

## ПРОБЛЕМА ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗА ЗЕМЛИ И ЛУНЫ. ИЗМЕРЕНИЯ $\delta^{57}\text{Fe}$ В ОБРАЗЦАХ ЛУННОГО ГРУНТА “ЛУНА”-16-20-24 (ДОКЛАД НА XXII-ОМ СИМПОЗИУМЕ ПО ГЕОХИМИИ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ, МОСКВА, 29–31 ОКТЯБРЯ 2019)

© 2020 г. Э. М. Галимов<sup>a, \*</sup>, S. Okabayashi<sup>b</sup>, T. Yokoyama<sup>b</sup>, T. Hirata<sup>c</sup>, K. Terakado<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук,  
ул. Косыгина 19, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo, 152-8551 Japan

<sup>c</sup>Geochemical Research Center, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

<sup>d</sup>Japan Space Forum, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0062 Japan

\*e-mail: galimov@geokhi.ru

Поступила в редакцию 20.04.2020 г.

После доработки 05.05.2020 г.

Принята к публикации 07.05.2020 г.

Из модели формирования системы Земля–Луна путем сжатия и фрагментации газо-пылевого облака (Galimov & Krivtsov, 2012) следовало необычное представление о механизме образования ядра Земли. В частности, предсказывалось, что железо земного ядра должно быть обогащено легким изотопом по сравнению с исходным железом (хондритов). Классическая модель формирования земного ядра, также как и модель мегаимпакта, такого представления не допускали. Проблема могла быть решена путем сравнения изотопного состава железа мантии Земли и Луны. Наиболее достоверно отражает изотопный состав железа лунной мантии ( $\delta^{57}\text{Fe}$ ) изотопный состав железа лунных очень низкотитанистых (VLT) базальтов, подобно тому, как  $\delta^{57}\text{Fe}$  базальтов срединно-океанических хребтов Земли (MORB) отражает изотопный состав железа земной мантии. VLT-базальты мало распространены на лунной поверхности, в отличие от высоко-титанистых базальтов, заполняющих лунные моря. Изотопный состав железа их до сих пор не измерялся. Нами впервые выполнен анализ изотопного состава железа очень низко-титанистых лунных базальтов (VLT) на материале, доставленном космическим аппаратом Луны-24. Поскольку из полученных данных следует, что  $\delta^{57}\text{Fe}$  железа силикатной Земли (Bulk silicate Earth) выше, чем  $\delta^{57}\text{Fe}$  (Bulk silicate Moon), то это с высокой степенью вероятности указывает на обогащение земного ядра легким изотопом железа. А это, в свою очередь, хорошо согласуется с моделью формирования системы Земля–Луна путем фрагментации газо-пылевого облака.

**Ключевые слова:** изотопный состав железа Луны, происхождение системы Земля–Луна, лунные VLT-базальты, генезис земного ядра

