

УДК 550.382

ЧИСТОЕ ЖЕЛЕЗО И ДРУГИЕ МАГНИТНЫЕ МИНЕРАЛЫ В МЕТЕОРИТАХ

© 2014 г. Д. М. Печерский, Г. П. Марков, В. А. Цельмович

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

e-mail: gpmarkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.09.2013 г.

Проведено обобщение результатов терромагнитного и микрозондового анализов 37 образцов из 25 метеоритов разных типов, при этом особое внимание обращалось на присутствие в них чистого (без никеля) железа. Установлено существование в метеоритах трех обособленных друг от друга групп металлических частиц: 1) чистое железо, 2) камасит с модой 3–6% Ni, 3) тэнит с модой ~50% Ni. Перерывы в составах Fe–Ni сплава между этими группами частиц противоречат диаграмме состояния в системе железо–никель, согласно которой в этой системе существует непрерывный ряд твердых растворов. Такую обособленность в составах металлических частиц метеоритов логично объяснить специфическими особенностями расплава (расплавов) металлов и процессов их кристаллизации и распада в космическом пространстве.

Предлагаются два основных варианта образования чистого железа в метеоритах: “первичный”, при кристаллизации из расплава, и “вторичный” — как результат распада твердого железо-никелевого раствора.

DOI: 10.7868/S0320930X14060073

ВВЕДЕНИЕ

Петромагнитные исследования космического материала в сочетании с микрозондовым анализом дают возможность получить определенную информацию о космических объектах.

Первый шаг в этом направлении был сделан в последние годы — это комплексное изучение космических металлических частиц в осадках (Печерский и др., 2011, 2013; Печерский, Шаронова, 2012). Кратко напомним о результатах петромагнитного и микрозондового анализов металлических частиц, присутствующих в осадках разных регионов и разного возраста. В осадках широко распространены металлические частицы космического происхождения, их концентрация обычно порядка $10^{-4}\%$ и очень редко превышает $10^{-3}\%$. Терромагнитные доказательства космического происхождения частиц самородного железа в осадках: 1) повсеместное распространение таких частиц, 2) бимодальный характер распределения частиц с обязательной «нулевой» модой; 3) отсутствие корреляции концентрации самородного железа с концентрацией таких земных минералов, как магнетит; 4) обратная зависимость накопления в осадках частиц железа от скорости осадконакопления; 5) как и в метеоритах, по составу металлические частицы в осадках можно разделить на три группы: 1) чистое железо, 2) ка-

масит с преимущественной концентрацией никеля 5–6%, 3) железо-никелевый сплав, содержащий более 20% Ni (тэнит) вплоть до чистого никеля. Первая и вторая группы распространены повсеместно, отражая свое закономерное присутствие в космической пыли, тогда как третья имеет локальное распространение и связана, вероятнее всего, с падением метеоритов. Совокупность перечисленных факторов однозначно говорит о космической природе частиц самородного железа в осадках.

Второй шаг — это терромагнитный анализ (ТМА) и микрозондовый анализ (МЗА) метеоритов для сравнения с данными ТМА и МЗА металлических частиц в осадках (Печерский и др., 2012a).

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для петромагнитного и микрозондового изучения метеоритов разных типов мы обратились с просьбой предоставить нам образцы метеоритов в ряд геологических музеев нашей страны. Откликнулись представители двух музеев: Михаил Николаевич Кандинов (Геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва) и Анна Алексеевна Пляшкевич (Музей естественной истории СВК-

НИИ ДВО РАН, Магадан), за что им огромная благодарность.

В нашем распоряжении было 37 образцов из 25 метеоритов, в том числе 12 железных, 7 железокосменных и 6 каменных метеоритов. Эти метеориты относятся к различным регионам мира: Северной и Южной Америки, Африки, Западной и Восточной Европы, Центральной Азии, Дальнего Востока и Северо-Востока Азии; времена падения их на Землю охватывают, по крайней мере, три века. Поэтому исследуемая выборка образцов метеоритов является, на наш взгляд, вполне представительной для выявления общей картины, единых закономерностей в распределении, составе и магнитных свойствах присутствующих в метеоритах магнитных минералов.

