

МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ЖЕЛЕЗО В БАЗАЛЬТАХ ЛАВОВОЙ РЕКИ МАЛОГО ЕНИСЕЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОМАГНИТНОГО ИЗУЧЕНИЯ

© 2020 г. Д. М. Печерский¹, А. Ю. Казанский², А. М. Козловский³,
Д. М. Кузина⁴, Г. П. Марков^{1, *}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

³ИГЕМ РАН, г. Москва, Россия

⁴Казанский Федеральный университет, г. Казань, Россия

*E-mail: gmarkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.08.2019 г.

После доработки 12.12.2019 г.

Принята к публикации 22.12.2019 г.

Выполнен термомагнитный анализ образцов из двух разрезов лавовой толщи позднекайнозойской базальтовой лавовой реки долины Малого Енисея. Основным носителем намагниченности исследуемых базальтов является титаномагнетит с точками Кюри 100–120°C, который часто заметно окислен как однофазно, так и гетерофазно вплоть до магнетита. Вероятно, что некоторая часть металлического железа в исследуемых образцах также была окислена и даже уничтожена, что привело к заметному разбросу концентраций железа по потоку, на фоне которого, тем не менее, видна тенденция роста концентрации железа сверху вниз по потоку. Относительная величина такого роста (градиент концентрации по вертикали лавового потока) практически постоянна для всех потоков лавовой толщи, что, очевидно, свидетельствует об определяющей роли гравитации при осаждении частиц железа в лаве. Из обобщения данных о частицах железа из разных объектов и разных регионов мира такая связь с гравитацией следует также из очень сходного вида гистограмм размеров частиц железа, особенно ярко это видно по одинаковым модам размера частиц (10–20 мкм). Важно также, что эта постоянная мода размера частиц железа не зависит от возраста, происхождения пород, а также от источника частиц (земного или внеземного).

Ключевые слова: металлическое железо, титаномагнетит, термомагнитный анализ, гравитационное осаждение.

DOI: 10.31857/S0002333720030072

ВВЕДЕНИЕ

Ранее [Печерский и др., 2018] при термомагнитном изучении базальтов лавовой реки Жом-Болок (Восточный Саян) было обнаружено вполне естественное, но не совсем очевидное явление: в жидком лавовом расплаве происходит осаждение относительно тяжелых частиц металлического железа, что и было подтверждено по обнаруженному росту концентрации железа сверху вниз лавового потока. Средняя концентрация железа по серии разрезов лавовой реки Жом-Болок в нижней части потоков в несколько раз превышает таковую в верхней части.

Сводная картина распределения концентраций железа по вертикальному разрезу четырех лавовых потоков Жом-Болока, представленная на рис. 1а, показывает, что, несмотря на большой разброс данных, достаточно отчетливо виден тренд роста концентрации железа сверху вниз по-

токов. Более наглядную картину изменения концентрации железа по вертикальному разрезу потоков показывает сравнение средних значений концентрации железа в трех частях разреза потоков: в верхней, средней и нижней (рис. 1б).

На наш взгляд, полученный в работе [Печерский и др., 2018] результат (рис. 1), представляет несомненный интерес для геофизики, поскольку он, по-видимому, свидетельствует об определяющем влиянии земной гравитации на процесс осаждения железных частиц в жидкой базальтовой лаве.

Однако следует отметить, что количество отобранных образцов базальтов лавовой реки Жом-Болок с каждого потока было весьма ограниченным: 2–3 образца на поток (верх, середина и низ потока). Поэтому возникла необходимость подтвердить полученные результаты на более представительной коллекции базальтовых образцов.

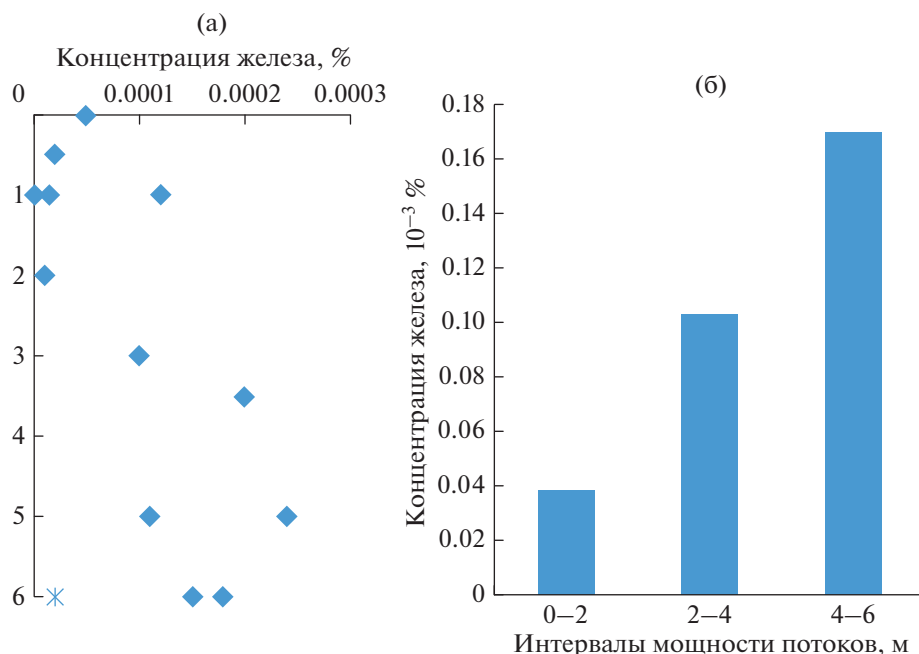


Рис. 1. Суммарное распределение концентраций железа по разрезу (а) и средняя концентрация железа в верхней (0–2 м), средней (2–4 м) и нижней (47–6 м) частях вертикального разреза 4-х потоков лавовой реки Жом-Болок (б).