**DOI:** 10.31857/S0016752520110060

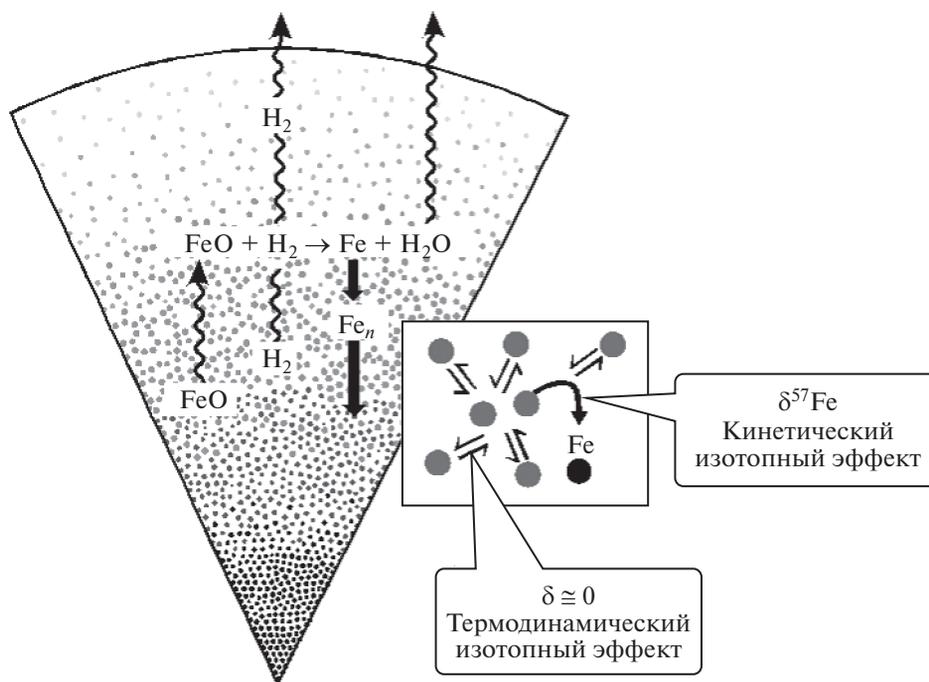
### ВВЕДЕНИЕ

Недавно мы выполнили исследования изотопного состава железа в образцах лунного грунта, доставленного советскими космическими аппаратами Луна-16, Луна-20 и Луна-24 (Okabayashi et al., 2019). При этом впервые был исследован изотопный состав железа так называемых очень низко-титанистых (very low titanium – VLT) лунных базальтов. На лунной поверхности VLT-базальты редки. В обширной американской коллекции лунных образцов “Аполлон” они встречаются только в образцах “Аполлон-17”. Изотопный состав железа в них никогда не измерялся. Между тем, изотопный состав железа VLT-базальтов наиболее точно отражает изотопный

состав лунной мантии. В этом сообщении мы не будем обсуждать всю совокупность данных по изотопному составу железа, полученных для образцов Луна 16-20-24. Они приведены в работе (Okabayashi et al., 2019). Выделим только один аспект исследования, связанный с анализом изотопного состава железа VLT-базальта, относящийся к генезису земного ядра.

### ПРОБЛЕМА ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗА ЗЕМНОГО ЯДРА

Изотопный состав железа принято представлять, как и в случае других стабильных изотопов, в величинах дельта ( $\delta$ ) в промилле (‰). Изменя-



**Рис. 1.** К механизму формирования земного ядра на стадии аккреции Земли (после фрагментации в модели образования системы Земля–Луна в процессе сжатия и фрагментации родительского газо-пылевого облака). Особенности фракционирования изотопов в дисперсной системе: термодинамический изотопный эффект при отделении летучих в газовую фазу, исключение – кинетический изотопный эффект при образовании металлической фазы, осаждающейся в ядро. Подробности в тексте и в Galimov (2011).

ются изотопные отношения  $^{57}Fe/^{54}Fe$  и  $^{56}Fe/^{54}Fe$ . Они связаны между собой соотношением:  $\delta^{57}Fe = 1.48\delta^{56}Fe$ . Воспроизводимость анализа составляет  $\pm 0.03\%$ . Измерения производились в Японии, в Токийском университете на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (MC-ICP-MS, Nu Plasma II, Nu Instrument, UK). Данные отнесены к стандарту IRMM-014 ( $^{56}Fe/^{54}Fe = 15.69$ ,  $^{57}Fe/^{54}Fe = 0.3625$ ). Подробности, связанные с подготовкой образцов, методикой анализа, а также более полное обсуждение данных, приведены в статье Okabayashi et al. (2019).

Нами предложена и разрабатывается модель формирования системы Земля–Луна путем сжатия и фрагментации газо-пылевого облака (Galimov, 2011; Galimov, Krivtsov, 2012). Из этой модели, помимо всего прочего, вытекало необычное представление о механизме образования ядра Земли. В частности, предсказывалось, что железо земного ядра должно быть обогащено легким изотопом, а мантия Земли, напротив, – тяжелым, по сравнению с исходным космическим железом. Модель происхождения Луны в результате мегаимпакта (Hartmann, Davis, 1975; Canar, Asphaug, 2001; Canar, 2006; Cuk, Stewart, 2012) такого представления не содержала. Поэтому оценка изотопного состава железа земного ядра могло стать аргументом в пользу той или иной модели в суще-

ствующей альтернативе происхождения системы Земля–Луна.

