

УДК 550.382

ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ САМОРОДНОГО ЖЕЛЕЗА В ЗЕМНЫХ И ВНЕЗЕМНЫХ ПОРОДАХ

© 2019 г. Д. М. Печерский^{1*}, Г. П. Марков¹

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

*E-mail: diatarmp@gmail.com

Поступила в редакцию 20.06.2018 г.

Принята в печать 05.11.2018 г.

*Вместо эпитафии:
юбиляры – ровесники:
и ИФЗ РАН, и один из авторов этой статьи
Д. Печерский – оба родились в 1928 году*

Кратко рассмотрена история развития исследований самородного железа в земных горных породах и метеоритах. Обобщены и систематизированы многочисленные данные об особенностях распространения, состава и размеров частиц металлического железа в осадках и других земных породах, а также в метеоритах, полученные с помощью термомагнитного анализа с нагревом до 800 °С в сочетании с микронзондовым анализом.

Проведенные исследования показали, что частицы железа во всех исследуемых осадках имеют, как правило, внеземное происхождение. На основании статистического анализа данных термомагнитного анализа предложен ряд признаков (статистических закономерностей), свидетельствующих о внеземном происхождении подавляющего большинства частиц железа в осадках.

Сходство условий образования частиц металлического железа земного и внеземного происхождения позволили предложить петромагнитную схему строения планет по распределению в них металлического железа.

Ключевые слова: железо, никель, осадки, базальты, метеориты, термомагнитный анализ, микронзондовый анализ

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-333720192111-122>

ВВЕДЕНИЕ

Отчего происходили глобальные вымирания на Земле, в частности, отчего вымерли динозавры? Этот интересный и модный до сих пор вопрос когда-то инициировал развитие исследований распространения частиц космического самородного железа в осадочных породах, поскольку значительная часть исследователей полагает, что глобальные вымирания произошли из-за падения на Землю на границе мезозоя и кайнозоя (граница Mz/Kz) огромного астероида, от которого по всей Земле разлетелись частицы космического железа.

В Институте физики земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ) РАН все началось с того, что в начале XXI века Андрей Федорович Грачев предложил петромагнитологам нашего института Д.М. Печерскому и З.В. Шароновой принять участие в изучении осадков из знаменитого разреза

Гамс (Австрия), дабы с помощью магнитных свойств этих осадков попытаться выяснить их особенности на границе двух геологических эр. В дальнейшем в этих исследованиях были существенно расширены, во-первых, география объектов, включающих границу Mz/Kz, во-вторых, возраст отложений (от близких к современным осадкам до юры и даже кембрия), в-третьих, число и география участников исследований, это: Б.З. Асанидзе (Грузия), Б.В. Буров, Д.К. Нургалиев, Д.М. Кузина, В.А. Фомин (Казань), А.Ю. Казанский, А.М. Козловский, Г.П. Марков, И.О. Мурдмаа, (Москва), Э.А. Молостовский (Саратов), В.А. Цельмович (Борок), А.Н. Храмов (С.-Петербург), А.А. Щетников (Иркутск).

Изучение Гамса и ряда других объектов показало, что главная причина существенного уничтожения жизни на Земле на границе Mz/Kz

связана с мощным плюмовым вулканизмом в это время [Grachev et al., 2009], к тому же глобальное вымирание — это достаточно длительный процесс, чтобы объяснить его одним ударом астероида, пусть даже огромного. Кроме того, оказалось, что этот астероид упал на Землю раньше границы Mz/Kz на 0.3 млн лет [Keller, 2008].

Но данная статья не о причинах глобальных вымираний, а об исследованиях самородного железа в горных породах, основной источник которого — космическая пыль. Исследования космической пыли ведутся давно. По данным многочисленных исследований в пылевых облаках, в атмосфере, в кернах льда из Антарктиды и Гренландии, в океанских пелагических осадках обнаруживаются частицы космической пыли, содержащей частицы самородного железа и никеля. Такие частицы, предположительно космического происхождения, чаще в форме шариков, реже в форме чешуек, впервые обнаружены в глубоководных океанских осадках и марганцевых конкрециях, а впоследствии и в других осадках [Murray, Renard, 1891; Грачев и др., 2008; Brownlee, 1985; Fredriksson, Martin, 1963; Grachev et al., 2009; Parkin et al., 1980; и др.]. Данные о распределении этих частиц как по поверхности Земли, так и во времени, носят весьма ограниченный характер, т. к. использовались лишь «прямые» методы фиксации таких частиц, как, например, электронная микроскопия и т. п., которые обычно требуют большой объем исследуемого материала и весьма трудоемки.

Более обширную и оперативную информацию о распределении частиц самородного железа во времени и пространстве можно получить по данным термомагнитного анализа (ТМА) осадков, который широко применяется при палеомагнитных и петромагнитных исследованиях различных геологических объектов, в том числе осадков и осадочных пород разного геологического возраста. При палео- и петромагнитных исследованиях производится оценка концентрации, состава и других характеристик основных магнитных минералов — носителей остаточной намагниченности (палеомагнитной записи), каковым самородное железо не является. Из всех основных носителей остаточной намагниченности максимальной температурой Кюри $T_c = 675$ °С обладает гематит, поэтому максимальная температура нагрева при ТМА обычно ограничивалась 700 °С. При этом информация о зернах самородного железа полностью отсутствовала, т. к. точки Кюри железа, даже с примесями, как правило, выше 700 °С (T_c чистого железа равна 770 °С). Тогда и возникла идея применить

для массового изучения распространения частиц самородного железа ранее не применявшийся для этой цели *термомагнитный анализ с нагревом до 800* °С. К настоящему времени накоплен достаточно большой объем данных о распространении частиц самородного железа в земных и внеземных породах и метеоритах [Антипин и др., 2014; Грачев и др., 2009; Марков и др., 2015; Мурдмаа и др., 2015; Печерский, 2008; 2012; 2015; Печерский и др., 2006; 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2017; 2018; Печерский, Кузина, 2015; Печерский, Шаронова, 2012; 2013; Цельмович и др., 2015; Grachev et al., 2009; Pechersky, 2008; 2010; Pechersky et al., 2006; 2008; 2010; и др.].

Цель настоящей работы обобщить и систематизировать данные об особенностях распространения и состава металлического железа в осадках и других земных породах, в метеоритах, полученные с помощью ТМА с нагревом до 800 °С в сочетании с микронзондовым анализом (МЗА).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТМА И МЗА

Используя два прекрасно дополняющих друг друга метода (ТМА и МЗА), мы в течение многих лет изучали распространение, состав и другие особенности частиц металлического железа в осадочных горных породах разного возраста, различных регионов мира и разного происхождения. Главный вывод из этих исследований: подавляющее большинство частиц железа во всех исследуемых осадках имеет, как правило, *внеземное* происхождение.

Следует отметить, что совсем недавно нам встретилось первое, но, возможно, не последнее исключение из этого правила, а именно, в осадках озер Жомболокского вулканического района Восточного Саяна обнаружены частицы железа явно *земного* происхождения [Печерский и др., 2018]. Концентрация железа в озерных осадках Жомболокского района (рис. 1а) существенно выше, чем в других осадочных породах (рис. 1б), распределение числа исследованных образцов (N) по концентрациям (далее: гистограмма концентраций) подобно гистограмме концентраций земного магнетита (рис. 1в) и резко отличается от гистограммы концентраций железа в ранее изученных осадочных породах Земли (ср. рис. 1а и 1б).