Данная работа посвящена терромагнитному исследованию металлического железа в образцах базальтов лавовой реки Малого Енисея.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лавовая река долины Малого Енисея (Ка-Хем и Кызыл-Хем) – крупнейший поздне-кайнозойский долинный лавовый поток Южно-Байкальской вулканической области Центральной Азии [Ярмолюк и др., 2004; Yarmolyuk et al., 2015]. Его протяженность составляет около 175 км (рис. 2). Вулканический центр расположен в верхнем течении р. Кызыл-Хем и сейчас представляет собой руины шлакового конуса, полностью перекрытого массивными лавами. Лавовые потоки сосредоточились в пределах узкой V-образной долины шириной, редко превышающей 2 км. В настоящее время лавовая толща полностью прорезана рекой на всем ее протяжении. В цоколе лавовой террасы обнажаются преимущественно раннепалеозойские гранитоиды Каахемского батолита. Общая мощность лавовой толщи изменяется от 350 м вблизи вулканического конуса до 10–20 м на нижнем и верхнем окончаниях лавовой реки. При этом мощность отдельных потоков варьирует от первых метров до 40 м. Границы лавовых потоков отчетливо фиксируются по маломощным (до 0.5 м) шлаковым зонам в кровле потоков. Иногда лавовые потоки разделяются горизонтами аллювиальных песков. В строении потоков мощностью более 15 м выделяются зоны с различ-

ной отдельностью: горизонтальной плитчатой, вертикальной столбчатой, веерной, глыбовой. Очевидно, такая зональность отвечает разной геологии лав внутри мощных потоков.

Петрографически вулканические породы лавовой реки Малого Енисея (МЕ) соответствуют порфиловым оливиновым базальтам. По размеру вкрапленники оливина достигают 1.5 мм, они составляют около 10% объема породы. Основная масса преимущественно хорошо раскристаллизована и состоит из микролитов оливина, клинопироксена, плагиоклаза и титаномагнетита. Иногда в подошве лавовых потоков отмечаются породы с доминированием вулканического стекла. Породообразующие минералы и вулканическое стекло практически не затронуты вторичными изменениями.

Возраст лавовых излияний был определен К–Аг методом по основной массе базальтов, отобранных в нижней и верхней частях лавовой толщи в среднем течении лавовой реки, и составил 280 ± 40 и 260 ± 40 тыс. лет [Ярмолюк и др., 2003].

Образцы для терромагнитных исследований отбирались в двух разрезах лавовой толщи в 33 км (I на рис. 2) и 45 км (II на рис. 2) ниже вулканического центра в точках с координатами 51.3827° с.ш. 97.3851° в.д. и 51.3487° с.ш. 97.2534° в.д. соответственно. Образцы отбирались непосредственно из обрывов лавовых потоков, где отчетливо фиксировались подошва и кровля, в направлении снизу вверх потока через близкие промежутки по мощности. Нижние потоки лавовой реки скрыты

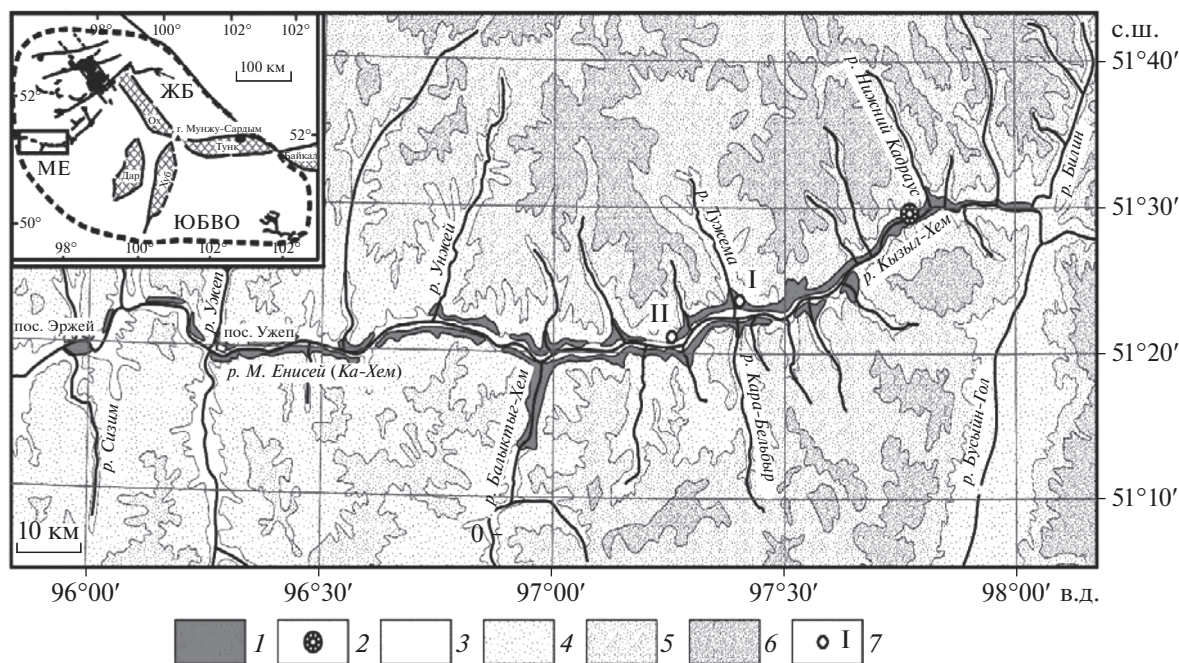


Рис. 2. Схема размещения лавовых потоков в долине р. Малый Енисей по работе [Ярмолюк и др., 2004]: 1 – лавы; 2 – центр излияний; 3–6 – высотные уровни рельефа (3 – <1000 м; 4 – 1000–1500 м; 5 – 1500–2000 м; 6 – >2000 м); 7 – участки опробования. На врезке показано положение лавовых рек Малых Енисей (МЕ) и Жом-Болок (ЖБ) в системе позднеплиоценовых–голоценовых вулканических проявлений Южно-Байкальской вулканической области (ЮБВО).

