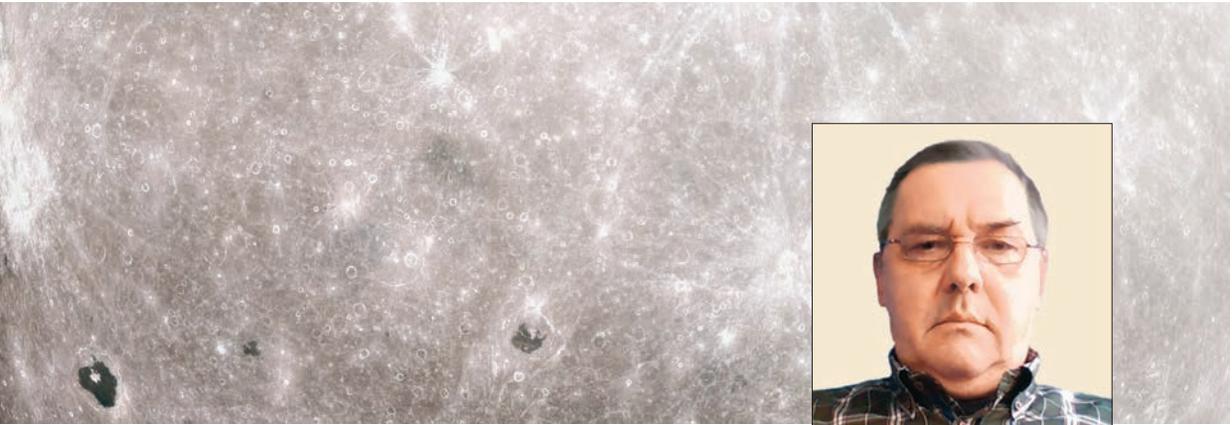


# НЕРАЗГАДАННЫЕ ТАЙНЫ ЛУНЫ



**М.А. ИВАНОВ,**

доктор геолого-минералогических наук

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

DOI: 10.7868/50044394819040042

***В статье дается краткий обзор наиболее важных вопросов лунной геологии, которые имеют непосредственное отношение к общей проблеме эволюции планет. Эти вопросы связаны с лунной хронологией, ее вулканической активностью и внутренним строением. Несмотря на огромный прогресс в изучении Луны, многие аспекты этих вопросов все еще остаются далекими от решения.***

---

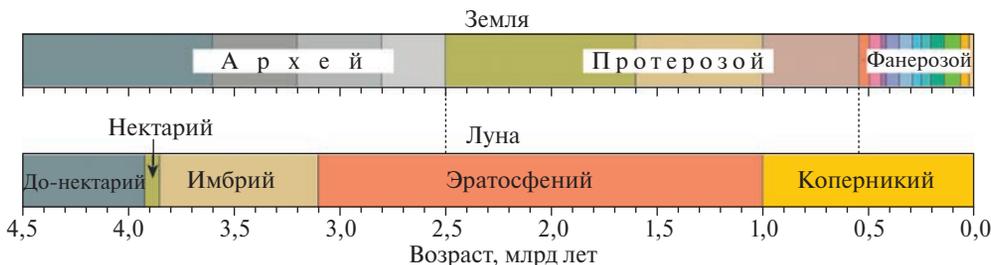
## ЛУНА – КЛЮЧ К ПОНИМАНИЮ РАННЕЙ ЭВОЛЮЦИИ ПЛАНЕТ

---

Луна – ближайшее к нам планетное тело, которое изучается уже на протяжении столетий. Долгое время основным инструментом познания в этой области оставался телескоп, а главным объектом исследования – лунная поверхность, ее форма и оптические свойства. После наступления космической эры технические возможности изучения Луны возросли в колоссальной степени, и в настоящее время накоплен огромный и качественно новый

фактический материал о морфологии поверхности Луны, ее топографии и спектральных характеристиках; составлены глобальные карты геофизических полей (например, гравитационного). Уникальный каменный материал был собран на Луне и доставлен на Землю астронавтами экспедиций по программе “Аполлон”, а также с помощью советских автоматических аппаратов серии “Луна” (ЗиВ, 1977, № 3; 2003, № 4; 2009, № 6).

Полученные данные позволяют добавить к области исследования не только поверхность, но и внутреннее строение Луны и обратиться к изучению проблемы



Сопоставление земной и лунной хронологий. Подавляющее большинство "морских" поверхностей Луны имеют возраст, соответствующий Архейскому периоду геологической истории Земли

фундаментальной важности: как эволюционировали планеты земной группы и какой этап их эволюции может иллюстрировать Луна?

Геологическая проблема эволюции планетных тел очень сложна и включает множество составных частей, которые могут быть как универсальными (распространяющимися на все планеты), так и специфичными для каждой из них. К универсальным аспектам проблемы относятся, прежде всего, хронология планет, их вулканизм и внутреннее строение; они отражают процессы обмена масс и энергий между планетами и окружающим космосом. Например, хронология геологических событий на планетах определяется, главным образом, по числу ударных кратеров на единицу площади, что напрямую связано потоком космических тел (его интенсивностью), бомбардирующих поверхность планет. Результаты проявления вулканизма, а также внутреннее строение планет позволяют судить о потерях планетами запаса тепла.

