

## **Распределение металлического железа внутри планет**

Д.М. ПЕЧЕРСКИЙ,  
доктор геолого-минералогических наук  
Институт физики Земли РАН

---

Для выяснения сходства металлического железа земного и внеземного происхождения в предлагаемой статье сравниваются данные о металлическом железе из земных (например, базальты) и внеземных (лунные базальты, метеориты)

породах. Исследования проводились с помощью термомагнитного и микрорзондового анализов. Выясняется, что частицы металлического железа присутствуют во всех породах и они подобны по составу, форме и размеру, что свидетельствует

о том, что все они сформировались в одинаковых условиях. И это может происходить из-за однородности газопылевых облаков на ранней стадии формирования звездно-планетных систем и последующей гравитационной дифференциации планет.

### ОБЪЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА

Для выполнения такой задачи в 2005–2015 гг. были собраны сведения о металлическом железе разного возраста внеземного и земного происхождения, которое входит в состав осадков из многих регионов Земли (Земля и Вселенная, 2010, № 6); метеоритов (Земля и Вселенная, 2013, № 2); лунных базальтов; магматических горных пород, образующих верхнюю мантию (гипербазитов), вынесенных

на поверхность Земли в виде ксенолитов базальтовыми лавами Антарктиды, Забайкалья, Монголии, Приморья, Сирии, Шпицбергена; сибирских траппов (обширных континентальных излияний базальтов) и базальтов со дна Атлантического, Тихого и Индийского океанов.

Подчеркну, что для выполнения поставленной задачи использовано удачное сочетание термомагнитного и микрорзондового анализов. Первый позволил

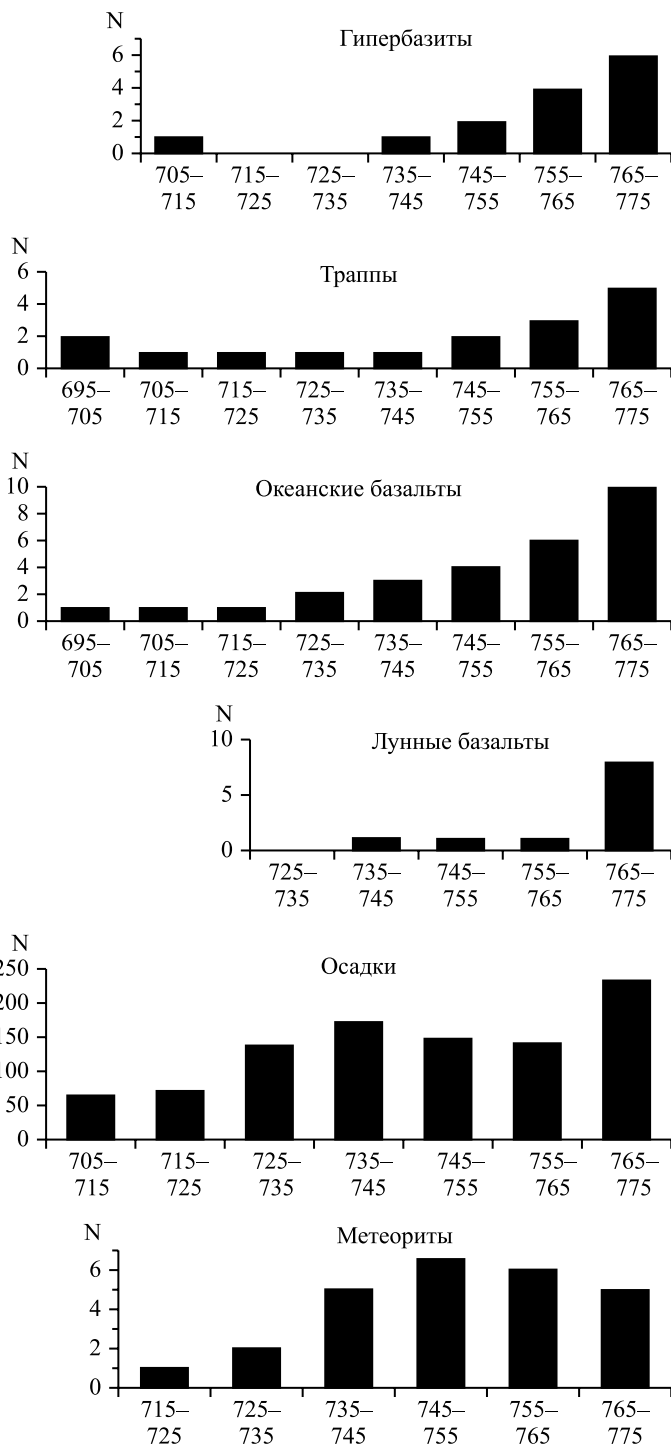
определить наличие металлического железа, его концентрацию, которая нередко оказывалась ниже  $10^{-4}\%$ , точку Кюри, то есть состав его, микроскопические же исследования дали сведения о форме, размере и составе зерен металлического железа.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

