

Вещественная асимметрия Луны

С.И.Демидова

Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН (Москва, Россия)

С самых ранних орбитальных наблюдений стало ясно, что Луна обладает глобальной асимметрией. Основные ее признаки — различия в топографии поверхности, мощности коры и в неравномерном распределении морских и материковых областей на видимой и обратной стороне Луны. Эти различия — результат самых ранних геологических процессов, обусловленных либо внутренними неоднородностями и связанными с ними термохимическими процессами, либо крупными ударными событиями. Поверхность Луны несет в себе свидетельства и тех и других. Совместный анализ имеющихся данных о составе лунных образцов и метеоритов, а также результатов глобального геохимического и минералогического картирования подтвердил существование различий в вещественном составе видимой и обратной стороны Луны. Однако однозначный вывод о происхождении глобальной асимметрии сделать по-прежнему невозможно.

Ключевые слова: Луна, лунные породы, лунные метеориты, дистанционное зондирование.

*Вечерняя Луна Возрастает,
Утренняя Луна Убывает.*

Луна — самая близкая и такая далекая, неиссякаемый источник вдохновения поэтов и вечной тоски волков, постоянно прячущая от людей свою обратную сторону. Что мы видим и чего мы не видим? Есть ли отличия, и если есть, чем они обусловлены? Попробуем разобраться.

Глядя на полную Луну, особенно вооружившись телескопом, легко заметить расположенные на ее светлой поверхности, называемой материками, темные, часто округлые участки — моря. И хотя моря заполнены не водой, а базальтами, а материка по рельефу, структуре и составу значительно отличаются от земных, названия прижились. Лунные материка представляют собой возвышенные участки поверхности, испещренные ударными кратерами поперечником в десятки и сотни километров, на которые накладываются многочисленные кратеры меньшего размера. Лунные моря — это равнины, занимающие понижения в рельефе. Они приурочены преимущественно к днищам крупнейших кратерных структур — ударных бассейнов. Уже первые изображения обратной стороны нашего спутника, полученные автоматической межпланетной станцией «Луна-3» (1959–1960), показали,



Светлана Ивановна Демидова, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории метеоритики и космохимии Института геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН. Область научных интересов — минералогия и геохимия Луны, метеоритика.
e-mail: demidova.si@yandex.ru

что распределение материковых и морских поверхностей Луны резко неравномерное. Моря сосредоточены на видимой стороне, а на обратной преобладают материковые области. Об этой особенности часто говорят как об асимметрии в расположении поверхностных структур Луны. Но асимметрия проявляется не только в этом. Абсолютная высота материков в среднем выше, чем морских равнин, хотя отдельные участки материков (например, центральная часть бассейна Южный полюс — Эйткен на обратной стороне) могут находиться ниже уровня морей. Совместный анализ сейсмических, гравитационных и топографических данных показал, что мощность лунной коры также заметно увеличивается на ее обратной стороне. На данный момент существует целый ряд гипотез

для объяснения глобальной асимметрии, сформировавшейся на самых ранних этапах эволюции Луны. Все они сводятся к двум основным группам: внешние причины, связанные с одним или несколькими гигантскими ударными событиями, либо внутренние — связанные с термохимическими процессами, обусловленными внутренними неоднородностями. Существует ли глобальная асимметрия и в вещественном составе?

Долгое время наши знания о вещественном составе Луны основывались на данных дистанционного зондирования и результатах исследования образцов, доставленных в ходе программ «Аполлон» (Apollo) и «Луна». В последние годы интерес к нашему спутнику значительно возрос. Были совершены успешные полеты к Луне японской, индийской, американских и китайских орбитальных станций. Благодаря им появились новые высокоточные данные о распределении целого ряда элементов и соединений по всей поверхности Луны, была разработана методика минералогического картирования. А совсем недавно, после 45-летнего перерыва, китайский аппарат «Чанъэ-5» доставил на Землю образцы из района Рюмкер в Океане Бурь. И уже появились первые результаты их исследования. Собранные за последние полвека около 430 лунных метеоритов* общей массой, превышающей 700 кг, более чем в два раза обогатили коллекцию лунного вещества. Принимая во внимание случайный характер выброса метеоритов, среди них должны присутствовать фрагменты и с обратной стороны Луны, но достоверно определить место, откуда они поступили, не представляется возможным.

Вещественный состав лунной коры

Известно, что, в отличие от Земли, Луна не имеет атмосферы и уже давно вулканически неактивна. Основным фактором, влияющим на ее поверхность, была и остается метеоритная бомбардировка, которая приводит к разрушению, разносу и перемешиванию коренных пород. В результате практически повсеместно на поверхности Луны образовался реголит — рыхлый слой обломочных пород мощностью от 1 м до 1 км. Изучая его, мы и получаем всю информацию о породах нашего спутника. Поскольку реголит возникает за счет механического дробления, в его составе доминируют фрагменты местных коренных горных пород и слагающих эти породы минеральных зерен. Однако в реголите также присутствуют обломки пород и минералов, по-

ступающих из удаленных районов в результате разноса кратерных выбросов при ударных событиях, а также сопровождающих их склоновых процессов (оползание материала по склонам). Кроме того, в составе реголита наблюдается большое разнообразие вторичных частиц, которые образуются при метеоритной бомбардировке. Их состав и структура связаны не только с дроблением, но и с плавлением, а также с испарением и материала мишени, и ударников. К ним относятся агглютинаты (частицы неправильной формы со стекловатой основной массой, цементирующей мелкие обломки), стекла, реголитовые брекчии и редкие фрагменты метеоритного вещества.