Все эти проблемы полнее всего изучены на Земле (однако это лишь один элемент общей картины). Луна как полноправное планетное тело (хотя формально она – и спутник) представляет собой еще один пример эволюции планет и позволяет изучить ее ранние этапы. Несмотря на то что Луна изучена

в большей степени, чем планеты земного типа (Меркурий, Венера, Марс), множество вопросов ее геологии остаются нерешенными<sup>1</sup>; это затрудняет детализацию геологической истории Луны и выяснение ее места в общей проблеме эволюции планет.

## ЛУННАЯ ХРОНОЛОГИЯ

Вопрос *возможного диапазона* возраста лунной поверхности имеет важнейшее значение для понимания способов формирования и путей эволюции не только Луны, но и всех других планет. Дело в том, что главным показателем возраста поверхности планетного тела является кратерная "летопись" (то есть плотность и морфология кратеров). Ударные кратеры образуются при столкновении космических тел с поверхностью планет, а собственно планетные процессы (эрозия, вулканизм, сейсмическая активность) "стирают" кратеры и обновляют поверхность планет. Из этого простого соотношения следует: чем выше плотность кратеров – тем древнее поверхность. Но насколько?

<sup>1</sup> National Research Council. The Scientific Context for Exploration of the Moon: Final Report. // Washington, DC: The National Academies Press, 2007.

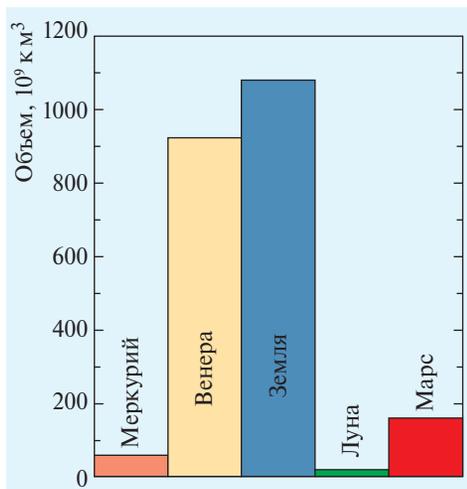


Диаграмма сравнения объемов планет земной группы, иллюстрирующая существование группы крупных (Земля, Венера) и малых планет (Меркурий, Луна). Марс занимает промежуточное положение

В свою очередь, образование ударных кратеров – главный геологический процесс в Солнечной системе, распространяющийся на все ее тела с твердой поверхностью – планеты, карликовые планеты, астероиды и кометы. В проблеме хронологии Солнечной системы исследование Луны играет ключевую роль, так как это единственное планетное тело, образцы которого непосредственно связанные с теми или иными типами пород (например, с выбросами из бассейна Моря Дождей) были доставлены на Землю, а их абсолютный возраст был точно измерен в земных лабораториях. Информация об исходном местоположении лунных образцов, доставленных на Землю, принципиально отличает их от другого типа внеземного вещества – метеоритов, локализация которых не может быть точно установлена.

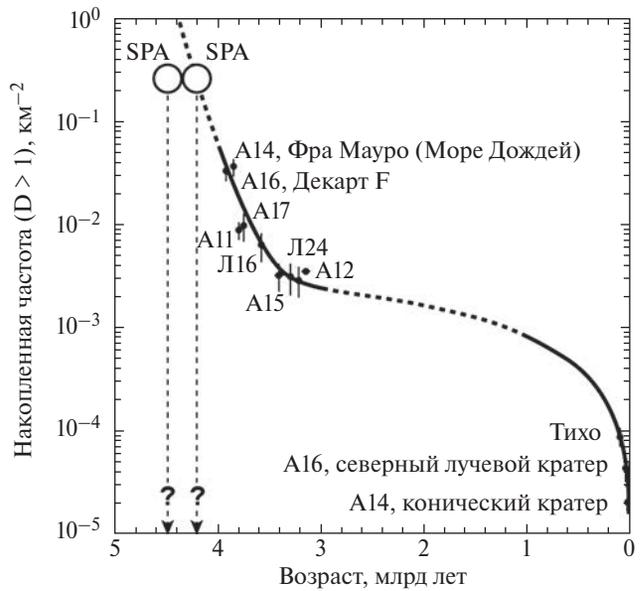
Знание места, из которого были взяты образцы лунных пород, установленная связь их с тем или иным веществом

ным комплексом и радиоизотопные датировки позволили связать частотно-размерное распределение ударных кратеров Луны и абсолютный возраст. Эта связь и позволяет ответить на вопрос: насколько древний (или молодой) тот или иной участок поверхности, в зависимости от плотности кратеров. Форма кривых частотно-размерного распределения кратеров на других планетах подобна лунной. Это достоверно установленный и очень важный факт; он позволяет экстраполировать соотношения между частотно-размерным соотношением кратеров и абсолютным возрастом, установленные на Луне, на другие планеты и оценивать абсолютный возраст их поверхности.