под осыпями, поэтому опробование было возможно только на 50–80 м выше подошвы лавовой толщи. В первом разрезе в устье р. Тужема в четырех потоках (МЕ-10/1, МЕ-10/2, МЕ-10/3 и МЕ-10/4) мощностью 6, 15, 25 и 5 м были отобраны соответственно 6, 6, 9 и 6 образцов. Во втором разрезе были опробованы два мощных потока (МЕ-10/5 и МЕ-10/6), около 20 и 36 м по 5 и 9 образцов соответственно.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования металлического железа в образцах базальтов лавовой реки Малого Енисея проводились с помощью хорошо известного метода – термомагнитного анализа (ТМА). Для повышения достоверности результатов ТМА отобранных образцов базальтов проводился параллельно в двух лабораториях: лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН (г. Москва) и в Палеомагнитной лаборатории Казанского Федерального университета. В Москве ТМА проводился на (термо)вибромагнитометре конструкции Н.М. Аносова и Ю.К. Виноградова, в Казани – на магнитных (термо)весах Кюри конструкции Б.В. Бурова и П.Г. Ясонова. Следует отметить, что эти приборы существенно отличаются по массе (и объему) исследуемых образцов: 2–2.5 г для вибромагнитометра в Москве и ~0.1 г для весов Кюри в Казани. Чувствительности обоих при-

боров по удельной намагниченности примерно одинаковы: $\sim 10^{-5}$ Ам²/кг. Точность определения точки Кюри $\sim 5^\circ$. Учитывая, что удельная намагниченность насыщения M_s железа при 20°C равна 217.5 Ам²/кг [Vozorth, 1951], нижний предел измерения концентрации железа для обоих приборов $\sim 10^{-5}$ мас. %.

ТМА представляет непрерывные измерения магнитного момента образца M в постоянном магнитном поле 0.6 Тл (вибромагнитометр) и 0.4 Тл (весы Кюри) при нагреве образца на воздухе со скоростью 60°/мин от комнатной температуры до 800°C и последующего охлаждения до комнатной температуры на вибромагнитометре и со скоростью 100°/мин на весах Кюри.

Типичные кривые ТМА, полученные на вибромагнитометре и весах Кюри, приведены на рис. 3.

Для оценки концентрации железа в образце кривая нагрева $M(T)$ продолжается (экстраполируется) от точки Кюри самородного железа 700–780°C до точки Кюри гематита (670°C), ниже которой кривая $M(T)$ обычно существенно меняется из-за присутствия в образце гематита, магнетита и других магнитных минералов с более низкими точками Кюри. Разница ΔM между экстраполированной кривой и кривой нагрева при 670°C, нормированная на массу образца m , есть величина, близкая к удельной намагниченности насыщения M_s железа в образце, поскольку термомагнитные

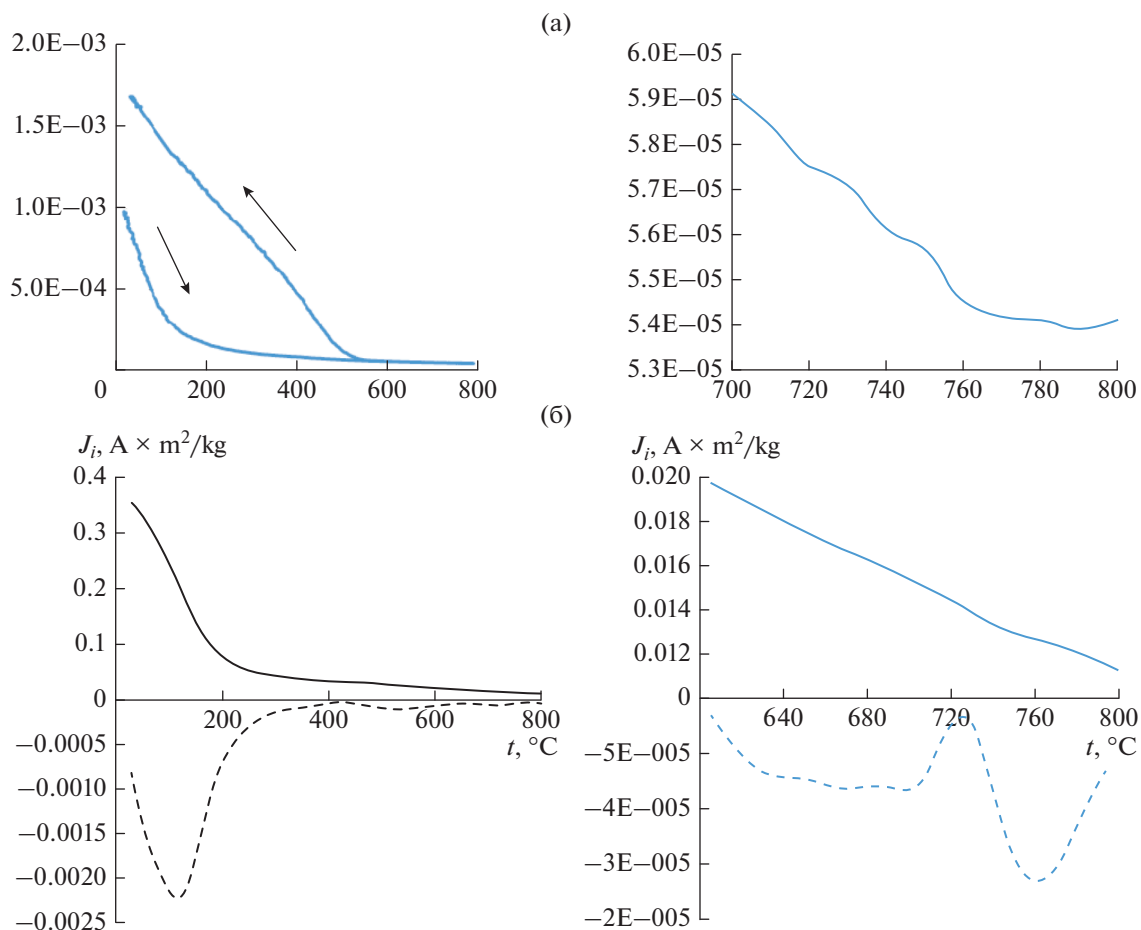


Рис. 3. Типичные кривые ТМА, полученные на вибромагнитометре (а) и весах Кюри (б). Справа показаны в увеличенном масштабе участки кривых в районе температуры Кюри железа.