Напомним, что особенностью модели формирования системы Земля–Луна путем сжатия и фрагментации газо-пылевого облака является дисперсное состояние вещества в процессе аккреции (рис. 1). Дисперсное состояние вещества определяет особенности изотопного фракционирования. В дисперсной среде 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 различие в содержании летучих. Железо, однако, как следует из нашей концепции, должно вести себя иначе. Оксид железа  $FeO$ , испаряющийся из частиц, восстанавливается водородом. Точнее, оксид железа испаряется инконгруэнтно. Кислород удаляется в виде воды, а свободные атомы  $Fe$  собираются в кластеры, образуя частицы. Частицы железа осаждаются к центру масс, формируя металлическое ядро. 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 изотопами. Таково предсказание модели.

Как проверить это предсказание? Материал земного ядра непосредственно недоступен для исследования. Но можно подойти к решению проблемы путем сравнительного анализа вещества Земли и Луны.

Логика, тут следующая: исходим из того, что Луна и Земля в целом имеют одинаковый, как и в случае других элементов, изотопный состав железа. Известно, что изотопные составы Земли и Луны практически неразличимы для большинства элементов на фоне достаточно широкого разброса изотопного состава других небесных тел. Земля имеет массивное ядро, составляющее 32% ее массы, а Луна — лишь небольшое ядро. Поэтому, если ядро Земли обогащено легким изотопом железа, то это заметно скажется на изотопном составе мантии Земли в сторону обогащения ее тяжелыми изотопами, в то время как изотопный состав железа силикатной части Луны практически не изменится по отношению к исходному железу. Иначе говоря, признаком концентрирования легкого изотопа железа в земном ядре, что предсказывает наша модель, должен служить сдвиг в сторону более высокого содержания тяжелых изотопов железа в силикатной Земле (BSE) по сравнению с силикатной Луной (BSM).

### ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗА ЛУНЫ

Однако из опубликованных работ по изотопному составу железа в лунном грунте следовало, что Луна, напротив, обогащена тяжелыми изотопами железа относительно пород Земли (Poitrasson et al., 2004; Weyer et al., 2005). Отношения  $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$  в лунных базальтах оказались значимо выше, чем в земных базальтах. Частично это оказалось связано с изотопным эффектом космического выветривания (Weisly et al., 2003). Но и свободные от эффекта выветривания типичные лунные базальты характеризуются значениями  $\delta^{57}\text{Fe}$  значительно более высокими, чем типичные земные базальты, показывающие  $\delta^{57}\text{Fe}_{\text{average}} = +0.1\text{‰}$ . (Schoenberg, Blanckenburg, 2006). Следовательно, железо в силикатной составляющей Луны тяжелее или, по крайней мере, не обеднено тяжелыми изотопами по сравнению с силикатной составляющей Земли. Это не поддерживает нашу модель.

Это одна сторона дела. Другая — это то, что силикатная составляющая Земли, т.е. мантия Земли, также содержит более высокую концентрацию тяжелых изотопов с  $\delta^{57}\text{Fe} = +0.05\text{‰}$ . (Sossi et al., 2016) по сравнению с железом хондритов, которое большинством авторов оценивается как  $\delta^{57}\text{Fe} = -0.01\text{‰}$ . (Craddock, Dauphas, 2011). Если это не результат

удаления легкого изотопа железа в ядро, то получается, что и вещество Земли, и вещество Луны аномально отличаются по изотопному составу железа от вещества хондритов. К этому выводу, собственно, и приходят некоторые исследователи. Это принципиально возможно, но не очень вероятно, так как Луна и Земля, хотя и могут несколько отклоняться по изотопному составу от хондритов, но все же в большинстве случаев совпадают или очень близки к хондритам.

К этому нужно добавить, что экспериментально было установлено, что в системе металл-силикат практически отсутствует изотопное фракционирование железа (Roskosz et al., 2006; Poitrasson et al., 2009; Hin et al., 2012).