Проблема калибровки частотно-размерного распределения кратеров на Луне по абсолютному возрасту, однако, далека от решения: в частности, некалиброванным, а интерполированным остается длительный промежуток (между 3 и 1 млрд лет), а также участок для наиболее древних кратеров – более 4 млрд лет. Оба “участка неопределенности” важны для понимания лунной хронологии, но часть древней популяции, кроме того, играет важную роль в гипотезе позднего всплеска ударной бомбардировки. В ней утверждается, что в период от 3,8 до 4 млрд лет назад система Луна–Земля пережила относительно короткое, но значительное усиление интенсивности метеоритной бомбардировки, вызванной крупными объектами<sup>2</sup>. Этот всплеск мог быть спровоцирован изменениями положения орбит планет-гигантов и связанными с ними перераспределениями потоков кратерообразующих тел.

<sup>2</sup> Tera F., Papanastassiou D.A., Wasserburg G.J. Isotopic evidence for a terminal lunar cataclysm // Earth Planet. Sci. Letters, 1974. V. 22. P. 1–21.

Диаграмма лунной хронологической кривой, показывающей соотношение между плотностью ударных кратеров (более 1 км) и абсолютными радиоизотопными возрастными лунных пород, отобранных в местах посадок КК "Аполлон" (А) и АМС "Луна" (Л). Абсолютный возраст ударного бассейна Южный полюс-Эйткен (SPA) играет важную роль в определении конфигурации кривой для возрастов более 4 млрд лет. (По данным Hiesinger H. et al., How old are young lunar craters? // *Journal Geophysical Res.*, 2012. V. 117. DOI: 10.1029/2011JE003935)



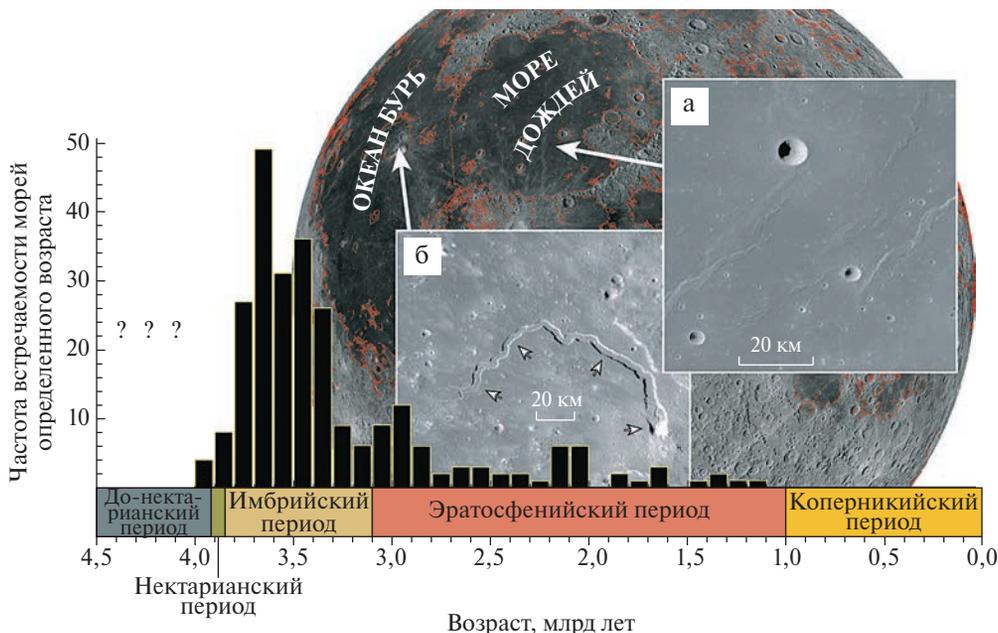
Решающим в проверке этой гипотезы станет определение абсолютного возраста формирования крупнейшего и древнейшего лунного бассейна Южный полюс – Эйткен (South Pole – Aitken, SPA; см. статью В.В. Шевченко в этом номере). Этот бассейн, по модельным представлениям, образовался до 4 млрд лет назад (на сколько раньше – неизвестно). Если возраст бассейна находится на существующей хронологической кривой, то нет оснований говорить о внезапных изменениях потоков кратерообразующих тел в Солнечной системе. В противном случае гипотеза “позднего всплеска ударной бомбардировки” и связанные с ней модели динамической эволюции Солнечной системы станут более основательными.

## ЛУННЫЙ ВУЛКАНИЗМ

Каждое планетное тело представляет собой “тепловую машину”, которая “выносит” на поверхность внутреннее

тепло с помощью того или иного механизма. Наиболее общий и яркий механизм – вулканическая активность, которая проявляется в извержениях горячего материала из недр планеты и его отложении и остывании на поверхности. Этот в целом однонаправленный процесс действует на всех планетах и продолжается до времени исчерпания запасов их внутреннего тепла.