Материковые породы преобладают в лунной коре и в основном представляют собой брекчии — продукты дробления и ударного плавления магматических пород лунной коры габбро-норит-троктолит-анортозитового состава (рис.1). Тип породы определяется соотношением главных породообразующих минералов, которые представлены минералом из группы полевых шпатов — плагиоклазом (преимущественно анортитом) и железомagneзиальными силикатами — оливином и пироксенами. Последние еще называют фемическими минералами, поскольку они обогащены Fe и Mg. Плагиоклаз, напротив, не содержит Mg и Fe, но обогащен Al. Порода с преобладающим анортитом называется анортозит, с оливином и плагиоклазом — троктолит, а с низкокальциевым пироксеном и плагиоклазом — норит. В составе габбро (плутонический аналог базальтов) преобладают высококальциевый пироксен и плагиоклаз. К редким фазам относятся оксиды магния, железа, алюминия и титана, представленные минералами группы шпинели, ильменитом и армоколлитом. Последний был впервые открыт в лунных породах и лишь позднее обнаружен на Земле. Кроме того, встречаются сульфид железа — троилит и Fe-Ni-металл. Второстепенное значение в материковой коре имеют брекчии неморских базальтов, которые по сравнению с анортозитовыми породами отличаются меньшими содержаниями плагиоклаза. Многие из них содержат так называемый KREEP-компонент, обогащенный K, редкоземельными элементами, P, Zr, Th и U. Эти элементы, которые называются несовместимыми, накапливаются при кристаллизации расплава, обогащая собой самые поздние фазы. В лунных породах они концентрируются в фосфатах (мерриллите и апатите), K-Ва полевом шпате, в редких минералах циркония (цирконолите и бадделеите) и др.

Морские породы — типично магматические, которые от земных базальтов и габбро отличаются

* <https://sites.wustl.edu/meteoritesite/items/lunar-meteorites/>

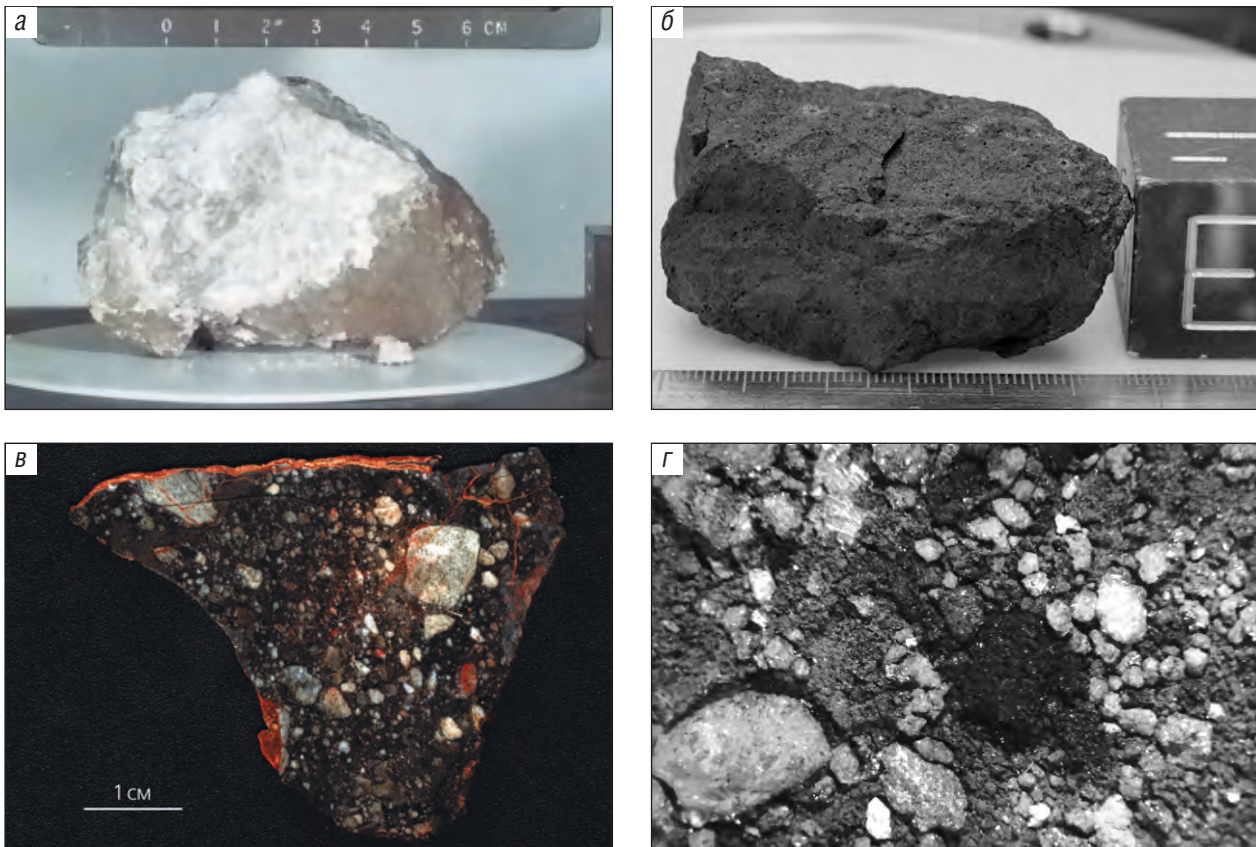


Рис.1. Типичные породы лунной коры: фрагмент анортозита (а, образец 15415), обломок морского базальта (б, образец 10049), спил брекчии лунного метеорита NWA 11828 (в), реголит, покрывающий поверхность Луны (г, образец «Луны-20», ширина кадра — 6 мм).