измерения проводились в магнитном поле насыщения для железа. Опыт проведения ТМА показывает, что полученная таким образом величина намагниченности ΔM несущественно отличается от таковой при экстраполяции кривой до комнатной температуры. Это тем более несущественно, учитывая, что в исследуемых базальтах концен-

трация железа часто ниже $10^{-4}\%$. Отношение величины $\Delta M/m$ к удельной намагниченности насыщения чистого железа ($217.5 \text{ Ам}^2/\text{кг}$) есть примерное относительное содержание последнего в образце.

Разумеется, точность вышеописанного определения концентрации железа в образце невысока, но ее вполне достаточно при колебаниях концентрации железа в изученных породах на порядки. Отметим, что недостаток ТМА в точности определения концентрации компенсируется простотой самого метода, а также простотой подготовки образцов для измерений, быстротой и массой получения данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На приведенных ниже рисунках (рис. 3—рис. 5, рис. 7—рис. 9) представлены гистограммы, показывающие распределение числа исследуемых образцов по какому-либо определяемому при ТМА параметру (точке Кюри, концентрации и др.). По

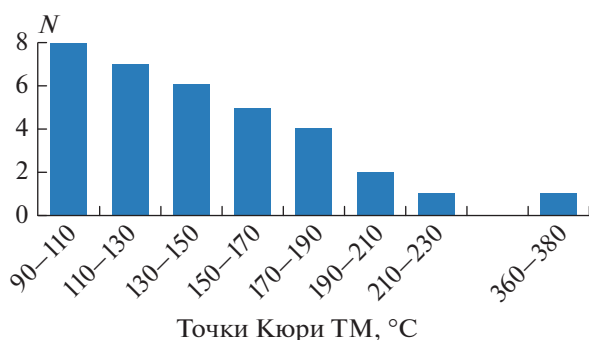


Рис. 4. Гистограмма точек Кюри титаномagnetитов базальтов Малого Енисея.

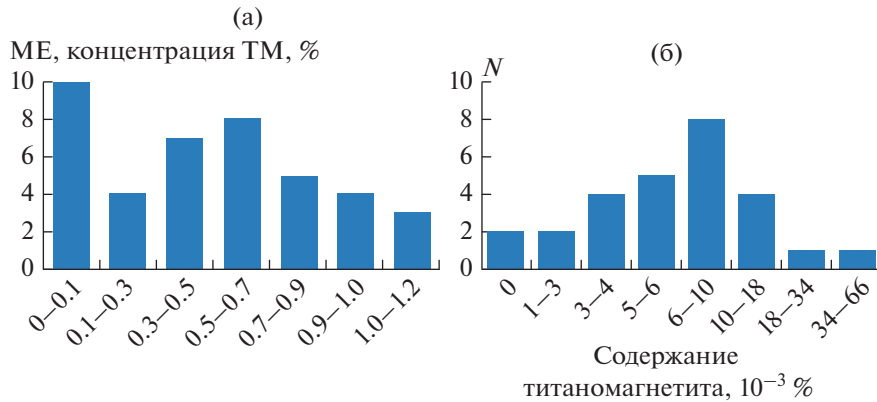


Рис. 5. Гистограммы концентрации титаномагнетита в базальтах Малого Енисея (а) и Жом-Болока (б).

оси ординат на этих рисунках везде отложено число образцов N , имеющих определенное значение параметра. Будем называть эти рисунки просто *гистограммами или распределениями параметра* (точек Кюри, концентрации и т.д.).

Проведенный ТМА образцов базальтов Малого Енисея (МЕ) показал, что основным носителем намагниченности исследуемых базальтов является первично-магматический титаномагнетит (рис. 4, рис. 5) с точками Кюри 100–120°C, которые соответствуют глубине магмового очага порядка 60 км (55–65 км) [Печерский, Диденко, 1995].

Вид гистограммы точек Кюри (T_c) титаномагнетитов (ТМ) с плавным спадом N при увеличении T_c (рис. 4) объясняется однофазным окислением первично-магматического титаномагнетита. Дальнейшее гетерофазное окисление титаномагнетита ведет к появлению минерала, близкого к магнетиту, и исчезновению титаномагнетита. Последнее наглядно демонстрирует рис. 5, где на фоне нормального распределения концентрации титаномагнетита с модой 0.5–0.7% выделяется “аномальная” нулевая серия образцов, в которых титаномагнетит отсутствует из-за его вторичного окисления. Интересно отметить, что такой значительной “нулевой” группы не наблюдается в базальтах Жом-Болока (рис. 5б), т.е. они заметно меньше окислены, чем базальты Малого Енисея, поэтому у базальтов Жом-Болока гистограмма концентраций титаномагнетита ближе к истинной.

Образцы, в которых присутствует титаномагнетит, характеризуются заметным ростом намагниченности насыщения после нагрева образца до 800°C (рис. 6) из-за окисления последнего с образованием магнетита. У образцов, подвергшихся в исходном состоянии (до лабораторного нагрева при ТМА) гетерофазному окислению и содержащих близкий к магнетиту магнитный минерал, роста намагниченности после нагрева не происходит, наблюдается даже спад ее, т.к. в результате лабораторного нагрева до 800°C какая-то часть

магнетита окисляется до гематита, из-за чего намагниченность после нагрева падает (левый столбик на рис. 6).