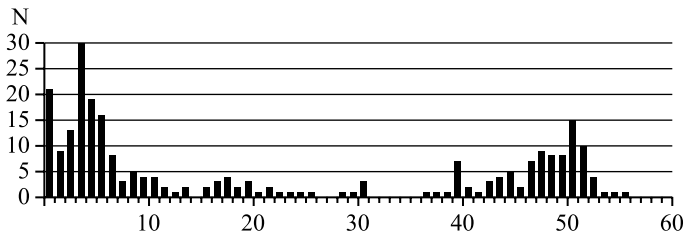
Основным методом исследования металлического железа в горных породах служит термомагнитный анализ. Он

позволяет быстро и с высокой чувствительностью получить сведения о концентрации и составе магнитных минералов непосредственно на кусочке горной породы, не извлекая из нее железо и другие минералы. Термомагнитный анализ выполнялся сотрудницей Палеомагнитной лаборатории Казанского университета Д.М. Кузиной (использовались магнитные весы Кюри) и сотрудником Лаборатории геомагнитного поля и петромагнетизма Института физики Земли РАН Г.П. Марковым (использовался термовибромагнитометр, сконструированный Н.М. Аносовым и Ю.К. Виноградовым). Анализ проводился в магнитном поле напряженностью 400–500 мТл и температурном интервале от +20°C до +800°C. Верхний предел (+800°C) выбран для того, чтобы фиксировать точку Кюри металлического железа, у чистого железа она равна +770°C и ниже, в зависимости от присутствия различных примесей, в первую очередь никеля.

Микрозондовый анализ и другие микроскопические исследования использованы для уточнения (и дополнения) данных термомагнитного анализа. Они проведены сотрудником геофизической обсерватории Борок ИФЗ РАН В.А. Цельмовичем на микрозонде "Tescan Vega-II" (Чехия) диаметром зонда около



Графики данных термомагнитного анализа. Гистограммы точек Кюри (в градусах Цельсия) демонстрируют однообразие составов металлического железа земного и внеземного происхождения. N – число образцов в данном температурном интервале.



Графики данных микрозондового анализа. Диаграмма концентрации никеля (%) в металлической части каменных метеоритов. N – число измерений. Большое расхождение процентного содержания никеля от измерения к измерению – результат, главным образом, гравитационной дифференциации вещества планеты.

0,2 мкм (размер анализируемого участка 2 мкм) с энергодисперсионным спектрометром. Оптические наблюдения проведены с помощью микроскопа “Olympus BX51M” (Япония) с увеличением до 1000 крат. Образцы для микрозондового анализа предварительно дробились ультразвуком, затем магнитная фракция извлекалась с помощью постоянного магнита.

В большинстве случаев данные микрозондового и термомагнитного анализов согласуются, но есть и расхождения. Это связано с тем, что термомагнитный анализ проводится на кусочке породы весом менее 0,1 грамма, а микрозондовый – на обогащенной магнитной фракции, взятой из большего куска горной породы.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОМАГНИТНОГО АНАЛИЗА

Металлическое железо в изученных группах

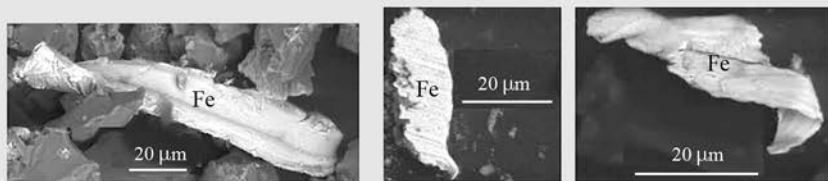
пород мы фиксируем по точкам Кюри. Так, точка Кюри железа зафиксирована в 14 образцах гипербазитов из 50 измеренных; концентрация железа, определенная по намагниченности и точке Кюри образца, варьирует от 0,0001% до 0,003%. Металлическое железо обнаружено по точке Кюри в 16 образцах траппов – половине изученных образцов. Концентрация металлического железа варьирует от 0,0001% до 0,0055%, она подобна гипербазитам. То же следует сказать об океанских базальтах: железо обнаружено в 27 образцах (что составляет половину изученных образцов базальтов), концентрация железа в них варьирует от 0,0002% до 0,018%. В лунных базальтах преобладает близкое к чистому железу (его концентрация меньше 0,1%).