В последние годы с помощью ТМА осадков был получен ряд закономерностей, однозначно свидетельствующих о внеземном происхождении подавляющего большинства частиц железа в осадках.

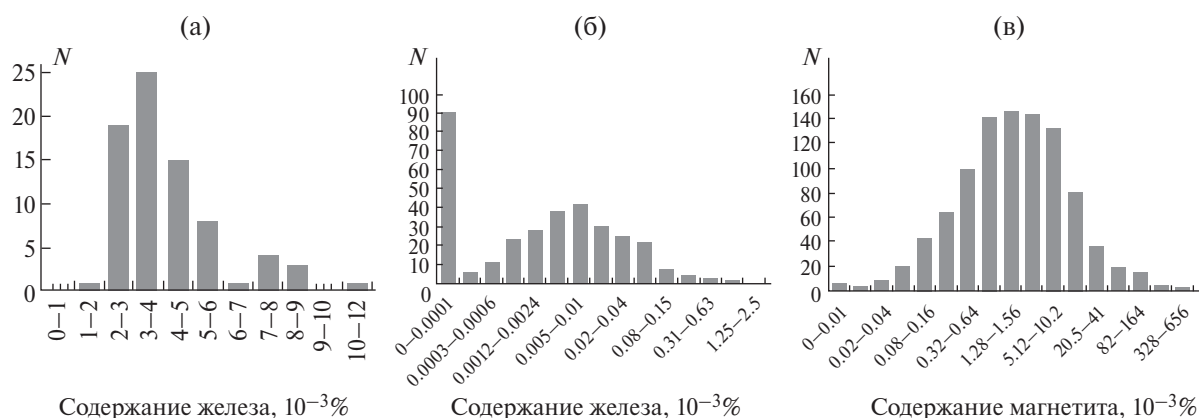


Рис. 1. Гистограммы концентраций железа (а), (б) и магнетита (в) в осадках разных регионов мира – сумма результатов ТМА по осадкам Жомболокского района (а) и по всем изученным ранее осадкам (б), (в).

Закономерность первая: повсеместное (глобальное распространение) присутствие частиц самородного железа в изученных отложениях.

Из общего числа образцов, для которых выполнен ТМА (1466) частицы железа обнаружены в 844 образцах. Концентрация частиц широко варьирует – от отсутствия до 0.05%. Но большие концентрации очень редки, преимущественно они между 10^{-5} и $10^{-3}\%$. Распределение концентраций самородного железа в пространстве и времени хаотичное.

Анализ полученных результатов показывает, что можно говорить о четырех типах накопления самородного железа в осадках: точечное, локальное, региональное и глобальное [Печерский и др., 2008; 2011; Печерский, Шаронова, 2012].

1. **Точечный** тип, наиболее распространенный, когда повышенное содержание железа фиксируется в одном образце, в «точке», и отсутствует в соседних образцах, этот тип носит случайный характер.

2. **Локальный** тип: повышенное содержание железа фиксируется в серии соседних образцов одного разреза, но не прослеживается от разреза к разрезу. Скорее всего, это сочетание первичного накопления и вторичного переотложения. Наиболее яркий пример длительного локального накопления железа, скорее всего первичного, т. к. отсутствует корреляция металлического железа с земными минералами железа, – в разрезах Басс (С. Кавказ) интервал от 82 Ма до 72 Ма; Кара-Кала (Копет-Даг) – 95–99 Ма, в разрезах Гергебиль (С. Кавказ), скв. 391 С (СЗ Атлантика) зафиксирован ряд локальных всплесков содержания железа ($2-3 \cdot 10^{-3}\%$) в нижнемеловых отложениях.

3. **Региональный** тип: повышенное содержание железа фиксируется в синхронных интервалах серии разрезов, например, Кавказа.

4. **Глобальный** тип: повышенное содержание железа фиксируется в синхронных интервалах времени в удаленных на большие расстояния разрезах. Глобальный тип, очевидно, отражает особенности космической пыли, в которой находилась Земля во время глобального накопления железа.

Приведем несколько примеров временных интервалов, которые, на наш взгляд, можно отнести к периодам глобального накопления самородного железа: 1) $\sim 12-13$ Ма, средний-поздний миоцен, продолжительность выпадения железа примерно 0.4 млн лет и его содержание достигает $4 \cdot 10^{-3}\%$, зафиксировано в двух разрезах: Халац и Квиринаки, удаленных друг от друга на более, чем 1500 км и расположенных в осадках, формировавшихся в совершенно разных условиях, в одном случае (Халац) – в явно окислительных, в другом (Квиринаки) – восстановительных; 2) $\sim 64-66$ Ма, ранний даний – поздний маастрихт, содержание железа приближается к $4 \cdot 10^{-3}\%$ и фиксируется во всех разрезах, где есть этот интервал времени; 3) $\sim 84-86$ Ма, сантон, зафиксирован в 5 разрезах, максимальное содержание от разреза к разрезу варьирует от $0.2 \cdot 10^{-3}\%$ (Маджалис) до $3 \cdot 10^{-3}\%$ (Кара-Кала); 4) $\sim 94-96$ Ма, поздний сеноман, повышенное содержание железа зафиксировано в разрезах Аймаки и Кара-Кала, удаленных друг от друга на 1000 км [Печерский и др., 2011; Печерский, Шаронова, 2012].

Повсеместное распространение частиц самородного железа, глобальный характер отмеченных выше интервалов повышенного содержания самородного железа, отсутствие общих земных

геологических и/или геомагнитных закономерностей в накоплении частиц самородного железа свидетельствуют о главном их *внеземном* источнике — *космической межпланетной пыли*.

Закономерность вторая: бимодальное распределение по концентрации частиц самородного железа с обязательной «нулевой» группой (рис. 1б).

Такое бимодальное разделение частиц на две группы носит закономерный глобальный характер, оно наблюдается во *всех* изученных объектах [Печерский и др., 2011; Печерский, Шаронова, 2012]. Бимодальное распределение объясняется следующим образом. Облако космической пыли и падающие из него на Землю частицы — это как туча, из которой капает капли дождя. Число частиц в космической пыли конечное, по существующим данным их менее 100 тысяч в одном кубическом метре, а металлических частиц заметно меньше [Brownlee, 1985; Encyclopedia Britanica, 2012]. Это значит, что из каждых десяти сантиметровых кубиков только в один попадет частичка космической пыли, которая падает на сплошной слой осадка. Соответственно, во многих исследованных нами образцах просто отсутствуют частицы космической пыли, они и образуют «нулевую» группу на гистограмме. Вторая группа отражает распределение частиц самородного железа в осадках, выпавших из космической пыли. Важно подчеркнуть, что бимодальная специфика с «нулевой» группой не зависит от литологических особенностей осадков, окислительно-восстановительных условий их накопления и раннего диагенеза (например, наличия или отсутствия пирита). Она свойственна осадочным толщам как на дне океана, так и на континенте, в озерах, возрастам от четвертичного периода до кембрия, т.е. носит глобальный характер.