Это важно подчеркнуть, потому что гетерофазно окисленные *in situ* образцы, не содержащие титаномагнетита, а только магнетит, очень часто не содержат и металлического железа, которое, очевидно, как и титаномагнетит, уничтожено в результате природного окисления базальта (табл. 1). При этом связь концентраций ТМ и железа отсутствует, что подчеркивается очень малым коэффициентом корреляции концентраций ТМ и железа (–0.045). Представленные в табл. 1 данные демонстрируют кажущуюся связь концентрации железа с концентрацией титаномагнетита, обусловленную одинаковым влиянием окисления на железо и титаномагнетит.

В базальтах Малого Енисея, как и во всех других изученных земных и лунных объектах, преобладает близкое к чистому железу с $T_c > 760^\circ\text{C}$ (рис. 7). Однако, по сравнению с остальными магматическими объектами, представленными на рис. 7, в частицах железа базальтов Малого Енисея и Жом-

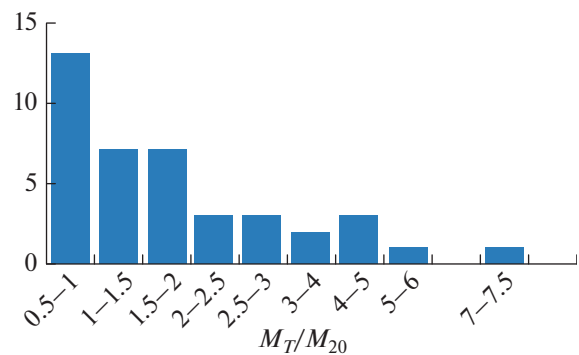


Рис. 6. Гистограмма отношения намагниченности насыщения после нагрева образца до 800°C (M_T) к ее исходной величине (M_{20}).

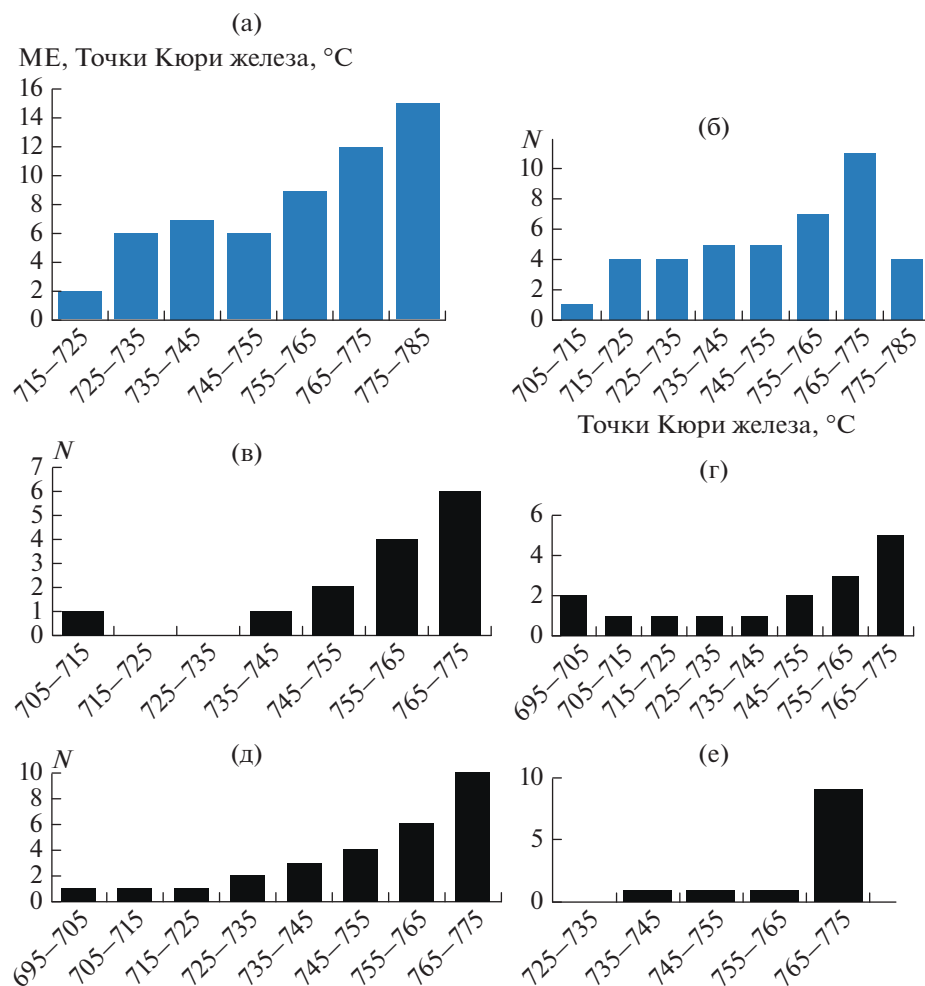


Рис. 7. Гистограммы точек Кюри железа в базальтах Малого Енисея (а); Жом-Болока (б); в гипербазальтах разных регионов (в); в сибирских траппах (г); в океанских базальтах разных регионов (д) [Печерский и др., 2017]; в лунных базальтах (е) [Nagata et al., 1974].

Болока присутствует наибольшее количество примесей, что выражается в более заметном вкладе точек Кюри 720–750°C (рис. 7а, 7б). С другой стороны, точки Кюри 775°C и выше, очевидно, обязаны небольшой примеси кобальта в железе.

Остановимся немного подробнее на распределении концентрации железа в вертикальном разрезе каждого лавового потока МЕ по данным ТМА (рис. 8).

В жидкой базальтовой лаве тяжелые частицы металлического железа должны тонуть, что и отражается в полученных данных, представленных

на рис. 8 и в табл. 2. Правда, на рис. 8 видна только общая тенденция роста концентрации железа сверху вниз по потоку, наиболее заметная в потоках МЕ-1, 3, 5. Эта тенденция нарушается в потоках МЕ-4, 6, и полностью отсутствует в потоке МЕ-2 (рис. 7).