МЗА проводился в Геофизической обсерватории Борок ИФЗ РАН на микрозонде “Тескан Vega II” с энергодисперсионным спектрометром. Оптические микроскопические наблюдения проведены при помощи микроскопа “Olympus BX51M”. Применялась методика исследования микрочастиц в оптическом микроскопе с последующим МЗА. Образцы измельчались в агатовой ступке, диспергировались в ультразвуковой ванне, и из них с помощью постоянного магнита извлекалась магнитная фракция. Отобранные таким образом частицы наносились на двухсторонний проводящий угольный скотч и прикатывались стеклянной палочкой для того, чтобы поверхность частиц была ориентирована параллельно поверхности столика. Это позволяло анализировать частицы, не прибегая к полировке объекта, что привело бы к потере многих нано- и микрочастиц. Качество такого анализа может быть плохим для частиц со сложной топологией, поэтому выбирались по возможности плоские участки. Микрозондовые исследования проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 0.2 нА, размер луча зонда ~0.2 мкм, диаметр анализируемой области 1–2 мкм, предел обнаружения для железа и никеля – 0.2%, время набора импульсов 1–2 мин. Достоверное обнаружение кобальта при этих режимах проблематично, так как это потребовало бы увеличения токов в 10 раз и увеличенного времени набора, что приводит к дрейфу электронного луча из-за неизбежного нагрева подложки. Кроме того, анализ содержания кобальта необходимо проводить на аншлифах, а исследуемые образцы метеоритов были представлены в виде мелких обломков и порошков, из которых было невозможно приготовить полированные аншлифы для МЗА.

Все результаты МЗА, приведенные ниже, нормированы на 100%.

ТМА выполнен в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН на термо-вибромагнитометре конструкции Н.М. Аносова и Ю.К. Виноградова. При ТМА проводились непрерывные измерения намагниченности в постоянном магнитном поле ~600 мТл в процессе нагрева образца до 800°C и последующего охлаждения до комнатной температуры со скоростью 1°C/с. Цикл нагрев-охлаждение, как правило, повторялся дважды. Концентрация никеля в никелистом железе определялась по данным МЗА, и ТМА.

ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МЗА И ТМА

Подробные данные МЗА и ТМА магнитных минералов исследуемых метеоритов опубликованы в работе (Печерский и др., 2012б). Ниже приведено обобщение этих данных.

Основные магнитные минералы в исследуемых метеоритах:

1) чистое (без никеля) железо обнаружено в 14 образцах, в том числе в 5 образцах (из 9) каменных метеоритов и 9 образцах (из 20) железных и железокосменных метеоритов (отметим, что, строго говоря, речь идет не о чистом железе, а о железе, содержащем небольшие концентрации примесей в пределах чувствительности и точности наших методов исследований, т.е. десятых долей процента);

2) камасит (Fe–Ni сплав с относительно низкой концентрацией никеля), обнаруживается и при ТМА и при МЗА во всех образцах метеоритов;

3) тэнит (Fe–Ni сплав с относительно высокой концентрацией никеля), присутствует по данным МЗА в 12 образцах (в 4 железных, в 2 железокосменных и во всех образцах каменных метеоритов);

4) шрейберзит (Fe,Ni)₃P обнаружен при МЗА в 15 образцах железных и железокосменных метеоритов и не обнаружен в каменных метеоритах;

5) Fe-сульфиды, главным образом троилит, а также пирротин и пентландит присутствуют в 11 образцах в заметных количествах во всех каменных метеоритах и почти отсутствуют в железных и железокосменных метеоритах; ✓

6) магнетит (Fe₃O₄) неоднократно фиксировался при ТМА в заметных количествах (очевидно, этот магнетит – чаще всего продукт