Распределение точек Кюри железа очень сходно в земных (гипербазиты, траппы и океанские базальты) и во

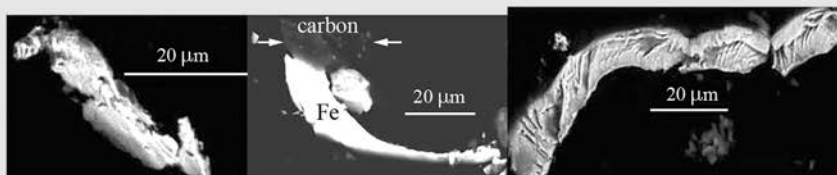
внеземных (лунные базальты) породах: на долю чистого железа приходится 31% образцов океанских базальтов, 36% – траппов, 43% – гипербазитов и 75% – лунных базальтов. И в метеоритах присутствует чистое железо, правда, в меньшем количестве.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОЗОНДОВОГО АНАЛИЗА

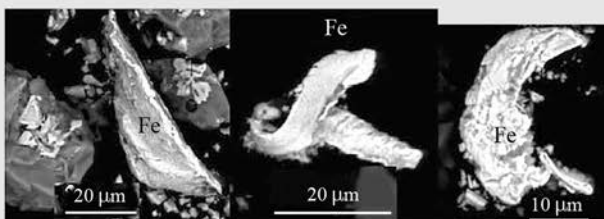
В соответствии с данными, полученными с использованием микрозондового анализа, в металлическом железе обычны примеси кремния, алюминия и хрома, в некоторых частицах железа присутствует заметная примесь марганца (обычно он встречается совместно с хромом). Некоторая доля частиц железа в базальтах и гипербазитах содержит примесь титана и магния; но примесь титана не отмечена в железе метеоритов. Наиболее интересна концентрация никеля в металлическом железе, она не зависит от земного или внеземного происхождения железа; 70% частиц железа в осадках не содержат никеля, 77% – в гипербазитах, 85% – в океанских базальтах, 86% – в траппах и только 8% – в метеоритах. Оставшиеся 92% частиц в метеоритах – это Fe-Ni-сплавы, содержащие от нескольких процентов до более 50% никеля, в их числе шрейберзит