Принятое классическое представление об образовании ядра состоит в том, что в первичном магматическом океане металлическое железо выделяется из силикатного расплава (например, Stevenson, 1990). Если аккреция происходит путем падения небольших тел, их железные ядра эмульгируются. В этом состоянии происходит возможный изотопный обмен. Капли металлического железа объединяются в крупные глобулы. Они скапливаются на дне магматического океана и затем проваливаются сквозь нижнюю мантию к ядру, без дальнейшего обмена или фракционирования. При этом в условиях температур и давлений магматического океана фракционирование изотопов железа практически не происходит.

При соударении Земли с крупными дифференцированными астероидами, их ядра тонут сквозь образовавшийся расплав и присоединяются к растущему ядру Земли. А ядра астероидов, как показывает исследование железных метеоритов, практически не отличаются от силикатной составляющей, или даже чуть изотопно тяжелее ( $\delta^{57}\text{Fe}$  от +0.01 до +0.32‰, Williams et al., 2006), что вполне согласуется с экспериментами по фракционированию изотопов железа.

Существует теоретическая оценка возможности обогащения металлического железа легким изотопом в равновесии с силикатным железом при давлениях свыше 130 GPa (Polyakov, 2009). Но это не меняет дела, поскольку подобные давления намного превосходят давления (порядка 20 GPa), имеющие место, как полагают, при разделении железа в системе металл-силикатный расплав (в магматическом океане), которое, в конечном счете, сепарируется в ядро. Иначе говоря, в рамках классической модели нет оснований рассчитывать на обеднение ядра легким изотопом железа в процессе его образования.

В отличие от классических представлений модель аккреции из газо-пылевого облака не только допускает, но и предсказывает, как отмечалось выше, разделение изотопов между земной мантией и ядром. Наблюдаемое обогащение земной

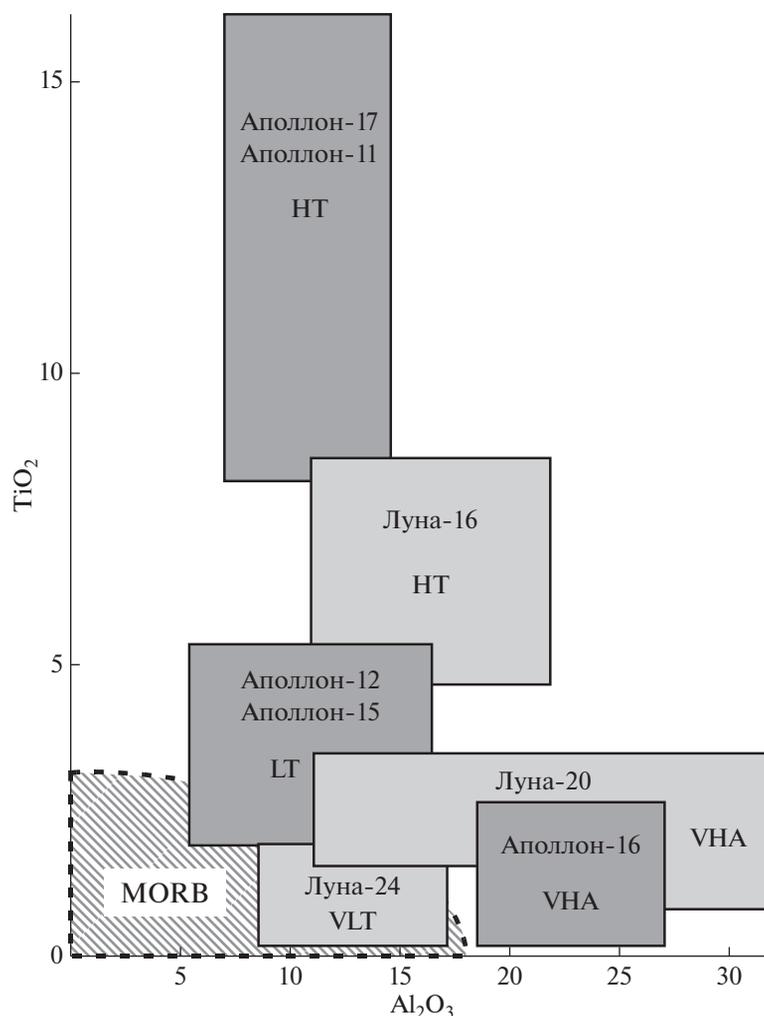


Рис. 2. Состав лунных базальтов в координатах  $TiO_2$ – $Al_2O_3$ , доставленных космическими станциями “Аполлон” и “Луна” в сравнении с соответствующим составом земных базальтов срединно-океанических хребтов (MORB).