Фото www.lpi.usra.edu/lunar/samples/ (а, б), фото автора (в) и фото М.А.Назарова (г)

ся меньшим размером зерен (крупнозернистыми для Луны считаются породы с зернами в 1–5 мм) и меньшим количеством стекла, а также характерными особенностями состава (см. рис.1). Тем не менее брекчии среди морских пород встречаются. Главные породообразующие минералы морских пород — высококальциевый пироксен и плагиоклаз, иногда оливин и ильменит, редко разновидности кремнезема (тридимит и кристобалит). Набор минералов приблизительно тот же, что и в материковых породах, меняется их соотношение и химический состав. В частности, морские базальты характеризуются более широкими вариациями составов минералов, железомagneзиальные силикаты в них более железистые, а ильменит переходит из разряда аксессуарных во второстепенные и даже главные минералы. В валовом составе это выражается обогащением морских пород Fe, Mg и Ti и обеднением Al относительно материковых.

Минералогическая бедность лунных пород (менее 100 минеральных видов) объясняется их важнейшими геохимическими особенностями,

а именно практическим отсутствием воды, соединений углерода, серы и др., а также низким парциальным давлением кислорода лунных магм, т.е. восстановительной средой расплавов. Собственно, с этим, например, связано присутствие в лунных породах металлического железа и существование «европиевой аномалии», которая служит ключом к разгадке ранней истории Луны. Следует пояснить ее происхождение.

Европиевая аномалия и кратчайшая история Луны

Как известно, для всех редкоземельных элементов (La, Ce, Pr...) характерна степень окисления +3, в таком виде они несовместимы со структурами главных породообразующих минералов и накапливаются в ходе кристаллизации силикатного расплава. Исключение составляет Eu, который, обладая в восстановительных условиях степенью окисления +2, приобретает способность замещать Ca^{+2} в плагиоклазе. Таким образом, Eu включается

в этот минерал, обедняя расплав, из которого тот кристаллизуется. Если в дальнейшем происходит разделение (фракционирование) кристаллов плагиоклаза и родительского расплава, а расплав имеет свою собственную историю кристаллизации (он мог быть родоначальным для других типов пород), то их некогда существовавшую связь все же можно установить, изучая распределение редкоземельных элементов. И именно лунные породы, кристаллизовавшиеся в восстановительных условиях, принесли европию всемирную славу. Характерная черта лунных материковых пород — присутствие положительной аномалии Eu. Морские и KREEP-породы, напротив, обладают отрицательной аномалией Eu, демонстрируя своего рода зеркальное отражение (рис.2). Такая комплементарность спектров редкоземельных элементов служит мощным аргументом в пользу гипотезы существования некогда единого источника всех пород лунной коры и верхней мантии — лунного океана магмы.

Согласно упрощенной модели, внешние зоны Луны (по крайней мере до глубины 400–500 км) были полностью расплавлены. Во время кристаллизации данного расплава более плотные ферритические минералы (оливин и пироксен) аккумуляровались в глубинных частях до того момента, когда

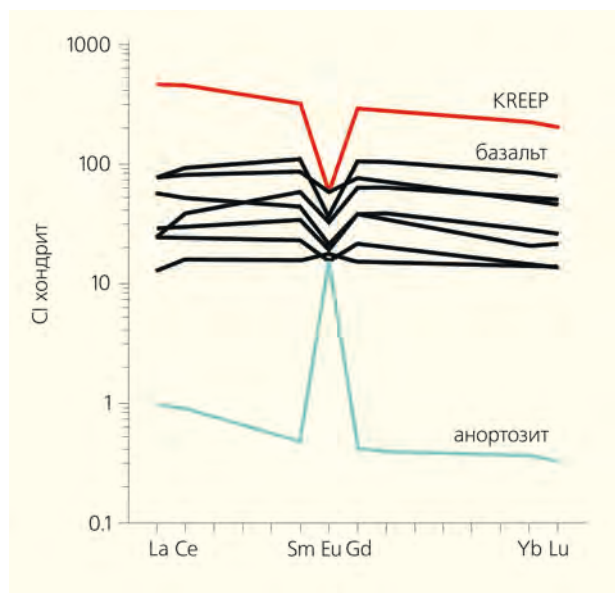


Рис.2. Концентрации редкоземельных элементов в лунных базальтах, анортозитах и KREEP-породах по отношению к углистым CI хондритам (самому примитивному веществу Солнечной системы) [1]. Положительная или отрицательная аномалия Eu присутствует во всех типах лунных пород, что свидетельствует о некогда едином магматическом источнике — лунном океане магмы.

расплав достиг насыщения плагиоклазом. Будучи менее плотным, чем родительский расплав, плагиоклаз в результате флотации (всплывания) около 4.5–4.4 млрд лет назад сформировал полевошпатовую кору. Неморские базальты (и ряд других материковых пород) считаются продуктами магматической активности после кристаллизации океана магмы. Магматические породы лунной коры были переработаны интенсивной метеоритной бомбардировкой более 3.9 млрд лет назад, что и привело к формированию материковых брекчий, которые доминируют в коровом веществе. При этом изотопные данные говорят о возможном завершающем катаклизме 3.9–3.8 млрд лет назад. Именно в ранний катастрофический период (до 3.8 млрд лет назад) сформировались крупнейшие кратерные бассейны как на видимой, так и на обратной стороне Луны: ударная структура Южный полюс — Эйткен, Море Спокойствия, Море Изобилия, Море Дождей, Море Кризисов и др. В дальнейшем многие из них были заполнены лавовыми потоками морских базальтов. Богатая несовместимыми (KREEP) элементами остаточная жидкость кристаллизовалась непосредственно ниже коры, и впоследствии частичное плавление этого слоя привело к излиянию KREEP-содержащих пород.