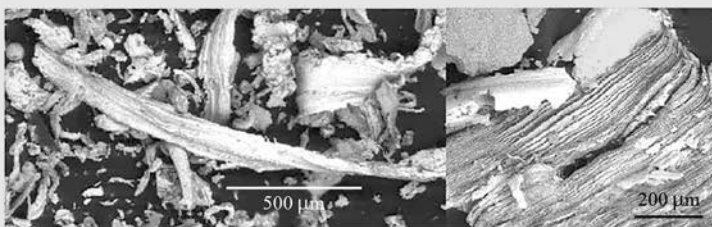
Гипербазиты



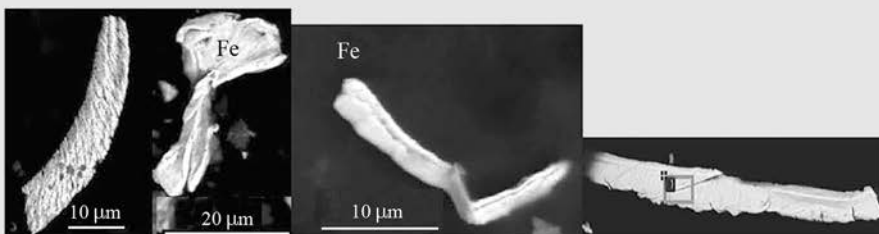
Сибирские траппы



Океанские базальты

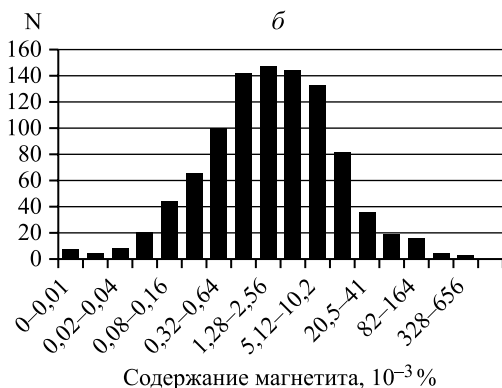
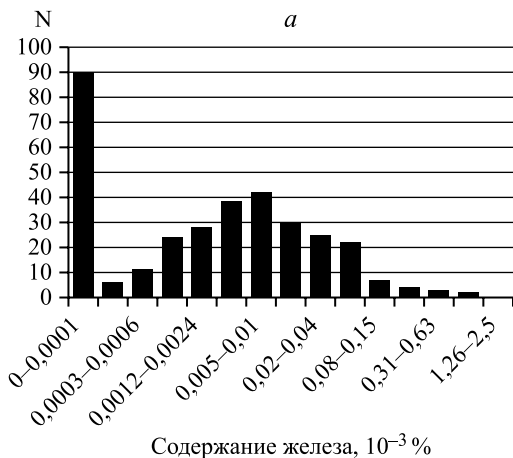


Метеориты



Осадки

*Примеры однообразия форм металлического железа земного и внеземного происхождения.*



Графики концентрации частиц металлического железа и магнетита в осадочных породах по данным терромагнитного анализа. N – число определений.

(Fe, Ni)<sub>3</sub>P и другие сплавы более сложного состава.

Преобладающее количество частиц металлического железа имеют одну и ту же форму, независимо от их земного или внеземного происхождения. Вариации форм и в то же время их повторение во всех изученных группах пород, скорее всего, отражает аналогичные первичные магматических условий для появления металлического железа.

Подобие условий образования частиц металлического железа во всех изученных группах пород выражается в идентичности распределения частиц по размеру: они варьируют, достигая 300–600 мкм, но при этом преобладают частицы размером не более 100 мкм. Преобладающие размеры частиц (менее 100 мкм) соответствуют внеземному их

происхождению: большинство таких частиц сохраняются, проходя через земную атмосферу, тогда как более крупные частицы при этом почти полностью сгорают. Правда, это не объясняет того же самого распределения по размеру частиц в случае железа земного происхождения. Очевидно, распределение частиц железа, в зависимости от их размера, отражает их формирование в таких магматических породах как гипербазиты, континентальные траппы и океанские базальты; в верхней мантии и в коре Земли и других планет.

#### ОБОБЩИМ НАШИ РЕЗУЛЬТАТЫ

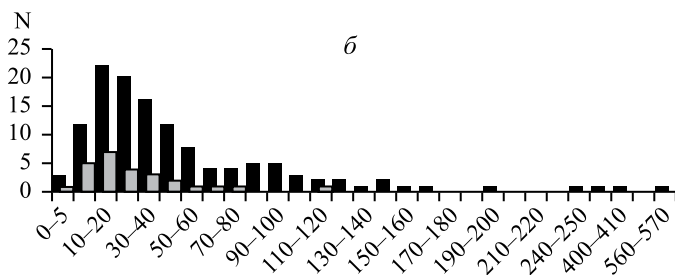
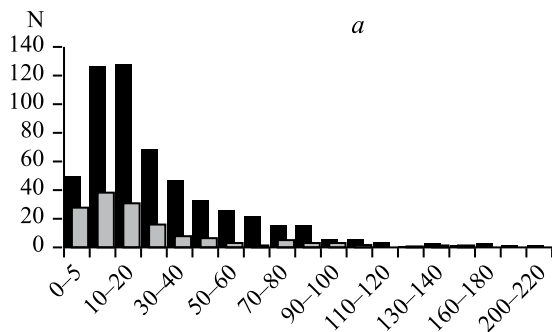
Подобие состава, формы и размера частиц металлического железа в земных магматических и осадочных породах может говорить об их

земном происхождении. Однако о внеземном происхождении подавляющей части металлического железа, обнаруженного в земном осадочном материале, однозначно свидетельствует набор статистических признаков:

- глобальное распространение частиц железа в осадочных породах из различных регионов мира, разного возраста (от четвертичного периода до кембрия), в озерах, морях и океанах с разной литологией и окислительно-восстановительными режимами;

- сложное распределение концентрации частиц металлического железа, нетипичное для частиц железа земного происхождения (например, магнетита) с обязательной “нулевой” группой, в которой частицы железа отсутствуют; она представляет

Графики распределения по размеру числа ( $N$ ) частиц металлического железа (в мкм), содержащего (серый цвет гистограммы) и не содержащего (черный цвет гистограммы) примесь никеля в осадках (а) и в гипербазитах (б). Данные микрозонда.