мантии тяжелыми изотопами железа согласуется с этим. Но как быть с имеющимися данными по лунным базальтам, которые, казалось бы, вопреки нашей гипотезе показывают более высокое обогащение Луны тяжелыми изотопами железа, чем силикатная Земля?

### ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ VLT-БАЗАЛЬТОВ

Здесь нужно сказать об одной важной особенности лунной геохимии. Как известно, Луна по сравнению с Землей обогащена тугоплавкими элементами — это Ca, Al, Ti. На рис. 2 показаны составы лунных базальтов, доставленных миссиями “Аполлон” и “Луна” в сравнении с составами типичных земных базальтов. Лунные базальты обогащены Ti. На Земле нет базальтов в такой степени, обогащенных титаном. Ильменит ( $FeTiO_3$ ) — распространенный минеральный компонент лун-

ных базальтов. Содержащие ильменит базальты заметно обогащены тяжелыми изотопами железа. Эта связь не прямая. Сам ильменит не обогащен тяжелым изотопом относительно фаялита (Sossi, O’Neill, 2017). Но базальты, содержащие ильменит, являются наиболее поздними в эволюционном ряду кристаллизации магматических пород (Snyder et al., 1992). При этом известно, что расплав обогащается тяжелыми изотопами железа по мере кристаллизации (Weyer, Ionov, 2007).

Среди лунных базальтов выделяют три категории: высоко-титанистые базальты (HT — high titanium), низко-титанистые (LT — low titanium) и очень низко-титанистые (VLT — very low titanium) базальты (рис. 2).

Аналогом земных базальтов типа базальтов срединно-океанических хребтов, так называемых MORB, могут быть лишь очень низко-титанистые лунные базальты (VLT).

На Земле базальты срединно-океанических хребтов, являются прямым продуктом плавления мантии Земли. Это — наиболее высокомагнезиальные и низко-титанистые базальты среди земных базальтов. Аналогично этому, лунные VLT-базальты генетически наиболее близки к первичному источнику (Snyder et al., 1992). Это — также высокомагнезиальные и наиболее низко-титанистые базальты (Vaniman, Parike, 1977).

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

Так возникла задача исследования очень низко-титанистых лунных базальтов (VLT). Очень низко-титанистые базальты мало распространены на поверхности Луны. Их источник находится на глубине 200–400 км (Taylor, Jakes, 1974).

На Земле проявления базальтов срединно-океанических хребтов обширны. Они занимают огромные пространства дна океана. Но лунная геология сложилась иначе. Крупные ударные бассейны, возникшие на Луне 4–3.5 млрд лет назад, известные нам как лунные моря, были заполнены лавой, представлявшей собой остаточную от фракционной кристаллизации высоко-титанистую жидкость. Поэтому высоко-титанистые базальты оказались типичными базальтами на лунной поверхности, хотя занимают не более 1% объема лунной коры, а действительно представительные для Луны VLT-базальты мало проявлены на поверхности. Как отмечалось, в американской коллекции они имеются только в образцах “Apollo-17”. Изотопный состав железа в них не измерялся. В нашей лунной коллекции в грунте “Луны-24” описаны очень низко-титанистые базальты (Barsukov, 1977; Grove, 1978). “Луна-24” отобрала образец в базальтовом покрове моря Кризисов. Это — один из наиболее древних бассейнов Луны, возраст которого около 3.9 миллиарда лет.