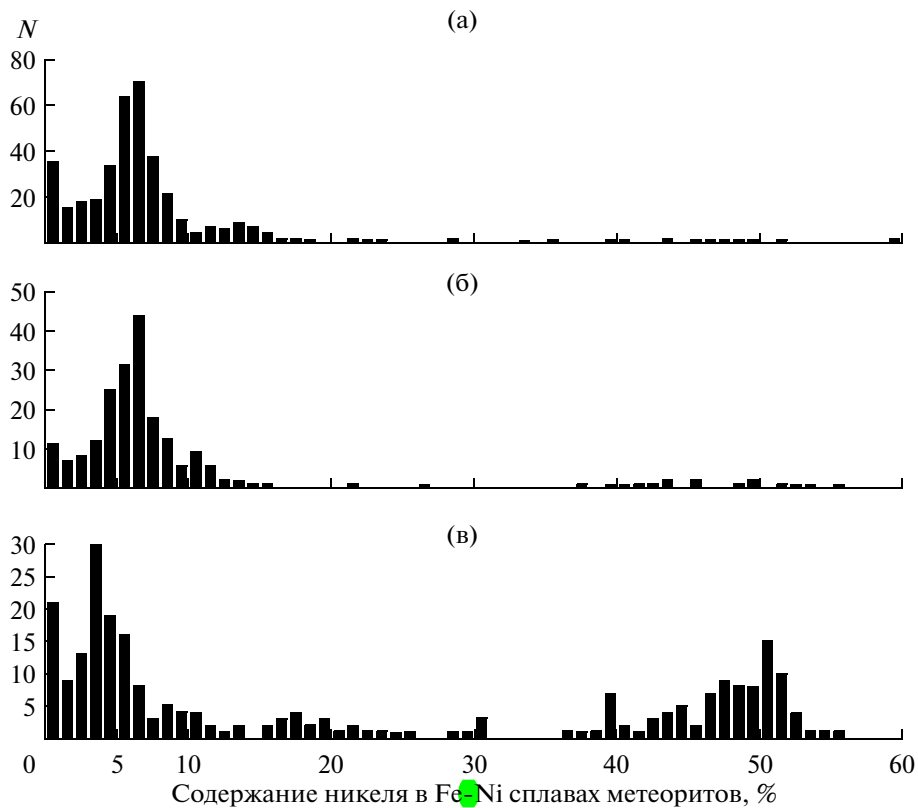


Рис. 1. Гистограммы содержания никеля (%) в Fe–Ni сплаве в метеоритах разного типа:

(а) — железные, (б) — железокаменные, (в) — каменные; данные МЗА
(по оси ординат N — число определений данной концентрации никеля).

вторичного окисления камасита и других магнитных минералов).

Проведенная статистическая обработка полученных результатов позволяет предположить, что три основных магнитных минерала метеоритов (камасит, тэнит и шрейберзит) кристаллизуются обособленно (независимо) друг от друга. Это подтверждается отсутствием корреляции между концентрациями этих минералов в исследуемых образцах: коэффициенты линейной корреляции между концентрациями камасита и тэнита $R_{кт} = -0.082$, камасита и шрейберзита $R_{кш} = -0.087$, тэнита и шрейберзита $R_{тш} = -0.073$.

Следует отметить, что “тэнитом” мы называем здесь Fe–Ni сплавы, содержащие более 20% никеля. Такое разделение Fe–Ni сплавов на камасит и тэнит достаточно условно, так как главное их отличие состоит не в концентрации Ni, а в кристаллической решетке: камасит имеет объемно-центрированную кубическую решетку, тэнит — гранецентрированную.

Гистограммы распределения числа наблюдений (N) по концентрации никеля для Fe–Ni спла-

вов метеоритов (рис. 1а–в) демонстрируют, во-первых, трехмодальное распределение: 1) чистое железо с модой 0% Ni, 2) камасит с модой 5–6% Ni в железных и железокаменных метеоритах (рис. 1а, б) и 3% Ni в каменных метеоритах (рис. 1в), 3) тэнит с модой 50% Ni в каменных метеоритах (рис. 1в); во-вторых, в железных и железокаменных метеоритах Fe–Ni сплав, содержащий более 20% Ni (тэнит), присутствует лишь в виде единичных зерен (рис. 1а, б), в каменных метеоритах доля тэнита, содержащего 39–52% Ni, с модой 50% Ni существенно возрастает (рис. 1в).

Существование на гистограммах (рис. 1) интервалов резкого спада N вплоть до отсутствия Fe–Ni сплавов, содержащих примерно 15–36% Ni, противоречит диаграмме состояния Fe–Ni сплавов, на которой таких “запретов” нет: железо и никель образуют между собой непрерывный ряд твердых растворов (Bozorth, 1951; Cassiamani и др., 2006). Следовательно, отсутствие в метеоритах некоторых Fe–Ni сплавов есть специфика расплава (или расплавов), из которого обособ-