Сказанное подчеркивается совершенно иным одномодальным распределением по содержанию магнетита заведомо земного происхождения

в тех же осадках (рис. 1в). Как крайний случай, очень низких концентраций земных минералов это распределение близко к пуассоновскому, а не к бимодальному.

Закономерность третья: отсутствие корреляции между концентрациями частиц самородного железа и магнетита. Наличие такой корреляции еще ничего не говорит о природе тех и других частиц, но свидетельствует об единых условиях их накопления в осадке. И, наоборот, — отсутствие корреляции говорит о разных условиях накопления самородного железа и магнетита. Отсутствие корреляции в сочетании с повсеместным распространением частиц железа свидетельствует в пользу преимущественно космического происхождения частиц самородного железа, и позволяет говорить об их связи с космической пылью.

Судя по отсутствию корреляции содержания космического железа и земного магнетита + титаномагнетита в большинстве разрезов, накопление самородного железа в рассматриваемых осадках происходило непосредственно из космических источников.

Однако нередки примеры, когда коэффициент корреляции $r > 0.2$. И, более того, есть два примера, когда $r \geq 0.5$ (отложения Сельбухры, $r = 0.74$ и сеноманская часть разреза Кара-Кала, $r = 0.5$), что свидетельствуют либо о заметном вкладе частиц самородного железа земного происхождения, либо о заметной роли переотложения в накоплении самородного железа.

Закономерность четвертая: разделение частиц самородного железа и Fe–Ni-сплава по составу на ряд групп.

Частицы железа по содержанию в них примеси никеля образуют три группы (рис. 2):

- 1) чистое железо без примеси никеля, такие частицы образуют обособленную группу;
- 2) группа с модой 5–6% никеля;

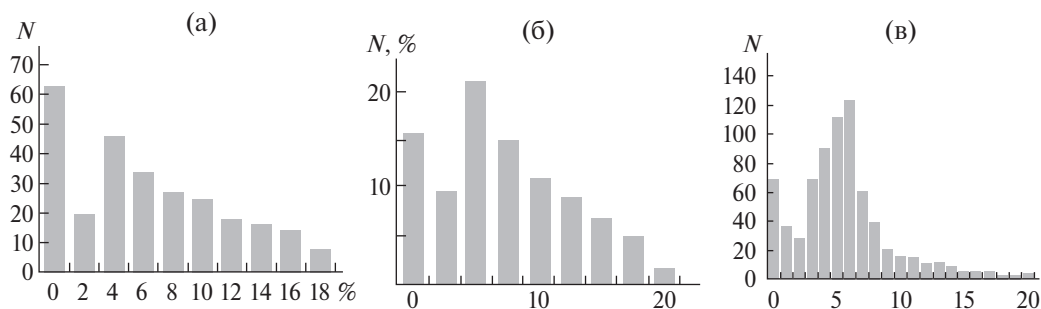


Рис. 2. Гистограммы концентраций никеля (%) в самородном железе: (а) — осадки Атлантики; (б) — эпиконтинентальные осадки северной Евразии [Печерский и др., 2011]; (в) — металлическая часть каменных метеоритов [Печерский и др., 2011; 2012]. N — число определений. Данные МЗА и ТМА.

3) Fe–Ni-частицы с содержанием никеля $>20\%$ вплоть до чистого никеля [Печерский и др., 2011; 2012].

Первая группа чистого железа присутствует в метеоритах, одновременно она очень похожа на частицы металлического железа из лунного материала (вулканического стекла, базальтов и брекчий), доставленного «Аполлоном» 11, 12 [Nagata et al., 1970; 1974]. По данным микросондового анализа металлические частицы в лунных породах состоят из практически чистого железа, точки Кюри их близки к $770\text{ }^\circ\text{C}$.

Средние содержания примеси никеля в самородном железе всех типах изученных осадков второй группы очень близки (5–6%). Более того, характер распределения по содержанию никеля в частицах железа в осадках повторяет распределение содержания никеля в металлической части метеоритов (рис. 2). Отсюда можно заключить, что главный источник частиц железа в осадках – метеориты, и те, и другие – продукты разной степени разрушения вещества планет (и других космических тел).

Третья группа – частицы Fe–Ni-сплава с высокими содержаниями никеля – встречаются очень редко и имеют сугубо локальное распространение. Их содержание не коррелирует с содержанием частиц самородного железа ($r = -0.059$). Резкое различие в содержании частиц самородного железа и Ni–Fe-сплава и отсутствие между их содержаниями корреляции, скорее всего, объясняется разными их источниками. Если первые, главным образом, продукты выпадения на Землю космической пыли, то вторые, вероятнее всего, связаны с импактными событиями, с падающими на Землю метеоритами. Слабая, но заметная корреляция с содержанием в осадках магнетита и титаномагнетита ($r = 0.41$) говорит о том, что часть этих частиц может быть результатом того, что космические частицы Ni–Fe-сплава *перетолжены* вместе с земными минералами. Отметим, что из сказанного выше можно однозначно утверждать, что в космической пыли концентрация частиц Fe–Ni-сплава ниже $10^{-5}\%$ (ниже чувствительности ТМА).

Частицы самородного железа в изученных осадках по составу образуют обширное облако и в среднем содержат 3–6% Ni, что отвечает составу камасита. При этом в четырех вышеотмеченных интервалах глобального обогащения осадков частицами самородного железа явно преобладают частицы второй группы, т. е. содержащие никелистое железо. Связь содержания частиц железа с содержанием в них примеси

никеля отсутствует: коэффициент корреляции между ними равен -0.024 . На этом фоне наблюдается явный пик повышенного содержания самородного железа с практически постоянной примесью никеля 5–6% независимо от места и возраста осадка, содержащего это железо, то есть это явно глобальный эффект, очевидно, характеризующий главный источник космической пыли – разрушенные планеты, астероиды и т. п. и главные их компоненты – чистое железо и никелистое железо – камасит [Печерский, Шаронова, 2012].

Закономерность пятая: обратная зависимость концентрации частиц самородного железа от скорости осадконакопления.

Для выявления этой закономерности определена скорость осадконакопления в каждом изученном разрезе. Для этого выбраны линейные участки концентрации железа по разрезу, т. е. интервалы с постоянной скоростью осадконакопления. В результате получена общая картина зависимости относительной величины «нулевой» группы от скорости осадконакопления (рис. 3).

На фоне разброса данных видна заметная тенденция к росту «нулевой» группы с увеличением скорости осадконакопления (рис. 3). В частности, на разброс влияет степень перетолжения частиц железа и возможного их земного происхождения, т. е. когда они участвуют

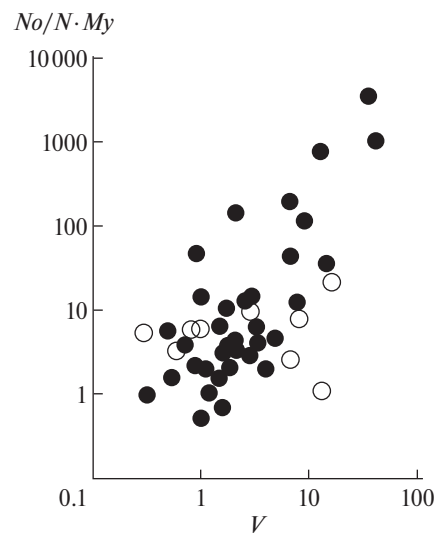


Рис. 3. Связь относительной величины «нулевой» группы частиц самородного железа со скоростью осадконакопления. N_0 – число образцов, в которых не обнаружены (отсутствуют) частицы самородного железа; N – общее число измеренных образцов в данном интервале, Mu – линейный интервал времени в миллионах лет. Полыми кружками выделены те интервалы, где заметна роль перетолжения.

