна, во многом похожего на то, что видно сегодня*.

Наблюдаются только два типа реальных изменений на Луне. Возможно, они вызваны одними и теми же причинами. Многие годы астрономы, а особенно астрономы-любители, указывали, что временами дно кратеров Альфонс, Платон и многих других кажется покрытым дымкой и несколько нечетким. Тонкие детали, например мельчайшие кратеры, становятся неразличимыми. Наконец, Олтер получил серию фотографий Альфонса, по которым видно, что изображение его в синих лучах менее отчетливо, чем следовало бы, по сравнению с изображениями в инфракрасных лучах. Он истолковал это как подтверждение существования дымки. Обратив внимание на эти фотографии, советский астроном Козырев начал наблюдать Альфонс и снимать его спектрограммы в надежде добыть фотографическое доказательство какой-то активности. 3 ноября 1958 г. он отметил, что в 01^h мирового времени центральная горка стала сильно размытой и имела необычный красноватый оттенок. Во время этого наблюдения была снята спектрограмма. Козырев приступил к получению второй. В течение этого периода центральная горка выглядела необычно яркой и белой, но близ конца экспозиции приобрела обычный вид. Третья спектрограмма была получена сразу же после первых двух.

Три пластинки были затем проявлены, и первые две оказались совершенно необычными. Первый спектр в фиолетовой части по сравнению с районами соседних кратеров был заметно слабее. Во

* Размеры Линнея несколько больше, чем указывает автор. Размеры кратера 1,5—2 км, а остатки вала имеют в диаметре 8—10 км. Возможно, что изменения Линнея не совсем фиктивны. В 1891 г. Пикеринг наблюдал, что во время полного лунного затмения белое пятно Линнея увеличилось до 18 км, а сразу после его окончания стало быстро сокращаться до своих обычных размеров. Не исключено, что в этом районе идут какие-то пока неизвестные процессы. — *Прим. перев.*

втором были видны широкие эмиссионные полосы. На следующую ночь Альфонс выглядел обычно и остаточных изменений горки или ее яркости не было.

Козырев объяснил это так. Явление началось с выброса красноватой пыли или пепла из точки вблизи центральной горки. Затем на протяжении нескольких часов происходило истечение газа. Газ ответствен за возникновение эмиссионного спектра. Козырев отождествил самые заметные эмиссии с полосами Свана C_2 , имеющими максимумы интенсивности у 4737 и 5715 Å. Другие полосы C_2 были отождествлены в области Hδ.

Отождествление этого вещества было поставлено рядом специалистов под сомнение. Юри показал, что трудно ожидать присутствия на Луне молекулы C_2 , но это возможно, если там есть CaC_2 . Если вода из недр проникает в места, содержащие CaC_2 , в результате химических реакций возникает C_2H_2 . Ацетилен очень неустойчив и не может сохраняться в течение долгого времени. Но ацетилен — газ, поэтому он может образовываться и выделяться, а солнечный свет будет диссоциировать его на C_2 и H_2 . Действие солнечного света может вызвать излучение в наблюдаемых полосах. Возможно присутствие и других газов.

Явление такого рода на Луне не следует рассматривать как вулканическое извержение. В лучшем случае происходит умеренное выделение газов, однако Эпик даже это подвергает сомнению. Фотографии спектра с яркими полосами были опубликованы, и по ним ясно видно, что эмиссия прекращается на границе тени от центральной горки. Эпик утверждает, что для газовой эмиссии это невозможно. Выделяющийся газ при почти нулевом атмосферном давлении быстро распространяется по всем направлениям. Он должен находиться и над областью тени, но при этом будет освещен солнечным светом и даст яркие эмиссионные полосы.

Примером того, как ведут себя газы, внезапно попадая в вакуум, может служить эксперимент, проведенный при одном из первых запусков ракеты «Сатурн-1». Она подняла большое количество водяного балласта до высоты примерно 150 км. На этой вы-

соте наш воздух чрезвычайно разрежен, но все же еще плотнее любой возможной лунной атмосферы. Вода была умышленно вылита в пространство, и она фактически взорвалась. Она расширялась со скоростью порядка 1,5 км/сек. Лунные газы должны подобным же образом очень быстро рассеиваться.

Так что здесь мы сталкиваемся с проблемой. Ясно, что в кратере Альфонс что-то произошло, но что именно, точно неизвестно.

Отмечались и другие, возможно сходные изменения на Луне. В начале 1963 г. Козырев сообщил о некоторых указаниях на слабое истечение газа из кратера Аристарх. 29 октября 1963 г. Гринакр и Барр изучали окрестности Аристарха с 60-сантиметровым рефрактором Ловелловской обсерватории. В этой области находится странное искривленное понижение, известное под названием Долины Шрётера, расширяющаяся часть которой называется Головой Кобры. Внезапно и совершенно неожиданно в 18^h 30^m Гринакр увидел пятно, непосредственно примыкающее к Голове Кобры, которое при наблюдении через плотный желтый фильтр светилось красновато-оранжевым светом. Без фильтра пятно выглядело ярче и вспыхивало. По форме оно было овальным и занимало площадь примерно 2,5×8 км². Второе пятно диаметром 2,5 км находилось поперек Долины Шрётера, а третье, большее пятно было замечено на внутреннем склоне вала Аристарха в его юго-западной части. Это пятно не вспыхивало. Пятна были хорошо видны в 60-сантиметровый телескоп, но не были заметны в 15-сантиметровый искатель. К 19^h 15^m все три пятна исчезли.

Менее чем через месяц, 27 ноября 1963 г., Гринакр и Барр обнаружили другое, еще большее красное пятно на вале Аристарха. Оно тоже было недолговечным. В этом случае несколько других наблюдателей подтвердили реальность явления. Оно было также видно в 172-сантиметровый рефлектор Перкинса, расположенный по соседству.

Причина появления этих цветных пятен не была с уверенностью установлена. Это могли быть выделения газов, флуоресцирующие под действием солнечного света. Добар предположил на основании

лабораторных экспериментов, что расплавленная лава, попадая в вакуум, энергично вскипает с излучением света. Это предположение в данном случае не кажется вероятным. Явление наблюдалось в одном случае на возвышенности, а в другом — на вале кратера. Если бы здесь появлялись потоки лавы, они должны были бы распространять плотные облака дыма, которых видно не было. Лава должна была также надолго изменить вид ряда участков.

Вновь мы встречаемся с тайной. Очевидно, что Луна не мертва. Эти случаи, вероятно, говорят о том, что недра Луны горячи, но для того, чтобы прийти к уверенным выводам, потребуется еще много времени и труда.

К этой загадке, возможно, имеют отношение два обстоятельства: оба явления произошли примерно через двое суток после восхода Солнца в этой области, а Аристарх, по-видимому, самый молодой из крупных лунных кратеров.

Интересно отметить, что У. Камерон еще до этого предсказала, что если какая-либо активность на Луне и обнаружится, она должна проявиться в районе Аристарха, и особенно поблизости от Головы Кобры. Она считала Аристарх самым новым крупным ударным кратером. Тепло от его образования могло все еще сохраниться в этой области. Долина Шрётера выглядит так, как если бы она возникла под действием внутренних сил. Ранние наблюдатели сообщали, что детали в этой области на протяжении коротких периодов времени видны нечетко и создается впечатление, что они покрыты дымкой. Сопоставив все это, У. Камерон предсказала, что если лунная активность существует, она может проявиться именно здесь.

Лунная атмосфера

Если бы даже над единицей площади поверхности Луны находилось такое же количество воздуха, как и на Земле, условия на обеих планетах все же были бы совершенно различными. Давление у поверхности есть функция полного количества газа и силы тяжести. Поскольку масса Луны, равная $1/81,56$ массы Земли, находится внутри сферы диаметром $0,273$ земного, сила тяжести у ее поверхности составляет $0,165$ силы тяжести на Земле. Это равно примерно $1/6$ ускорения силы тяжести на поверхности Земли; таким образом, в первом приближении, атмосфера Луны простиралась бы вверх в 6 раз дальше, чем у Земли. Плотность и давление у поверхности равнялись бы $1/6$ плотности и давления в стандартной атмосфере.

Давно известно, что у Луны нет плотной атмосферы. Чтобы условия, существующие на Луне, были понятны, полезно сделать небольшой обзор земной атмосферы. Средние температуры атмосферы на уровне моря выше, чем можно было бы ожидать, исходя из интенсивности солнечного облучения за 24-часовой период. Это вызвано парниковым эффектом. Большая часть солнечного излучения сосредоточена в видимой части спектра. Такие длины волн проходят через воздух и поглощаются поверхностью или вблизи нее. Нагретый грунт переизлучает эту энергию в инфракрасных лучах, большая часть которых не может пройти через атмосферу. Таким образом, энергия удерживается и нагревает нижнюю атмосферу до температуры, при которой достигается баланс между приходящим и уходящим излучениями.

Средняя температура стандартной атмосферы на уровне моря 288°К . Она падает с высотой примерно до 24 км, после чего ход ее меняется. Далее температура растет и на высоте около 65 км превышает температуру у поверхности. Еще выше она резко падает примерно на 100° , но затем растет равномерно и достигает в разреженных верхних слоях очень высоких значений, измеряемых тысячами градусов. Если не считать двух относительно небольших инверсий в нижней части земной атмосферы, с уменьшением давления и плотности температура растет.

В нижней части атмосфера полностью перемешана и по составу однородна; но на больших высотах происходит разделение элементов по атомному весу. Они располагаются в следующем порядке: кислород, азот, гелий и на самом верху водород*.

Много лет назад Джинс показал, что скорость потери атмосферы небесным телом зависит от абсолютной температуры, скорости ускользания для данного тела и массы атома или молекулы. Скорость ускользания — это скорость, необходимая для того, чтобы частица удалась от тела и никогда к нему не вернулась. При данной температуре все молекулы газа обладают максвелловским распределением скоростей. Это значит, что небольшая часть молекул будет двигаться очень медленно. Большая их часть будет двигаться со скоростью, близкой к средней, которая зависит от массы молекул и температуры, но некоторые молекулы будут двигаться в несколько раз быстрее. Если скорость ускользания в 4 раза больше средней молекулярной скорости, такие молекулы исчезнут из атмосферы примерно за 1000 лет. Если скорость ускользания в 5 раз превышает среднюю скорость молекул, то время истощения атмосферы увеличивается до 1 млрд. лет, если в 6 раз, — то газ практически будет сохраняться вечно.

Скорость ускользания на земной поверхности равна 11,2 км/сек. На высоте 640 км она умень-

* Представление о гравитационном разделении атмосферы устарело. Диффузия и конвективные движения сильно перемешивают атмосферу почти на всем ее протяжении; диффузионное разделение начинает сказываться на высотах порядка 1000 км. — Прим. перев.

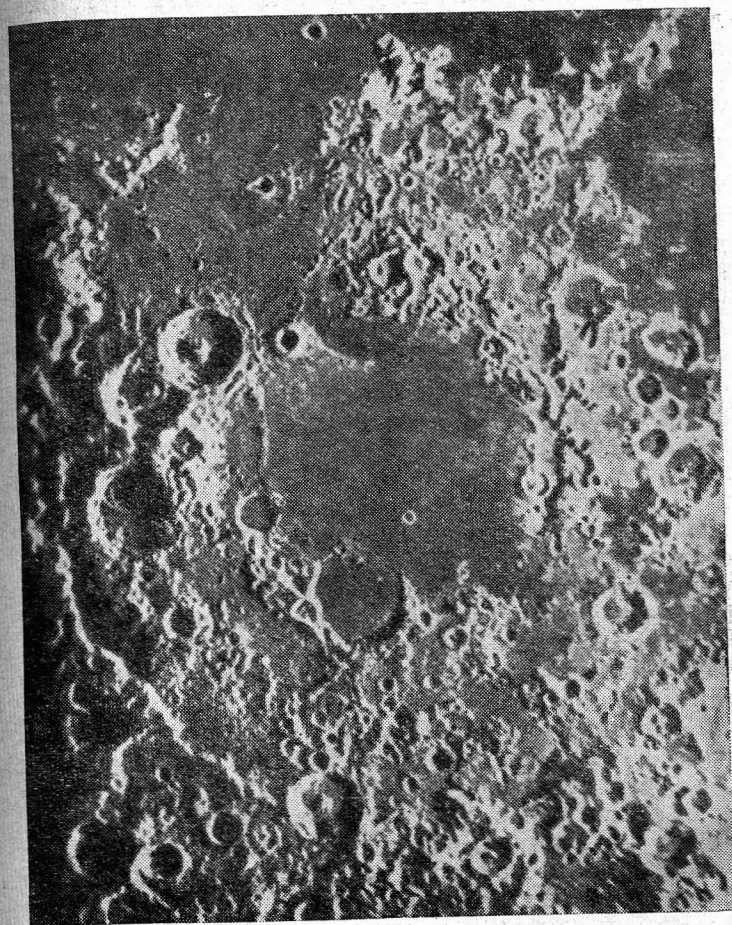


Фото 7. Море Нектара и концентрическое кольцо Алтая (Лаборатория Луны и планет Университета штата Аризона).