Лунный морской вулканизм связывается с процессами частичного плавления мантии на глубине до 400 км. Излияния базальтов на видимой стороне Луны происходили в основном 3.8–3.2 млрд лет назад, в подчиненном количестве — 3.2–1.1 млрд лет назад, и совсем незначительное количество базальтов образовалось в Океане Бурь около 1.1 млрд лет назад. Именно породы такой молодой вулканической провинции доставил на Землю китайский аппарат «Чанъэ-5». Первые полученные данные свидетельствуют о возрасте 2 млрд лет, и это образцы самых молодых лунных базальтов [7]. Низкая вязкость лунных лав (сопоставимая с вязкостью машинного масла при комнатной температуре) позволяет маломощным (до 1.5 км) лавовым потокам растекаться на очень большие расстояния. Этому способствует и меньшее по сравнению с Землей ускорение силы тяжести — 1.62 м/с^2 . Несмотря на значительную пространственную распространенность (17% поверхности Луны, из которых 90% приходится на ее видимую сторону), морские породы обладают незначительной мощностью (до 1.5 км) и составляют всего лишь около 1% лунной коры. Немного. Но почему они изливались только на видимой стороне Луны? Казалось бы, модель лунного океана магмы предполагает однородность составов пород, а также их равномерное распределение в лунной коре.

Дистанционное зондирование поверхности Луны и изучение лунных метеоритов

Уже первые данные о глобальном распределении таких элементов, как Fe и Th, полученные спектральной аппаратурой космических аппаратов «Клементина» (Clementine, 1994) и «Лунар Проспектор» (Lunar Prospector, 1998–1999), показали, что область распространения морских базальтов в Океане Бурь, помимо высокого содержания железа, характеризуется повышенными содержаниями тория. Кстати сказать, на основе этих данных на Луне был выделен ряд глобальных геологических образований – террейнов – с их отличительными геохимическими, геофизическими и геологическими характеристиками (рис.3). Кроме того, стало понятно, что собранные астронавтами «Аполлона» более 300 кг пород скорее нети-

пичны для поверхности Луны. Вопрос происхождения ториевой аномалии особенно важен для понимания магматической и тепловой эволюции Луны, так как торий наряду с другими радиоактивными элементами мог бы служить источником тепла в области генерации базальтов видимой стороны Луны. Полагают, что возникновение ториевой аномалии связано с аккумуляцией магмы, обогащенной KREEP-компонентом под слоем сравнительно тонкой материковой коры в районе Океана Бурь, а появление ториевой аномалии на поверхности обусловлено выбросами ударного кратера, который сформировал бассейн Моря Дождей примерно 3.9 млрд лет назад.

С ториевой аномалией связано и еще одно значительное открытие последнего десятилетия – обнаружение на поверхности Луны выходов кис-

