

Изотопный состав железа VLT-базальта с «Луны-24» и происхождение Луны

Э.М.Галимов

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

Модель образования системы Земля—Луна путем сжатия и фрагментации газопылевого облака предполагает радикально отличное от принятого формирование железного ядра нашей планеты. Его особенность, помимо прочего, состоит в том, что в ядре должен накапливаться легкий изотоп железа (^{54}Fe). Но из модели мегаимпакта и из существующих представлений о механизме образования ядра подобное явление не следует. Установление фактического изотопного состава ядра может стать критерием правильности той или иной модели. Непосредственно вещество ядра недоступно для исследования, но к решению задачи можно подойти, изучая вещество Луны. Земля имеет массивное ядро, составляющее 32% ее массы, а Луна — лишь небольшое. И если ядро Земли будет обогащено легким изотопом железа, то это заметно скажется на изотопном составе мантии в сторону обогащения ее тяжелым изотопом (^{57}Fe). В то же время изотопный состав железа силикатной части Луны почти не будет отличаться от исходного. Иначе говоря, признаком обогащения земного ядра легким изотопом стало бы обогащение пород земной мантии тяжелым изотопом по сравнению с мантией Луны. Наиболее достоверно отражает изотопный состав железа лунной мантии изотопный состав железа очень низкотитанистых (VLT) лунных базальтов. Они аналогичны земным базальтам срединно-океанических хребтов (MORB). Лунные VLT-базальты вследствие глубинного залегания мало распространены на поверхности. Они редки в коллекции образцов, собранной американскими астронавтами экспедиций «Аполлон». Изотопный состав железа в них до сих пор не изучался. Мы совместно с японскими коллегами впервые исследовали изотопный состав железа VLT-базальтов, доставленных советским космическим аппаратом «Луна-24». Из полученных данных следует, что содержание изотопа ^{57}Fe в мантии Земли выше, чем в лунной. А это свидетельствует об обогащении ядра Земли изотопом ^{54}Fe , что, в свою очередь, согласуется с моделью формирования системы Земля—Луна путем фрагментации газопылевого облака.

Ключевые слова: происхождение системы Земля—Луна, генезис земного ядра, лунные VLT-базальты, изотопный состав железа Луны, $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$.

Недавно мы вместе с японскими учеными измерили изотопный состав железа в образцах лунного грунта, доставленного советскими автоматическими станциями «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24». Результаты исследования доложены на состоявшемся в прошлом году изотопном симпозиуме в Москве [1] и опубликованы в специализированном журнале [2].

Выполненное впервые исследование изотопного состава железа в отечественной коллекции лунных образцов — интересный факт, но рядовое научное событие, если учесть, что уже много данных по изотопному составу железа лунного грунта было получено раньше при исследовании образцов обширной американской коллекции «Аполлон».



Эрик Михайлович Галимов, академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, научный руководитель Института геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН (директор в 1992–2015 гг.), почетный профессор Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, член Президиума РАН (2002–2013), президент Международной ассоциации геохимии и космохимии IAGC (2000–2004). Геохимик. Награжден медалью Альфреда Трейбса (2004) и золотой медалью В.И.Вернадского (2018), лауреат Государственной премии РФ по науке и технологиям (2016).
e-mail: galimov@geokhi.ru

Более интересно и более значимо то, что проанализирована лунная порода, которая ранее не исследовалась. Это образец очень низкотитанистого базальта (very low titanium), или VLT-базальта. Подобные породы редки на поверхности Луны. Так называемые лунные моря заполнены более

высокотитанистыми базальтами. Именно они чаще и отбирались американскими астронавтами. VLT-базальт определен в образцах только одной («Аполлон-17») из шести лунных экспедиций «Аполлон». Но и он не исследовался, поскольку, видно, не ставилась специальная задача.

Такая задача возникла в связи с проблемой происхождения Луны, точнее, системы Земля—Луна. При этом по счастливой случайности VLT-базальт оказался в составе грунта, отобранного нашей беспилотной станцией «Луна-24». Вот об этой научной задаче и о том, как ее решение связано с исследованием изотопного состава железа лунного VLT-базальта, и пойдет речь.

Изотопия железа

Для начала несколько слов об изотопии железа. Геохимия изотопов уже давно стала одним из наиболее эффективных инструментов изучения природных процессов. Определение соотношений изотопов таких элементов, как углерод ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), кислород ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$), водород (D/H), вошло в практику геологических исследований с 1950–1960-х годов. Эти элементы входят в состав живого вещества, воды, атмосферы, земных минералов, многих полезных ископаемых. Установление происхождения вещества и условий его образования сегодня, как правило, трактуется в рамках изотопной аргументации.

Сравнительно недавно появилась возможность при помощи нового поколения масс-спектрометров с индуктивно-связанной плазмой с высокой точностью определять изотопный состав железа ($^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$, $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$) в породах и минералах. Железо относится к числу наиболее распространенных элементов. Оно образует ядра планет, участвует в процессах планетарного масштаба. Первые прецизионные определения изотопного состава железа появились в конце 1990-х — начале 2000-х годов.