шается всего до $10,7$ км/сек. При температуре 373° К только молекулы H_2 обладают средней молекулярной скоростью, равной $\frac{1}{5}$ скорости ускользания. Водород медленно теряется Землей. Даже при крайне высоких температурах верхних частей атмосферы ускользает только водород и, возможно, гелий. Другие, более тяжелые газы сохраняются постоянно.

На Луне положение совершенно иное. Скорости ускользания на поверхности и на высоте 640 км равны $2,38$ и $2,03$ км/сек соответственно. Средняя молекулярная скорость для водорода не в 5 раз меньше скорости ускользания, а равна ей. Водород должен покидать Луну взрывоподобно. Все обычные газы будут быстро исчезать с Луны. Мы не знаем, какую температуру имела бы теоретическая лунная атмосфера, но по аналогии с Землей она должна быть высока. Если температура имеет всего лишь умеренное значение 373° К, то за тысячу лет покинет Луну любой из следующих газов: NH_3 , CO , He , H_2 , O_2 , O и H_2O . Аргон и углекислый газ сохраняются немного дольше, но они также не могут быть постоянными составляющими атмосфер. Криптон и ксенон могут удерживаться, если только температура ненамного выше точки кипения воды (при нормальном давлении).

Этот краткий анализ условий на Луне убедительно показывает, что если на Луне и есть какая-то атмосфера, то она очень незначительна. Что говорят наблюдения о существовании на Луне атмосферы? Этот вопрос очень занимал ранних наблюдателей с их примитивными телескопами. Шрётер из Лилиенталя сделал около 1790 г. многочисленные зарисовки Луны. Он понимал, что если Луна обладает разреженной атмосферой, то в ней должны возникать слабые сумеречные явления, которые лучше всего наблюдать у рогов Луны, когда она имеет форму серпа. На некоторых его рисунках ясно видно слабое свечение, которое можно истолковать как сумеречный эффект. Тогда казалось, что существование лунной атмосферы установлено. Но более поздние наблюдатели с лучшими телескопами не смогли повторить этих наблюдений, и сейчас понятно, что Шрётера ввела в заблуждение плохая оптика его теле-

скопа. Атмосфера, в 10 000 раз более тонкая, чем земная, при полном солнечном освещении была бы более яркой, чем темная сторона Луны, освещенная почти полной Землей. Такие рассуждения привели Рессела, Дэгана и Стюарта в 1926 г. к выводу, что давление лунной атмосферы у поверхности не превышает 10^{-2} мм рт. ст.

Было проведено много наблюдений, приведших к отрицательному результату. Около 100 лет назад Хёггинс попытался обнаружить лунную атмосферу по линиям, которые она образует в спектре Луны. Он потерпел неудачу. Наблюдалось большое число покрытий звезд Луной. Звезды при приближении к лимбу не тускнели, как было бы в том случае, если бы в лунной атмосфере происходило поглощение света. Точно так же отсутствует сколько-нибудь заметное преломление света звезд в лунном воздухе.

Полярные сияния на Луне никогда не наблюдались. Это значит, что кислорода и азота там во всяком случае меньше, чем в земной атмосфере на высотах в несколько сот километров.

Фесенков по поляризационным измерениям нашел, что плотность лунной атмосферы не может быть больше $1,3 \cdot 10^{-7}$ плотности земной атмосферы. Лио и Дольфюс в своих прекрасных исследованиях с коронографом применяли метод Шрётера. По предельной интенсивности свечения, наблюдаемой близ рогов в фазе четверти и пересчитанной на рассеивающую способность атмосферы, они нашли, что верхняя граница плотности равна $3 \cdot 10^{-8}$ плотности земной атмосферы. Дольфюс в 1953 г. установил, что этот верхний предел не превышает 10^{-9} , а в 1956 г. по поляризационным и фотометрическим наблюдениям с коронографом он понизил его еще на порядок.

Все эти поиски дали отрицательные результаты. Они проводились со все более усовершенствованными инструментами, и верхний предел плотности лунной атмосферы непрерывно снижался.

Существуют ли какие-либо наблюдательные методы, позволяющие определить плотность атмосферы Луны? Такие методы все-таки есть.

В 1054 г. н. э. китайцы заметили в созвездии Тельца яркую новую звезду. Ни один из миллионов,

смотревших на эту сверхновую, не мог и думать о том, что когда-нибудь она поведает нам о плотности лунной атмосферы. Видимый остаток этой взорвавшейся звезды известен под названием Крабовидной туманности. Она все еще излучает свет и, что более важно, радиоволны (при помощи синхротронного механизма). Она находится в такой части неба, что Луна может пройти перед ней. Основания для проведения эксперимента заключались в том, что, если Луна обладает атмосферой, она должна быть очень разреженной. Из-за малой плотности под воздействием различных солнечных излучений она должна быть сильно ионизована. Когда Луна закрывает Крабовидную туманность, радиоизлучение туманности должно пройти через атмосферу Луны. Эта сильно ионизованная атмосфера должна заметно влиять на радиоволны, и степень их изменения будет мерой плотности лунной атмосферы. Такое покрытие произошло в 1955 г.; его наблюдали Костейн, Элмор и Уитфилд. Предварительный отчет был опубликован в 1955 г., а более полный — в 1956 г.

Изменение радиоизлучения Крабовидной туманности лучше всего удалось объяснить преломлением в атмосфере на краю дневной стороны Луны. Было получено, что концентрация равна $1000 \text{ электрон/см}^3$. Искажение радиоволн соответствовало плотности лунной атмосферы примерно $2 \cdot 10^{-13}$ от плотности земной атмосферы на уровне моря и ни в коем случае не больше $6 \cdot 10^{-13}$.

Наконец-то было получено желаемое значение давления у поверхности Луны. Измеренная плотность соответствует давлению $2 \cdot 10^{-10} \text{ мм рт. ст.}$ Получить столь хороший вакуум в лаборатории удалось лишь в последние годы.

Хотя теперь мы знаем плотность лунного «воздуха», мы не знаем его состава. В зависимости от истории Луны существует несколько возможностей. Среди радиоактивных элементов, входивших в состав веществ, из которых возникла солнечная система, был иод-129. Если он ответствен за лунную атмосферу, она должна содержать его дочерний элемент — ксенон-129. Если атмосфера состоит из продуктов спонтанного деления урана-238, то в ней будет 5% крип-

тона и 95% ксенона. Если атмосфера содержит следы первичных газов, сохранившихся со времен образования Луны, то в остатках газа должно быть 93% криптона и 7% ксенона. При радиоактивном распаде калия-40 возникает аргон. Обычными вулканическими газами являются сернистый ангидрид, углекислый газ и вода. Согласно теории газов, на лунной поверхности могут сохраняться только криптон и ксенон, но Эпик показал, что их низкие потенциалы ионизации приведут к тому, что они тоже будут потеряны Лунной. Это заставляет думать, что из первичной лунной атмосферы не могло сохраниться ничего и что наблюдаемые газы появляются из двух источников: при медленном выделении газов из недр Луны, на что, по-видимому, указывают наблюдения кратеров Альфонс и Аристарх, и при временном захвате газов из межпланетной среды. Во всяком случае, атмосфера настолько разрежена, что по сути дела вообще недостойна такого названия, и ее следует называть экзосферой. Толщина атмосферы меньше длины свободного пробега, так что каждый атом или молекула движется по баллистической траектории, не сталкиваясь с другими.

Столь разреженная атмосфера не может оказать ощутимого влияния даже на мельчайшие микрометеориты. Все такие тела, и большие, и маленькие, ударяются о поверхность, даже не вспыхнув в атмосфере, даже не затормозившись.

Такая же плотность в земной атмосфере достигается только на высоте около 1000 км. Спутник «Эхо-1», представляющий собой шар из тонкой пленки, обращался вокруг Земли на высоте 1000 км в течение нескольких лет, не обнаруживая ни малейших признаков торможения в атмосфере, равной по плотности той, которая предполагается у Луны.

Затмения

Луна оказывала влияние на человеческое мышление еще в доисторические времена. На некоторых росписях в пещере Альтамира (Испания) видны символы фаз Луны и дней лунного месяца. Эти рисунки были сделаны в ледниковый период примерно 15 000 лет назад. В 1500 г. до н. э. строители мегалитических сооружений воздвигли огромные камни, отмечающие направления на точки восхода и захода Луны. В Стоунхендже, в Южной Англии, есть гигантские каменные арки, указывающие положения этих точек весной, летом и во время равноденствий. Дж. Хокинс указал, что концентрические круги в Стоунхендже могли быть использованы для предсказания изменений в направлениях на точку восхода Луны в течение 56-летнего цикла.

В астрономии слово *затмение* означает заслонение света от одного небесного тела другим телом. Два наиболее известных типа затмений связаны с Солнцем, Землей и Луной. Но точно так же один компонент двойной звезды может затмить другой, если их орбиты соответствующим образом расположены относительно Земли.

Когда тело в солнечной системе освещается Солнцем, образуются три вида теней. Так как Солнце больше Луны, последняя отбрасывает длинную, коническую тень. Наблюдатель внутри этой тени увидит, что Луна полностью покрывает Солнце. Это *полное солнечное затмение*. Наблюдатель в конусе, образованном продолжением образующих конуса тени за вершину, увидит, что Луна меньше Солнца и проецируется на его диск. Такое затмение называется

кольцеобразным. Вершина третьего, еще большего конуса находится между Солнцем и Луной. Наблюдатель внутри этого конуса, расположенный от Солнца дальше, чем Луна, и не попадающий ни в конус истинной тени, ни в конус кольцеобразного затмения, находится в зоне *полутени*. Он увидит, что Луна проецируется на солнечный диск лишь частично. Это называется *частным затмением*. В одном из крайних случаев затмевающее тело может казаться гораздо большим, чем затмеваемое. Такое затмение называется *покрытием*. Оно имеет место, когда Луна проходит перед звездой. Наоборот, перед Солнцем может пройти объект с очень маленьким угловым диаметром. Такое кольцеобразное затмение называется *прохождением*. По диску Солнца время от времени проходят Венера и Меркурий.

Явление солнечного затмения вызвано тем, что диаметр Луны случайно составляет около 1/400 диаметра Солнца, и она находится на расстоянии, равном 1/400 расстояния от Земли до Солнца. В результате Луна имеет такой же видимый диаметр, что и Солнце. В действительности из-за эллиптичности ее орбиты Луна вблизи перигея кажется больше Солнца, а вблизи апогея — меньше.

Когда Луна находится между Землей и Солнцем вблизи перигея, ее тень падает на Землю, и наблюдатель внутри конуса тени видит полное затмение Солнца. Если затмение происходит вблизи апогея, тень слишком коротка, чтобы достать до Земли, и вокруг темной Луны остается кольцо солнечного света.

Перед фазой полного или кольцеобразного затмения и после нее Луна закрывает различные доли солнечного диска. Точно так же, если прохождение Луны между Землей и Солнцем не очень близко к центральному, может произойти частное затмение. Солнечные затмения могут, конечно, состояться только в новолуние. Поскольку затмения не случаются каждое новолуние, очевидно, что наклон орбиты Луны к эклиптике достаточен, чтобы в большей части соединений Луна прошла севернее или южнее Солнца.