В перечисленных в табл. 2 интервалах мощности четырех потоков градиенты роста концентрации сверху вниз разреза достаточно близки, что свидетельствует в пользу определяющего действия силы тяжести (постоянного ускорения свободного падения) при осаждении частиц железа в

Таблица 1. Кажущаяся связь концентрации железа с концентрацией титаномагнетита в базальтах

Содержание ТМ, %	Пределы C_{Fe} , $10^{-3}\%$	Среднее C_{Fe} , $10^{-3}\%$	Число образцов без железа
0–0.05	0–0.13	0.037 ($N = 20$)	11
0.06–1.2	0–0.20	0.102 ($N = 18$)	3

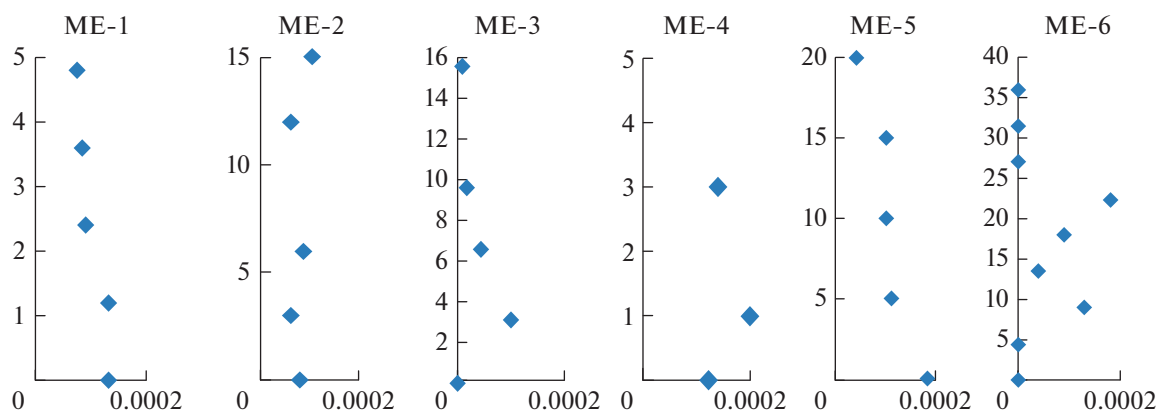


Рис. 8. Распределение железа по вертикали в 6 лавовых потоках Малого Енисея. По оси абсцисс отложена концентрация железа в %, по оси ординат – вертикальная мощность потоков в м. (Не показаны нулевые результаты, когда нет титаномагнетита и железа, которые, очевидно, уничтожены при вторичном окислении).

жидкой лаве. Отметим, что в остальных интервалах мощности потоков, (неуказанных в табл. 2, закономерный рост концентрации железа сверху вниз отсутствует, что, по-видимому, может быть связано, в частности, с заметным отличием движения лавы от ламинарного. Конечно, не следует также исключать тривиальную причину большого разброса результатов и отсутствия закономерного роста концентрации железа сверху вниз потока – это очень низкое содержание железа в образцах, близкое к пределу чувствительности измерительной аппаратуры, и, соответственно, большие погрешности в определении концентрации железа в базальтах Малого Енисея.

Выше отмечалось, что ТМА образцов базальтов Малого Енисея проводился параллельно на дублях образцов в двух лабораториях, в которых исследуемые образцы заметно отличались по массе и размеру. Очевидно, было бы интересно сравнить данные ТМА о концентрации железа в двух лабораториях, т.е. в двух вариантах размера и массы образцов: ~2.5 г (рис. 9а) и ~0.1 г (рис. 9б).

В случае “больших” образцов (рис. 9а) для железа, как и для титаномагнетита, на гистограммах выделяются две группы образцов: первая характе-

ризуется пониженной (почти нулевой) концентрацией железа (от 0 до 0.00002%) и относится к образцам с заметным вторичным окислением; вторая группа относится к титаномагнетитовым образцам и, очевидно, отражает истинное распределение железа в базальтах, оно логнормальное, мода 0.00008–0.00016%. Заметим, что в базальтах Жом-Болока, в которых вторичное окисление и титаномагнетита, и железа заметно слабее, распределение содержания железа одномодальное и близкое к логнормальному, мода 0.003–0.004% (рис. 9в).

Совершенно иная картина наблюдается для “маленьких” образцов (рис. 9б), в половине которых железо полностью отсутствует, в остальных образцах случайно разбросаны единичные определения низкой концентрации железа между 0.00001 и 0.0009%, что отражает неравномерность распределения железа в базальтах, где расстояние между частицами железа может быть сопоставимо с размером “маленьких” образцов. Соответственно, между концентрациями железа в “больших” и “маленьких” образцах отсутствует связь, коэффициент корреляции $r = -0.024$. При этом средние концентрации железа и в “маленьких”, и в

Таблица 2. Градиент роста концентрации железа C_{Fe} сверху вниз в выделенных интервалах мощности трех потоков базальтов Малого Енисея (см. рис. 7)

Поток	Интервал мощности потока с ростом C_{Fe} , м	Разность $C_{Fe} \times 10^{-5}$, % C_{Fe} (низ)– C_{Fe} (вверх)	Градиент роста $C_{Fe} \times 10^{-5}$, %/м
ME-1	2.4–1.2	2	1.7
ME-3	9.0–3.3	9	1.6
ME-5	5.0–0	9	1.8

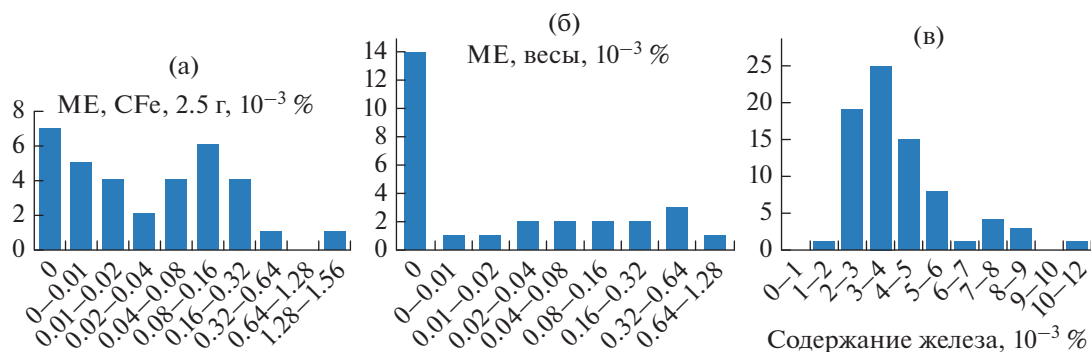


Рис. 9. Гистограмма концентрации металлического железа в образцах базальтов Малого Енисея массой ~2.5 г (а); ~0.1 г (б) и в базальтах Жом-Болока (в).