## РЕЗУЛЬТАТ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изотопный анализ железа VLT-базальта Луны-24, выполненный в рамках исследования образцов Луны-16, Луны-20 и Луны-24 (Okabayashi et al., 2019), дал величину  $\delta^{57}\text{Fe} = +0.08\%$ . Эта величина меньше, чем величина  $\delta^{57}\text{Fe} = +0.10\%$ , характеризующая земные базальты срединно-океанических хребтов (MORB). Воспроизводимость изотопного анализа составляет  $2\sigma = \pm 0.03\%$ , но при многократных измерениях (соответствующие пробы в нашем образце L24130 измерялись 17 раз, Okabayashi et al., 2019) достоверная точ-

ность (по Стьюденту) приближается к  $\pm 0.01\%$ . Значит, железо лунной мантии, которое мы отождествляем с исходным железом для Луны и Земли, действительно изотопно легче железа земной мантии. Поскольку изотопные составы железа Земли и Луны в целом, как мы полагаем, одинаковы, избыток тяжелого изотопа в мантии Земли 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 ( $\delta^{57}\text{Fe}$  от  $-0.029$  до  $-0.014\%$ , Poitrasson et al., 2004). Вероятно, тугоплавкие зеленые вулканические стекла представляют вещество глубоководных магм, являющихся источником VLT-базальтов. Значительную отрицательную величину показал дунит ( $\delta^{57}\text{Fe} = -0.50\%$ , Wang et al., 2015).

На Земле почти все мантийные субстраты показывают положительные значения  $\delta^{57}\text{Fe}$ . Образцы земных коматиитов и лерцолитов имели значения  $\delta^{57}\text{Fe} = +0.05\%$ , дунит  $\delta^{57}\text{Fe} = +0.035\%$  (Dauphas et al., 2010). Все это указывает на то, что земная мантия обогащена тяжелым изотопом железа по отношению к Луне и хондритам.

## ВЫВОД

Впервые выполнен анализ изотопного состава железа очень низко-титанистых лунных базальтов (VLT) на материале, доставленном космическим аппаратом Луны-24.  $\delta^{57}\text{Fe}$  лунных (VLT)-базальтов, наиболее достоверно отражает изотопный состав железа лунной мантии, подобно тому, как  $\delta^{57}\text{Fe}$  срединно-океанических базальтов Земли (MORB) отражает изотопный состав железа земной мантии. Поскольку из полученных данных следует, что  $\delta^{57}\text{Fe}$  железа силикатной Земли (Bulk silicate Earth) выше, чем  $\delta^{57}\text{Fe}$  (Bulk silicate Moon), то это с высокой степенью вероятности указывает на обогащение земного ядра легким изотопом железа. А это, в свою очередь, хорошо согласуется с нашей моделью формирования системы Земля–Луна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Barsukov V.L. (1977) Preliminary data for the regolith core brought to the Earth by the automatic lunar station Luna 24. In *8th Lunar and Planetary Science Conference*, 3303-3318.
- Canap R.M. (2006) Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. *Science*. **338**, 1052-1055.
- Canap R.M., Asphaug E. (2001) Origin of the Moon in a Giant impact near the end of the Earth's formation. *Nature*. **411**(6848), 708-712.