Изотопный состав железа ($^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$) принято указывать величиной (δ), представляющей собой (как и в случае других стабильных изотопов) отклонение в тысячных долях (‰) полученного значения от значения $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ в условном стандарте. В качестве международного стандарта принято железо IRMM-014 ($^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe} = 15.69$, $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe} = 0.3625$). В некоторых статьях данные приводятся в величинах $\delta^{56}\text{Fe}$. Измеряются отношения $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$. Обе нотации связаны между собой соотношением $\delta^{57}\text{Fe} = 1.48 \cdot \delta^{56}\text{Fe}$ и могут быть легко пересчитаны. Воспроизводимость анализа составляет $\pm 0.03\%$. Многократными измерениями доверительную точность можно довести до $\pm 0.01\%$. В нашем слу-

чае измерения производились в Японии, в Токийском университете, на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (MC-ICP-MS, Nu Plasma II, Nu Instrument, UK).

Проблема происхождения Луны

До сих пор в геологической науке дискутируется проблема происхождения Луны. Наиболее известна модель мегаимпакта, согласно которой на заключительной стадии аккреции Земля столкнулась с другим небесным телом планетного (размером с Марс) масштаба. В результате катастрофы на околоземную орбиту был выброшен расплав, который в конечном счете конденсировался в спутник Земли Луну. Эта концепция была выдвинута американскими астрономами У.Хартманом и В.Девисом [3]. Она объясняла избыточный угловой момент системы Земля—Луна, дефицит железа на Луне по сравнению с Землей, обогащение Луны тугоплавкими элементами и обеднение летучими. Модель сразу получила широкое признание и поддержку. Потом выявились сложности. В числе ее главных слабостей — невозможность совместить удивительное сходство изотопных составов элементов Земли и Луны с динамическими расчетами, из которых следует, что вещество Луны должно было при ударе унаследовать главным образом вещество ударника, а не Земли [4]. К тому же Земля и Луна отличаются содержанием летучих, что обязательно сказалось бы на различии их изотопного состава. А он одинаков. Модель неоднократно модифицировалась [5, 6] и, хотя содержит до сих пор не устраненные слабости, продолжает оставаться в повестке дня [7].

В качестве альтернативы выдвинута модель образования системы Земля—Луна путем фрагментации исходного газопылевого облака. Наиболее полно эта модель изложена в нашей с А.М.Кривцовым книге [8]. Но в разное время в ее разработке принимали участие ученые ряда академических институтов: академики Т.М.Энеев, В.П.Мясников, член-корреспондент А.В.Забродин, А.М.Кривцов, а также Ю.А.Сидоров, М.С.Легкоступов и др. [9, 10].

Наша модель предполагает образование Земли и Луны из общего исходного газопылевого облака в результате его сжатия и фрагментации (рис.1). Твердые частицы имеют состав, отвечающий веществу углистых хондритов. Последние рассматриваются как наиболее примитивное вещество Солнечной системы. Железо в них представлено в виде FeO. Газовая составляющая — в основном первичный водород, на который изначально приходилось более 90% вещества газопылевого облака.