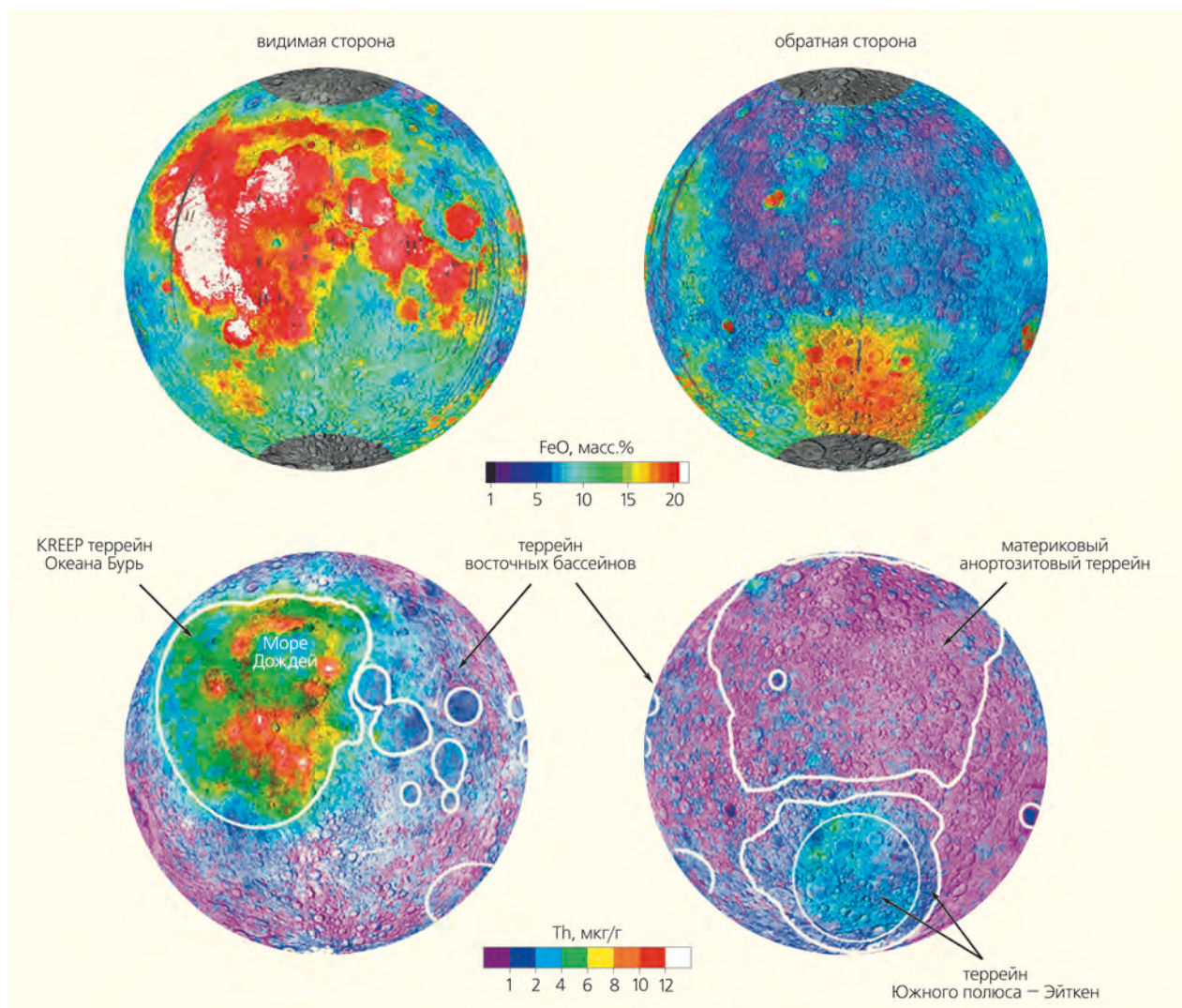


Рис.3. Распределение содержаний FeO (по данным станции «Клементина») и Th (по данным «Лунар Проспектор») на поверхности Луны и выделенные на их основе геологические террейны [2, 3].

лых пород [4]. В отличие от Земли, где граниты имеют широкое распространение, на Луне их значимого количества увидеть никак не ожидали. Ранее редчайшие фрагменты пород кислого состава находили лишь в ударных брекчиях, доставленных «Аполлонами-12 и 14» и в некоторых лунных метеоритах. Характерные минералы таких пород, помимо плагиоклаза и пироксенов, — калиевый полевой шпат, кварц, фосфаты и циркониевые минералы. Только, в отличие от KREEP-пород, в них отмечается экстремально высокое содержание несовместимых элементов (в их числе и Th). Благодаря орбитальным данным, полученным с помощью многоспектрального радиометра Diviner, установленного на космическом аппарате «Лунар Реконесанс Орбитер» (Lunar Reconnaissance Orbiter, 2009), было обнаружено, что редкие гранитные купола локализованы главным образом на видимой стороне Луны, и как раз в Океане Бурь. Это районы кратеров Груйтуйзен, Ханстен, Аристарх, Лассел и Рифейских гор. Конечно, их количество не сравнить с земным, но на обратной стороне Луны такие геологические структуры наблюдаются только в единственном районе — в области кратеров Комптон и Белькович (рис.4). Их происхождение — еще одна лунная загадка. Полагают, что подобные кислые образования представляют собой продукт либо глубокой дифференциации силикатных расплавов, либо частичного плавления, обогащенного несовместимыми элементами источника (например, KREEP-содержащего материала, перекрытого чехлом базальтовой магмы), либо жидкостной несмесимости подобных расплавов.

Но вернемся к базальтам и обратим внимание на обратную сторону Луны. Базальтов там немного, но они все же есть в районе Моря Москвы. Картирование гравитационного поля Луны миссией GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory, 2011) подтвердило, что мощность коры на обратной стороне ($\approx 50\text{--}60$ км) значительно превосходит ее мощность на видимой стороне ($\approx 30\text{--}40$ км) [8]. Соответственно, базальтам, чтобы излиться на поверхность обратной стороны, следует преодолеть большее расстояние, и область генерации их расплавов должна располагаться значительно глубже. Это, в свою очередь, может приводить к отличиям их состава и условий кристаллизации. Однако, поскольку все образцы базальтов доставлены только с видимой стороны Луны, информацию о составе базальтов с обратной стороны можно было получить лишь с помощью метеоритов. Уникальный базальтовый метеорит Kalahari 009 обнаружен в одноименной пустыне в 1999 г. От базальтов видимой стороны он отличается очень низким содержанием несовместимых элементов и древним возрастом (≈ 4.3 млрд лет). Это может свидетельствовать о его выбросе с обратной стороны Луны, вероятно даже из морского бассейна, который перекрыт чехлом материковых ударных выбросов так называемого крипто моря [9]. Из этого следует, что морской вулканизм существовал и до массового излияния морских базальтов. Но его следы были тщательно замаскированы мощными ударами, которые привели к плавлению и перемешиванию морских вулканических пород с материковыми, полностью скрыв его присутствие.