Луна представляет собой удобный объект для изучения вулканизма в историческом аспекте, так как на протяжении почти всей ее геологической истории эффективные эрозионные процессы не действовали, и проявления вулканизма на спутнике сохраняются в первозданном виде. Это позволяет изучать тип и интенсивность происходивших вулканических процессов и оценивать их роль в общем тепловом балансе планеты. Вулканические породы формируют вторичную кору, которая образуется при плавлении мантии и “перекрывает” первичную, сформированную на ранних этапах эволюции



Хронология вулканической активности Луны: а – типичная морфология поверхности лунных морей; б – в некоторых случаях на поверхности лавовых равнин видны каналы (стрелки), образованные в результате извержений с большим расходом излияний. Мозаики снимков (разрешение – 100 м), полученные с помощью широкоугольной камеры WAC AMC “Лунный орбитальный разведчик”, фото NASA. Кажущийся пик вулканической активности на Луне приходится на интервал времени между 3,8 и 3,3 млрд лет назад. Подавляющее большинство проявлений лунного вулканизма представлено лавовым заполнением ударных бассейнов (например, Моря Дождей); по данным Hiesinger H. et al., How old are young lunar craters? // Journal Geophysical Res., 2012. V. 117. DOI: 10.1029/2011JE003935

планет, во время их интенсивной метеоритной бомбардировки<sup>5</sup>.

Вулканическая активность Луны почти полностью связана с заполнением лавами топографических депрессий ударных бассейнов. Области такого заполнения хорошо видны с Земли даже невооруженным глазом: это – темные пятна на поверхности Луны, которые называются “морями”. “Морское” заполнение бассейнов представляет

собой колоссальные скопления базальтовых лав, которые покрывают около 20% поверхности Луны, а их толщина достигает нескольких километров. Как правило, базальтовые покровы образуют сплошные неструктурированные поля, но в некоторых случаях на их поверхности видны лавовые русла длиной многие десятки до сотен километров. Они свидетельствуют о высоком темпе выноса подачи расплава на поверхность; остывание больших объемов вулканического материала играло важную роль в тепловом балансе Луны.

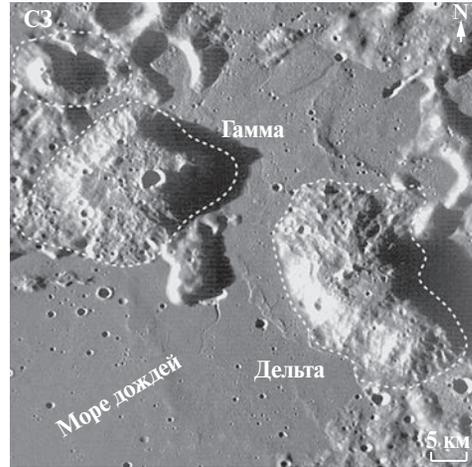
Одна из важных (и все еще нерешенных) проблем лунного вулканизма – время его начала. Тщательные

<sup>5</sup>Taylor R.S., McLennan S.M. In: Planetary crusts: Their composition, origin and evolution // Cambridge Univ. Press. Cambridge. New York. Melbourne. Madrid. Cape Town. Singapore. Sao Paulo, 2008. P. 378.

измерения частотно-размерного распределения кратеров на поверхности лунных морей показали, что видимый пик вулканической активности на Луне приходился на интервал между 3,3 и 3,8 млрд лет<sup>4</sup>. Снижение частоты древних вулканических проявлений (более 3,8 млрд лет назад), однако, может быть кажущимся; связано это с тем, что в этот период времени на Луне доминировало ударное кратерообразование, “стиравшее” следы вулканической активности. Заметный спад интенсивности вулканизма (после 3,3 млрд лет) не вызывает сомнений и отражает затухание поздней вулканической активности Луны. Значительное снижение интенсивности вулканизма (после 3,3 млрд лет) может свидетельствовать о том, что к этому времени Луна “истратила” основную часть запаса своего внутреннего тепла, и с тех пор эндогенная активность на этой планете была минимальной. Сопровождалось ли ослабление вулканической активности заметными изменениями состава лунных базальтов? Это еще одна из важнейших проблем, связанных с изучением вулканизма Луны.

Несмотря на то что в вулканических породах на Луне главную роль играют базальты, в коллекциях лунных вулкаников найдены образцы, соответствующие по составу и текстуре земным породам кислого состава – гранитам (или риолитам). Такие образцы свидетельствуют о существовании небазальтового лунного вулканизма, что расширяет и усложняет проблемы лунной петрологии.