в процессе накопления осадков, как и земные частицы. Это выражается в нашем случае в коэффициенте корреляции между концентрациями частиц железа и магнетита ($r=0.3-0.7$). В отличие от главной тенденции для точек, связанных с переотложением (на рис. 3 полые кружки), исчезает зависимость величины «нулевой группы» от скорости осадконакопления. Отсутствие связи концентрации земных магнитных минералов, например, магнетита, со скоростью осадконакопления демонстрирует коэффициент линейной корреляции ($r=0.032$).

Наличие заметной тенденции к росту «нулевой» группы с увеличением скорости осадконакопления однозначно свидетельствует о преобладании среди частиц самородного железа в изученных осадках частиц космического происхождения.

Гистограммы точек Кюри (T_c) у осадков всех регионов и возрастов (рис. 4г) ближе к таковым для метеоритов (рис. 4д) и заметно отличаются от гистограмм T_c земных базальтов и базальтов Луны (рис. 4а, 4б) [Nagata et al., 1974]. Гистограмма T_c осадков озер Жомболокского района (рис. 4в) совершенно не похожа на ос-

тальные осадки и аналогична земным и лунным базальтам (рис. 4а, 4б).

По данным ТМА в базальтах Жомболока присутствует от нуля до $\sim 0,5 \cdot 10^{-3}\%$ железа, что заметно меньше, чем в озерных осадках (рис. 2), $T_c = 712-780$ °С. По данным МЗА, в образцах базальтов обнаружены только единичные мелкие частицы самородного железа. Как и в осадках, в базальтах встречаются хромистое железо (10.7–17.7% Cr), FeCrNi, FeNiSn, CuZn.

По данным МЗА из экзотических сплавов в осадках встречено зерно FeCrNi (72–73% Fe; 16–18% Cr; 7–9% Ni), зерно ZnFe (65% Zn, 31% Fe), зерно WFeCr, зерно FeCoNd (54% Fe, 15% Co, 23% Nd), зерно хромита ~ 2 мкм, зерно 7 мкм самородного цинка, зерна никеля 1–3 мкм, шарики магнетита диаметром 4–20 мкм.

Сходный набор экзотических частиц металлов в осадках и базальтах, особенно большое сходство частиц никеля, необычных и для базальтов, и для осадков позволяет сделать вывод о том, что именно базальты являются источниками таких частиц в озерных осадках Жомболокского района. Такую связь подтверждает и пространственная закономерность: наибольшая концентрация самородного железа наблюдается в осадках озера Хара-Нур,

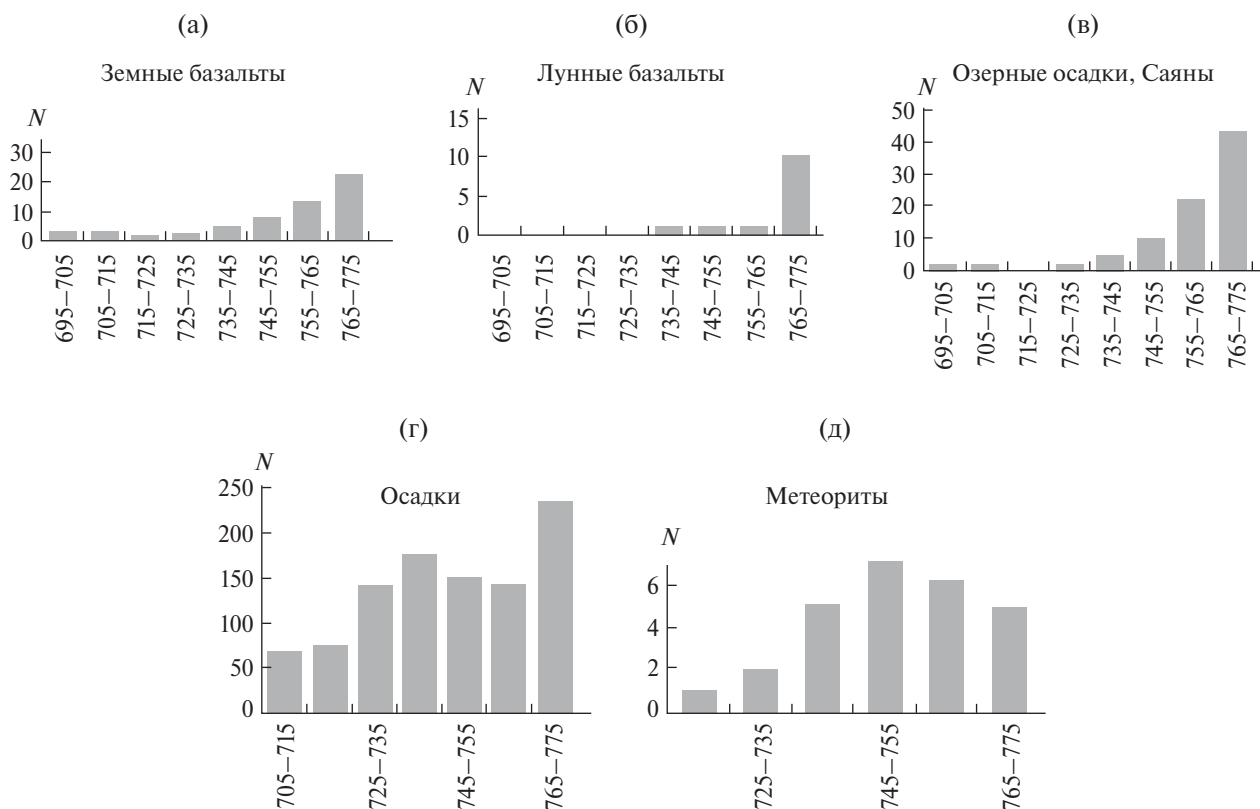


Рис. 4. Гистограммы T_c железа в земных (а), лунных базальтах (б), в осадках Жомболокского района (в), в земных осадках многих регионов (г), в метеоритах (д).

непосредственно контактирующего с Жомболокским потоком. Озеро Хикушка находится в ~ 800 м от края Жомболокского базальтового потока и существенно ближе к вулканам (~ 3 км), но концентрации железа в его осадках заметно ниже, чем в осадках озера Хара-Нур. Наименьшая концентрация самородного железа наблюдается в осадках озера Тухурен-Нур, расположенного за хребтом в ~ 3 км от Жомболокского потока. Однако, несмотря на сказанное выше, очень низкая концентрация железа в базальтах, преобладание в них титаномагнетита с $T_c \leq 120$ °С, отсутствующего в осадках и наоборот – наличие «чистого» магнетита в осадках, отсутствующего в базальтах, свидетельствует о том, что базальты района не есть единственные источники металлического железа в осадках.