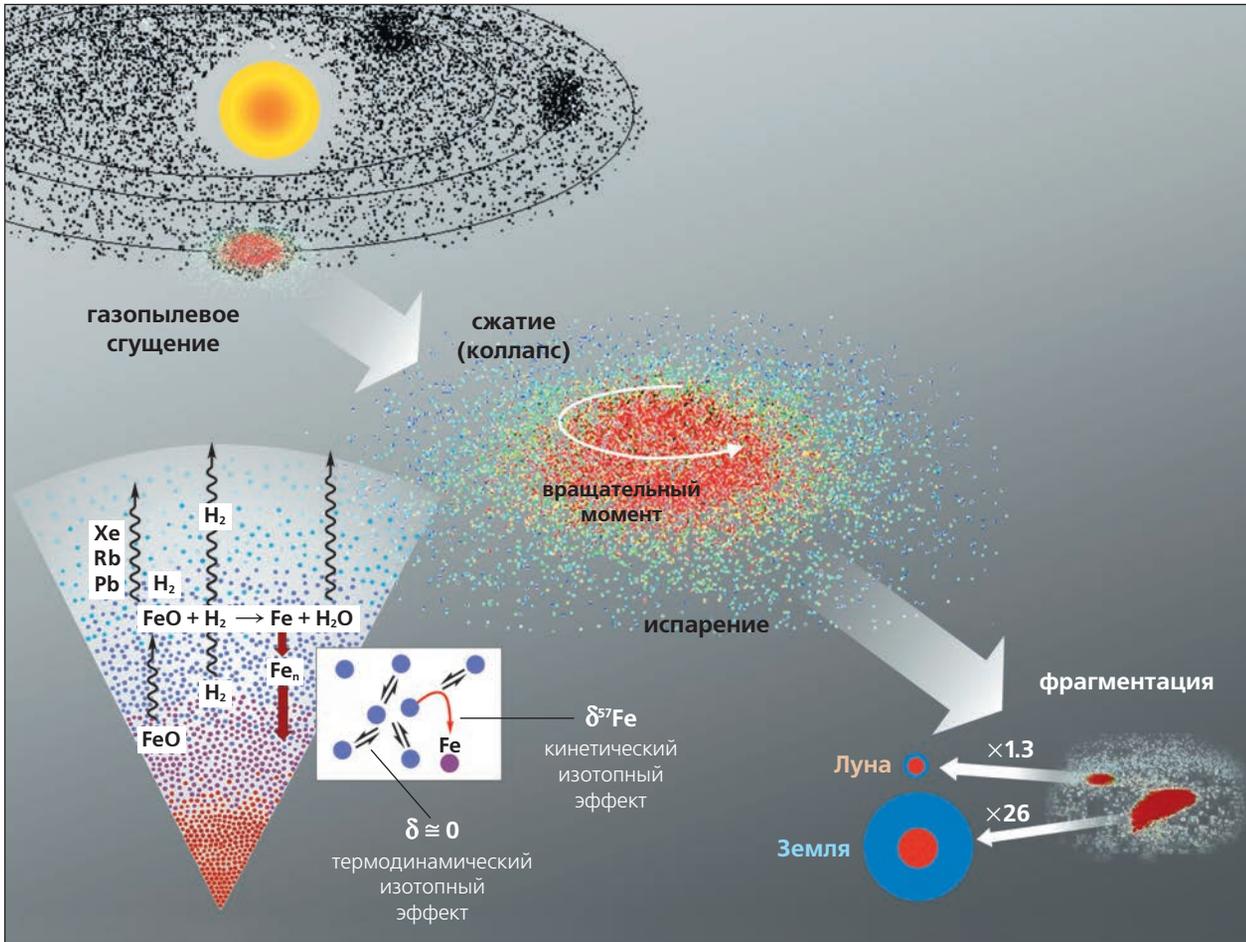


Рис.1. Иллюстрация к механизму формирования Земли и Луны в процессе сжатия и фрагментации родительского газопылевого облака. Подробности в тексте.

Температура внутренней части облака увеличивается по мере сжатия, что приводит к частичному испарению летучих компонентов, в том числе FeO. Испарение играет решающую роль в динамике процесса. Теоретически фрагментация становится возможной (при том угловом моменте, который характерен для системы Земля—Луна), если в уравнения динамики включен член, учитывающий испарение. В результате фрагментации образуются две неравные части, которые становятся зародышами Земли и Луны. При испарении породообразующих оксидов раньше всего теряются оксиды щелочных металлов K и Na, а сразу за ними — FeO (рис.2, внизу). Тугоплавкие же оксиды (Al_2O_3 , CaO и TiO_2), напротив, концентрируются. Это экспериментальные данные А.Хашимото [11]. Из экспериментов следует, что при испарении приблизительно 40% вещества углистых хондритов остаток приобретает состав, отвечающий Луне (рис.2, вверху).

Компонент	Земля	CI	Остаток после испарения 40% CI	Луна
SiO_2	35.5	34.2	42.9	43.4
MgO	24.6	23.7	31.9	32.0
FeO	8.0	35.8	15.8	13.0
Fe	26.0	—	—	3?
CaO + Al_2O_3	4.6	4.35	9.4	10.8

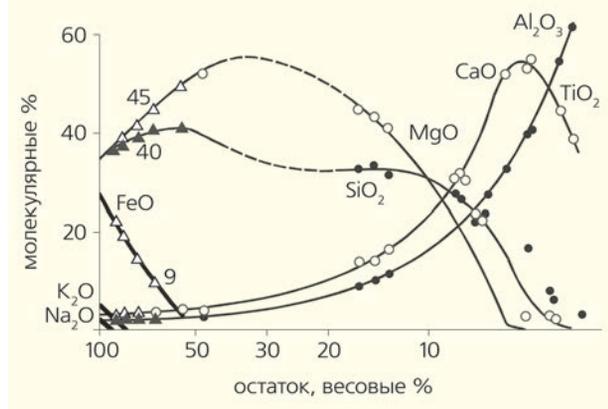


Рис.2. Сопоставление составов (по главным компонентам) Земли и Луны с экспериментальными данными по испарению CI хондритов (вверху) и изменение состава остаточного расплава.

Компьютерное моделирование показывает, что если зародыши не равны по массе, то при последующей аккреции больший фрагмент собирает на себя почти все оставшееся вещество первичного облака, а меньшему достается лишь незначительная часть. Например, если массы фрагментов относятся как 4:1, то больший (будущая Земля) увеличивает массу в процессе последующей аккреции в 26 раз, в то время как меньший (будущая Луна) — только в 1.3 раза.

Первоначально оба зародыша имеют одинаковый состав. Они в равной степени обеднены железом. Однако ввиду последующей различной скорости роста Луна сохраняет высокотемпературный облик своего зародыша, обогащенного тугоплавкими окислами Al, Ca, Ti и обедненного Fe и летучими, в то время как Земля забирает почти весь исходный материал и приближается к составу исходного облака. Это объясняет различие в химическом составе Земли и Луны и известный дефицит железа в Луне по сравнению с Землей.