На рис. 16 изображены все перечисленные случаи. Свет от Солнца падает на Луну, которая отбрасывает коническую тень IPJ . Если Земля находится в положении 1, тень падает на нее и наблюдатели на овальной площади BC увидят полностью затмившееся Солнце. Если Земля находится в положении 2, тень не достает до Земли и наблюдатели в соответствующем овале FG увидят кольцеобразное затмение. Все прочие наблюдатели на площадях EH

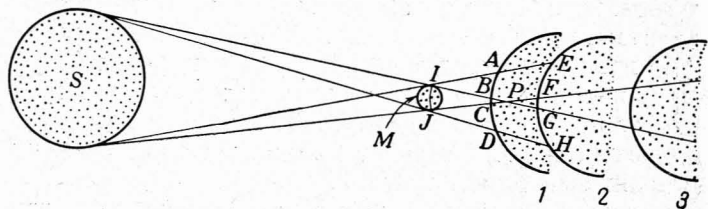


Рис. 16. Виды солнечных затмений.

или AD увидят, что Луна закрывает только часть Солнца.

Если бы Луна была гораздо дальше от Земли (положение 3), она казалась бы гораздо меньше Солнца и не затмевала бы его, а скорее проходила бы перед Солнцем, так же как планеты Венера и Меркурий.

Земля отбрасывает пропорционально бóльшую тень; в полнолуние Луна может погружаться в земную тень или в полутень. Из геометрических соображений можно ожидать, что, когда Луна входит в полутень, она становится менее яркой, а когда входит в тень, она должна исчезать. В действительности, для того чтобы определить, что Луна находится во внешней части земной полутени, необходимы довольно точные измерения яркости, и даже когда Луна целиком погружена в тень, она обычно не исчезает совсем. Это происходит вследствие того, что земная атмосфера преломляет лучи Солнца внутрь теневой зоны. Красные лучи легче, чем синие, проходят длинный путь в воздухе, и полностью затмившаяся Луна приобретает поэтому медный оттенок. Возможно также, что бомбардировка протонами, идущими от Солнца, заставляет поверхность Луны флуоресциро-

вать красным светом. Но даже в этих условиях граница тени выражена довольно резко; в частных фазах она выглядит на диске полной Луны как дуга круга, значительно большего, чем сама Луна. В IV в. до н. э. Аристотель пользовался такими наблюдениями для доказательства сферичности Земли.

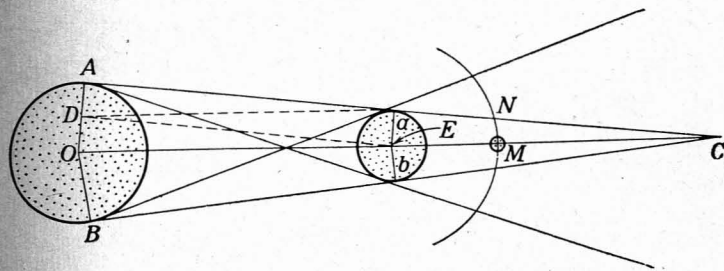


Рис. 17. Размеры земной тени.

В отличие от солнечного лунное затмение видно всюду, где затмившаяся Луна находится над горизонтом, если только этому не мешают облака.

Из простых геометрических соотношений в системе Земля — Луна — Солнце можно получить много интересных фактов. Из рис. 17 легко найти длину земной тени. OED и ECa — подобные треугольники. Следовательно, $OD : OE = Ea : EC$, но $OD (=R - r)$ по построению есть разность между солнечным и земным радиусами. $Ea = r$ — радиус Земли, $OE = d$ — расстояние от Земли до Солнца. Следовательно,

$$EC = \frac{dr}{R-r} = \frac{d}{108,1}.$$

Число 108,1 получается потому, что $R = 109,1r$. Если Земля находится на расстоянии 149,7 млн. км от Солнца, ее тень имеет длину 1 385 000 км. Эта длина меняется примерно на 22 500 км, ибо расстояние от Земли до Солнца в течение года переменное.

Поскольку EC равно 1 385 000 км, а расстояние от Луны до Земли в среднем составляет около 385 000 км, CM в среднем должно быть равно 1 000 000 км, так что MN , радиус земной тени на расстоянии Луны, должен быть равен $621/860$ земного

радиуса, или 4761 км. Таким образом, диаметр тени в этом месте равен округленно 9500 км, или $2\frac{3}{4}$ диаметра Луны. Он меняется в течение года примерно на 300 км в обе стороны.

Подобным же образом мы можем вычислить длину лунной тени. В среднем она равна 373 700 км, но из-за изменения расстояния от Луны до Солнца длина лунной тени меняется от 367 400 до 380 000 км.

Поскольку средняя длина лунной тени меньше среднего расстояния от Луны до Земли, то тень от Луны в среднем не доходит до Земли. Однако Луна может приближаться до 356 000 км к центру Земли или до 350 580 км к ее поверхности. Если в это же время Земля находится в афелии, на максимальном расстоянии от Солнца, вершина конуса лунной тени может оказаться приблизительно на 29 380 км дальше поверхности Земли. В этом случае сечение тени земной поверхностью может достигнуть максимально возможной величины 269 км в диаметре. Обычно тень падает на Землю наклонно и пятно тени не круглое, а овальное; сечение овала может быть больше 269 км.

В противоположном случае тень может не доходить до Земли и максимальное расстояние ее до земной поверхности составляет 28 500 км. Из-за этих геометрических особенностей кольцевые затмения Солнца значительно более часты, чем полные; иногда затмение может быть в одной части зоны видимости кольцевым, а в другой части — полным.

Хотя конус лунной тени вблизи Земли сходится в точку, конус полутени на том же расстоянии имеет ширину примерно 6500 км. Если земной наблюдатель внутри полутени находится близ края тени, он увидит, что Луна почти полностью закрывает Солнце. Если он находится близ границы полутени, он увидит, что Луна едва касается лимба Солнца. Поскольку Земля шарообразна, 6500-километровая полутень занимает на земной поверхности гораздо более широкую полосу.

Земля и Луна движутся относительно друг друга и относительно Солнца, и Земля вращается; поэтому лунная тень движется по земной поверхности вдоль

очень сложной кривой. Тень перемещается к востоку со скоростью около 3400 км/час, но Земля вращается в том же направлении. На экваторе скорость вращения около 1670 км/час. Следовательно, лунная тень, проецирующаяся на экватор, движется к востоку со скоростью 1730 км/час. В высоких широтах относительная скорость больше. Она может достигать даже 8000 км/час, когда тень падает очень наклонно, как это бывает при затмениях на восходе или заходе Солнца.

Максимальная длительность полного затмения, 7 час 40 мин, достигается близ экватора Земли. На широте 45° максимальная продолжительность составляет только 6 час 30 мин. Экваториальное кольцевое затмение может продолжаться до 12 час 24 мин.

Любой человек знает, что затмения Солнца и Луны не происходят ежемесячно; они достаточно редки, и привлекают к себе всеобщее внимание. Это объясняется тем, что в новолуние Луна обычно проходит севернее или южнее Солнца, и аналогично в полнолуние Луна проходит севернее или южнее земной тени. Причина этого заключается в том, что лунная орбита наклонена в среднем на $5^\circ 08'$ к плоскости эклиптики. Затмение может произойти только тогда, когда новая или полная Луна находится близ узла. Следовательно, вдоль эклиптики существуют две области, внутри которых происходят затмения Солнца или затмения Луны.

Для лунных затмений границы этой области определяются предельным расстоянием Солнца от узла лунной орбиты, при котором возможно частное или полное лунное затмение. Это расстояние переменное и зависит, во-первых, от изменений расстояния между Землей и Луной и, во-вторых, от колебаний наклона лунной орбиты. В результате существуют наибольшее и наименьшее предельные расстояния.

При всех полнолуниях лунное затмение невозможно, если Солнце дальше от узла, чем наибольшее предельное расстояние, или, что то же, если земная тень дальше от противоположного узла, чем это расстояние. Если расстояния Солнца или тени от

соответствующих узлов не превышают наименьшего предельного, затмение обязательно должно произойти. Если расстояния находятся между этими двумя пределами, затмение может либо произойти, либо нет.

Наибольшее предельное расстояние равно $12^{\circ}15'$, наименьшее — $9^{\circ}30'$. Каждый год существуют два периода длительностью 26 суток или меньше, когда лунные затмения возможны, ибо земная тень проходит наибольшее предельное расстояние за 13 суток.

Затмение Солнца происходит, когда Луна частично или полностью находится внутри конуса, образующими которого являются линии, касательные как к Земле, так и к Солнцу. На расстоянии Луны этот конус имеет диаметр около 16 000 км. Следовательно, для солнечных затмений упомянутая область вдоль эклиптики примерно вдвое больше, чем для лунных. Наибольшее расстояние равно $18^{\circ}31'$, наименьшее $15^{\circ}21'$. Если Луна целиком попадает в конус, где-нибудь на Земле происходит полное или кольцевое затмение Солнца. Наибольшее и наименьшее предельные расстояния для центральных затмений равны соответственно $11^{\circ}50'$ и $9^{\circ}55'$.

Из-за существования этих пределов число затмений, которые могут произойти за год, резко ограничено. Должно быть по меньшей мере два затмения, оба солнечных. Полное число затмений может доходить до семи. Если их семь, то могут быть либо пять солнечных и два лунных, либо четыре солнечных и три лунных затмения. В среднем в год происходит четыре затмения.

Затмения могут происходить только в период прохождения Солнцем узлов лунной орбиты. Таких прохождений каждый год бывает два. Интервал между прохождениями узла Луной называется *драконическим** *месяцем*, так как любые затмения должны происходить близ моментов этих прохождений. Поскольку орбита Луны совершает один оборот за $18\frac{2}{3}$ года, узлы движутся по эклиптике к западу, и промежуток времени между двумя прохождениями Солн-

* То есть месяцем затмений, ибо по древним поверьям при затмениях дракон пожирал Солнце или Луну. — *Прим. перев.*

цем одного и того же узла равен только 346,62 суток. Он называется *драконическим годом*.

Каждый драконический год может быть только два лунных затмения, так как удвоенный наибольший предел для лунных затмений ($2 \times 12^{\circ}15'$) меньше, чем расстояние $29^{\circ}06'$, которое Солнце проходит вдоль эклиптики между двумя последовательными полнолуниями. Таким образом, невозможно, чтобы Солнце находилось на необходимом расстоянии от узла во время обоих последовательных полнолуний. Наоборот, Солнце может быть слишком далеко от узла, и во время всех четырех полнолуний, ближайших к моментам прохождения узлов, затмений может не быть.

Поскольку календарный год содержит $365\frac{1}{4}$ суток, возможно, что в году произойдет три лунных затмения. Если Солнце проходит один узел лунной орбиты в январе, то другой узел оно пройдет в конце июня и вернется к первому узлу в декабре. В каждый из этих периодов может произойти затмение Луны. Последний раз такое положение было в 1917 г. и вновь наступит в 1982 г.

Так как предельные расстояния для солнечных затмений гораздо больше, чем для лунных, каждый раз, когда Солнце проходит узел лунной орбиты, должно произойти по меньшей мере одно солнечное затмение. Их может быть и два, одно до, а другое после прохождения узла. Каждый драконический год будет, таким образом, два, три или четыре солнечных затмения; если первое затмение случится в январе, то в один календарный год может произойти и пять солнечных затмений. Всякий раз, когда два солнечных затмения происходят в два последовательных новолуния, в промежуточное полнолуние происходит полное лунное затмение.

Солнечные затмения происходят чаще лунных в отношении примерно 3:2. Однако, так как по крайней мере часть лунных затмений видна более чем с половины земной поверхности, в любом данном месте будет наблюдаться больше лунных затмений, чем солнечных. Траектория тени *полного* солнечного затмения столь узка, в среднем шириной только 100--

110 км, что в данном месте Земли полное солнечное затмение происходит в среднем раз в 360 лет. И это несмотря на то, что в среднем *полные* солнечные затмения случаются где-либо на Земле каждые полтора года.