- Craddock P.R., Dauphas N. (2011) Iron Isotopic Compositions of Geological Reference Materials and Chondrites. *Geostand. Geoanalytical Res.* **35**, 101-123.
- Cuk M., Stewart S.T. (2012) Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning. *Science*. **338**, 1047-1052.
- Dauphas N., Teng F.Z., Arndt N.T. (2010) 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*. **74**, 3274-3291.
- Elardo S.M., Shahar A. (2017) Non-chondritic iron isotope ratios in planetary mantles as a result of core formation. *Nat. Geosci.* **10**, 317-321.
- Galimov E.M. (2011) 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). *Geochem. Int.* **49**(6), 537-554.
- Galimov E.M., Krivtsov A.M. (2012). *Origin of the Moon. New Concept: Geochemistry and Dynamics*. Walter de Gruyter.
- Grove T.L. (1978) Cooling histories of Luna 24 very low Ti (VLT) ferrobasalts: An experimental study. *Proc. Lunar Sci. Conf.* **9**, 565-584.
- Hartmann W.K. and Davis D.R. (1975) Satellite-sized planets and Lunar origin. *Icarus*. **24**, 504-515.
- Hashimoto A. (1983) Evaporation metamorphism in the early solar nebula. Evaporation experiments on the melt FeO–MgO–SiO<sub>2</sub>–CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and chemical fractionations of primitive materials. *Geochem. J.* **17**, 111-145.
- Hin R.C., Schmidt M.W., Bourdon B. (2012) 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*. **93**, 164-181.
- Okabayashi S., Yokoyama T., Hirata T., Terakado K., Galimov E. (2019) Iron isotopic composition of very low-titanium basalt deduced from iron isotopic signature in Luna 16, 20 and 24 soils. *Geochim. Cosmochim. Acta*, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.10.020>
- Poitrasson F., Roscoz M., Corgne A. (2009) Non iron isotope fractionation between molten alloys and silicate melt to 2000 degrees C and 7.7 Gpa: experimental evidence and implications for planetary differentiation and accretion. *Earth Planet. Sci. Lett.* **278**, 376-385.
- Poitrasson F. (2007) Does planetary differentiation really fractionate iron isotopes? *Earth Planet. Sci. Lett.* **256**, 484-492.
- Poitrasson F., Halliday A.N., Lee D.C., Levasseur S., Teutsch N. (2004) Iron isotope differences between Earth, Moon, Mars and Vesta as possible records of contrasted accretion mechanisms. *Earth Planet. Sci. Lett.* **223**, 253-266.
- Polyakov V.B. (2009) Equilibrium iron isotope fractionation at core-mantle boundary conditions. *Science*. **323**(5916), 912-914.
- Roskosz M., Watson H.C., Mysen B.O., Luais B.2., Toplis M.J. (2006). Experimental quantification of the fractionation of Fe isotopes during metal segregation from a silicate melt. *Earth Planet. Sci. Lett.* **248**, 851-867.
- Schoenberg R., Blanckenburg F. von (2006) Modes of planetary-scale Fe isotope fractionation. *Earth Planet. Sci. Lett.* **252**, 342-359.
- Snyder G.A., Taylor L.A., Neal C.R. (1992) A chemical model for generating the sources of mare basalts: Combined equilibrium and fractional crystallization of the lunar magma sphere. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **56**, 3809-3823.
- Sossi P.A., Nebel O., Foden J. (2016) Iron isotope systematics in planetary reservoirs. *Earth Planet. Sci. Lett.* **452**, 295-308.
- Sossi P.A., O'Neill H.S.C. (2017) The effect of bonding environment on iron isotope fractionation between minerals at high temperature. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **196**, 121-143.
- Stevenson D.J. Models of the Earth's Core. (1981) *Science*. **214**(4521), 611-619.
- Taylor S.R., Jakes P. (1974) The geochemical evolution of the moon. In: Lunar Science Conference, 5th, Houston, Tex., March 18–22. New York, *Pergamon Press*. **2**, 1287-1305.
- Wang K., Jacobsen S.B., Sedaghatpour F., Chen H., Korotev R.L. (2015) The earliest Lunar Magma Ocean differentiation recorded in Fe isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.* **430**, 202-208.
- Weyer S., Anbar A.D., Brey G.P., Münker C., Mezger K., Woodland A.B. (2005) Iron isotope fractionation during planetary differentiation. *Earth Planet. Sci. Lett.* **240**, 251-264.
- Weyer S., Ionov D.A. (2007) Partial melting and melt percolation in the mantle: The message from Fe isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.* **259**, 119-133.
- Wiesli R.A., Beard B.L., Taylor L.A., Johnson C.M. (2003) Space weathering processes on airless bodies: Fe isotope fractionation in the lunar regolith. *Earth Planet. Sci. Lett.* **216**, 457-465.
- Williams H.M., Markowski A., Quitté G., Halliday A.N., Teutsch N., Levasseur S. (2006) Fe isotope fractionation in iron meteorites: New insights into metal-sulphide segregation and planetary accretion. *Earth Planet. Sci. Lett.* **250**, 486-500.