При аккреции дисперсное состояние вещества определяет особенности изотопного фракционирования. В дисперсной системе испарение происходит в пространство между частицами, и оно обратимо. В этом случае изотопное фракционирование пренебрежимо мало. Вещество, находящееся в газовой фазе, удаляется в потоке газа-носителя и потому также не сопровождается изотопным эффектом. Отсюда наблюдаемое удивительное сходство изотопных составов большинства элементов Земли и Луны (несмотря на различное содержание летучих).

Железо, как следует из нашей концепции, должно вести себя иначе. Его оксид FeO, испаряющийся из частиц, восстанавливается водородом. Кислород удаляется в виде воды, а свободные атомы Fe собираются в кластеры, образуя частицы, которые осаждаются к центру масс, формируя металлическое ядро. Таков механизм формирования ядра в нашей модели.

Поскольку при испарении атомы железа образуют новую металлическую фазу, этот процесс необратим. Он сопровождается кинетическим изотопным эффектом. Поэтому металлические частицы, осаждающиеся в ядро, должны быть обогащены легким изотопом, а железо, остающееся в силикатных частицах, напротив, — тяжелыми. Следовательно, железное ядро планеты в этом случае должно быть обогащено легким изотопом железа ^{54}Fe . Из модели мегаимпакта это никак не следует. Определение изотопного состава железа ядра может стать сильным аргументом в пользу той или иной модели.

Фракционирование изотопов железа

Изотопный состав железа земных пород. Вещество железного ядра недоступно для непосредственного исследования. Но данных об изотопном составе земных пород достаточно много. Наиболее представительным продуктом плавления мантии считаются базальты срединно-океанических хребтов, так называемые MORB (middle ocean ridge basalts). Их изотопный состав в среднем определяется величиной $\delta^{57}\text{Fe} = 0.1\%$. На Земле почти все мантийные субстраты показывают положительные значения $\delta^{57}\text{Fe}$. Образцы мантийных коматиитов и лерцолитов имеют значения $\delta^{57}\text{Fe} = 0.05\%$, дунитов — $\delta^{57}\text{Fe} = 0.035\%$ [12]. П.А.Сосси с соавторами оценивают средний изотопный состав железа мантии величиной $\delta^{57}\text{Fe} = 0.05\%$ [13]. Это отличается от изотопного состава железа хондритов ($\delta^{57}\text{Fe} = -0.01\%$) [14] в сторону обогащения тяжелым изотопом ^{57}Fe . Обычно изотопный состав элементов Земли близок к изотопному составу тех же элементов в хондритах. Если изотопный состав железа Земли в целом соответствует данной величине ($\delta^{57}\text{Fe} = -0.01\%$), то это говорит в пользу отрицательных величин $\delta^{57}\text{Fe}$ в ядре (исходя из баланса с положительными величинами $\delta^{57}\text{Fe}$ в мантии), что согласуется с нашей моделью. Но данные соображения нельзя рассматривать как доказательство, так как есть другая возможность: железо Земли в целом отличается от железа хондритов, т.е. оно в целом имеет изотопный состав $\delta^{57}\text{Fe} = 0.05\%$. А между изотопным составом железа ядра и мантии различий нет. К такому выводу исследователей склоняло также то, что теоретически и экспериментально было показано: в расплаве между металлическим железом и железом в силикатах фракционирование изотопов практически отсутствует.

Механизм формирования ядра, который мы рассматриваем в нашей модели, отличается от общепринятого.

Принятое классическое представление образования ядра состоит в том, что в первичном магматическом океане металлическое железо выделяется из силикатного расплава [15]. Если аккреция происходит путем падения небольших тел, их железные ядра эмульгируются. В таком состоянии происходит возможный изотопный обмен. Капли металлического железа объединяются в более крупные глобулы. Они скапливаются на дне магматического океана, где мантия становится достаточно твердой, а затем быстро проваливаются сквозь нижнюю мантию к ядру — без дальнейшего обмена или фракционирования. Эксперименты показали, что в системе металл — силикатный расплав при тех

температурах и давлениях, когда происходит сепарация железа из расплава ($T \sim 2000$ К, P до 25 ГПа), железо, выделяющееся в металлическую фазу, не обогащается легким изотопом [16, 17]. При соударении Земли с крупными дифференцированными астероидами их ядра тонут в образовавшемся расплаве и присоединяются к растущему ядру Земли. А ядра астероидов (как показывает исследование железных метеоритов) относительно хондритов обогащены скорее тяжелым изотопом Fe, а не легким ($\delta^{57}\text{Fe} = 0.01\text{--}0.32\%$) [18].

Таким образом, в принятой модели образования земного ядра отсутствует механизм разделения между изотопами железа мантии и ядра. Следуя этой модели, нужно принять, что по каким-то причинам изотопный состав железа Земли (в отличие от всех других элементов) иной, чем в хондритах.

По некоторым данным, при сверхвысоких давлениях (свыше 130 ГПа) существует возможность обогащения металлического железа легким изотопом в равновесии с силикатным железом [19]. Но это не меняет дела, поскольку такие давления намного превосходят те, при которых, как полагают, происходит сепарация железа из расплава. Подобные давления достигаются на границе ядра и мантии уже сформировавшейся планеты.

Иначе говоря, в рамках классической модели нет оснований рассчитывать на обеднение ядра легким изотопом железа в процессе его образования.