По составу, форме (рис. 5) и размеру (рис. 6) частицы железа земного и внеземного происхождения практически идентичны. Гистограммы

на рис. 6 почти повторяют друг друга, особенно это видно по одинаковым модам размера частиц (10–20 мкм). Это можно объяснить едиными условиями происхождения частиц железа в процессе формирования планет и других космических тел, являющихся источником самородного железа в межпланетной пыли и в земных осадках. Поэтому нет особых генетических признаков различия частиц железа земного и внеземного происхождения, есть разные условия их образования. Термины «земное или внеземное» определяют лишь местонахождение источника частиц железа. Очевидно, частицы самородного железа при воздушном разносе быстро оседают недалеко от места извержения вулкана: концентрация магнитных частиц уменьшается на расстоянии 450 км в 10 раз, на расстоянии 880 км в 100 раз [Evans, 1999]. Такой вывод следует отнести не только к вулканическим источникам самородного железа.

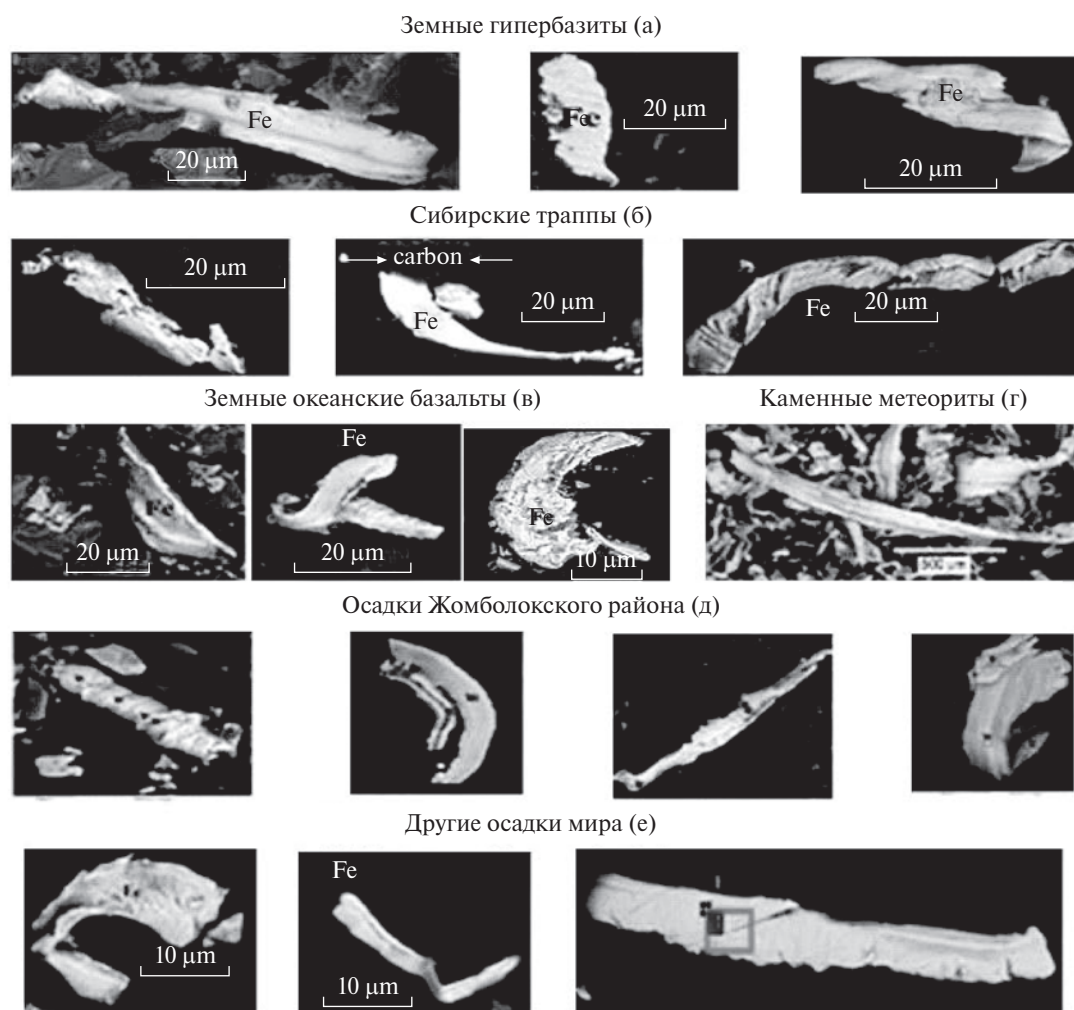


Рис. 5. Примеры форм земных (а), (б), (в), (д), (е) и внеземных (г) частиц частиц самородного железа [Печерский и др., 2013 а; б].

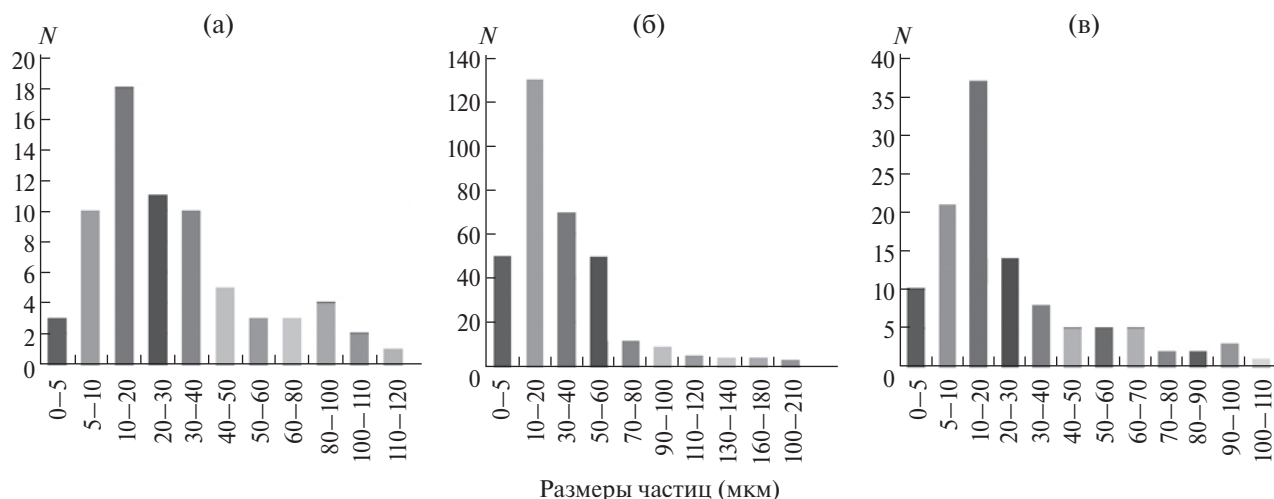


Рис. 6. Гистограммы размеров частиц железа в осадках озер Жомболокского района (а), в осадках разных регионов Земли (б), в земных базальтах (в).