С глубокой древности известно, что затмения повторяются строго через интервал в 18 лет $11\frac{1}{3}$ суток. С учетом современных уточнений календаря, этот период будет равен только 18 годам $10\frac{1}{3}$ суток, если внутрь его попадают пять високосных лет. Этот период времени называется *саросом*. Он состоит из 223 синодических месяцев (от полнолуния до полнолуния) или из 6585,32 суток; 19 драконических лет составляют 6585,78 суток, и разница равна примерно 11 час. За 11 час Солнце проходит по эклиптике всего $28'$, немного меньше своего видимого диаметра. Сарос также очень близок к 239 аномалистическим месяцам (от перигея до перигея), что равно 6585,54 суток.

Чтобы проследить влияние сароса, предположим, что солнечное затмение происходит сегодня и что Солнце находится точно в одном из узлов лунной орбиты. Через 223 синодических месяца, т. е. 18 лет и 11 суток, тоже будет новолуние и Луна будет находиться примерно на первоначальном расстоянии от Земли. Солнце будет только на $28'$ западнее своего первоначального положения. Произойдет очень похожее затмение, но траектория тени на Земле пройдет примерно на 8 час по долготе западнее. Это связано с тем, что 223 синодических месяца дольше 6585 дней на 0,32 суток.

Следовательно, сходные затмения будут повторяться через каждый сарос, но будут происходить примерно на треть окружности Земли западнее. Среднее число солнечных затмений в саросе равно 71, но оно может меняться на 2—3 затмения в ту или иную сторону. Причина этих колебаний состоит в том, что те частные затмения, которые случаются вблизи предельного расстояния, могут произойти в одном саросе и не произойти в другом. Из 71 затмения примерно 45 центральных, т. е. либо полных, либо кольцевых.

При каждом полном затмении Солнца происходят эффектные явления. Когда серп Солнца становится узким, изображения Солнца, проецирующиеся через листву на почву, тоже становятся серповидными. Мельчайшие отверстия между листьями действуют как камера-обскура.

В последний момент перед полной фазой становится совсем темно и остатки света, еще идущего от краешка Солнца, совершенно не похожи на обычный солнечный свет. И небо и пейзаж приобретают странную окраску. В это время животные находятся в полной растерянности, а птицы очень часто устраиваются спать. Температура заметно падает и иногда даже выпадает роса. Непосредственно перед тем, как граница лунной тени дойдет до наблюдателя, на любой белой поверхности можно увидеть волнообразные *бегающие тени*. Иногда можно совершенно ясно видеть, как лунная тень приближается к наблюдателю; кажется, что надвигается сильная гроза, хотя тень движется очень быстро.

В последние мгновения перед полной фазой исчезающее Солнце светит через неровности лунного лимба и солнечный свет распадается на отдельные маленькие пятнышки, которые называются *четками Бейли*.

Во время полной фазы становятся видимыми корона, хромосфера и протуберанцы. Появляются самые яркие звезды и планеты. Становится совершенно темно, но не так темно, как в безлунную ночь.

Корона — это жемчужная внешняя атмосфера Солнца, часто простирающаяся более чем на величину солнечного диаметра. *Хромосфера* — это нижняя часть солнечной атмосферы; она очень ярка. *Протуберанцы* — это похожие на языки пламени, ярко светящиеся массы газа, которые видны по краю Солнца, когда яркий свет фотосферы перекрыт Луной.

Во время полного солнечного затмения можно провести самые разнообразные наблюдения. Большая часть их связана с изучением внутренней и внешней частей атмосферы Солнца. В частности, когда Луна скользит по диску Солнца, она закры-

вает и открывает слои, лежащие на разной высоте над фотосферой. Следовательно, можно провести изучение распределения по высоте различных элементов и степени ионизации в атмосфере.

Хотя такие работы можно провести и вне затмения при помощи инструмента, называемого коронографом, исследования затмившегося Солнца все еще настолько важны, что астрономы готовы объехать полмира ради нескольких минут или секунд наблюдений.

15

Фотографии, сделанные зондом «Рейнджер», и поверхность Луны

В 16^h50^m мирового времени 28 июля 1964 г. с Атлантического ракетного полигона во Флориде * плавно поднялась ракета-носитель «Атлас-Аджена В». Примерно через 5 мин пустая оболочка ракеты «Атлас» отделилась от «Аджены В», и затем успешно включилась вторая ступень. Она вывела космический аппарат на промежуточную орбиту высотой 185 км. «Аджена В» вместе с космическим зондом оставались на орбите в течение 20 мин. Затем по команде они были должным образом ориентированы, ракета снова включилась и вышла на нужный курс к Луне. После того как работа «Аджены В» была закончена, она отделилась от «Рейнджера-7». Возвратные ракеты отбросили пустую оболочку от самого зонда. Это было сделано для того, чтобы свет, отраженный от сверкающего металла «Аджены В», не вводил в заблуждение датчики, используемые для ориентации «Рейнджера-7» в пространстве. Космический зонд выдвинул наружу панели с солнечными элементами, отыскал Солнце и Землю, стабилизировался в нужном направлении и отправился в свой 68-часовой полет к Луне.

Так начался этот фантастически успешный полет, который дал нам первые изображения лунной поверхности с близкого расстояния. Первоначальное направление было настолько точным, что «Рейнджер-7» ударился бы о Луну и без промежуточной коррекции. Однако точка удара находилась бы на обратной

* Ныне полигону присвоено имя Джона Кеннеди. — Прим. перев.

стороне Луны и для передачи изображений полет был бы бесполезным: радиосигналы нельзя было бы получить на Земле. 29 июля в 9^h40^m мирового времени началась промежуточная коррекция курса, закончившаяся в 10^h00^m, когда корабль был подготовлен к исполнению команд. В течение следующих 16 мин «Рейнджер-7» сориентировался, включил на 50 сек маленькие бортовые двигатели, а затем вновь продолжил ориентировку. Полностью маневр был завершен в 10^h58^m. Корабль был направлен на Море Облаков почти в расчетную точку удара. В дополнительном маневре нужды уже не было, хотя он и был подготовлен.

Двумя днями позднее, 31 июля 1964 г., в 13^h08^m мирового времени были включены телевизионные камеры и передатчики начали посылать данные об изображениях на двойную 26-метровую антенну следающего радиотелескопа в Голдстоуне. Результаты известны всему миру. Все шесть телевизионных камер работали прекрасно. Две камеры (F-1 и F-2) использовались для получения широкоугольных фотографий. Изображения на них имели площадь 2,84 см² и за 2,56 сек разлагались на 1152 строки. Другие четыре камеры (P-1, P-2, P-3 и P-4) использовались для фотографирования малых площадей. Площадь изображения на каждой из них составляла только 0,71 см² и изображение разлагалось на 300 строк.

Всего было получено 4316 изображений: первое — с высоты 2217 км, а последнее — с высоты 300 м над поверхностью Луны. Удалось передать только часть этого последнего кадра, когда «Рейнджер-7» столкнулся с Луной. Камеры работали в течение 17 мин 13 сек.

Точка столкновения имеет селенографические координаты 10°,59 ю. ш. и 20°,68 в. д. (20°,68 з. д. на астронавтических картах) и находится близ крошечного кратера Бонплан Р.

Что видно на этих изображениях и что они говорят нам о лунной поверхности и о возможности успешного прилунения? Во-первых, следует помнить, что изображения с малой высоты, показывающие тонкие детали, относятся только к поверхности морского типа. Изображений материков еще не получено.

В прошлом часто предполагалось, что моря могут быть пересечены многочисленными трещинами и разломами. Эти структуры, по общему мнению могли быть уменьшенными вариантами более крупных борозд. Это опасение не оправдалось; нет никаких признаков подобных трещин.

Фотографии, снятые с больших высот, очень похожи на фотографии, сделанные при помощи наземных телескопов. По мере приближения «Рейнджера-7» к поверхности становятся видимыми кратеры все меньших и меньших размеров. Образование, имеющие вид маленьких белых пятнышек, увеличиваясь, превращаются в четкие и ясно выраженные кратеры с лучами.

С высоты 380 км некоторые размытые белые пятна начали разрешаться на группы маленьких плохо выраженных кратеров, расположенных на белом фоне. Возможно, эти белые пятна являются частями лучей от гигантских ударных кратеров Тихо и Коперник. Заметно также несколько маленьких линейных деталей.

К тому времени, когда «Рейнджер-7» опустился до высоты 140 км, стало ясно видно, что линейные образования — это небольшие складчатые жилы. Тут и там стали заметны удлиненные неглубокие понижения, направленные приблизительно к Тихо или Копернику. Маленькие кратеры заметно концентрировались на белых пятнах. Эта связь кратеров и лучей напоминает обычные фотографии системы лучей Коперника, где довольно большое число кратеров расположено на лучах. Наряду с измельченным веществом из Коперника должно было быть выброшено значительное количество отдельных глыб породы.

Фотографии, полученные с высоты 75 км, показывают необычайное изобилие маленьких кратеров. На этом кадре насчитывается 98 четких, ясно выраженных кратеров и, кроме того, 1026 других, размытых и неясных. Многие из последних кратеров — это неглубокие, удлиненные объекты, обычно направленные к Копернику. Можно считать, что четкие кратеры не образованы первичными столкновениями, т. е. телами непосредственно из космоса. Более многочисленные и менее выраженные кратеры, вероятно, образованы

веществом, выброшенным из Коперника или Тихо, и, следовательно, являются вторичными кратерами. Ясно видна только одна складчатая жила, борозд совсем незаметно.

На изображении, полученном с высоты 19 км, видны те же типы образований, что и на фотографиях с больших высот, но здесь поверхность кажется испещренной мельчайшими неглубокими впадинками, от наименьшей, диаметром 14 м, до 250-метровых. Видны отдельные углубления размером до 600 м, ясно заметны также многие удлиненные выемки. Характер поверхности непрерывно меняется при переходе от одной фотографии к другой, от плоской, усыпанной преимущественно первичными кратерами, до выщербленной, волнистой поверхности, сформированной в основном вторичными соударениями. Во всей серии фотографий число первичных кратеров на каждый кадр, грубо говоря, постоянно. Это вызвано тем, что число маленьких кратеров по отношению к большему увеличивается практически в той же пропорции, в которой истинные площади, изображенные на снимках, уменьшаются при снижении «Рейнджера-7».

На кадре 379, и еще лучше на кадре 381, который был получен с высоты всего 5 км, виден очень примечательный кратер. Этот кратер имеет в диаметре 210 м. В отличие от других в нем, по-видимому, находится та твердая глыба, которая образовала кратер. Глыба эта неправильной формы и в видимых двух измерениях имеет размеры примерно 90×45 м. Она имеет и третье измерение, что видно по тени, но как высока она — неизвестно. Можно предположить, что эта глыба была выброшена при возникновении Коперника.

Можно сделать интересную проверку этой гипотезы. Коперник отстоит от этого маленького кратера на 633 км. Если угол выброса глыбы был равен 45° , то она имела скорость 0,94 км/сек. 1 г такого камня при этой скорости обладал кинетической энергией $4,418 \cdot 10^9$ эрг, или 105,6 кал.

Из уравнений, полученных в нашей книге «The measure of the Moon», следует, что для образования 210-метрового кратера энергия ударяющего тела должна быть равна $3,06 \cdot 10^{13}$ кал. Отсюда получаем, что

масса глыбы должна быть равна $2,90 \cdot 10^{11}$ г. Предполагая, что ее средняя плотность $2,5$ г/см³, найдем, что объем ее составляет $1,16 \cdot 10^{11}$ см³. Помня, что видимые размеры глыбы 90×45 м, находим, что ее высота должна быть равна 28 м. Это вполне разумная величина. Отсюда видно, что наше предположение о выбросе глыбы из кратера Коперник не приводит к противоречиям.

Кратер и находящаяся в нем каменная масса показывают, по всей вероятности, что место, где упала глыба, не покрыто глубоким слоем пыли, а способно задержать гигантский камень и предотвратить его погружение в мягкий грунт. Это больше отвечает свойствам твердого грунта, чем толстого пылевого слоя.