Изотопный состав железа лунных пород.

Есть ли какой-либо другой путь к оценке изотопного состава железа земного ядра? Здесь мы обращаемся к Луне. Логика рассуждений следующая: исходим из того, что Земля и Луна совпадают или близки по изотопному составу исходного железа (как это имеет место в случае других элементов). При этом Земля обладает массивным ядром, составляющим 32% ее массы, а Луна — лишь небольшим. Если ядро Земли обогащено легким изотопом железа, это заметно скажется на изотопном составе мантии Земли в сторону обогащения ее тяжелыми изотопами, в то время как изотопный состав железа силикатной части Луны почти не будет отличаться от исходного. Иначе говоря, признаком обогащения земного ядра легким изотопом служило бы обогащение пород земной мантии тяжелым изотопом по сравнению с мантией Луны, т.е. должно соблюдаться условие $\delta^{57}\text{Fe}_{\text{земной мантии}} > \delta^{57}\text{Fe}_{\text{лунной мантии}}$.

Изучение данных по изотопному составу железа Луны, полученных в результате исследования образцов лунного грунта, которые доставили американские астронавты, поначалу разочаровывает. На первый взгляд, они не поддерживают нашу модель. Отношения $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ в лунных базальтах ока-

зались значимо выше, чем в земных. Правда, частично это было связано с изотопным эффектом космического выветривания — бомбардировкой поверхности лунного грунта микрометеоритами [20]. Но и свободные от эффекта выветривания типичные лунные базальты характеризуются высокими значениями $\delta^{57}\text{Fe}$.

Есть одна особенность лунной геохимии. Базальты Луны, как мы уже упоминали, обогащены тугоплавкими элементами. Из числа породообразующих это Ca, Al, Ti. Титансодержащий минерал ильменит (FeTiO_3) — распространенный компонент лунных базальтов. Содержащие его базальты заметно обогащены тяжелыми изотопами железа. Эта связь не прямая. Сам ильменит не обогащен тяжелым изотопом относительно фаялита Fe_2SiO_4 [21]. Но базальты, включающие ильменит, — наиболее поздние в эволюционном ряду кристаллизации магматических пород [22]. При этом известно, что расплав обогащается тяжелыми изотопами железа по мере кристаллизации [23]. На Земле нет базальтов, в такой степени обогащенных титаном (рис.3).

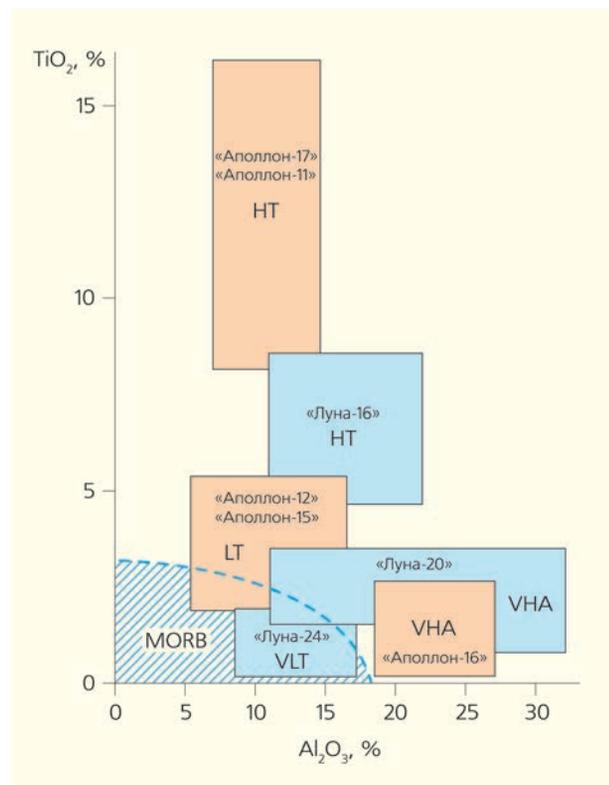


Рис.3. Состав лунных базальтов (в координатах $\text{TiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$), доставленных космическими станциями «Аполлон» и «Луна», в сравнении с соответствующим составом земных базальтов срединно-океанических хребтов (MORB). HT — высокотитанистый базальт, LT — низкотитанистый базальт, VLT — очень низкотитанистый базальт, VHA — высокоглиноземистый базальт.

Среди лунных базальтов выделяют три категории: высокотитанистые (HT — high titanium), низкотитанистые (LT — low titanium) и очень низкотитанистые (VLT — very low titanium). Аналогом земных пород типа базальтов срединно-океанических хребтов (MORB) могут быть лунные VLT-базальты.

На нашей планете базальты срединно-океанических хребтов представляют собой прямой продукт плавления мантии Земли. Это наиболее высокомагнезиальные и низкотитанистые земные базальты. Аналогично этому лунные VLT-базальты генетически наиболее близки к первичному источнику [22]. Они также высокомагнезиальные и наиболее низкотитанистые [24].

Учитывая особенности лунной геохимии, нужно сравнивать изотопный состав железа земных MORB не с типичными высокотитанистыми лунными базальтами, а с очень низкотитанистыми. Именно их сравнение может ответить на вопрос, остается ли земная мантия изотопно более тяжелой, чем лунная. И содержит ли земное ядро повышенную концентрацию легкого изотопа железа.