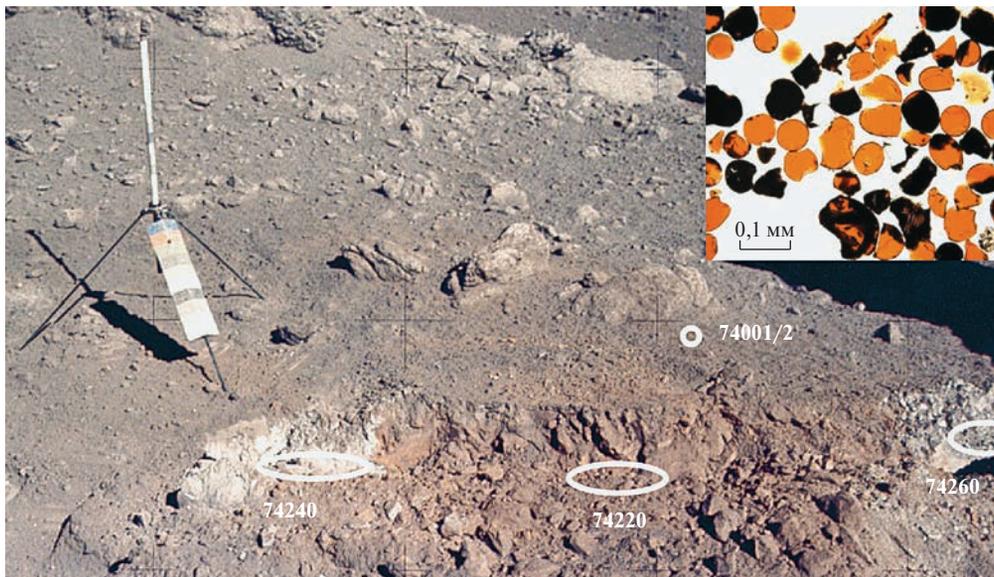
Вулканическими образованиями небазальтового типа считаются крутосклон-



Группа куполов Грютойзен на Луне (Северо-Западный – СЗ, Гамма и Дельта; обведены пунктиром), форма которых свидетельствует о небазальтовом составе лав. Мозаики снимков получены с помощью широкоугольной камеры WAC AMC “Лунный орбитальный разведчик”. Фото NASA

ные купола Майран и Грютойзен в восточной части вала бассейна Моря Дождей; их объем составляет сотни кубических километров. Форма куполов указывает на их происхождение в результате излияний лав повышенной вязкости. Объем куполов и отсутствие на Луне атмосферы исключают такие механизмы, как излияния малых порций расплава или извержения магмы, насыщенной кристаллами или пузырьками газа. Высокая вязкость лав, скорее всего, связана с повышенным содержанием в них кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ). Изучение геологической ситуации, в которой находятся купола Грютойзен, позволило переместить на второй план такие способы обогащения магмы кремнеземом, как переплавление первичной анортозитовой коры или кристаллизационную дифференциацию базальтовых расплавов, и отдать предпочтение механизму переработки вещества подобного граниту. Такое вещество

<sup>4</sup>Hiesinger H., Head J.W., Wolf U., Jaumann R., Neukum G. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts: A synthesis, in: Recent advances and current research issues in Lunar stratigraphy // Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 2011. V. 477. P. 1–52.



Район посадки КК "Аполлон-17" в древнем горном районе Таурус–Литтров, где были обнаружены скопления оранжевого грунта, состоящего из стекловатых шариков (предположительно пирокластического происхождения). Изображение шариков показано на врезке, в верхнем правом углу. Белыми цифрами отмечены места отбора проб оранжевого грунта. Фото NASA

должно было входить в состав лунной коры к моменту извержения куполов (около 3,8–3,9 млрд лет назад).

Ключевой проблемой небазальтового лунного вулканизма является нахождение источника гранитного вещества. Является ли оно результатом дифференциации гипотетического океана магмы, или это – проявление ее третичной коры (связанной с переработкой ее первичной и вторичной коры)? Может быть, гранитное вещество Луны имеет не вулканическое, а ударное происхождение и формировалось в период интенсивной метеоритной бомбардировки? Точное определение содержания главных и второстепенных элементов в веществе крутосклонных куполов позволило бы уточнить петрологические модели формирования лунных небазальтовых пород, что имеет непосредственное отношение к построению моделей эволюции Луны.

Еще одно важное "отклонение" от главной, базальтовой темы лунного

вулканизма – пирокластические отложения. Существование пирокластических покровов на Луне было установлено на основании работ, выполненных во время экспедиций по программе "Аполлон", а образцы пирокластического материала были доставлены в 1971–1972 гг. с мест посадки КК "Аполлон-15" и "Аполлон-17". На поверхности Луны было отмечено около сотни темных диффузных покровов, интерпретируемых как пирокластические отложения, площадь которых варьирует от 5 до 50 тыс. км<sup>2</sup>. Образование пирокластического материала связано с извержениями лав, насыщенных газами. Такие отложения, помимо чисто вулканологического интереса, представляют важную проблему наличия летучих компонентов на Луне. Например, в стекловатых шариках, доставленных с мест посадки КК "Аполлон-15" и "Аполлон-17", было установлено высокое содержание

воды (до 750 ppm)<sup>5</sup>. Важно, что количество воды в шариках уменьшается от центра к периферии; следовательно, вода не была захвачена извне, а ее количество в центре шариков позволяет оценить исходное содержание воды в магме.