При падении и взрыве космических тел, частицы самородного железа, как и при извержении вулкана, выпадут на поверхность Земли недалеко от места падения космического тела. В случае продуктов выветривания вулканических пород ореол их разноса будет еще меньше, чем в случае воздушного разноса. Однако прямая связь требует очень частых, а не одиночных извержений вулканов в течение накопления озерных осадков, т. к. частицы железа присутствуют в значимых количествах во всех образцах озерных осадков. Сходство состава, формы и размера частиц самородного железа земного и внеземного происхождения свидетельствует о единстве условий образования частиц железа в процессе формирования звездно-планетных систем, образованных из газово-пылевых облаков. Распространение частиц металлического железа от места извержения вулкана и/или падения крупного метеорита ограничено в пространстве. Это следует из яркого примера: из многих изученных объектов только в Жомболокском районе, в непосредственной близости от крупных излияний базальтовых лав обнаружено заметное обогащение осадков частицами металлического железа *земного* происхождения. Следовательно, маловероятно найти глобальные ореолы распространения частиц металлического железа от падения крупных метеоритов и других космических тел, как и от крупных извержений вулканов.

ПЕТРОМАГНИТНАЯ СХЕМА СТРОЕНИЯ ПЛАНЕТ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ В НИХ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА

Единые условия образования, т. е. единый сценарий формирования планет согласуется с существующими представлениями о ранней стадии формирования Солнечной системы [Жарков, 1983; Маракушев и др., 1992; Хаббард, 1987; Baker et al., 2005; Bonvie, Wadhwa, 2010; McFadden, Weissman, Johnson, 2007; Patterson, 1956; Weiss et al., 2009; и др.]. Это выражается в единстве химического состава ядер планет-гигантов, Земли, метеоритов и в единстве возраста Солнечной системы. Так, содержание химических элементов (исключая водород и гелий) в фотосфере Солнца и в хондритах практически одинаково. Относительный объем ядра Земли составляет 12.6%, объем коры — 1.4% от общего объема Земли, относительные «объемы» метеоритов: железные (ядро) — 1.5% и каменные коровые (лунные и марсианские) — 1.4% [Meteoritical Bulletin, 2000–2010]. Таким образом, получается, что на долю ядра планет (железных метеоритов) приходится почти на порядок меньший объем, чем на долю земного ядра. Поэтому можно предположить, что относительный объем ядра разрушенных планет (планеты) был на порядок меньше земного. Сказанное не противоречит оценке доли самородного железа в составе Земли, Марса и метеоритов и, видимо, отвечает доле самородного железа в разрушенных планетах (планете), образующих пояс астероидов.

Единообразие состава металлической фазы на начальной стадии формирования Солнечной системы вполне естественно. В дальнейшем, несмотря на процесс дифференциации и т. п., металлическая фаза во всех оболочках планет аналогична по содержанию никеля и других примесей. На примере земной коры мы наблюдаем широкие вариации составов магнитных минералов, отражающие существенные изменения физико-химических условий, и прежде всего T-fO₂-режима, при их образовании. Соответственно, единообразие состава металлической фазы позволяет полагать, что физико-химические условия в расплаве при кристаллизации железной части и на этой стадии формирования планет изменялись мало. Это объясняется также и тем, что при гравитационной дифференциации (гравитационном расслаивании), когда легкие элементы уходят вверх, тяжелые – вниз, на таких металлах как никель, который близок к главному компоненту – железу, этот процесс не должен сказываться.

Сходство (общность) условий образования частиц металлического железа во всех изученных вариантах земного и внеземного происхождения позволяет нарисовать петромагнитную схему строения планет по распределению в них металлического железа.

1. В коре Земли, Луны, Марса и, очевидно, других планет, распространены титаномагнетиты. Состав их колеблется в больших пределах, прежде всего, в зависимости от T-fO₂-условий. Так, в базальтах рифтов на континентах и в океанах, где эти условия однородны, содержится титаномагнетит с 12–14% титана, тогда как в островодужных вулканитах, где окислительно-восстановительные условия широко варьируют, состав титаномагнетитов изменяется от близких рифтовым до магнетита; в лунных базальтах в высоко восстановительных условиях кристаллизуется ульвошпинель и другие феррошпинели, содержащие только двухвалентное железо [Печерский, Диденко, 1995]. Малый объем корового материала по сравнению с остальной частью планет объясняет редкое присутствие среди метеоритов коровых пород, в частности, таковые отсутствуют среди изученных нами метеоритов; концентрация самородного железа, как содержащего, так и не содержащего никеля, редко превышает 0.001%; соотношение случаев самородного железа (Fe), не содержащего никеля к Fe–Ni-сплавам в траппах, океанских и лунных базальтах Fe/FeNi ≥ 10 [Печерский, 2015].

2. В верхах мантии титаномагнетит отсутствует, но заметно возрастает доля частиц

Fe–Ni-сплавов, так в гипербазитах из верхов мантии Fe/FeNi = 5.5; концентрация частиц самородного железа редко превышает 0,001%, как и в коровых породах.

3. Суммарная характеристика всей верхней мантии выражена в значении Fe/FeNi = 3.9 частиц железа из осадков, которое занимает промежуточное положение между метеоритами и гипербазитами и ближе к гипербазитам, т.е. к породам земной верхней мантии [Печерский, 2015]. Предполагается, что это и есть материал, который, главным образом, попадает в межпланетную пыль, в отличие от материала нижней мантии, который попадает на Землю преимущественно в виде относительно более крупных обломков метеоритов. Породы верхней мантии практически не содержат такого материала как шрейберзит [Печерский, 2015].

4. Низы мантии отражены в изученных нами образцах каменных метеоритов: концентрация в них Fe + Fe–Ni-сплавов 0.2–9%, отношение Fe/FeNi = 0.147. В низах мантии заметно возрастает количество Fe-сульфидов (главным образом, троилит) и в металлической ее части появляется шрейберзит (~2%).

5. В ядре Земли и планет-источников метеоритов отношение Fe/Fe–Ni = 0.146, концентрация Fe + Fe–Ni-сплавов ~90%. Среди Fe–Ni-сплавов заметная доля принадлежит шрейберзиту (17%), тогда как сульфиды железа практически исчезают. Получается, что между каменными и железными метеоритами, т.е. между низами мантии и ядром планеты нет резкой границы по количеству безникелевого железа, есть плавный рост от каменных метеоритов к железокремнистым и железным метеоритам по концентрации самородного железа и Fe–Ni-сплавов. Видимо, плавный переход существует и между верхней и нижней мантией.

6. Общность распределения металлического железа, самородного и в виде Fe–Ni-сплава, в планетах, очевидно, определяется действием общего физического закона, такого как закон всемирного тяготения (гравитация), как на стадии существования газово-пылевого облака, так и гравитационной дифференциации в процессе формирования.

Авторы выражают огромную благодарность В.А. Цельмовичу за проведение микрозондового анализа образцов, а также А. Костерову за полезные замечания и исправления текста статьи.