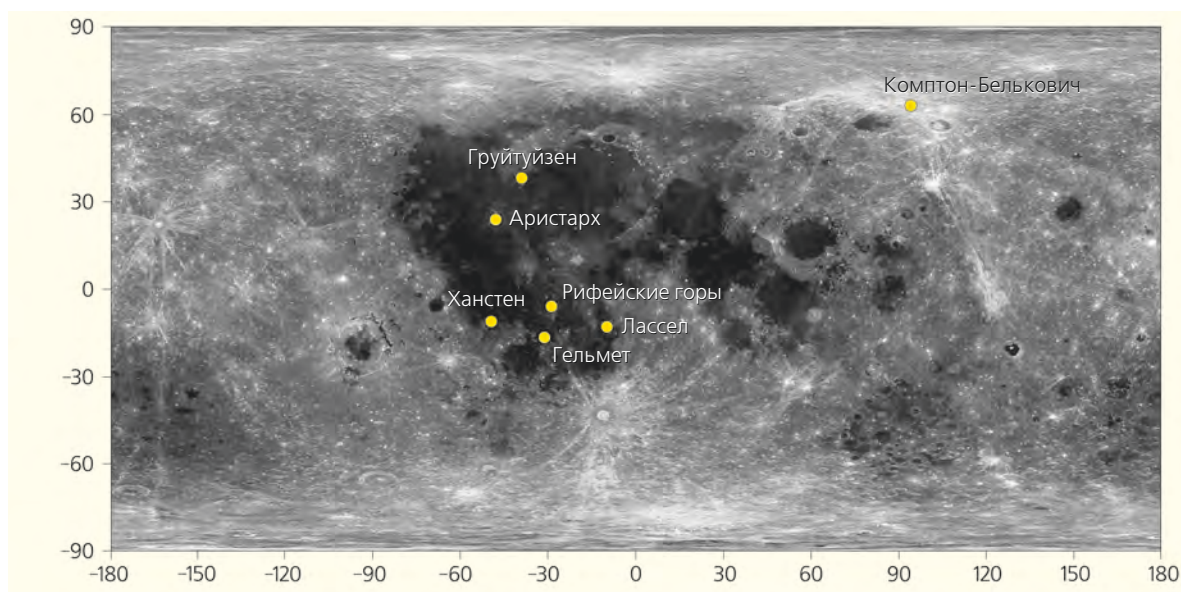


Рис.4. Купола кислых пород (желтые круги) на поверхности Луны, по данным аппарата «Лунар Реконесанс Орбитер» [4].

А есть ли различия в составе материковых пород? Согласно орбитальным данным, материковые породы на обратной стороне Луны содержат меньше K, U, Th и Fe. Исключение составляет самая глубокая депрессия Южный полюс — Эйткен, которая, напротив, обогащена Fe (см. рис.3). Такое распределение подтверждается составом материковых метеоритов, больше половины которых содержит всего лишь 3–6 масс.% FeO и менее 1 мкг/г Th. Это позволяет предположить, что их существенное количество могло быть выброшено с обратной стороны нашего спутника.

Помимо латеральной неоднородности лунная кора обладает глобальной стратиграфией. Поскольку реголит представляет собой продукт малых ударных событий (которые практически не затрагивают глубинных пород), его средний состав должен соответствовать составу лунных приповерхностных пород. Однако на ранних этапах лунной истории в ходе крупных ударных событий на поверхность могло быть выброшено и вещество лунных недр, а орбитальные наблюдения позволили его обнаружить.

Бассейн Южный полюс — Эйткен, расположенный на обратной стороне Луны, отличается уникальным составом поверхности и геофизическими параметрами. Хотя его точный возраст до сих пор неизвестен (предположительно около 4.3 млрд лет), ученые полагают, что эта ударная структура — древнейший сохранившийся кратер. Кроме того, он крупнейший в Солнечной системе, известный на данный момент: его диаметр ≈ 2400 км, а превышение в рельефе до 14 км (рис.5). Глубина экскавации такого кратера может достигать ≈ 240 км, затрагивая вещество не только нижней коры, но и верхней мантии. Нестыковки, выявленные при интерпретации спектральных характеристик, которые получили станции «Клементина» и «Лунар Проспектор», позволили высказать идею о различии в минеральном составе поверхности этого района и районов посадки миссий «Аполлон» и автоматических станций «Луна». Их материал как раз послужил для калибровки этих самых спектральных данных. Полагают, что на поверхности Южного полюса — Эйткена в основном присутствует низкокальциевый пироксен, менее (чем его высококальциевая разновидность) распространенный в образцах, которые доставлены с видимой стороны. И это, в свою очередь, позволило высказать предположение о норитовом (см. выше) составе нижней части лунной коры. Модельные расчеты предсказывают значительную распространенность низкокальциевого пироксена (ортопироксена) и в верхней мантии Луны [10].

Но не одним пироксеном наполнены лунные недра. Орбитальные данные, полученные японской станцией «Кагуйя» (2007–2009), позволили обнаружить на поверхности Луны участки чистых анортозитов, содержащих до 99% анортита, и области оливиновых пород [5, 6, 11], которые связаны с выбросами крупных (диаметром более 100 км) кратеров на всей поверхности Луны (рис.6). В подтверждение гипотезы о существовании лунного океана магмы естественно было предположить, что слой массивных анортозитов присутствует под слоем реголита как на видимой, так и на обратной стороне Луны. Тогда, если анортозитовый слой представляет собой вещество верхней коры, оливины могут свидетельствовать об экскавации мантийного вещества либо слоя нижней коры, которые обладают более феррическим составом [5, 6].

В некоторых лунных метеоритах и в образцах, доставленных «Аполлонами-15 и -17», описано редчайшее глубинное вещество. Его минеральная ассоциация необычна для лунных пород: магнезиальный оливин + низкокальциевый пироксен с высоким содержанием алюминия (до 7 мас.% Al_2O_3) + шпинель + плагиоклаз. Модельные расчеты свидетельствуют, что такая минеральная ассоциация может присутствовать в нижней коре и да-