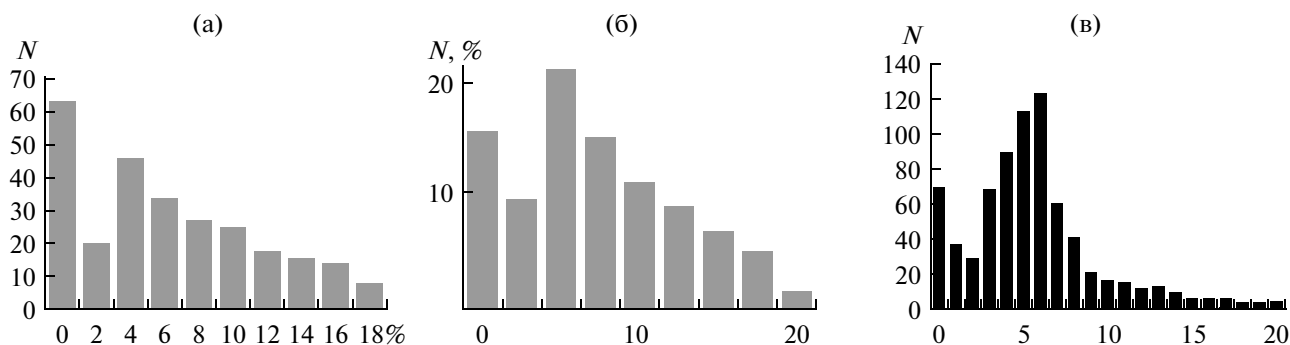


Рис. 2. Гистограммы содержания никеля (%) в самородном железе:

(а) — осадки Атлантики, (б) — эпиконтинентальные осадки северной Евразии (данные ТМА),

(в) — металлическая часть метеоритов (данные МЗА) ←

(по оси ординат N — число определений данной концентрации никеля).

ленно (независимо) кристаллизуются чистое железо, камасит и тэнит.

Следует отметить, что по данным непосредственного изучения доставленных на Землю образцов лунных базальтов и собранных на Земле лунных метеоритов (Фрондел, 1978; Meteoritical Bulletin, 2000–2010) в них практически отсутствуют Fe–Ni сплавы, но в небольшой концентрации присутствует чистое железо. По-видимому, это чистое железо не связано с коровыми лунными базальтами и т.п., поскольку полученные нами результаты по метеоритам заведомо не корового происхождения показали наличие в них чистого железа наряду с обычным для метеоритов никелистым железом (камаситом) и небольшой концентрацией тэнита.

Гистограммы (рис. 1а–в) построены исключительно по данным МЗА, они отражают число случаев фиксации зерен того или иного состава, не характеризуя их общей концентрации в данном образце. Оценка концентрации камасита и тэнита по совокупности данных ТМА и МЗА показывает (Печерский и др., 2012), что, во-первых, суммарное среднее содержание магнитных минералов в железных метеоритах менее 70%, что, очевидно, объясняется заметным их окислением до слабомагнитных и практически немагнитных гидроокислов железа; во-вторых, содержание камасита в железных метеоритах на порядок выше, чем в каменных. Среднее содержание тэнита примерно одинаково во всех типах метеоритов, при этом относительное содержание тэнита в железных метеоритах примерно в 40 раз меньше, чем камасита, тогда как в каменных метеоритах — только в 3.5 раза, т.е., по-види-

мому, тэнит более тяготеет к каменным метеоритам.

Отметим очень близкое сходство гистограмм распределения N по содержанию никеля в Fe–Ni сплавах железных метеоритов и в осадках разного возраста и разных регионов мира (рис. 2), что, очевидно, свидетельствует в пользу их единой природы. Отсюда можно заключить, что главный источник железных метеоритов и металлических частиц в осадках один и тот же. И железные метеориты, и металлические частицы в осадках — это результат разрушения родительского тела (планеты).