В отличие от полярных областей, где скопления летучих компонентов могут происходить из разных источников, в том числе экзогенных (например: солнечный ветер, кометы, астероиды), летучие компоненты пирокластических отложений несомненно представляют собой продукт дегазации лунной мантии и, следовательно, являются ее важной геохимической характеристикой.

Ключевой проблемой при изучении пирокластических отложений Луны является состав ее летучих компонентов. Измеренные высокие содержания воды в стеклянных шариках с мест посадки КК “Аполлон-15” и “Аполлон-17” могли бы означать, что вода играла важную роль в формировании лунных пирокластических отложений. Если она была доминирующим агентом, то наиболее крупные из пирокластических покровов (20% из них имеют в поперечнике более 50 км) могли бы представлять собой области пониженного потока вторичных нейтронов, которые вполне мог бы зафиксировать прибор LEND, работающий с сентября 2009 г. на АМС “Лунный орбитальный разведчик” (“Lunar reconnaissance orbiter”; ЗиВ, 2009, № 6, стр. 110)<sup>6</sup>. Однако это не так, и пространственное распре-



Внутреннее строение Луны, составленное на основе модельных представлений. (По данным Wieczorek M.A. The interior structure of the Moon: What does geophysics have to say? // *Elements*, 2009. V. 5. P. 35–40)

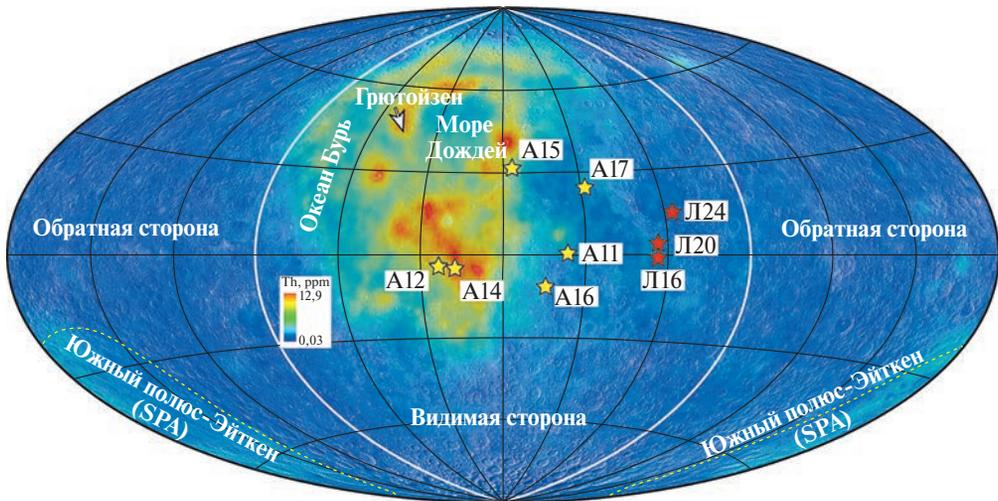
деление темных диффузных покровов, считающихся пирокластическими (за исключением некоторых случаев), не коррелирует с вариациями потока вторичных нейтронов. Отсутствие выраженной связи темных покровов с областями пониженного нейтронного альbedo указывает на то, что, вероятно, в качестве движущей силы пирокластических извержений на Луне выступали другие, не содержащие водород, летучие компоненты (например, CO<sub>2</sub> и/или CO). Детальные геохимические (включая изотопные) исследования пирокластического вещества позволили бы ввести важные ограничения для оценки состава и количества летучих компонентов в мантии Луны. Такие оценки будут являться ключевыми при разработке моделей формирования системы Земля–Луна.

## ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЛУНЫ

Внутреннее строение Луны – наименее изученный вопрос, несмотря на гигантское количество информации,

<sup>5</sup> Saal A.E., Hauri E.H., Lo Cascio M., Van Orman J.A., Rutherford M.C., Cooper R.F. Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior // *Nature*, 2008. V. 454. P. 192–195.

<sup>6</sup> Mitrofanov I.G., Bartels A., Bobrovniksky Y.I., et al. Lunar Exploration Neutron Detector for the NASA Lunar Reconnaissance Orbiter // *Space Sci. Rev.*, 2010. V. 150. P. 183–207.