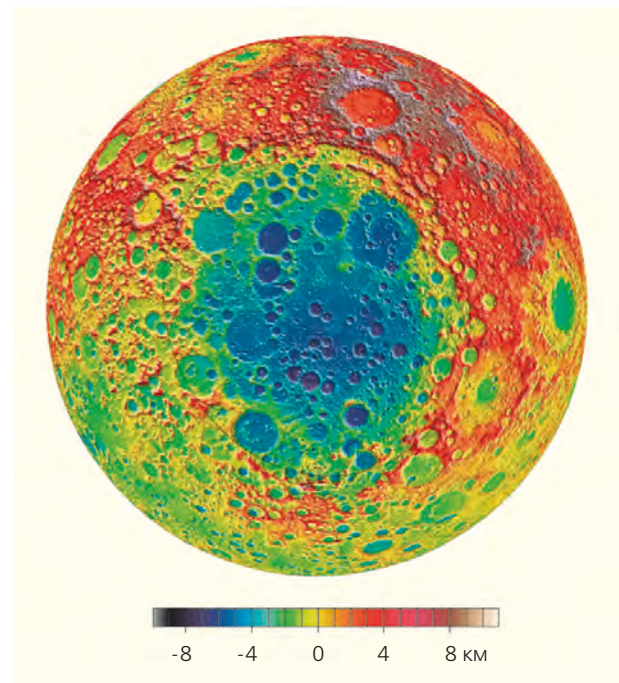


Рис.5. Топографическая карта крупнейшего кратера в Солнечной Системе — бассейна Южный полюс — Эйткен. Данные альтиметра LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter), установленного на аппарате «Лунар Реконесанс Орбитер».

www.nasa.gov/mission_pages/LRO/

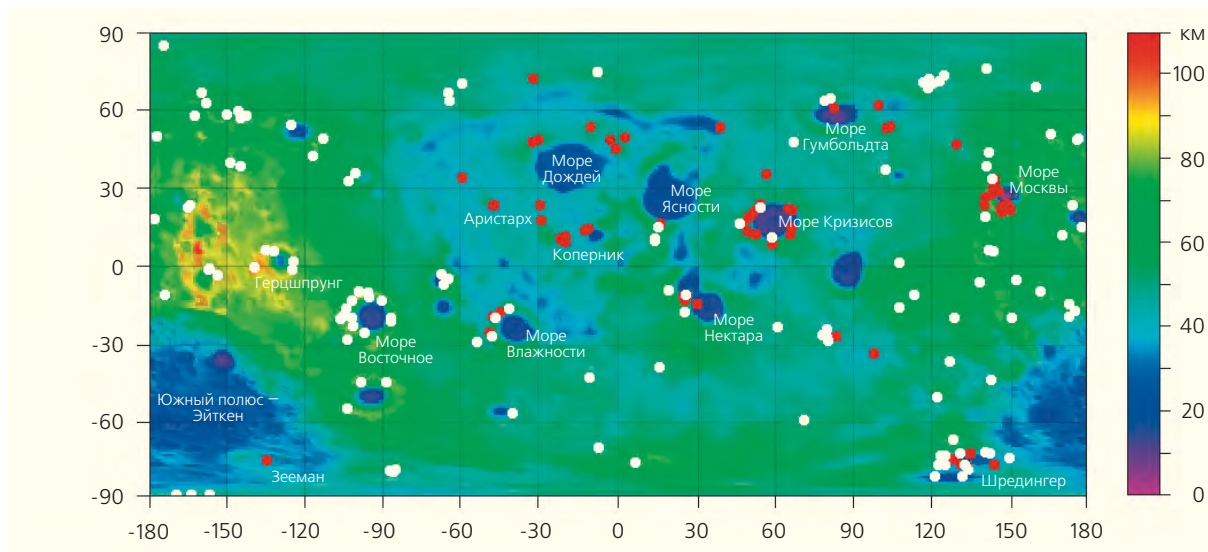


Рис.6. Проявления анортозитов, содержащих до 99% анортита (белые круги) и оливиновых пород (красные круги), по данным минералогического картирования. За основу взята карта мощности лунной коры [5, 6].

же в верхней мантии [12]. Фрагменты глубинных пород могли быть выброшены на поверхность в результате крупнейших (одного или нескольких) ударных событий (например, в результате образования бассейна Южный полюс — Эйткен). Не возникает сомнений, что такие крупные удары не проходят бесследно. Они приводят к изменениям термических условий не только в лунной коре, но и в мантии и, таким образом, могут спровоцировать активную фазу базальтового вулканизма. Действительно, массовые излияния морских базальтов видимой стороны Луны произошли как раз после окончания интенсивной бомбардировки. Но вот связано ли это с какой-то конкретной ударной структурой? Возможно ли, что крупный удар на видимой стороне мог стать причиной формирования глобальной асимметрии?

Предположение о том, что бассейн Океана Бурь диаметром около 3000 км сформировался при гигантском ударном событии, появилось еще в прошлом веке, но до настоящего момента убедительных доказательств, подтверждающих данный факт, не найдено. Гравитационная аномалия, обнаруженная миссией GRAIL в центральной части видимой стороны Луны, на сегодняшний день интерпретируется как гигантская тектономагматическая структура, а не мегакратер, хотя некоторые ученые считают, что морфология этого бассейна могла быть сильно изменена в результате изостатических релаксационных процессов. Интересно, что спектральные характеристики этого района также предполагают широкое распространение низкокальциевого пироксена, который теоретиче-

ски мог быть сформирован в результате кристаллизации ударных расплавов, возникших при смешении корового и мантийного вещества [13]. На самом деле многие породы, особенно отобранные в ходе миссий «Аполлон-12, -14 и -15» непосредственно в районе Океана Бурь, строго говоря, не базальты и не анортозиты. Они представляют собой брекчии промежуточного состава (содержание FeO в них составляет $\approx 10\%$). Да и среди метеоритов такие смешанные составы с повышенным содержанием несовместимых элементов — не редкость. Несомненно, идея об ударном происхождении бассейна Океана Бурь чрезвычайно привлекательна для объяснения глобальной асимметрии Луны. И моделирование гигантского ударного события на ее видимой стороне подтверждает такую возможность [14]. Но требуются дополнительные вещественные (и не только) доказательства.