Так возникла задача исследования лунных VLT-базальтов.

Исследование VLT-базальтов

Очень низкотитанистые базальты мало распространены на поверхности Луны. Как указывают С.Тейлор и П.Джейкс, их источник находится на глубине 200–400 км [25].

На Земле проявления базальтов срединно-океанических хребтов обширны. Они занимают огромные пространства дна океана. Но лунная геология сложилась иначе. Крупные ударные бассейны, которые возникли в результате гигантской бомбардировки Луны 4.0–3.3 млрд лет назад (известные нам как лунные моря), были заполнены лавой, представлявшей собой остаточную от фракционной кристаллизации высокотитанистую жидкость. Поэтому высокотитанистые базальты оказались типичными базальтами на лунной поверхности (хотя и занимают не более 1% объема лунной коры), а действительно представительные для Луны VLT-базальты мало проявлены на поверхности. В обширной американской коллекции они очень редки, встречаются только в образцах «Apollo-17». Изотопный состав железа в них не измерялся. Но в нашей лунной коллекции в грунте с «Луны-24» описаны очень низкотитанистые базальты [26, 27]. «Луна-24» отобрала образец в базальтовом покрове моря Кризисов — одном из наиболее древних бассейнов Луны [28].

Я задался целью исследовать изотопный состав железа VLT-базальтов из коллекции «Луны-24». К сожалению, у нас не было масс-спектрометра нужного типа. Несколько лет назад представители Японского космического агентства и Токийского университета обратились в Российскую академию наук с просьбой предоставить им для показа на выставке образцы лунного грунта, полученного советскими автоматическими станциями. Образцы мы предоставили, но в ходе переговоров я попросил их исследовать в них изотопный состав железа. И вот в начале этого года японские ученые прислали результаты анализов. Мы изучали целый ряд образцов грунта, доставленного всеми тремя станциями: «Луна-16, -20 и -24». Эти данные представляют самостоятельную ценность. Мы обсуждаем их в статье, опубликованной в специализированном журнале [2]. Здесь я остановлюсь лишь на анализе VLT-базальта «Луны-24».

Изотопный анализ VLT-базальта «Луны-24» показал величину $\delta^{57}\text{Fe} = 0.08\text{‰}$, что меньше величины ($\delta^{57}\text{Fe} = 0.1\text{‰}$), характеризующей земные базальты срединно-океанических хребтов (рис.4).

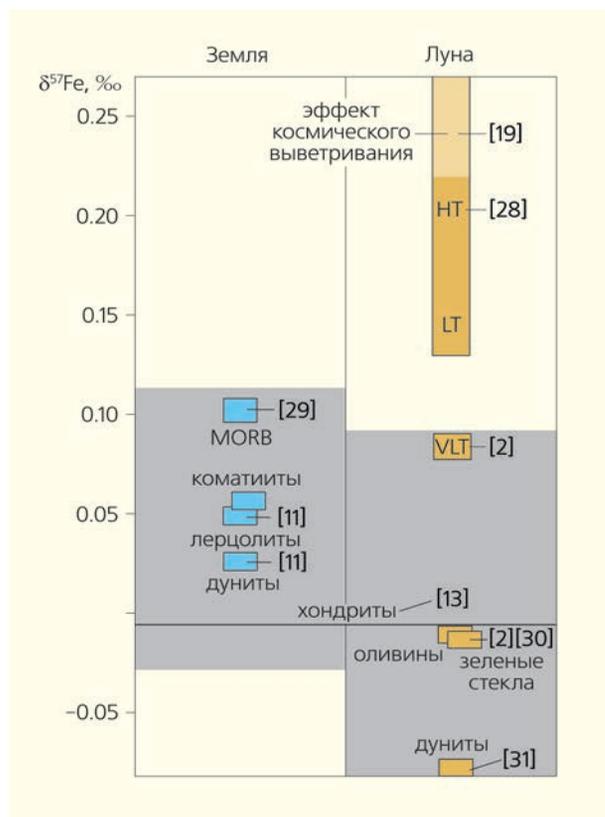


Рис.4. Изотопный состав железа земных и лунных пород. VLT-базальты Луны изотопно легче (по железу), чем земные MORB. Породы мантии Земли имеют более высокие значения $\delta^{57}\text{Fe}$ по сравнению с породами Луны.

Это свидетельствует о том, что железо лунной мантии (которое мы отождествляем с исходным железом для Луны и Земли) действительно изотопно легче железа земной мантии. Поскольку изотопный состав железа Земли и Луны в целом одинаков, наблюдаемый избыток тяжелого изотопа в мантии нашей планеты должен быть уравновешен повышенным содержанием легкого изотопа в ее ядре.