Если правильно наше предположение, что сфотографированная глыба действительно выброшена из Коперника и образовала кратер, то как объяснить, что в весьма многочисленных размытых кратерах не видно и следов вещества, от столкновения которого с Луной образовались эти кратеры? Вспомним, что скорости выброса глыб из Коперника низки. Чтобы глыба могла достигнуть точки удара «Рейнджера-7» при угле выброса 45° , необходима скорость всего 0,94 км/сек; при угле 10° от горизонтали скорость должна увеличиться только до 1,2 км/сек. Эти значения сходны с соответствующими значениями для скоростных пуль. Такие пули сильно деформируются и нагреваются при ударе, но не разрушаются.

Существуют наблюдения, позволяющие сказать, каким образом возникли эти пустые, размытые вторичные кратеры.

Ранее предполагалось, что Луна вполне может быть покрыта более или менее непрерывно глыбами всех размеров, выброшенными из крупных кратеров при их возникновении. Фотографии не подтвердили этого предположения. Виден только один объект, который может быть такой глыбой, но он частично погребен в кратере, который сам и создал. Имеется множество доказательств выбросов из Коперника и Тихо; но во всех случаях образовались неглубокие кратеры и нет никаких следов выброшенного вещества, сохранившегося в виде крупных глыб, за исключением только одного кратера. Самые крупномас-

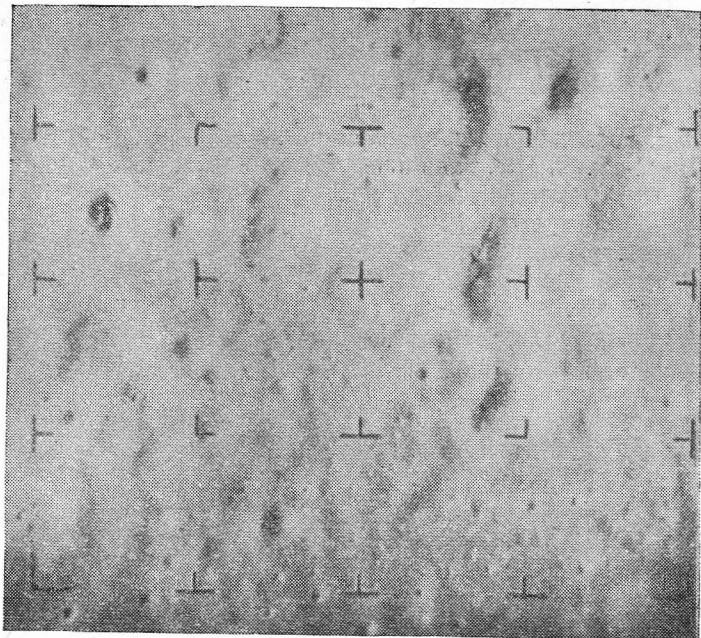


Фото 8. Фотография, полученная зондом «Рейнджер-7» с высоты 5 км (Лаборатория реактивных двигателей).

штабные фотографии, снятые с высоты всего лишь 300 м, почти идентичны снимкам, полученным с больших высот. На них видны и первичные, и вторичные кратеры, но нет сколько-нибудь значительного числа глыб, хотя валуны размером до метра были бы хорошо заметны, если бы они существовали. На изображениях очень мало деталей, которые можно было бы истолковать как маленькие камни. Хотя площадь размером 18×30 м — слишком малая часть поверхности Луны, чтобы делать какие-либо обобщения, эти данные не подтверждают теории, что даже поверхность морей покрыта камнями. Любые камни, присутствующие на поверхности, должны быть мелко раздроблены. Очень похоже, что вещество, выброшенное из крупных ударных кратеров, было измельченным или по крайней мере с такой силой ударилось о Луну, что при этом распалось.

Кроме того, существуют и аргументы, связанные с самими вторичными кратерами. Обычно они круглые, но многие из них совершенно неправильной формы и очень неглубоки. Выемки такого типа не могли возникнуть при ударе одиночных твердых масс. Круговые и неправильные вторичные углубления имеют низкие валы с мягкими и плавными очертаниями.

Неопубликованные материалы Г. Мортон (Лаборатория прикладной физики, Университет Джона Гопкинса) показывают, что, если плотность снаряда существенно меньше плотности мишени, возникающий кратер будет менее глубоким, чем при ударе более плотного снаряда.

Все эти взаимосвязанные данные хорошо согласуются с мыслью о том, что большая часть вещества, выброшенного из гигантских ударных кратеров, была столь сильно раздроблена, что образовывала лучи или, будучи выброшена в виде отдельных сгустков измельченной породы, вырывала, как пескоструйная машина, наблюдаемые ныне размытые вторичные кратеры. Возможно также, что существовали отдельные куски, но удар был настолько сильным, что они при этом распадались. Во всех этих случаях могли возникать только пустые кратеры. Глыба, случайно избежавшая разрушительного действия удара, создала кратер, в котором все еще виден образовавший его снаряд.

Было высказано предположение, что размытые кратеры — на самом деле первичные, но эродированы ударами метеоритов и микрометеоритов до их современного состояния. Этого, по-видимому, не может быть. При современной частоте падений за последние 2 млрд. лет должно было быть около 2 ударов метеоритов с массами от 1 до 10 г на 1 м² поверхности Луны. Такие тела образуют кратеры диаметром от 30 см до 1 м. Поверхностный слой будет сильно раздроблен на глубину до 30 см или меньше. Многочисленные меньшие метеориты не могут проникнуть в каменистую поверхность. Более крупные слишком редки, чтобы вызвать предполагаемую эрозию. Вторичные фрагменты, выброшенные из первичных ударных кратеров, должны производить какую-то эрозию,

но величина ее, по-видимому, слишком незначительна для замывания первичных кратеров.

Как показывают фотографии «Рейнджера» в сочетании с другими видами наблюдений, поверхность Луны слегка волниста и довольно густо покрыта первичными кратерами, которые становятся более многочисленными при уменьшении их размеров. Кратеры, подобные этим, должны находиться на Луне повсеместно. В районах, где упали выбросы из крупных ударных кратеров, имеется большое число вторичных кратеров, обычно размытых, часто неправильной формы и всегда неглубоких.

Моря следует рассматривать как древние лавовые излияния, поверхность которых покрыта тонким слоем пыли, образующей ажурные структуры, а слои, лежащие непосредственно под поверхностью, сильно раздроблены. Породы под этими тонкими слоями, вероятно, очень пористы, что вызвано попаданием расплавленной лавы в вакуум.

Вид поверхности согласуется с радиолокационными оценками неровностей грунта и не преподносит каких-либо крупных сюрпризов. Бесчисленные углубления и кратеры создают для прилунения астронавтов далеко не идеальную поверхность, но нет оснований сомневаться, что хорошая техника позволит им опуститься на морях почти в любом месте, исключая, быть может, только сами лучи.

В начале 1965 г. «Рейнджеры» 8 и 9 также попали в заранее намеченные места. Фотографии Моря Спокойствия, сделанные «Рейнджером-8», очень сходны с ранее полученными изображениями Моря Познанного*, если не считать того, что на них видно несколько очень больших борозд. Многочисленны вторичные кратеры, образованные выбросами из Феофила.

Камеры «Рейнджера-9» дали изображения внутренней части Альфонса. Хорошо видно много ударных кратеров. Весь бассейн испещрен многочисленными бороздами, лавовыми потоками и кратерами типа взрывных провалов. На вершине центральной

* Такое название получил район падения «Рейнджера-7». — *Прим. перев.*

горки Альфонса не заметно кратерочка. Во всех подробностях сфотографированы многочисленные долины, радиальные к Моря Дождей.

Вне сомнения, на Луне имеется много структур внутреннего происхождения, и большое число маленьких кратеров является, вероятно, взрывными провалами. Тем не менее необходимо отметить, что непрерывная последовательность числа и размеров первичных кратеров, от очень больших до минимальных, по крайней мере 3-метровых, видных на снимках «Рейнджера», наносит смертельный удар гипотезе, по которой большинство лунных кратеров имеет вулканическую природу. Они могут быть только метеоритного происхождения.

136-летний спор закончился.

Послесловие

Закрывается последняя страница еще одной книги о Луне. И хотя в нашей научной и научно-популярной литературе нет недостатка в работах на эту тему, переведенная на русский язык обзорная книга Ральфа Болдуина безусловно будет с интересом принята советским читателем. Она явится доступным пособием для знакомящихся с этой областью научных исследований и ценным справочным руководством для специалистов. Известный селенолог и опытный популяризатор, Ральф Болдуин удачно сочетает сжатость, ясность и строгость изложения, достаточную глубину трактовки и значительную широту затрагиваемых проблем.

Естественно, что не во всех аспектах предлагаемая книга равноценна. Английское издание ее увидело свет в 1965 г. И хотя два года — небольшой срок для книгоиздателей, он очень ощутим для исследователей Луны. Отнюдь не случайно авторское предисловие начинается именно с тезиса о стремительном, энергичном развитии современной астрономии. Это вовсе не красивые слова, а трезвое предупреждение о постоянной необходимости критического переосмысления прежних результатов, особенно теперь, когда в науке о Луне многие взгляды меняются столь быстро, как никогда ранее.

Ниже мы кратко остановимся на некоторых новейших данных, появившихся преимущественно в результате полетов к Луне космических зондов, а также дадим представление о методах, при помощи которых эти данные были получены.

Обзор результатов изучения ближайшего к Земле небесного тела космическими средствами доведен автором до полета «Рейнджера-9», последнего аппарата

из этой американской серии межпланетных «скитальцев». За истекшее с того момента время рост инженерно-технической и научной информации, которая становится доступной исследователям в процессе дальнейшего осуществления программ непилотируемых полетов к Луне, достиг невиданных масштабов. Достаточно напомнить, что за два года, прошедших после полета «Рейнджера-9», с апреля 1965 г. по апрель 1967 г., в сторону Луны запускалось еще 16 космических зондов: 10 советских и 6 американских.

18 июля 1965 г. с целью дальнейших испытаний бортовых систем в условиях, близких к реальному полету межпланетных станций в сторону Марса, была выведена на гелиоцентрическую орбиту советская космическая станция «Зонд-3», которая миновала Луну, пройдя от нее на расстоянии 10 тыс. км. К периоду прохождения близ Луны было приурочено выполнение одной из запланированных задач: съемка восточного сектора обратной стороны Луны, который не был сфотографирован «Луной-3» в 1959 г.

На борту «Зонда-3» находилась фототелевизионная установка весом 6,5 кг, снабженная объективом с фокусным расстоянием 106,4 мм и относительным отверстием 1:8. Сеанс фотографирования начался 20 июля в 1^h24^m мирового времени и продолжался 68 мин. Положение станции относительно центра Луны по долготе изменилось в течение сеанса на 60°.

В ходе эксперимента 1965 г. предстояло отснять меньшую по сравнению с программой 1959 г. часть невидимого полушария Луны. Детали неизученного сектора обратной стороны освещались косыми лучами Солнца и были в выгоднейших условиях, когда длинные тени особенно наглядно выявляют структуру поверхности. Фотографии «Зонда-3» отличались высоким качеством и сопоставимы со снимками видимой стороны, получаемыми с Земли. Новые снимки практически полностью охватывали дотоле неизвестную часть обратной стороны Луны, что значительно пополнило представления о макроструктуре лунного шара.

С точки зрения таких параметров, как траектория и конечная скорость, проблема полета к Луне распа-

дается на цепь более или менее самостоятельных задач различной степени сложности:

- 1) пролет близ Луны;
- 2) прицельное попадание в заданный район;
- 3) облет вокруг Луны;
- 4) жесткая посадка с частичным гашением скорости у поверхности;
- 5) выход на селеноцентрическую орбиту;
- 6) мягкая посадка с практически полным гашением скорости у поверхности;
- 7) посадка на Луну и возвращение на Землю.

Эти соображения наряду с грузоподъемностью корабля и энергетическими ресурсами бортовой аппаратуры определяют возможности и цели очередных космических рейсов. Как известно, траектории пролета, попадания и облета Луны были впервые последовательно реализованы советскими учеными уже в 1959 г. Итогами явились отработка бортовой и наземной аппаратуры, доставка на Луну советского вымпела и первые в истории фотографии обратной стороны Луны.