Работа выполнена в рамках гос. задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антипин В.С., Кузьмин М.И., Печерский Д.М., Цельмович В.А., Язев С.А. Вещество метеорита Челябинск: результаты геохимического и термомагнитного изучения // Докл. РАН. 2014. Т. 458. № 1. С. 57–60.
- Грачев А.Ф., Корчагин О.А., Цельмович В.А., Коллманн Х.А. Космическая пыль и микрометеориты в переходном слое глин на границе мела и палеогена в разрезе Гамс (Восточные Альпы): морфология и химический состав // Физика Земли. 2008. № 7. С. 42–57.
- Грачев А.Ф., Печерский Д.М., Борисовский В.А., Цельмович В.А. Магнитные минералы в осадках на границе мела/палеогена (разрез Гамс, Восточные Альпы) // Физика Земли. 2008. № 10. С. 40–55.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука. 1983. 415 с.
- Лукин А.Е. Самородные металлы и карбиды – показатели состава глубинных геосфер // Геофизический журнал. 2006. № 4. С. 17–46.
- Маракушев А.А., Грановский Л.Б., Зиновьева Н.Г., Митрейкина О.Б. Космическая петрология. М.: изд-во МГУ. 1992. 325 с.
- Марков Г.П., Печерский Д.М., Цельмович В.А. Магнитные минералы метеорита Челябинск // Астрономический вестник. 2015. Т. 49. № 5.
- Новгородова М.И. Кристаллохимия самородных металлов и природных интерметаллических соединений. Итоги науки и техники. Серия кристаллохимия. Изд-во ВИНТИ. 1994. Т. 29. 150 с.
- Петромагнитная модель литосферы/Ред. И.К. Пашкевич, Д.М. Печерский. Киев: Наукова Думка. 1994. 345 с.
- Печерский Д.М. Обогащение осадков гидроокислами железа на границе мезозоя и кайнозоя: обобщение петромагнитных данных // Физика Земли. 2008. № 3. С. 65–72.
- Печерский Д.М. Железо из космоса // Земля и Вселенная. 2010. № 6. С. 68–75.
- Печерский Д.М. Магнитные минералы из космоса // Земля и Вселенная. 2013. № 3. С. 59–70.
- Печерский Д.М. Самородное железо и другие магнитные минералы в осадках: термомагнитные признаки космического происхождения. Изд-во РАР. 2012. 107 с.
- Печерский Д.М. Распределение частиц самородного железа и Fe-Ni сплавов на планетах // Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2015. 56 с.
- Печерский Д.М. Микрозондовое и термомагнитное изучение частиц железа в осадках. Обобщение // Экспериментальная геохимия. 2015. Т. 2. № 1. С. 103–107.
- Печерский Д.М. Распространенность металлического железа на планетах // Геофизический журнал. 2016. № 5. С. 13–24.
- Печерский Д.М. Распределение металлического железа внутри планет // Земля и Вселенная. 2017. № 6. С. 82–89.
- Печерский Д.М., Асанидзе Б.З., Нургалиев Д.К., Шаронова З.В. Петромагнитная и палеомагнитная характеристика отложений на границе мезозоя и кайнозоя: разрез Тетрицкаро (Грузия) // Физика Земли. 2009. № 2. С. 49–65.
- Печерский Д.М., Гильманова Д.М., Иванов Е.В., Кузьмин М.И., Марков Г.П., Нургалиев Д.К., Цельмович В.А. Самородное железо в осадках озера Байкал (скважина ВDP-98): результаты термомагнитного анализа // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 9. С. 1336–1347.
- Печерский Д.М., Гильманова Д.М., Казанский А.Ю., Кривоногов С.К., Нургалиев Д.К., Цельмович В.А. Самородное железо в четвертичных отложениях дархатской впадины, северная Монголия // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 12. С. 1923–1942.
- Печерский Д.М., Гильманова Д.М., Марков Г.П., Мурдмаа И.О., Нургалиев Д.К., Цельмович В.А., Шаронова З.В. Самородное железо и другие магнитные минералы в осадках северо-западной Атлантики: результаты ТМА и МЗА // Физика Земли. 2013а. № 3. С. 131–153.
- Печерский Д.М., Грачев А.Ф., Нургалиев Д.К., Цельмович В.А. Магнитоминералогическая характеристика переходного слоя на границе мела и палеогена (разрез Гамс, вост. Альпы, Австрия) // Геофизические исследования. 2008. Т. 9. № 4. С. 29–39.
- Печерский Д.М., Грачев А.Ф., Нургалиев Д.К., Цельмович В.А., Шаронова З.В. Петромагнитные особенности осадков на границе мезозоя и кайнозоя: результаты изучения разреза Гамс (Австрия) // Физика Земли. 2008. № 5. С. 55–74.
- Печерский Д.М., Диденко А.Н. Палеоазиатский океан: петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. М.: изд-во ОИФЗ РАН. 1995. 296 с.
- Печерский Д.М., Казанский А.Ю., Марков Г.П., Цельмович В.А., Шетников А. Редчайшее явление накопления в озерных осадках частиц металлического железа земного происхождения: Жомболокский вулканический район, Восточный Саян // Физика земли. 2018. № 1. С. 113–127
- Печерский Д.М., Кандинов М.Н., Марков Г.П., Пляшкевич А.А., Цельмович В.А. Сочетание термомагнитных и микрозондовых исследований внеземных магнитных минералов: информация о строении и эволюции планет // журнал «Исследовано в России» С. 437–452. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2012/032.pdf>
- Печерский Д.М., Кандинов М.Н., Марков Г.П., Пляшкевич А.А., Цельмович В.А., Шаронова З.В. Магнитные минералы метеоритов. «Наука и просвещение. Посвящается 150-летию со дня рождения академика В.И. Вернадского». М.: изд-во ГГМ. 2012. С. 166–185.
- Печерский Д.М., Кузина Д.М. Частицы безникелевого железа в осадках // Физика земли. 2015. № 6. С. 103–115.
- 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., Кузина Д.М., Нургалиев Д.К., Цельмович В.А. Единая природа самородного железа в земных