Помимо того что железо лунных VLT-базальтов изотопно легче земных базальтов, многие мантийные лунные материалы показывают отрицательные значения $\delta^{57}\text{Fe}$. Вулканические зеленые стекла близки к хондритам ($\delta^{57}\text{Fe} = -0.029 - -0.014\text{‰}$) [31]. Кстати, Тейлор и Джейкс считали, что тугоплавкие зеленые вулканические стекла представляют вещество глубинных магм — источников VLT-базаль-

тов [25]. По данным К.Вонга с соавторами, значительную отрицательную величину ($\delta^{57}\text{Fe} = -0.50\text{‰}$) показал и лунный дунит [32].

Основываясь на этих материалах, можно предположить, что изотопный состав железа Луны в целом близок или совпадает с изотопным составом железа хондритов. Как отмечалось выше, на Земле почти все мантийные субстраты (гарцбургиты, коматииты и лерцолиты) имеют положительные значения $\delta^{57}\text{Fe}$. Все это указывает на обогащение земной мантии тяжелым изотопом железа по отношению к Луне и хондритам. И с высокой степенью вероятности можно говорить об обогащении земного ядра легким изотопом железа, что, в свою очередь, хорошо согласуется с нашей моделью и с ее предсказанием. ■

Литература / References

1. Галимов Э.М., Okabayashi S., Yokoyama T. и др. Проблема изотопного состава железа Земли и Луны. Измерения $\delta^{57}\text{Fe}$ в образцах лунного грунта «Луна-16, -20, -24» (доклад на XX симпозиуме по геохимии стабильных изотопов, М., 29–31 октября 2019). Геохимия. 2020; 11: 1041–1060. [Galimov E.M., Okabayashi S., Yokoyama T. et al. The problem of the isotopic composition of iron of the Earth and the Moon. Measurements of $\delta^{57}\text{Fe}$ in the LUNA-16, -20, -24 lunar soil samples (report at the XX Symposium on the Geochemistry of Stable Isotopes, Moscow, October 29–31, 2019). Geochemistry International. In press.]
2. Okabayashi S., Yokoyama T., Hirata T., Terakado K., Galimov E. Iron isotopic composition of very low-titanium basalt deduced from iron isotopic signature in Luna 16, 20 and 24 soils. Geochim. Cosmochim. Acta. 2020; 269: 1–14.
3. Hartmann W.K., Davis D.R. Satellite-sized planets and Lunar origin. Icarus. 1975; 24: 504–515.
4. Canup R.M., Asphaug E. Origin of the Moon in a Giant impact near the end of the Earth's formation. Nature. 2001; 41(6848): 708–712.
5. Canup R.M. Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. Science. 2006; 338: 1052–1055.
6. Cuk M., Stewart S.T. Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning. Science. 2012; 338: 1047–1052.
7. Бялко А.В., Кузьмин М.И. Осколки образования Луны: геофизические следствия гигантского столкновения. ЖЭТФ. 2019; 156(4): 603–614. [Byalko A.V., Kuzmin M.I. Fragments of the Moon formation: geophysical consequences of the Giant Impact. J. Exp. Theor. Phys. 2019; 129: 511–520. DOI:10.1134/S1063776119100182.]
8. Galimov E.M., Krivtsov A.M. Origin of the Moon. New Concept: Geochemistry and Dynamics. Berlin; Boston, 2012.
9. Galimov E.M., Krivtsov A.M., Zabrodin A.V. et al. Dynamic Model for the Formation of the Earth–Moon System. Geochem. International. 2005; 43(11): 1045–1055.
10. Galimov E.M. Formation of the Moon and the Earth from a common supraplanetary gas-dust cloud (lecture presented at the XIX all-Russia symposium on isotope geochemistry on November 16, 2010). Geochemistry Int. 2011; (49): 537–554.
11. Hashimoto A. Evaporation metamorphism in the early solar nebula. Evaporation experiments on the melt $\text{FeO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ and chemical fractionations of primitive materials. Geochem. J. 1983; (17): 111–145.
12. Dauphas N., Teng F.Z., Arndt N.T. Magnesium and iron isotopes in 2.7 Ga Alexo komatiites: Mantle signatures, no evidence for Soret diffusion, and identification of diffusive transport in zoned olivine. Geochim. Cosmochim. Acta. 2010; (74): 3274–3291.
13. Sossi P.A., Nebel O., Foden J. Iron isotope systematics in planetary reservoirs. Earth Planet. Sci. Lett. 2016; 452: 295–308.
14. Craddock P.R., Dauphas N. Iron Isotopic Compositions of Geological Reference Materials and Chondrites. Geostand. Geoanalytical Res. 2011; 35: 101–123.
15. Stevenson D.J. Models of the Earth's Core. Science. 1991; 214(4521): 611–619.
16. Roskosz M., Watson H.C., Mysen B.O. et al. Experimental quantification of the fractionation of Fe isotopes during metal segregation from a silicate melt. Earth Planet. Sci. Lett. 2006; 248: 851–867.
17. Hin R.C., Schmidt M.W., Bourdon B. Experimental evidence for the absence of iron isotope fractionation between metal and silicate liquids at 1 GPa and 1250–1300°C and its cosmochemical consequences. Geochim. Cosmochim. Acta. 2012; 93: 164–181.
18. Williams H.M., Markowski A., Quitté G. et al. Fe isotope fractionation in iron meteorites: New insights into metal-sulphide segregation and planetary accretion. Earth Planet. Sci. Lett. 2006; 250: 486–500.
19. Polyakov V.B. Equilibrium iron isotope fractionation at core-mantle boundary conditions. Science. 2009; 323(5916): 912–914.