Жесткая посадка на Луну так и не состоялась: советская программа такой задачи не предусматривала, а три «Рейнджера» (с третьего по пятый), предназначенные для жесткой посадки, потерпели неудачу. Американским специалистам удалось осуществить лишь вторую часть программы «Рейнджер» — прицельное попадание в Луну с телефотографированием при подлете (1964—1965 гг.). С помощью телевизионного оборудования на Землю были переданы снимки отдельных участков лунной поверхности с близкого расстояния. Однако в этих полетах задача жесткой посадки уже не фигурировала; никакого гашения скорости на заключительной стадии полета не происходило, и аппараты со всем оборудованием погибали при ударе о поверхность.

В рассматриваемый нами период на повестке дня стояло создание искусственного спутника Луны и мягкая посадка на ее поверхность. Советские ученые интенсивно работают над этой последней задачей.

Как это ни парадоксально, но после полетов «Рейнджеров» многие противоречия селенологов отнюдь не были устранены, а, напротив, обострились.

Серии телефотографий с высот от нескольких тысяч километров до нескольких сотен метров дали возможность выявить статистические закономерности распределения кратеров в двух морских районах и на дне Альфонса, частично объяснили структуру лучевых систем и позволили установить некоторые морфологические особенности форм лунного мезорельефа. Что же касается микрорельефа и собственно лунного грунта, то при исследовании этих проблем по-прежнему оставались широкие возможности для разночтений. Характерным примером служит общая дискуссия на Конференции по природе Луны весной 1965 г. в Годдардовском центре космических полетов близ Вашингтона. Прийти к единой точке зрения по итогам анализа лунных фотографий, сделанных кораблями «Рейнджер», участникам конференции так и не удалось. Закljučая конференцию, известный сторонник пылевой гипотезы Томас Голд из Корнеллского университета остроумно заметил, что фотографии «Рейнджеров» оказались зеркалом, в котором для каждого отразилась лишь его собственная точка зрения.

Фотографирование Луны при подлете не давало ответа на очень многие спорные вопросы. Только непосредственный анализ поверхности, мягкая посадка на нее научной аппаратуры могла пролить свет на дотоле неясные проблемы микроструктуры лунного рельефа. Такая задача настойчиво решалась советскими учеными и конструкторами.

Сбор информации для отработки мягкой посадки начался уже при полете «Луны-5», запущенной 9 мая 1965 г., через полтора месяца после «Рейнджера-9».

Вот заключительные этапы этой длительной и кропотливой работы. 4 октября 1965 г., в день восьмой годовщины запуска первого искусственного спутника Земли, стартует многоступенчатая космическая ракета со станцией «Луна-7» весом 1506 кг. В 1^h08^m24^s московского времени 8 октября станция достигла поверхности Луны в районе Океана Бурь, западнее кратера Кеплер. При подлете к Луне было выполнено большинство операций, необходимых для осуществления мягкой посадки на ее поверхность, и получен

большой практический материал для дальнейших работ.

«Луна-8» весом 1552 кг ушла к Луне 3 декабря 1965 г. Она достигла ее поверхности 7 декабря в 00^h51^m30^s московского времени в точке с координатами 9°08' с. ш. и 63°18' з. д. При подлете к Луне была проведена комплексная проверка работы систем, обеспечивающих мягкую посадку.

Триумфальным стал полет советской автоматической станции «Луна-9», впервые в истории человечества 3 февраля 1966 г. в 18^h45^m30^s мирового времени совершившей мягкую посадку на поверхность иного небесного тела. Значение этого успеха можно поставить в один ряд с такими выдающимися достижениями, как запуск первого искусственного спутника Земли и первый полет пилотируемого космического корабля.

Станция «Луна-9» была выведена на орбиту искусственного спутника Земли и в дальнейшем переведена на траекторию движения к Луне 31 января 1966 г. После выхода на траекторию вес станции составлял 1583 кг. Он складывался из весов трех основных частей: собственно автоматической лунной станции (АЛС) — герметичного контейнера сферической формы с научной аппаратурой весом около 100 кг, которому предстояло мягко опуститься на лунную поверхность; двигательной установки для коррекции траектории и торможения при подлете к Луне; отсеков с аппаратурой управления полетом.

Коррекция траектории — направленное изменение скорости движения станции по радиокоманде с Земли на 71,2 м/сек — была успешно выполнена 1 февраля в 19^h29^m мирового времени. Вторично двигательная установка включилась по команде радиовысотомера на высоте около 75 км от поверхности за 48 сек до посадки. В момент достижения поверхности Луны автоматическая лунная станция с системой амортизации была отделена от двигательной установки и прилунилась поблизости. Станция опустилась в Океане Бурь в точке с координатами 64°22' з. д. и 7°08' с. ш., северо-восточнее 60-километрового кратера Кавальери.

Через 4 мин 10 сек после прилунения словно гигантский бутон раскрылись лепестковые антенны и

начался первый сеанс радиопередачи с поверхности Луны. А еще через 7 час с помощью специальной панорамной телекамеры АЛС «Луна-9» начала обзор лунного ландшафта и передачу его изображения на Землю. Развертка изображения достигалась двумя движениями установленного над объективом плоского зеркала; сканированием по вертикали в пределах 29° (строчная развертка) и медленным вращением в плоскости, перпендикулярной оптической оси камеры (кадровая панорамная развертка). Полная круговая панорама передавалась с разложением на 6000 строк при 500 элементах в строке. Если последние кадры космических зондов «Рейнджер» имели разрешение в 10²—10³ раз большее, чем фотографии, полученные с Земли, то с борта «Луны-9» были переданы панорамы, разрешение на которых в 10²—10³ раза больше, чем у «Рейнджеров». На ближайших к камере участках панорамы различимы детали рельефа размером 1—2 мм.

Габариты автоматической лунной станции: от основания до центра объектива телекамеры — 58 см, высота со штыревыми антеннами — 112 см, диаметр описанной окружности по открытым лепестковым антеннам — 160 см.

Два месяца спустя после посадки «Луны-9» состоялась новая космическая «премьера». 31 марта в 10^h47^m мирового времени, в соответствии с программой дальнейшего исследования межпланетного пространства приняла старт космическая ракета, на борту которой была размещена автоматическая станция «Луна-10» весом 245 кг. Полет ракеты протекал нормально, и вечером 3 апреля 1966 г. в 18^h44^m мирового времени советская «Луна-10» открыла счет искусственным спутникам Луны (ИСЛ).

Создание искусственных спутников Луны — необходимый этап в освоении этого небесного тела. Чтобы по достоинству оценить значение спутников Луны, следует вспомнить огромную роль искусственных спутников при изучении Земли. Мирные спутники, вращающиеся около нашей планеты, изучают околоземное пространство, выполняют комплексные метеорологические обследования, обеспечивают радио-, телефонную и телевизионную связь, решают геодезические

задачи. Аналогичные задачи уже сейчас ставятся и будут ставиться перед искусственными спутниками Луны. Именно лунные спутники позволяют заглянуть в далекое геологическое прошлое самой Земли, ибо поверхность Луны, не испытывающая эрозийного воздействия воды, атмосферы и биосферы, несет печать отдаленнейших космических катаклизмов.

Измерения параметров орбиты первого советского ИСЛ дали возможность получить важные сведения о фигуре Луны. С первого спутника было передано 9 гамма-спектров поверхности. На основании этих данных акад. А. П. Виноградов и его сотрудники подошли к решению проблемы химического состава лунного покрова. Как известно, земная кора состоит из пород, в той или иной степени насыщенных радиоактивными веществами, испускающими гамма-лучи. Среди радиоактивных элементов земной коры главное место занимают уран, торий и радиоактивный изотоп калия. Наибольшее количество этих элементов содержится в гранитах, беднее ими базальты. Сравнение интенсивности гамма-излучения от распада естественных радиоактивных элементов на Луне с данными наземных съемок позволяет приписать лунным породам концентрации радиоактивных элементов, близкие к земным породам основного состава (типа базальтов). Не исключена возможность залегания на поверхности Луны и пород ультраосновного состава (метеоритное вещество). Заметного различия в уровне интенсивности гамма-излучения над лунными морями и материками обнаружено не было.

Несколько лет назад академик А. П. Виноградов выдвинул известную теорию «зонного плавления». Эта теория объясняет механизм наблюдаемого расслоения пород в недрах Земли: кора сложена легкоплавкой фракцией, а нижележащая мантия образована фракцией тугоплавкой. Геохимики предполагают, что подобные процессы протекали и на Луне, только разделение вещества произошло не полностью. Возможно, что лунные материка и являются площадками «нетронутного» первичного вещества.

С «Луны-10» было передано 10 магнитографических разрезов окололунного пространства, что позво-

лило судить о существовании магнитного поля около нашего единственного естественного спутника.

Активное существование первого искусственного спутника Луны продолжалось с 3 апреля по 30 мая. За этот срок он сделал 460 витков около Луны, покрыв расстояние в 7 млн. км. В общей сложности со спутником было проведено 219 сеансов радиосвязи.

После «Луны-10» на селеноцентрические орбиты вышли советские ИСЛ «Луна-11» и «Луна-12». На «Луна-12» среди других научных экспериментов было выполнено фотографирование лунной поверхности.

Успешная мягкая посадка «Луны-9» стала как бы «зеленым сигналом» для полетов последующих космических аппаратов. 2 июня 1966 г., через четыре месяца после советской «Луны-9», район Океана Бурь близ кратера Флемстид стал местом прилунения американского «Сервейора-1».

Инженерно американский аппарат для мягкой посадки решен иначе, чем советский. Он представляет собой рамную пирамидальную конструкцию и внешним видом несколько напоминает лабораторный штатив. Посадочное шасси «Сервейора» состоит из трех механических «ног», снабженных гидравлическими амортизаторами самолетного типа. Опорные «башмаки» этих «ног» выполнены из разрушающихся сотовых алюминиевых панелей. Наружный слой «башмаков» в виде усеченного конуса выдерживает нагрузку до $7 \cdot 10^5$ дин/см², внутренний — до 15×10^5 дин/см². Для предотвращения жесткого удара корпуса аппарата о поверхность под ним размещены цилиндрические контрольные амортизаторы из сотовых панелей, рассчитанные на нагрузку 30×10^5 дин/см². Близ «башмаков» находятся газовые двигатели системы управления пространственным положением, которые поддерживают ориентацию корабля. На вершине центральной штанги крепится солнечная панель и остронаправленная антенна. Габариты аппарата: высота 3 м; диаметр окружности, описанной у «башмаков» посадочного шасси в развернутом положении, 4,2 м.

Торможение «Сервейора-1» выполнялось первоначально главной тормозной двигательной установкой и в дальнейшем тремя верньерными жидкостными

двигателями. Отсечка последних произошла на высоте 4 м при скорости 1,5 м/сек. Продолжая падать, «Сервейор-1» коснулся поверхности Луны при вертикальной составляющей скорости 3,5 и горизонтальной 0,3 м/сек. Аппарат резко осел и контрольные амортизаторы уткнулись в грунт. Вслед за этим он подскочил на высоту 6 см и примерно через секунду после первого контакта окончательно опустился на поверхность. Масса корабля к моменту прилунения составляла 291,8 кг. Передача телеизображений началась через 35 мин после посадки. Космический «робот», полет которого задержался на три года, а стоимость (свыше 500 млн. долларов) в десять раз превзошла сметную, опустился в точке с координатами 43°32 з. д. и 2°49 ю. ш.

С августа 1966 г. по февраль 1967 г. американские ученые вывели на селеноцентрические орбиты три фотографических спутника из серии «Лунар орбитер». Перед ними была поставлена задача фотографирования в крупном масштабе (с разрешением до 1 м) избранных участков экваториальной зоны с целью выбора места высадки лунной экспедиции. С них были получены также снимки экваториальной зоны со средним разрешением (до 8 м) и перспективные фотографии отдельных районов.

На исходе 1966 г. советские ученые добились еще одной замечательной победы. Впервые было запланировано и успешно осуществлено не косвенное, а прямое определение физико-механических свойств лунного грунта в точке посадки.