Остановимся подробнее на результатах наблюдения чистого (без никеля) железа в метеоритах. Судя по всем данным МЗА, можно предположить, что существует два главных варианта образования чистого железа в метеоритах: “первичный”, из расплава и “вторичный” как результат распада твердого раствора Fe–Ni сплава, что выражается в различных формах выделений чистого железа. ✓

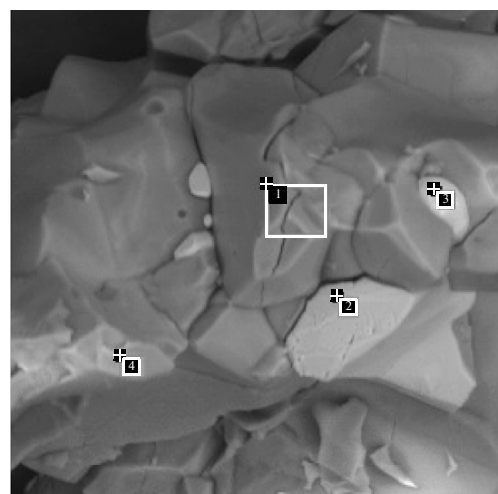
1. Обособленные зерна размером от менее 2 мкм до относительно крупных 30–70 мкм, находящиеся, как правило, в силикатах каменных метеоритов (рис. 3). Исключение составляет зерно чистого железа размером более 100 мкм в метеорите Биштюбе, где значительная его часть превращена во вторичные гидроокислы железа (рис. 4а).

2. Чешуйки, стружки и тонкое переслаивание чистого железа с камаситом, обычно толщина слойков менее 2 мкм, иногда до 5 мкм (рис. 5). Такое переслаивание обычно наблюдается в железных метеоритах.

3. Повсеместно наблюдаются очень мелкие включения чистого железа размером меньше раз-

№	O	Mg	Si	Ca	Fe	Ni
1	52.35	15.60	22.57	2.90	6.30	0.28
2	4.10	2.86	1.93	0.23	90.88	0.00
3	3.47	1.50	0.84	0.00	82.61	11.58
4	26.64	14.51	13.65	0.00	43.33	1.87

(a)

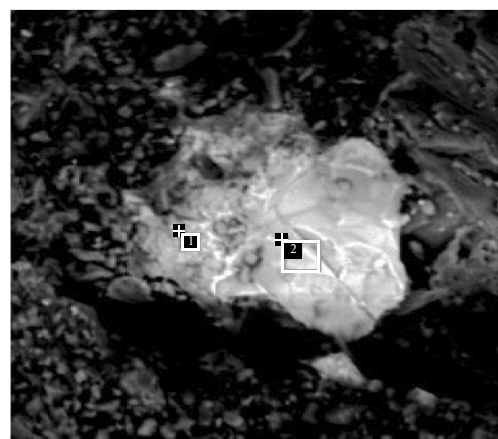


40 мкм

Electron image 1

№	O	Mg	Al	Si	Fe
1	7.23	4.10	1.03	3.92	83.72
2	4.18	2.66	0.62	2.36	90.18

(б)

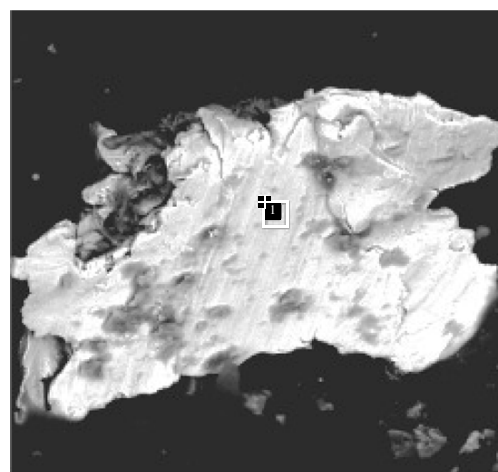


40 мкм

Electron image 1

O	Fe
5.76	94.24

(в)



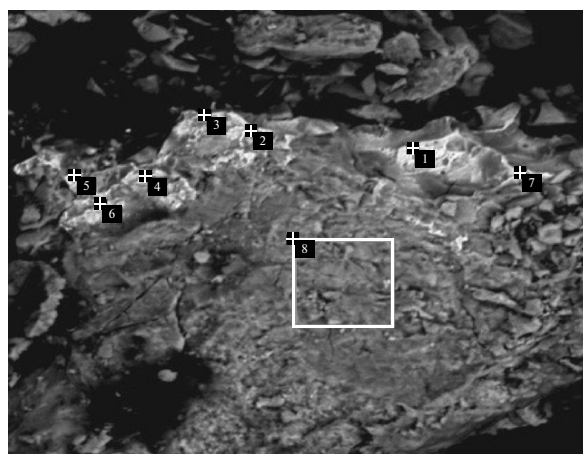
40 мкм

Electron image 1

Рис. 3. Обособленные зерна чистого (без Ni) железа (2) и камасита (3) в силикатах (1, 4), ахондрит Камберленд Фоллс (а). Зерно чистого железа в окружении силикатов, хондрит Саратов (б). Зерно чистого железа (1), видна полосчатая структура, более темные полосы и пятна, возможно, окисленное железо, хондрит Саратов (в).