“больших” образцах, практически, одинаковы: 0.00009 и 0.00008% (табл. 3).

Представленные в табл. 3 обобщенные данные о концентрации железа в различных магматических образованиях из разных регионов нашей страны показывают достаточно широкие вариации концентрации железа в разных объектах как предельных значений, так и средних величин. При этом максимальные концентрации железа наблюдаются в океанских базальтах, меньше в Сибирских траппах и гипербазитах, а минимальные – в базальтовых лавах Жом-Болока и Малого Енисея (табл. 3).

Обращает на себя внимание сходство гистограмм размеров частиц железа в различных породах (рис. 10), наиболее ярко это сходство проявляется в одинаковых модах размера частиц (10–20 мкм). Особенно важно, что распределение по размеру и мода размера не зависят от происхождения и возраста пород (молодые океанские базальты, пермо-триасовые траппы, древние гипербазиты), а также не зависят от источника частиц железа (земного или внеземного).

На наш взгляд, этот результат можно объяснить только одним определяющим такое распределение фактором – силой тяжести Земли. Следо-

вательно, по гистограмме размера частиц железа (мода размера), очевидно, можно восстановить величину силы тяжести, точнее – ускорения свободного падения, а значит и массу планеты – источника частиц железа как в базальтовой лаве, так и в осадках.

Следует заметить, что при этом размер частиц железа определяется в шлифе, значит информация о размере частиц железа в большой степени не зависит от их вторичных изменений, в отличие от существенно зависимых от сохранности материала точек Кюри и концентрации частиц металлического железа. Соответственно, появляется уникальная возможность по среднему размеру частиц железа проследить величину ускорения свободного падения на Земле за длительный промежуток времени, например, 3–4 млрд лет.

Для оценки зависимости моды размера частиц железа от ускорения свободного падения, необходимо смоделировать распределение размеров частиц железа в совершенно одинаковых жидких средах, отличающихся только разными ускорениями свободного падения, т.е. разными размерами (массами) планет – источников частиц железа. Затем построить такие гистограммы по доступным для измерений образцам, например, с

Таблица 3. Концентрация железа C_{Fe} в различных магматических объектах

Объект	Пределы C_{Fe} , $10^{-3}\%$	Число образцов	Среднее C_{Fe} , $10^{-3}\%$
Океанские базальты	0–18.0	21	1.2
Сибирские траппы	0–5.5	37	0.61
Гипербазиты	0–3.0	45	0.18
Базальты Жом-Болока	0–0.5	28	0.07
Базальты Малого Енисея, (2.5 г)	0–0.4	39	0.09
Базальты Малого Енисея, (0.1 г)	0–0.9	39	0.08

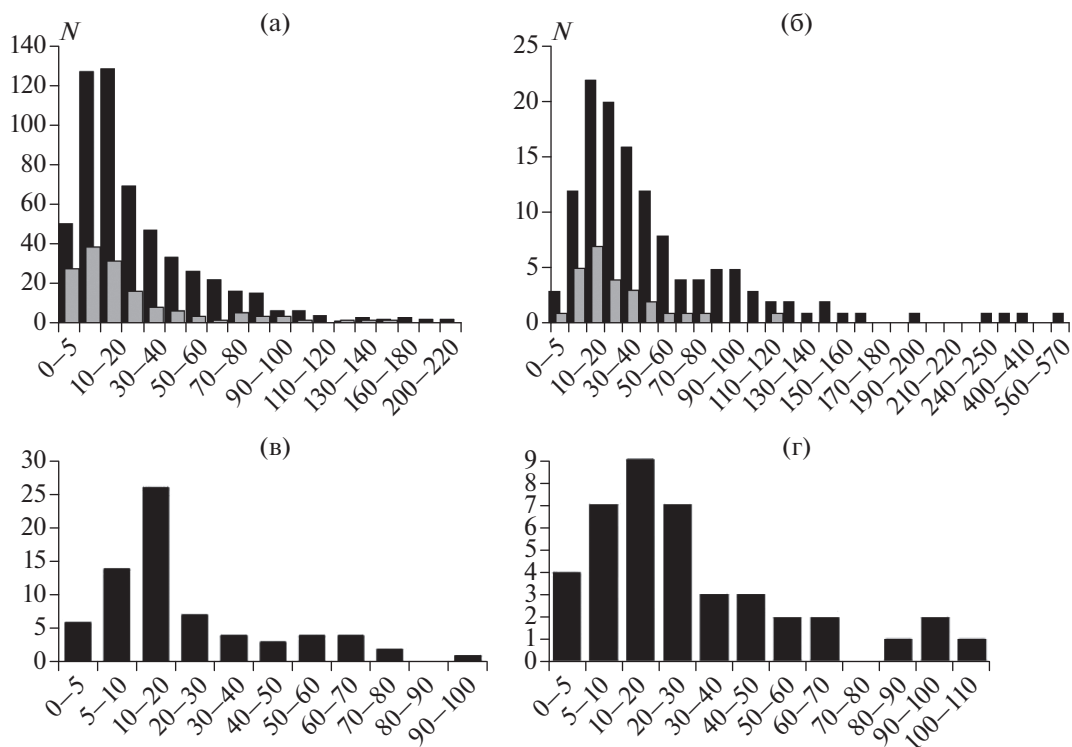


Рис. 10. Гистограммы размеров частиц самородного железа (в мкм), содержащего (серые) и не содержащего (черные) примесь никеля в осадках (а), гипербазальтах (б), траппах (в) и в океанских базальтах (г) [Печерский, 2015; Печерский и др., 2017].