Космической гаванью «Луны-13» вновь стала темная равнина Океана Бурь. Запущенная 21 декабря 1966 г. автоматическая станция «Луна-13» достигла поверхности Луны 24 декабря в 18^h01^m мирового времени, совершив мягкую посадку в типично морском районе в точке с координатами 18°52' с. ш. и 63°03' з. д. подле кратеров Крафт, Селевк и Скиапарелли. Прилунение произошло в предутренние «часы» лунных суток при свете узкого серпа Земли; вскоре место посадки было освещено лучами Солнца.

Несмотря на гигантский прогресс в этой области, полеты к Луне остаются сложнейшими научно-техническими экспериментами. Выше мы упоминали о 16

запусках за истекшие два года. Не все из них оказались в равной мере успешными. Стартовавшая 1 июля 1966 г. американская станция «Лунар эксплорер», которую предполагали вывести на селеноцентрическую орбиту, стала спутником Земли, — причина неудачи заключалась в чрезмерно большой начальной скорости, развитой ракетой-носителем. Тремя месяцами позже вследствие отказа одного из верньерных двигателей при коррекции на маршевом участке траектории разбилась о лунную поверхность американская станция «Сервейор-2». Во время полета «Луны-6» команда на выключение двигателя при коррекции не была исполнена, и станция прошла от Луны на расстоянии 160 000 км. Эти случаи лишней раз подчеркивают те колоссальные трудности, которые стоят перед создателями космических аппаратов. Тем большее чувство гордости испытываем мы за наших ученых, инженеров и рабочих — первооткрывателей космических трасс, которые демонстрируют всему миру неисчерпаемые возможности советской науки и техники. Их трудовые подвиги воплощаются в ярких незабываемых страницах летописи космического века.

Фотографии «Зонда-3» в 1965 г. практически завершили глобальный обзор лунной поверхности. Подтвердив прежние выводы советских селенологов, эти фотографии дали возможность судить о морфологии обратной стороны гораздо полнее. Больше того, по существу они стали научной сенсацией. Если в 1959 г. сходство обратной стороны Луны с видимой только ставилось под сомнение, то в 1965 г. сомнений уже не осталось: обратная сторона действительно во многих отношениях отличается от видимой.

На видимой стороне Луны морские районы, основным признаком которых является низкая отражательная способность (альбедо), занимают около половины поверхности. На обратной стороне выявлено резкое преобладание материкового ландшафта. Единственным «полноправным» морем обратной стороны, которое по своим отражательным свойствам и правильной форме бесспорно заслуживает это название, является Море Москвы (Mare Moscoviense) со средним поперечником, не превышающим 300 км. На фотографиях, полученных с «Зонда-3», нет сколько-ни-

будь значительных новых морских областей, за исключением весьма ограниченного по площади района к югу от Моря Восточного.

Разобщенные северный и южный материковые щиты видимого полушария на невидимой стороне Луны смыкаются в единый материковый массив. Следовательно, при характеристике природы лунной поверхности правильнее было бы придерживаться концепции общелунного материкового покрова, в то время как темные морские и океанические поверхности (результат затопления вследствие частичных опусканий лунной коры) следует рассматривать лишь как замкнутые внутриматериковые вкрапления.

Принципиальное значение имеет открытие на невидимом полушарии Луны особого вида депрессий, достигающих в поперечнике сотен километров. Депрессии со светлым, в основном материкового типа дном, усеянным кратерами, имеют в достаточной степени правильную, овальную форму и по площадям сопоставимы с большинством лунных морей. Изучение указанных депрессий неизбежно наводит на мысль, что по происхождению они во многих отношениях подобны морям, хотя в отличие от последних они избежали последующего затопления, отчего и не получили характерной для морей сравнительно ровной поверхности темного тона. Вследствие сходства с морями для спецификации описанных депрессий был предложен термин *талассоид* (мореподобный).

Таким образом обнаружено, что на Луне существуют два типа гигантских кольцевых депрессий, которые могут быть объединены общим названием *бассейны*. Переходные формации отмечались ранее по изучению крупных деталей видимого полушария. А. В. Хабаков обращал внимание, что Море Нектара занимает лишь часть обширной депрессии между Алтайским хребтом на востоке и Пиренеями на западе. Территория между этими хребтами представляет собой овальную котловину поперечником 1100—1200 км, усеянную кратерами и неровностями материкового типа и тона, т. е. в целом подобную котловинам талассоидов. Затопленная в позднейшие геологические эпохи центральная область древнего талассоида и называется ныне Морем Нектара.

Ударная теория формирования лунного рельефа рассматривает моря как результат спорадических столкновений с планетезиμαлями. Именно этой точки зрения придерживается в своей книге Ральф Болдуин. Однако уже издавна обращалось внимание на то исключительно важное и противоречащее ударной теории обстоятельство, что моря видимого полушария расположены отнюдь не хаотически, а образуют широкий пояс. Основываясь на этой наблюдаемой закономерности, Ю. Франц предсказывал продолжение пояса морей и наличие второго океана на обратной стороне Луны. Чтобы избежать отмеченного противоречия Дж. Койпер, развивая ударную теорию, включил в рассмотрение пояс метеоритов, вращавшихся некогда около Земли наподобие кольца Сатурна. Таким образом, процесс формирования лунного рельефа распадается на две эпохи, причем в первую из них — когда Луна, удаляясь от Земли, проходила через пояс метеоритов — интенсивность бомбардировки лунной поверхности значительно превышала современный уровень.

Фотографии «Зонда-3» не оставляют места для гипотез относительно второго океана и некоторой, хотя бы частично связанной цепи морей от Океана Бурь и Моря Восточного в направлении к Морию Мечты (*Mare Ingenii*). Однако в целом овальные лунные бассейны, моря и талассоиды, имеют вполне очевидную тенденцию располагаться широким поясом, координаты южного полюса которого $\beta = -55^\circ$, $\lambda = -20^\circ$.

Естественно считать, что образование кольца гигантских депрессий происходило в одну геологическую эпоху, но по каким-то причинам депрессии видимой стороны затоплялись лавообразной или же аналогичной ей субстанцией, в то время как на обратной стороне такого затопления не происходило. Принципиально важно установить, связано ли это различие непосредственно с воздействием Земли или же связь косвенна, а явление случайное.

Как известно, имеются основания предполагать, что некогда Луна вращалась вокруг своей оси существенно быстрее, чем в настоящее время. Фигура Луны в таком случае, очевидно, определялась сум-

марным действием сил тяготения и центробежной силы. Когда под влиянием приливного торможения скорость вращения Луны заметно уменьшилась, вследствие уменьшения центробежной силы фигура равновесия приняла иной вид, отчего и произошла цепь гигантских экваториальных опусканий, давшая начало кольцу котловин. Угол между средней плоскостью кольца котловин и современным экватором, согласно этой точке зрения, определяет прежний наклон экватора Луны к плоскости эклиптики, который, как у Земли и Марса, составляет 20—30°.

Другим важным открытием на обратной стороне Луны являются цепочки кратеров диаметром 20—40 км. По протяженности, составляющей многие сотни километров, они резко отличаются от цепочек, известных на видимом полушарии, что позволяет говорить об исключительности этих образований. Примечательно четко выраженное направление всех вновь открытых кратерных цепочек, сходящихся к светлой материковой области севернее Моря Восточного. Подобные образования свидетельствуют об активных тектонических процессах в недрах Луны.

В результате изучения новых снимков на той части карты обратной стороны Луны, которая до полета «Зонда-3» оставалась белым пятном, обнаружено около трех с половиной тысяч новых объектов. Для наиболее значительных из них специальная Комиссия АН СССР под председательством старейшего советского астронома академика А. А. Михайлова предложила собственные наименования.

Первому талассониду на Луне предложено дать имя Сергея Павловича Королева. Десять крупнейших кратеров восточного сектора обратной стороны предлагается назвать в честь Норберта Винера, Эвариста Галуа, Н. Е. Жуковского, Н. И. Кибальчича, Ю. В. Кондратюка, Гендрика Лоренца, Грегори Менделя, Баруха Спинозы, П. Л. Чебышева и Ф. А. Цандера. Все эти выдающиеся ученые шли неизведанными путями, открывая людям широчайшие перспективы для познания окружающего мира. Бунтари в науке, многие из них не щадили сил и отдавали жизнь за прогресс человечества. Многие названия отражают историю становления и развития отечествен-

ного ракетостроения. Для трех из кратерных цепочек предложены названия ГДЛ (Газодинамическая лаборатория), ГИРД (Группа изучения реактивного движения) и РНИИ (Реактивный научно-исследовательский институт). Это первые советские опытно-конструкторские организации в области ракетной техники. В названиях отдельных кратеров увековечены славные имена советских ученых-ракетчиков.

Вновь открытому морю на обратной стороне Луны присваивается наименование Море Мирное (Mare Pacificus).

В память об основных вехах в освоении Луны Комиссия АН СССР предложила два новых названия на видимой стороне Луны. Место, куда был доставлен в 1959 г. советский вымпел, предлагается назвать Заливом «Лунника» (Sinus «Lunnikus»), а район первой мягкой посадки «Луны-9» — Заливом Прилуния (Sinus Landing).

Согласно существующей процедуре, проект новых названий представлен на утверждение в Международный астрономический союз, очередной съезд которого состоится осенью 1967 г. в Праге.

Лавина новых данных о микрорельефе хлынула в руки селенологов в результате мягкой посадки «Луны-9». Прежде всего огромное значение имел сам факт посадки — безукоризненное доказательство правильности как инженерных расчетов, так и теоретических предпосылок конструкторов.

По панорамным снимкам была установлена однородность лунного покрова. Этот вывод полностью подтвердился последующими посадками «Сервейора-1» и «Луны-13». Ни одна из деталей станции не была запылена; высокое качество изображения также свидетельствовало о том, что объективы телесистемы остались чистыми. Нигде на панорамах не видно бесструктурного пылевого слоя. Лунный грунт оказался цементированным, связанным. Судя по телефотографиям, полученным во время дополнительного сеанса в ночь с 6 на 7 февраля, углы наклонов у дециметровых лунок, внутри которых видны тени, превышают 41°, — такова была высота Солнца в момент телепередачи.

Характерными для лунной поверхности оказались три типа деталей: кратеры-лунки, или воронки, с едва намечающимися валами или вообще без валов; протяженные линейные структуры; камни.

Как и считалось прежде, на лунной поверхности доминируют отрицательные формы рельефа: кратеры-лунки, депрессии, трещины. Важный новый факт — обнаружение линейных структур. Известно, что преобладающие направления крупных, видимых с Земли линейных структур были открыты еще очень давно. В последующем такие структуры в мезомасштабе обнаружались на фотографиях космических аппаратов «Рейнджер». Создается впечатление, что преобладающие направления для такого рода структур на лунной поверхности сохраняются одними и теми же как в макро- и мезо-, так и в микромасштабе.

В нескольких случаях отчетливо прослеживается пересечение линейными структурами кратеров-лунок. По-видимому, прочность линейных структур выше, нежели прочность окружающего их материала. Возможно, что эти структуры представляют собой обнажения мелких жил, обладающих повышенной прочностью при поверхностном разрушении породы.

К линейным структурам относятся и гряды камней. Вряд ли случайно, что азимут наиболее четко выраженной гряды камней совпадает с преобладающим направлением «прожилковых» линейных структур. Очевидно, на лунной поверхности существуют не только мелкие, но и более крупные жилы и дайки. Одним из доказательств этого, возможно, и служат гряды камней.

В целом формы лунного микрорельефа определенно связаны с эрозионными экзогенными процессами. Отрицательный баланс масс для места посадки «Луны-9» можно считать доказанным: масса выпадающих частиц меньше массы покидающего Луну вещества. По-видимому, отрицательный баланс масс имеет место и для всей поверхности Луны. Панорамные снимки АЛС «Луна-9», воспроизведенные с документальной точностью, и итоги их предварительного анализа опубликованы в выпущенной АН СССР книге «Первые панорамы лунной поверхности».

Изучение панорамы «Луны-9» показало, что формирование лунной поверхности бесспорно не одноактный процесс. Применительно к макрорельефу видимого полушария Луны эту точку зрения последовательно развивал известный советский селенолог А. В. Хабаков.

В результате изучения дальности разброса камней на фотографиях космических аппаратов «Рейнджер» Дж. Койпер пришел к выводу, что прочность лунного грунта составляет $1 \cdot 10^{-2}$ или $1 \cdot 10^{-3}$ прочности базальта, т. е. он способен выдержать нагрузку порядка 10 кг/см^2 .