№	O	Fe
1	3.91	96.09
2	4.78	95.22
3	3.55	96.45
4	9.10	90.90
5	11.62	88.38
6	14.39	85.61
7	9.32	90.68
8	31.10	68.90
8a	35.86	64.14

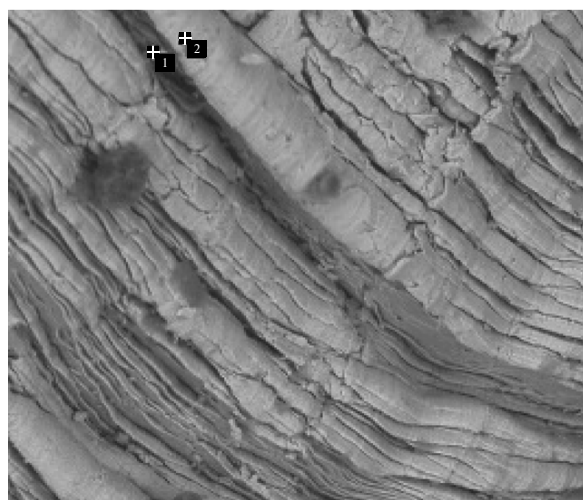
(a)



20 мкм

Electron image 1

(б)

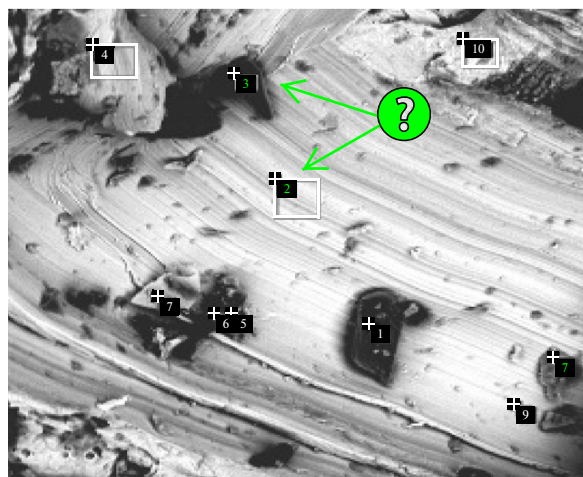


20 мкм

Electron image 1

№	O	Mg	Si	Cr	Fe	Ni
1	21.71	8.12	0.00	0.00	70.18	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	0.00
3	23.01	0.00	0.00	0.00	76.99	0.00
4	5.56	0.00	0.00	0.00	91.08	3.36
5	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	0.00
6	27.83	0.00	3.88	0.00	68.29	0.00
7	25.94	0.00	0.00	0.00	74.06	0.00
8	5.71	0.00	0.00	31.70	60.04	2.55
9	6.74	0.00	0.98	0.00	92.28	0.00
10	1.65	0.87	0.43	0.00	92.79	4.26

(в)



20 мкм

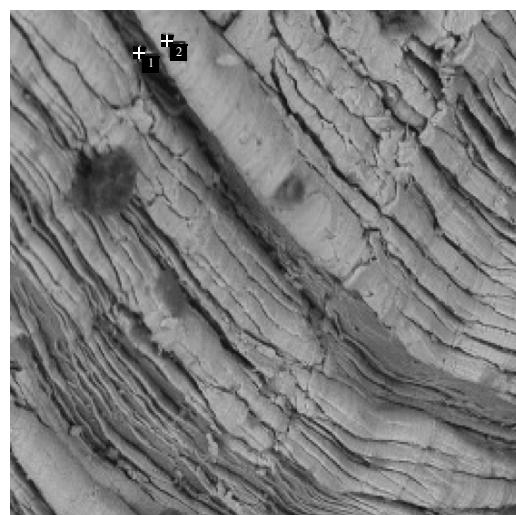
Electron image 1

Рис. 4. Остатки чистого железа [1–7], превращенного в гетит и гематит [8].