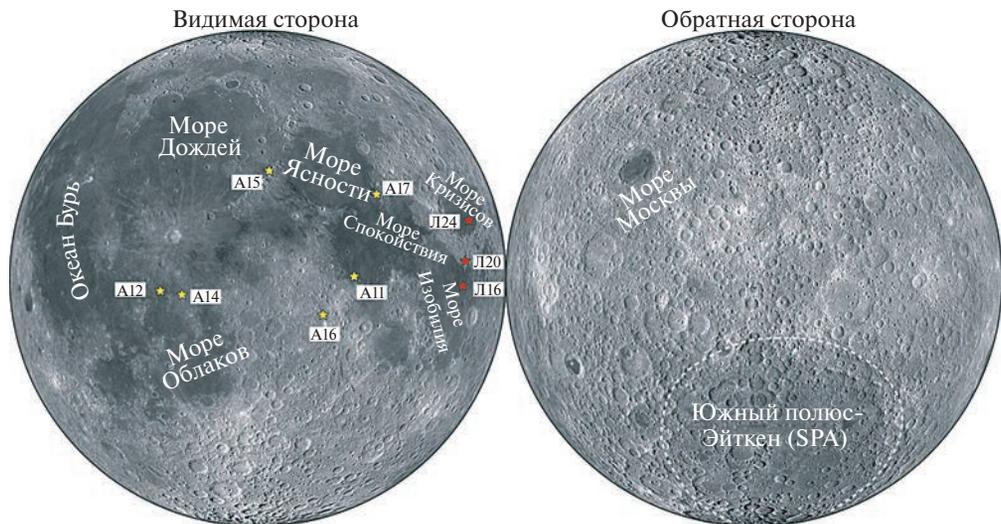


Карта распределения содержаний тория на Луне по данным, полученным с помощью АМС "Лунар Проспектор" ("Lunar Prospector"). Повышенное содержание Th характеризует центральную часть видимого полушария. На карте показаны места посадки КК "Аполлон" (А; звездочки желтого цвета) и АМС "Луна" (Л; звездочки красного цвета) и отмечены географические детали, упомянутые в тексте. Фото NASA

собранный о ней к сегодняшнему дню. Главным методом изучения внутреннего строения Земли является сейсмондирование. Этот метод мог бы применяться для исследования и других планет, но был реализован только при исследовании Луны в рамках экспедиции по программе "Аполлон". Мониторинг сейсмических событий на Луне продолжался около 8 лет, за это время было зафиксировано примерно 1800 падений метеоритов, 28 приповерхностных лунотрясений (глубиной гипоцентра до 100 км и магнитудой до 5 М) и примерно 7000 чрезвычайно слабых лунотрясений на глубине примерно половины радиуса Луны. Несмотря на кажущееся обилие сейсмических событий, произошедших за время наблюдений, результаты экспериментов имеют низкое разрешение и позволяют составить только самые общие представления о том, как устроена Луна. Проблема исследования внутреннего строения Луны имеет четыре главных аспекта.

1. *Средняя толщина лунной коры и вариации ее состава.* Объем материала лунной коры, определяемый по оценкам ее средней толщины, чрезвычайно важен для понимания геологической эволюции планет, так как представляет собой результат их дифференциации. Современные представления о толщине лунной коры модельно зависимы и являются следствиями гипотез, предложенных для описания начальных стадий эволюции Луны как планетного тела (гипотеза "океана магмы", "мантийного переворота").

Фактическая мощность коры Луны – главный, но не единственный фактор, лимитирующий модели ее формирования и эволюции. Результаты гамма-спектрометрического изучения Луны позволили установить, что ее первичная кора, предшествовавшая формированию вулканического заполнения ударных бассейнов, имеет значительные вариации валового состава. В частности, в единой обширной про-



Видимая и обратная стороны Луны. Темными пятнами показано лавовое заполнение ударных бассейнов (концентрируются на видимой стороне). На обратной стороне Луны проявления вулканической активности редки. Пунктиром отмечено примерное положение вала бассейна Южный полюс-Эйткен. На карте отмечены наиболее заметные географические детали и места посадок КК "Аполлон" (желтые звездочки) и АМС "Луна" (красные звездочки). Мозаики снимков получены с помощью широкоугольной камеры WAC АМС "Лунный орбитальный разведчик". Фото NASA

винции, охватывающей Море Дождей и Океан Бурь, наблюдается значительное повышение концентрации главных, генерирующих тепло элементов (K, Th и U). С чем связана такая концентрация? Имеет ли она ударное происхождение или представляет собой результат планетной дифференциации? Каков возраст аномалии генерирующих тепло элементов? Эти вопросы чрезвычайно важны для понимания эволюции Луны как планеты.

## 2. Физическое состояние мантии.

Главным источником сведений о мантии Луны служат глубинные лунотрясения, зафиксированные во время пассивного сейсмического эксперимента в ходе экспедиций КК "Аполлон". Возникновение таких лунотрясений лишь частично коррелирует с прохождением приливного вздутия, вызванного притяжением Земли, а их эпицентры образуют кластеры в пределах

видимого полушария Луны. Если такое распределение глубинных лунотрясений действительно имеет место, то в этом случае полушарие обратной стороны Луны сейсмически пассивно. Такой вывод был бы чрезвычайно важен для понимания строения глубоких недр Луны. Сейсмическая дихотомия, однако, может быть кажущейся, связанной с проведением сейсмических экспериментов только на видимой стороне Луны. Не исключено, что слабые глубинные лунотрясения в пределах обратного полушария Луны просто не были зафиксированы.