участки, куда частицы железа внеземного происхождения не оседали из-за их ограниченного количества;

- отсутствует корреляция между концентрациями частиц металлического железа и земных магнитных минералов (например, магнетита);

- обратная зависимость концентрации частиц металлического железа от скорости накопления осадков (такая зависимость в поведении земных частиц отсутствует);

- преобладание в осадочных породах частиц железа размером менее 100 мкм (так как они не сгорели в земной атмосфере), тогда как для земных частиц такого верхнего предела не существует.

Глобальное распространение частиц металлического железа логично связать с космической межпланетной пылью, приходящей на Землю из космоса. Межпланетная пыль образуется в результате столкновения и дробления планет, астероидов, комет и других малых тел. Подобие частиц железа во всех

исследованных объектах (как земных, так и внеземных) позволяет допустить совпадение условий их формирования.

Согласно нашим результатам, приведенным в таблице, отношение числа частиц железа не содержащих примеси никеля (Fe), к числу частиц Fe-Ni-сплава (Fe/FeNi) в трапах равно 31, в океанских базальтах – 8,4. Подобна ситуация и на Луне: частицы металлического железа из базальтов состоят, согласно результатам микрозондового и термомагнитного анализа, из практически чистого железа, обычно примесь никеля от нуля до 0,5%,  $Fe/FeNi \geq 10$ . В гипербазитах соотношение  $Fe/FeNi = 5,6$ ; у каменных метеоритов – 0,147, у железных метеоритов – 0,146%; у осадков – 3,9%,

что в последнем случае очень близко к гипербазитам, то есть к породам из верхней части мантии.

Совпадение отношений Fe/FeNi в каменных и железных метеоритах (0,147 и 0,146) свидетельствует об отсутствии резкой границы между нижней мантией и ядром.

Общая концентрация частиц металлического железа и Fe-Ni сплавов (Fe + FeNi) в изученных образцах каменных метеоритов, по данным термомагнитного анализа 0,3–9%; тогда как в базальтах и гипербазитах Fe + FeNi очень редко превышает 0,01%, в лунных базальтах не превышает 0,1%.

Следовательно, изученные нами образцы каменных метеоритов относятся, вероятнее всего, к низам мантии. Вышеизложенное подтвержда-

**КОЛИЧЕСТВО И ПРОЦЕНТНОЕ СОДЕРЖАНИЕ  
ЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗА И Fe-Ni-СПЛАВОВ В ПЛАНЕТАХ**

N	Σ	Fe	FeNi	Fe/FeNi	ШР	CFe
Траппы (кора)						
21	72	62	2	31	0	
%		86	2,8		0	≤ 0,01
Океанские базальты (кора и верхняя мантия*)						
14	79	67	8	8,4	0	
%		85	10		0	≤ 0,01
Лунные базальты (кора и верхняя мантия)				~10	0	0,05
Гипербазиты (верхняя мантия)						
16	166	128	23	5,6	0	
%		77	14		0	≤ 0,01
Осадки (верхняя мантия)						
105	552	388	99	3,9	2	
%		70	18		0,4	≤ 0,01
Метеориты каменные (нижняя мантия)						
16	267	34	232	0,147	6	
%		12,8	87,3		2,2	> 0,1–9
Метеориты железные (ядро)						
28	535	68	466	0,146	90	
%		12,7	87,1		16,8	>90

*Примечание:* N – число образцов в данной группе пород; Σ – общее число частиц Fe + FeNi в данной группе пород; Fe – число частиц железа, не содержащих никель; FeNi – число частиц камасита и других сплавов, Fe/FeNi – их отношение; ШР – число частиц шрейберзита; % – процентное отношение Fe, FeNi и шрейберзита к сумме частиц Σ; CFe – преобладающая концентрация железа, согласно термомангнитному анализу (%).

\* В данной статье терминам “верхняя мантия” и “нижняя мантия” не придается “сейсмического” значения. Автор называет так верхнюю часть мантии, где отношение концентраций частиц Fe/FeNi близко к осадкам и гипербазитам и на два порядка выше, чем в метеоритах: то есть в нижней мантии и в ядре планет.