* * *

Итак, асимметрия нашего спутника, возникшая на самых ранних этапах его развития, находит свое отражение не только в неравномерном распределении различных типов лунных пород, но и в их составе. Однако следует признать, что мы не стали ближе к разгадке главной причины ее возникновения. Вполне возможно, что основным виновником послужило либо «однобокое» соседство Земли, которая в давние времена к тому же была значительно ближе, либо неравномерное распределение мантийного вещества, либо конвекционные движения в лунном океане магмы. Все эти факторы могли оказать влияние как на мощность

формирующейся лунной коры, так и на возникновение вещественных неоднородностей, да и на целый ряд сопряженных термохимических процессов. Однако так же вероятно, что виной всему стало одно или несколько катастрофических ударных событий, которыми изобиловала ранняя история планетных тел Солнечной системы. И орбитальные, и подтверждающие их вещественные данные свидетельствуют об огромной роли таких событий в распределении вещества на поверхности Луны,

а энергия, возникающая при мощных ударах, определенно повлияла на процессы, происходящие в ее недрах. Возможно, формированию лунной асимметрии способствовала совокупность ряда внутренних и внешних факторов. Тем не менее ясно одно: пока не будет четкого понимания структурных особенностей, валового состава, времени образования лунной коры и эволюционных процессов в мантии, происхождение асимметрии так и останется загадкой. ■

Литература / References

1. Warren P.H., Taylor G.J. The Moon. Planets, Asteroids, Comets and the Solar System. Treatise on Geochemistry (Second Edition). H.D.Holland, K.K.Turekian (eds.). Vol.2. 2014; 213–250.
2. Jolliff B.L., Gillis J.J., Haskin L.A. et al. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins. *J. Geophys. Res.* 2000; 105: 4197–4216.
3. Gillis J.J., Jolliff B.L., Korotev R.L. Lunar surface geochemistry: Global concentrations of Th, K, and FeO as derived from lunar prospector and Clementine data. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2004; 68: 3791–3805.
4. Glotch T.D., Lucey P.G., Bandfield J.L. et al. Highly Silicic Compositions on the Moon. *Science.* 2010; 329: 1510–1513.
5. Yamamoto S., Nakamura R., Matsunaga T. et al. Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE. *Nat. Geosci.* 2010; 3: 533–536.
6. Yamamoto S., Nakamura R., Matsunaga T. et al. Massive layer of pure anorthosite on the Moon. *Geophys. Res. Lett.* 2012; 39: L13201. DOI:10.1029/2012GL052098.
7. Che X., Nemchin A., Liu D. et al. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5. *Science.* 2021; 374(6569): 887–890. DOI:10.1126/science.abl7957.
8. Wieczorek M.A. The crust of the Moon as seen by GRAIL. *Science.* 2013; 339: 671–675.
9. Sokol A.K., Fernandes V.A., Schultz T. et al. Geochemistry, petrology and ages of the lunar meteorites Kalahari 008 and 009: New constraints on early lunar evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2008; 72: 4845–4873.
10. Кусков О.Л., Кронрод Е.В., Кронрод В.А. Влияние термального состояния на химический состав мантии и размеры ядра Луны. *Геохимия.* 2019; 64(6): 567–584. [Kuskov O.L., Kronrod E.V., Kronrod V.A. Effect of thermal state on the mantle composition and core sizes of the Moon. *Geochemistry International.* 2019; 57(6): 605–620.]
11. Ohtake M., Matsunaga T., Hanyuama J. et al. The global distribution of pure anorthosite on the Moon. *Nature.* 2009; 461: 236–241.
12. Назаров М.А., Аранович Л.Я., Демидова С.И. и др. Алумоэнстатиты лунных метеоритов и глубинные породы Луны. *Петрология.* 2011; 19(1): 14–26. [Nazarov M.A., Aranovich L.Ya., Demidova S.I. et al. Aluminous enstatites of lunar meteorites and deep-seated lunar rocks. *Petrology.* 2011; 19(1): 13–25.] DOI:10.1134/S0869591111010061.
13. Nakamura R., Yamamoto S., Matsunaga T. et al. Compositional evidence for an impact origin of the Moon's Procellarum basin. *Nature Geoscience.* 2012; 5: 775–778.
14. Zhu M., Wünnemann K., Potter R.W.K. et al. Are the Moon's nearside-farside asymmetries the result of a giant impact? *J. of Geophysical Research.* 2019; 124(8): 2117–2140. DOI:10.1029/2018JE005826.

Compositional Asymmetry of the Moon

S.I.Demidova

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS (Moscow, Russia)

The earliest orbital observations have shown that the Moon has global asymmetry between its nearside and farside. The main differences are in topography, crustal thickness, and distribution of mare and highland areas. These asymmetries are thought to be a result of very early geological processes caused either by internal inhomogeneity and related thermochemical processes or by giant impact event(s). The evidence of both is present on the Moon surface. A joint analysis of the available data on the composition of lunar samples and meteorites and global geochemical and mineralogical mapping confirmed the existence of differences in the composition of the Moon's nearside and farside. However, it is still impossible to unambiguously conclude about the origin of global asymmetry.

Keywords: the Moon, lunar rocks, lunar meteorites, remote sensing.