На основе панорамных снимков «Луны-9» аналогичные расчеты проделал Ю. Н. Липский. Он также пришел к выводу, что поверхность Луны выдерживает нагрузку в несколько килограммов на квадратный сантиметр. Далее он высказал соображение, что в действительности допустимая нагрузка, возможно, на полпорядка — порядок больше рассчитанной.

В результате изучения панорамных снимков «Луны-9» подавляющее большинство селенологов окончательно отвергло концепцию «лунной пыли».

Во время телерепортажа с борта «Луны-9» в Океане Бурь занималось утро. У нас на Земле это лунное утро знаменовало новый день в развитии мировой науки. Такова диалектика развития: века кропотливого труда селенологов внесли свой вклад в осуществление грандиозного космического эксперимента. И один этот эксперимент позволил расширить представления о поверхности Луны, пожалуй, больше, чем все предшествующие столетия.

Несмотря на то что точка посадки «Сервейора-1» находится в 800 км от «Луны-9», микроструктура поверхности оказалась в целом подобной уже описанной. Грунт близ аппарата имеет однородную мелкокомковатую структуру — это гранулированное вещество с сильно изменяющимися размерами зерен. Наиболее типичны частицы размером менее 2 мм, однако размер исходных зерен, скорее всего, меньше разрешающей способности телекамеры. Связь между числом и размером комков и камней представляется формулой $N = 3 \cdot 10^5 \cdot y^{-1,77}$, где N — число комков на

100 м², а y — размер комков в мм. Формула справедлива при $1 < y < 2000$ мм.

Как указывалось выше, после первого контакта с поверхностью «Сервейор-1» резко осел, так что контрольные амортизаторы под корпусом уткнулись в грунт. Последующие телефотографии показали в месте удара трещину. Этот факт лишний раз говорит о значительной связности лунного грунта.

С целью проверки пылевой гипотезы на «Сервейор-1» был проделан эксперимент с кратковременным обдувом поверхности струей азота. Реактивный двигатель системы управления пространственным положением на посадочной опоре № 2, расположенный под углом 72° на расстоянии 12 см от поверхности, в течение 12 сек включался импульсами по 20 мсек с паузами в 30 мсек. Он развивал тягу до 0,028 кг. Место обдува фотографировалось. Ни «пылевой облака», ни каких-либо изменений после включения двигателя не наблюдалось. В предполагаемой точке обдува был обнаружен лишь малый конусообразный кратер, однако телеснимки, полученные до эксперимента, не дают удовлетворительного ответа, существовал ли он прежде, или нет. Не исключено, что струя выхлопных газов оказалась малоэффективной, но так или иначе этот эксперимент пока является важным аргументом против даже тонкого слоя «лунной пыли».

Корабль «Сервейор-1» функционировал в течение лунного дня и был законсервирован на период лунной ночи. После очередного восхода Солнца работоспособность отдельных систем корабля удалось на некоторое время частично восстановить. В общей сложности с борта «Сервейора-1» получили свыше 10 тыс. телефотографий. Смена красного, зеленого и синего светофильтров позволила воспроизвести на Земле цветные изображения. Преобладающим тоном на Луне, как и ожидалось, оказался серо-коричневый. Помимо лунного ландшафта, с помощью телекамеры наблюдался Юпитер, а также звезды Сириус и Канопус.

Важные сведения о физико-механических свойствах лунного грунта сообщила «Луна-13». Помимо фототелевизионного комплекса, «Луна-13» несла на

борту целую лабораторию для испытания прочности и плотности лунного покрова. В числе приборов станции находились измерительный штамп-грунтомер, динамограф и радиационный плотномер.

Измерительный штамп-грунтомер, или, как часто называют подобные приборы, пенетrometer, представляет собой стержень с коническим наконечником. Специальное приспособление для выноса грунтомера (механическая «рука») удаляет его на заданное расстояние от корпуса станции. Внедрение конического наконечника в грунт происходит под действием малого порохового реактивного двигателя, развивающего фиксированное усилие в 7 кг в течение 1 сек.

Длительность и величина импульса динамической перегрузки при контакте автоматической станции с поверхностью Луны регистрировалась динамографом, состоящим из пьезоэлектрических датчиков и электронной запоминающей схемы. Наличие динамографа дает возможность детальным образом сопоставить характерные особенности посадки «Луны-13» с динамическими данными модельных экспериментов, проводившихся в земных условиях. Сравнение позволило заключить, что верхний слой лунного покрова 20—30 см толщиной имеет примерно те же механические показатели, что и земные грунты средней плотности.

Установление взаимосвязи между прочностью и плотностью лунного грунта, находящегося в условиях глубокого вакуума и резких перепадов температур, также является задачей первостепенной важности. Если данные о динамике посадки служили основанием для оценки именно прочности грунта, то необходимая информация о его плотности была собрана с помощью радиационного плотномера. Он состоит из малого радиоактивного источника гамма-излучения и трех блоков газоразрядных счетчиков гамма-квантов. Защитный экран, смонтированный между источником и счетчиками, предохраняет последние от прямого попадания гамма-квантов, так что они регистрируют лишь рассеянное излучение. Интенсивность потока рассеянного гамма-излучения, достигающего газоразрядных счетчиков, находится в зависимости от плот-

ности рассеивающей поверхности. Согласно предварительным сообщениям, плотность вещества наружного слоя лунной коры не превышает плотности воды. Это подтверждает данные радиоастрономических наблюдений и вновь свидетельствует о высокой пористости лунной породы.

Равно как и панорамы «Луны-9», телефотоснимки «Луны-13» показывают многочисленные кратеры-лунки, камни различных размеров, лежащие без погружения в грунт, линейные структуры прожилкового характера.

Телеинформация с борта «Луны-13» убедительно подтвердила основные выводы советских ученых, сделанные в результате анализа аналогичной информации с борта «Луны-9»: определяющую роль в формировании микрорельефа играет разрушение лунной коры. Во вновь изученном районе также имеет место отрицательный баланс масс.

Луна никогда не приближается к Земле меньше чем на 356 000 км. Однако в космический век подобные расстояния не кажутся большими. «Зонд-8» достиг окрестностей Луны через 33 час после старта с промежуточной орбиты искусственного спутника Земли. Советская автоматическая станция «Луна-13» затронула на весь полет 79 час 44 мин. «Сервейор-1», следовавший по аналогичному маршруту, пробыл в пути 63 час 37 мин. Интересно вспомнить, что 30 годами раньше, в июне 1937 г., мировые рекордсмены Чкалов, Байдуков и Беляков во время беспрепятственного перелета Москва — Северный полюс — Америка пробыли в воздухе 63 час 25 мин.

Перспективы пилотируемых полетов к Луне стимулируют стремительный рост исследований этого небесного тела не только космическими, но и обычными средствами наземной астрономии, хотя темпы «земных» астрономов не могут сравниться с темпами астрономов «космических». Конечно, с помощью наземных наблюдений, невозможно собрать ту бесценную информацию, которую передают по телеметрическим каналам лунные космические аппараты. Однако систематические наблюдения с поверхности Земли целого полушария Луны создают прочный фундамент,

основу для обобщения разнообразных космических данных в единую стройную систему.

В результате усилий «земных» астрономов в последние годы были значительно пересмотрены традиционные взгляды, особенно в отношении однородности и неизменности лунного лика. Получение Н. А. Козыревым и В. И. Езерским в 1958 г. спектрограммы с эмиссионными линиями сванновской серии молекулы C_2 и слабой системой полос C_3 , что свидетельствовало о выходе газов в районе центрального пика кратера Альфонс, заставило даже скептиков признать существование современной лунной активности. В дальнейшем реальность кратковременных проявлений такой активности на лунной поверхности подтверждалась объективными методами неоднократно. Сравнительно недавно московский астроном М. М. Поспергелис отметил кратковременное изменение плоскости поляризации в ходе наблюдений кратера Аристарх. В конце 1966 г. Н. Н. Петрова наблюдала проявления лунной активности близ кратера Кеплер и в районе Залива Радуги. В связи с этим старые, считавшиеся сомнительными визуальные данные о переменах на лунном лике также приходится принимать всерьез.

Весьма плодотворное изучение термических свойств видимого полушария Луны путем наблюдений в инфракрасной области спектра в ходе лунных затмений предприняли в США Р. Шортхилл и Дж. Саари. Для этой цели ими была сконструирована оригинальная сканирующая установка с достаточно высокой разрешающей способностью. Необходимое внимание было уделено привязке обнаруженных аномальных областей к топографическим деталям лунной поверхности. В результате было выделено большое число площадей — «теплых пятен», температура которых во время затмений остается на десятки градусов выше температуры окружающей местности. Оказалось, что теплые участки совпадают с центрами лучевых систем и другими молодыми образованиями.

Н. П. Барабашев и В. И. Езерский обнаружили известную корреляцию между термическими аномалиями и фотометрическими характеристиками поверх-

ности. Дальнейшее развитие работ в этом направлении сулит богатые возможности для «проникновения» в недра Луны.

В преддверии пилотируемых полетов к Луне мощнейшим средством изучения особенностей лунной среды стало моделирование, которым занимаются не только астрономы, но и представители иных профессий. Моделирование идет сразу несколькими путями. Предпринимаются попытки имитировать процессы, в результате которых возникали минералы лунного покрова (например, выплескивание расплава в вакуум), по косвенным свойствам подбирается минералогический состав образцов. Чаше всего на простейших моделях испытывается влияние отдельных факторов лунной среды: глубокий вакуум, малая сила тяжести, облучение «солнечным ветром» и т. д.

Обширный класс исследований посвящен моделированию ударных кратеров сверхскоростным обстрелом. Анализ форм кратеров в зависимости от материалов мишени и снаряда также позволил приблизиться к пониманию природы лунного грунта.

Нет сомнений, что Луне предстоит стать первой внеземной базой человечества. Уже сейчас в рамках Международной астронавтической федерации ученые многих стран обсуждают перспективные планы деятельности Международной лунной лаборатории на 1975—1985 гг. Представления о Луне непрерывно будут обновляться и расширяться. Вместе с ними неизмеримо расширятся наши представления о происхождении и эволюции всей солнечной системы.

А. ГУРШТЕИН

16 апреля 1967 г.
Москва

ОГЛАВЛЕНИЕ

Из предисловия автора	5
1. Из истории изучения Луны	7
2. Закон всемирного тяготения и орбита Луны	13
3. Приливы	21
4. Приливное трение и форма Луны	31
5. Происхождение Луны	43
6. Основные образования на поверхности Луны	52
Кратеры	53
Лучи кратеров	60
Круговые моря	61
Темные моря	63
Борозды	64
Складчатые жилы	65
Горные цепи	65
Кратерные цепочки	66
Сбросы	68
Купола	68
Обратная сторона Луны	69
7. Как возникли лунные кратеры?	72
8. Как образуется метеоритный кратер?	84
9. Как образовались темные моря?	93
10. Какова температура лунной поверхности?	96
11. Как выглядит поверхность Луны?	101
12. Изменения на Луне	119
13. Лунная атмосфера	125
14. Затмения	132
15. Фотографии, сделанные зондом «Рейнджер», и поверхность Луны	143
Послесловие	152

Р. БОЛДУИН

ЧТО МЫ ЗНАЕМ О ЛУНЕ?

Редактор *Р. Г. Золина*
Художник *Г. И. Юдицкий*
Художественный редактор *Н. А. Фильчагина*
Технический редактор *Н. А. Турсукова*
Корректор *И. С. Додолева*

Сдано в производство 22/У 1967 г.
Подписано к печати 9/Х 1967 г.
Бумага типографская № 2, формат 84×108¹/₃₂ =
= 2,82 бум. л. 9,34 усл. печ. л., в т/ч вкл. 1.
Уч.-изд. л. 8,37. Изд. № 27/4253.
Цена 58 коп. Зак. 733
Темплан 1968 г. Издательства „Мир“, № 136.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ленинградская типография № 2
имени Евгении Соколовой
Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете
Министров СССР,
Измайловский проспект, 29

58 к.