20. *Weisly R.A., Beard B.L., Taylor L.A., Johnson C.M.* Space weathering processes on airless bodies: Fe isotope fractionation in the lunar regolith. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003; 216: 457–465.
21. *Sossi P.A., O'Neill H.S.C.* The effect of bonding environment on iron isotope fractionation between minerals at high temperature. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2017; 196: 121–143.
22. *Snyder G.A., Taylor L.A., Neal C.R.* A chemical model for generating the sources of mare basalts: Combined equilibrium and fractional crystallization of the lunar magmasphere. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1992; 56: 3809–3823.
23. *Weyer S., Ionov D.A.* Partial melting and melt percolation in the mantle: The message from Fe isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007; 259: 119–133.
24. *Vaniman D.T., Papike J.J.* Very low Ti/VLT/basalts — a new mare rock type from the Apollo 17 drill core. 8th Lunar and Planetary Science Conference. Houston, 1977; 1444–1449.
25. *Taylor S.R., Jakes P.* The geochemical evolution of the moon. Lunar Science Conference, 5th, Houston, Tex., March 18–22. N.Y., 1974; 2: 1287–1305.
26. *Barsukov V.L.* Preliminary data for the regolith core brought to the Earth by the automatic lunar station Luna 24. 8th Lunar and Planetary Science Conference. Houston, 1977; 3303–3318.
27. *Grove T.L.* Cooling histories of Luna 24 very low Ti (VLT) ferrobasalts: An experimental study. *Proc. Lunar Sci. Conf.* 1978; 9: 565–584.
28. *Вассербург Дж., Папанастасиу Д.А., Мак-Каллок М.Т. и др.* Петрология, химия, возраст и история облучения образцов «Луны-24». Лунный грунт из Моря Кризисов. Ред. В.Л.Барсуков. М., 1980; 219–230. [*Wasserburg G., Papanastassion D.A., McCulloch M.T. et al.* Petrology, chemistry, age and irradiation history of “Luna 24” samples. Lunar soil from Mare Crisium. V.L.Barsukov (ed.). Moscow, 1980; 219–230. (In Russ.).]
29. *Elardo S.M., Shahar A.* Non-chondritic iron isotope ratios in planetary mantles as a result of core formation. *Nat. Geosci.* 2017; 10: 317–321.
30. *Schoenberg R., Blanckenburg F.von.* Modes of planetary-scale Fe isotope fractionation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006; 252: 342–359.
31. *Poitras F., Halliday A.N., Lee D.C. et al.* Iron isotope differences between Earth, Moon, Mars and Vesta as possible records of contrasted accretion mechanisms. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004; 223: 253–266.
32. *Wang K., Jacobsen S.B., Sedaghatpour F. et al.* The earliest Lunar Magma Ocean differentiation recorded in Fe isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015; 430: 202–208.

Iron Isotopic Composition of Lunar VLT-Basalt and the Origin of the Moon

E.M.Galimov

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

The model of the Earth—Moon system formation by compression and fragmentation of a gas-dust cloud suggests a radically different formation of the iron core of the planet from the accepted one. Among other peculiarities is an accumulation of the light isotope of iron (^{54}Fe) in the nucleus. However, such a phenomenon does not follow neither from the megaimpact model, nor from the existing ideas about the mechanism of the core formation. So, the establishing the actual isotopic composition of the nucleus can become a criterion for the correctness of a particular model. The substance of the nucleus itself is not accessible for research, but the problem can be solved by studying the substance of the Moon. The Earth has a massive core, about 32% of its mass, and the Moon has only a small one. So that, if the Earth's core is enriched with a light isotope of iron, then this will noticeably affect the isotopic composition of its mantle toward the enrichment with the heavy isotope (^{57}Fe), while the isotopic composition of iron in the silicate part of the Moon will hardly differ from the primary matter. In other words, enrichment of the Earth's mantle rocks with a heavy isotope in comparison with the Moon mantle would be a sign of enrichment of the Earth's core with a light isotope. The most reliable reflection of the iron isotopic composition of the lunar mantle is the iron isotopic composition of the very low-titanium (VLT) lunar basalts. They are similar to terrestrial basalts of the mid-ocean ridges (MORB). Lunar VLT-basalts due to deep occurrence are not very common on the surface. They are rare in the collection of samples delivered by the American astronauts of the “Apollo” expeditions. The isotopic composition of iron in them has not yet been determined. Together with our Japanese colleagues, for the first time, we studied the iron isotopic composition of VLT-basalts delivered by the Soviet Luna-24 mission. Our results suggest that the content of the ^{57}Fe isotope in the Earth's mantle is higher than that in the lunar one. This indicates the enrichment of the Earth's core with the ^{54}Fe isotope, which, in turn, is consistent with the model of the formation of the Earth—Moon system by fragmentation of a gas-dust cloud.

Keywords: origin of the Earth—Moon system, genesis of the Earth's core, lunar VLT-basalts, isotopic composition of the iron of the Moon, $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$.