Важным и несомненным фактом, установленным при сейсмическом изучении Луны, стало отсутствие поперечных сейсмических волн в связи с наиболее глубокими лунотрясениями: поперечные волны отфильтровываются в зонах полного или частичного плавления, так как в жидкостях не переда-

ются сдвиговые напряжения. Следовательно, вполне вероятно, что в глубоких частях мантии Луны существуют области частично расплавленного вещества.

Еще одной важной проблемой строения мантии Луны является вопрос существования в ней зоны “скачка плотности”, которая, возможно, располагается в 500 км под ее поверхностью. Существование таких зон в земной мантии хорошо известно и связано с формированием при высоком давлении более плотных минеральных фаз, например, при превращении менее плотного оливина в его более плотную модификацию вадслеит на глубинах около 400 км. Сила тяжести Луны, однако, недостаточна для таких трансформаций на глубине 500 км и “скачок плотности” (если он действительно существует) должен быть связан с другими явлениями. Он может представлять собой, к примеру, дно гипотетического океана магмы. Низкое пространственное и временное разрешение существующих сейсмических данных не позволяют пока однозначно ответить на вопрос: существуют или отсутствуют зоны “скачка плотности” в мантии Луны.

3. *Лунное ядро.* Все планеты земной группы имеют железное ядро (или богатое железом), оно составляет примерно половину радиуса планет. Луна, вероятно, также имеет ядро, но его размеры, как представляется на сегодняшний день, существенно меньше. Данные о массе, размере и моменте инерции Луны могут быть интерпретированы так: ядро не должно превышать 460 км в диаметре (что составляет примерно четверть диаметра планеты). С этими оценками согласуются другие независимые данные: например, результаты электромагнитного зондирования недр Луны могут указывать, что верхняя граница радиуса ее ядра равна

500 км, а измерения слабого индуцированного магнитного поля (когда Луна проходит через магнитосферу Земли) согласуются с наличием у нее железосодержащего ядра диаметром около 360 км.

Некоторые из лунных образцов, доставленных на Землю, значительно намагничены и, следовательно, испытывали воздействие внешнего магнитного поля. Орбитальные измерения, выполненные в 1998–1999 гг. с помощью АМС “Лунар Проспектор” (“Lunar Prospector”; ЗиВ, 1998, № 3, с. 47–48; 2001, № 1) показали, что намагничены и обширные регионы на лунной поверхности. Таким образом, есть основания предполагать, что у Луны в геологическом прошлом было собственное магнитное поле и, следовательно, “динамо”, требующее частично или полностью расплавленного ядра. Определения возраста лунных намагниченных пород указывают, что “динамо” (если оно существовало) прекратило работать примерно 3,9 млрд лет назад, до видимого пика вулканической активности на Луне.

Представления о химическом составе лунного ядра практически ничем не ограничены и полностью модельно зависимы. Выдвинуты равновероятные гипотезы о существовании ядра, состоящего из чистого железа, или же ядра, представленного сплавом железа и серы, и даже ядра, которое состоит из высокоплотного силикатного расплава, обогащенного железом и титаном<sup>7</sup>.

4. *Тепловой поток.* Оценка величины теплового потока Луны является важнейшим параметром, характеризующим современное состояние “тепловой машины” этой планеты. Существующие на сегодняшний день пря-

<sup>7</sup> *Wieczorek M.A.* The interior structure of the Moon: What does geophysics have to say? // *Elements*, 2009. V. 5. P. 35–40.

мые замеры потока внутреннего тепла были получены в экспедициях КК “Аполлон-15, -16 и -17” с помощью тепловых датчиков. Эксперименты по изучению потока внутреннего тепла Луны были малочисленны, ограничены видимым полушарием и не позволили составить адекватное представление о ее современном тепловом потоке. Отсутствие надежных сведений о нем не позволяет, в свою очередь, оценить распространенность основных теплогенерирующих элементов, которые играли важную роль в геологической эволюции Луны. Выявленные аномалии в распределении теплогенерирующих элементов, расположенных в коре Луны, должны “представлять” регионы, где зарегистрирован повышенный тепловой поток. Его оценка в этих областях помогла бы внести важный вклад в понимание степени разделения теплогенерирующих элементов между корой и мантией и позволила бы ввести ограничения на модели общего

теплового бюджета Луны. Кроме того, знания о тепловом состоянии лунных недр чрезвычайно важны для оценок реологических параметров (механической прочности, текучести и т.д.), которые во многом определяют сейсмические характеристики горных пород в недрах Луны и, следовательно, влияют на интерпретацию данных сейсмических экспериментов.

Решение вопросов, связанных с внутренним строением Луны, требует долгосрочных сейсмических наблюдений и мониторинга изменений ее формы под действием земного и солнечного притяжений. Для проведения таких исследований необходимо развертывание сети сейсмометров и уголкового отражателей, охватывающей оба полушария Луны (ЗиВ, 1999, № 3). Такая сеть позволила бы не только получать данные о внутреннем строении Луны, но и выполняла бы навигационные функции, необходимые для поддержки будущих экспедиций к этой планете.