- породах и метеоритах. Результаты микрозондового и термомагнитного анализов // *Физика Земли*. 2015. № 5. С. 140–155.
- Печерский Д.М., Марков Г.П., Цельмович В.А.* Чистое железо и другие магнитные минералы в метеоритах // *Астрономический вестник*. 2015. Т. 49. № 1. С. 65–75.
- Печерский Д.М., Марков Г. П., Цельмович В.А., Шаронова З.В.* Внеземные магнитные минералы // *Физика Земли*. 2012. № 7–8. С. 103–120.
- Печерский Д.М., Нургалиев Д.К., Фомин В.А.* Космическое железо в осадках – результаты термомагнитного анализа // *Вестник Отделения наук о Земле. NZ6025*. 2010. Т. 2. С. 185–192. doi: 10.2265/2010 NZ000043,2010
- Печерский Д.М., Нургалиев Д.К., Фомин В.А., Шаронова З.В., Гильманова Д.М.* Космическое железо в осадках мела-дании // *Физика Земли*. 2011. № 5. С. 12–34.
- Печерский Д.М., Нургалиев Д.К., Цельмович В.А., Шаронова З.В.* Петромагнетизм отложений разреза Гамс (Австрия) на границе мезозоя и кайнозоя. Исследование магнитных свойств горных пород. Владивосток: изд-во Дальневосточного университета. 2006. С. 64–75.
- Печерский Д.М., Нургалиев Д.К., Шаронова З.В.* Магнитолитологическая и магнитоминералогическая характеристика отложений на границе мезозоя и кайнозоя: разрез Кошак (Мангышлак) // *Физика Земли*. 2006. № 11. С. 99–112.
- Печерский Д.М., Нургалиев Д.К., Шаронова З.В.* Магнитные свойства пограничного слоя на границе К/Т, разрез Гамс (Австрия) // *Физика Земли*. 2009. № 6. С. 20–31.
- Печерский Д.М., Шаронова З.В.* Термомагнитное свидетельство наличия частиц самородного железа в осадках // *Физика Земли*. 2012. № 4. С.38–44.
- Печерский Д.М., Шаронова З.В.* Связь концентраций частиц самородного железа в осадках со скоростью их накопления: обобщение термомагнитных данных // *Физика Земли*. 2013. № 5. С. 125–131
- Хаббард У.* Внутреннее строение планет. М.: Мир. 1987. 328 с.
- Цельмович В.А., Печерский Д.М., Марков Д.П.* Отличительные характеристики магнитных минералов челябинского метеорита. Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции. Челябинск: Агентство СІР Челябинской ОУНБ, 2014. С. 612–636.
- Штеренберг Л.С., Васильева Г.Л.* Самородные металлы и интерметаллические соединения в осадках северо-восточной части Тихого океана // *Литология и полезные ископаемые*. 1979. № 2. С.133–139.
- Baker J., Bizzarro M., Witting N., Connelly J., Haack H.* Early planetesimal melting from an age 4.566 Gyr for differentiated meteorites // *Nature*. 2005. V. 436. Is. 7054. P. 1127–1131.
- Bonvier A., Wadhwa M.* The age of the Solar system redefined by the oldest Pb-Pb age of meteoritic inclusion // *Nature Geoscience*. 2010. V. 3. P. 637–641.
- Brownlee D.E.* Cosmic dust: Collection and research // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1985. V. 13. P. 147–173.
- Encyclopedia Britanica.* Art. Meteorites. Second edition. Eb.com. 2012.
- Evans M.E.* Magnetoclimatology: a test of the wind-vigour model using 1980 Mount St. Hellens ash. // *Earth. Planet. Sci.Lett.* 1999. V. 172. № 3–4. P. 255–259.
- Fredriksson K., Martin I.R.* The origin of black spherules found in the Pacific islands, deep sea sediments, and Antarctic ice // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1963. V. 27. P. 245–248.
- Grachev A.F., Kollmann H.A., Korchagin O.A. et al.* “The K/T boundary of Gams (Eastern Alps, Austria) and the nature of terminal Cretaceous mass extinction”. Ed. A.F. Grachev. *Abhandlungen der geologischen bundesanstalt. band 63.* 2009. PP. 89–134.
- Keller G.* Impact stratigraphy. Old principle, new reality. In Evans K.R., Horton J.W., King D.T. and Morrow J.R. eds. “The Sedimentary Record of Meteorite Impacts” // *Geol. Soc. America, special paper.* 2008. V. 437. P. 147–178.
- McFadden L., Weissman P.R., Johnson T.V.* *Encyclopedia of the Solar System.* 2007. 992 p.
- Meteoritical Bulletin.* № 84 (2000)–№ 98 (2010).
- Murray S., Renard A.F.* Report on deep-sea deposits based on the specimens collected during the voyage of H.M.S. Challenger in the years 1872 to 1876. Neil. Edinburg. 1891. V. 3.
- Nagata T., Ishikawa Y., Kinoshita H. et al.* Magnetic properties of Lunar samples // *Science.* 1970. V. 167. P. 703–706.
- 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. Pp. 2827–2839.
- Parkin D.W., Sullivan R.A.L., Andrews J.N.* Further studies on cosmic spherules from deep sea sediments // *Phil. Trans. R. Soc. London.* 1980. A.V. 297. P. 495–518.
- Patterson C.* Age of meteorites and the Earth // *Geochim. et cosmochim. Acta.* 1956. V. 10. P. 230–237.
- Pechersky D.M.* Metallic iron in sediments at the Mesozoic-Cenozoic (K/T) boundary // *Russ. J. Earth Sci.* 2008. V. 10. № 6. P. 1–9. ES6006, doi:10.2205/2005 ES000304
- Pechersky D.M.* Metallic iron and nickel in Cretaceous and Cenozoic sediments: the results of thermomagnetic analysis // *Journal Environmental Protection.* 2010. V. 1. № 2. P. 143–154.
- Pechersky D.M., Grachev A.F., Nourgaliev D.C., Tselmovich V.A., Sharonova Z.V.* Magnetolithologic and magnetomineralogical characteristics of deposits at the Mesozoic/Cenozoic boundary: Gams section (Austria) // *Russ. J. Earth Sci.* 2006. V. 8. № 3. ES3001. doi: 10.2205/2006 ES000204
- Pechersky D.M., Nurgaliev D.K., Trubikhin V.M.* Native iron in Miocene sediments // *Russ. J. Earth Sci.* 2008. V. 10. ES6004. doi:10.2205/2008 ES000306
- Pechersky D.M., Nourgaliev D.K., Sharonova Z.V.* Magnetic properties of rocks of the Gams section. Chapter 5 in “The K/T boundary of Gams (Eastern Alps, Austria) and

the nature of terminal Cretaceous mass extinction” / Ed. A.F. Grachev. *Abhandlungen der geologischen bundesanstalt*, band 63. 2009. P. 89–134.

Pechersky D.M., Kuzina D.M. Extraterrestrial Metallic Iron in the Lacustrine, Epicontinental and Ococeanic Sediments: A Review of Thermomagnetic and Microprobe Analyzes Data” // *Journal of Geology & Geophysics*. 2016. № 5. P. 260. doi: 10.4172/2381-8719.1000260

Pechersky D.M., Kuzina D.M., Ivanov E.V., Kuz'min M.I., Nurgaliev D.K., Tsel'movich V.A. Thermomagnetic analysis of native iron from the upper sedimentary horizons of Lake Baikal, section GC-99 (Posolskaya Bank) // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58. № 12. С. 1964–1974.

Weiss B.P., Gattacceca J., Stanley S., Rochette P., Christensen U.R. Paleomagnetic records of meteorites and early planetesimal differentiation // *Space Sci. Rev.* 2009. P. 1–49.

The History and State-of-the-Art of the Studies of Native Iron in Terrestrial and Extraterrestrial Rocks

D. M. Pechersky^a and G. P. Markov^{a,*}

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

^{*}*E-mail: diamarMP@gmail.com*

Received June 20, 2018

A brief review on the history of studying native iron in terrestrial rocks and meteorites is presented. The synthesis and systematization of extensive data on the distribution, composition, and grain size of metal iron particles in sediments, other terrestrial rocks, and meteorites obtained by thermomagnetic analysis with heating to 800 °C combined with microprobe analysis are described. The studies show that iron particles in all the studied sediments typically have extraterrestrial origin. Based on the statistical analysis of the thermomagnetic data, a number of indications (statistical regularities) are proposed testifying to the overwhelmingly extraterrestrial origin of iron particles in sediments. The similarity of the formation conditions of terrestrial and extraterrestrial metal iron particles makes it possible to suggest a petromagnetic scheme for the structure of planets based on the distribution of metal iron in them.

Keywords: iron, nickel, sediments, basalts, meteorites, thermomagnetic analysis, microprobe analysis