ется распределением шрейберзита: доля его частиц в железных метеоритах (то есть в ядре) 17%, в каменных метеоритах (в нижней мантии) ~2%, и он практически отсутствует в гипербазитах и базальтах, то есть в верхней мантии.

Из полученных результатов можно заключить, что материал

верхней части мантии планет легче разрушается, чем материал их нижней мантии и ядра. Соответственно материал верхней мантии должен преобладать в межпланетной пыли, и он преимущественно попадает в земные осадки. Материал нижней мантии и ядра попадает на поверхность Земли в виде

относительно крупных обломков – метеоритов.

Таким образом, найдена закономерность распределения частиц Fe-Ni-сплавов внутри Земли и других планет: более 90% их содержится в ядре, заметное присутствие в нижней мантии, относительно низкая доля (14%) в верхней мантии; они практически

ки отсутствуют в коре Земли и Луны. В то же время общее содержание частиц железа без никеля и Fe-Ni-сплавов в ядре (железные метеориты) и в нижней мантии (каменные метеориты) одинаковое.

#### ПОДВЕДЕМ ИТОГИ НАШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате обобщения данных термоманнитного и микрозондового анализов для земных и внеземных пород обнаружено подобие составов, форм и размеров частиц железа, содержащих и не имеющих примеси никеля во всех группах пород. Выяснилось, что частицы металлического железа в земных осадках в подавляющем большинстве случаев имеют внеземное происхождение, и их повсеместное распространение связывается с межпланетной пылью. Отмеченное сходство частиц железа говорит о близких условиях образования таких частиц на Земле и на других планетах из гомогенного газопылевого облака на ранней стадии эволюции Солнечной системы и других звездно-планетных систем, а также на стадии последующей гравитационной дифференциации планет. Согласно современным представлениям, газопылевые облака во Вселенной широко распространены, однородны

и близки по составу; из них все время образуются звездно-планетные системы, включая Солнечную. Следовательно, есть возможность создать общую модель распределения металлического железа **во всех планетах**. Вот основные ее положения:

– титаномагнетит – главный магнитный минерал коры планет, содержит 12–14% титана; его состав варьирует в зависимости от окислительно-восстановительных условий в магме. Близкая к земной ситуация типична для марсианских базальтов. Из-за высоко-восстановительных условий в лунных базальтах кристаллизуется ульвошпинель ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ) и другие феррошпинели, содержащие только  $\text{Fe}^{2+}$ . В земных и лунных базальтах отношение  $\text{Fe}/\text{FeNi} \geq 10$ ;

– в верхах мантии титаномагнетит отсутствует, заметно уменьшается отношение  $\text{Fe}/\text{FeNi} = 5,5\%$ ; при этом суммарная концентрация частиц металлического железа  $\leq 0,01\%$ , как в породах коры; суммарная характеристика всей верхней мантии выражена в величине отношения  $\text{Fe}/\text{FeNi} = 3,9\%$  для осадков, которая очень близка к соотношению  $\text{Fe}/\text{FeNi}$  для гипербазитов, то есть к породам земной верхней мантии. Скорее всего, такие породы попадают в межпланетную пыль, тогда как материал

из нижней мантии падает на поверхность Земли в виде относительно крупных обломков метеоритов;

– нижняя мантия представлена в образцах каменных метеоритов; концентрация в них металлического железа и сплавов (Fe + FeNi) от более чем 0,2% до 9%, отношение  $\text{Fe}/\text{FeNi} = 0,147\%$ ; шрейберзит в небольших количествах (~2%) появляется в металлической части нижней мантии;

– в ядре планет, которые считаются источниками распространения в космосе метеоритов и, вероятно, в ядре Земли  $\text{Fe}/\text{FeNi} = 0,146\%$ , общая концентрация металла (Fe + Fe-Ni) около 90%; шрейберзит составляет заметную часть материала ядра, 17%;

– практически одинаковое распределение в планетах металлического железа, содержащего и не содержащего никеля, определяется действием общего для Вселенной закона всемирного тяготения (гравитации), который действует на стадии существования газопылевого протопланетного облака и гравитационной дифференциации в процессе формирования планет (в том числе и Солнечной системы). Последняя, следовательно, является не исключительным, а вполне рядовым событием.