Луны ($g = 1.62 \text{ м/с}^2$), Марса (3.71 м/с^2), Земли (9.807 м/с^2), из пояса астероидов (каменные метеориты) и, таким образом, связать моду размера частиц железа с ускорением свободного падения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В жидкой базальтовой лаве тяжелые частицы металлического железа должны тонуть, что нами и обнаружено в ряде интервалов мощности потоков лавовой реки Малого Енисея, несмотря на большой разброс результатов, вызванных разными причинами, в частности, заметным отличием движения лавы от ламинарного, вторичным окислением зерен железа и др. В ряде интервалов мощности потоков градиенты роста концентрации железа сверху вниз потоков очень близки ($1.6\text{--}2 \times 10^{-5}\%$ /м), что, по-видимому, свидетельствует в пользу определяющего действия силы тяжести, ведущей к оседанию частиц железа в жидкой лаве. А по силе тяжести (ускорению свободного падения) можно в принципе оценить массу планеты — источника частиц железа!

К сожалению, при таком пути оценки массы планеты мы сталкиваемся с неразрешимой пока проблемой: где взять разрезы лавовых потоков с планет — источников частиц железа. Но выручает другое решение — оценка массы планеты по ги-

стограмме размера частиц железа, проще говоря, по ее моде, что можно получить по отдельным образцам базальтов, терригенных осадков, каменных метеоритов и, что очень важно, почти независимо от степени их сохранности. Решению этой проблемы — установлению связи между модой размера частиц и ускорением свободного падения — и будут посвящены дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Печерский Д.М., Диденко А.Н. Палеоазиатский океан. М.: изд-во ОИФЗ РАН. 1995. 296 с.
- Печерский Д.М. Распределение частиц самородного железа и Fe-Ni сплавов на планетах. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing. 2015. 56 с.
- Печерский Д.М., Кузина Д.М., Марков Г.П., Цельмович В.А. Самородное железо на Земле и в космосе // Физика Земли. № 5. 2017. С. 44–62.
- Печерский Д.М., Казанский А.Ю., Марков Г.П., Цельмович В.А., Щетников А.А. Редчайшее явление накопления в озерных осадках частиц металлического железа земного происхождения: Жомболокский вулканический район, Восточный Саян // Физика Земли. 2018. № 1. С. 113–127.
- Ярмолюк В.В., Аракелянц М.М., Лебедев В.А., Иванов В.Г., Козловский А.М., Лебедев В.И., Никифоров А.В., Сугорова А.М., Байкин Д.Н., Коваленко В.И. Хронология до-

линьных излияний в Южно-Байкальской вулканической области (данные К–Аг датирования) // Докл. РАН. 2003. Т. 390. № 5. С. 657–662.

Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Кудряшова Е.А., Лебедев В.И., Сугоракова А.М. Крупнейшие долинные излияния в кайнозой Азии: особенности строения, состава и условия формирования “лавовой реки” долины малого Енисея // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 3–20.

Bozorth R.M. Ferromagnetism. D. Van Nostrand Comp. Inc. Toronto-New York. 1951. 784 p.

Nagata N., Sugiura N., Fisher R.M., Schwerer F.C., Fuller M.D., Dunn J.R. Magnetic properties of Apollo 11–17 lunar materials with special reference to effects of meteorite impact.

Proceedings of the Fifth Lunar conference. 1974. V. 3. P. 2827–2839.

Pechersky D.M., Kazansky A.Yu., Kozlovsky A.M., Markov G.P., Shchetnikov A.A., Tselmovich V.A. Basalts of the Zhombolok lava river as a possible sources of metallic iron in sediments of local lakes: thermomagnetic and microprobe justification. International Conference on Paleomagnetism and Rock Magnetism (Kazan, Russia, 2–7 October, 2017).

Yarmolyuk V.V., Kudryashova E.A., Kozlovsky A.M., Lebedev V.A., Savatenkov V.M. Late Mesozoic–Cenozoic intraplate magmatism in Central Asia and its relation with mantle diapirism: Evidence from the South Khangai volcanic region, Mongolia // J. Asian Earth Sciences. 2015. V. 111. P. 604–623.

Metallic Iron in Basalts of the Malyi Yenisei Lava River: Results of Thermomagnetic Study

D. M. Pechersky^a, A. Yu. Kazansky^b, A. M. Kozlovskii^c, D. M. Kuzina^d, and G. P. Markov^{a, *}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^b*Faculty of Geology, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^c*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

^d*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

^{*}*e-mail: gmarkov@yandex.ru*

Thermomagnetic analysis of the samples from two sections of lava layers of the Late Cenozoic basalt lava river in the Malyi Yenisei valley is carried out. The main carrier of the magnetization of the studied basalts is titanomagnetite with the Curie points of 100–120° C which is frequently substantially oxidized, both single-phase and heterophase, up to magnetite. It is likely that some part of the metallic iron in the studied samples has been also oxidized and even disintegrated. This resulted in a significant scatter in iron concentration in the flow against which, however, an increasing trend of iron concentration from the top downward along the lava flow is observed. The relative magnitude of this increase (iron concentration gradient along the vertical of the lava flow) is almost constant for all flows of the lava sequence probably suggesting the decisive role of gravity in the precipitation of iron particles in the lava. Based on the synthesis of iron particle data from different objects and different regions of the world, this relationship with gravity also follows from a very similar shape of the histograms of the particle sizes of iron grains. This is most clearly seen from the same modes of particle sizes (10–20 μm). Another important fact is that this constant mode of iron particle size does not depend on age, origin of the rock, and on the source of particles (terrestrial or extraterrestrial).

Keywords: metallic iron, titanomagnetite, thermomagnetic analysis, gravitational precipitation