Октаэдрит Биштюбе (а). Участок тонкослоистого чистого железа [2, 5, 9] со светлыми включениями и прослоями камасита [4, 10]. Черные зерна [1, 3, 6] обогащены углеродом. [7] – магнетит, [8] – зерно хромферита. Палласит Омолон (б).

№	O	Fe
1	1.25	98.75
2	2.45	97.55

(a)

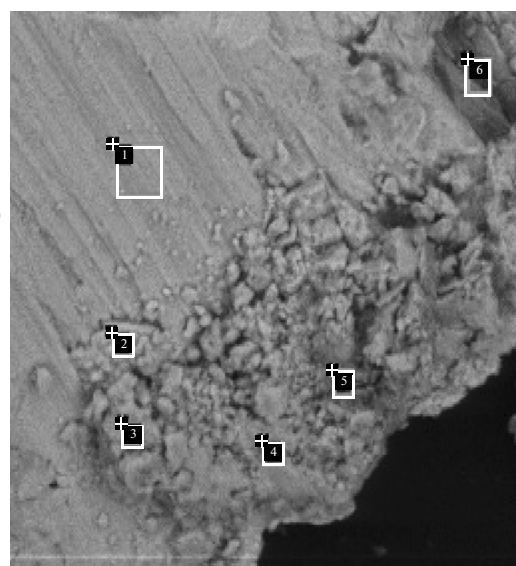


20 мкм



№	O	P	S	Cr	Fe	Ni
1	6.92	0.43	0.85	0.00	90.11	1.68
2	10.86	1.34	6.25	1.92	77.51	2.13
3	4.38	0.75	17.37	6.73	67.59	3.17
4	7.12	0.34	21.95	14.08	54.67	1.86
5	10.19	7.24	5.49	1.27	58.57	17.24
6	1.47	0.00	0.00	0.00	97.93	0.60

(б)



10 мкм



Рис. 5. Слой чистого железа шириной ~5мкм (1, 2) среди слоев камасита, Алискерово, октаэдрит (а). Тонкое переслаивание чистого железа и камасита (1) с мелкими включениями добреелита (3, 4) и шрейберзита (5), Анжуйский гексаэдрит (б).

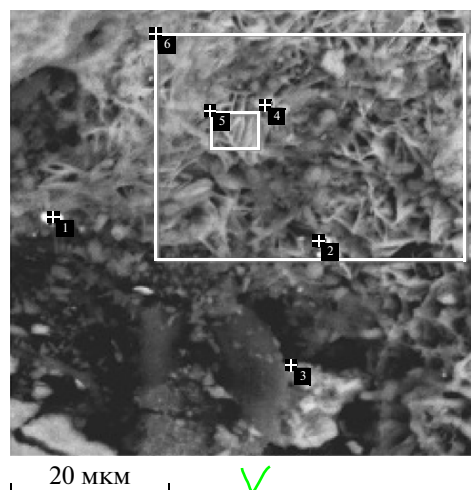
мера зонда, такие включения чаще встречаются в железных метеоритах (рис. 6а), но один раз они были обнаружены в троилите каменного метеорита (рис. 6б).

4. В железных метеоритах обнаружено два шарика чистого железа размером до 30 мкм (рис. 7).

Обособленность образований чистого железа и Fe—Ni сплавов подчеркивается и обособленностью распределения вторичных окислов и гидроокислов железа, содержащих и не содержащих примеси никеля, т.е. образованных по камаситу и тэниту или по чистому железу (рис. 8). Количество Fe-окислов и гидроокислов, содержащих и не содержащих никель, отражает соотношение

№	O	S	Ca	Fe
1	28.62	0.00	3.42	67.97
2	7.41	0.00	1.62	90.97
3	27.08	5.31	7.46	60.16
4	9.52	0.00	2.00	88.48
5	4.39	0.00	1.09	94.52
6	22.36	0.00	4.75	72.89

(a)



№	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ni
1	1.76	0.00	0.00	0.00	0.00	33.63	0.00	64.61	0.00
2	5.96	0.00	3.00	0.00	1.96	13.35	0.00	75.72	0.00
3	2.22	0.00	0.49	0.55	1.23	9.81	0.00	85.42	0.00
4	1.69	0.00	0.54	0.00	0.57	17.04	0.00	80.17	0.00
5	0.59	0.00	0.00	0.30	0.00	0.64	0.00	97.74	0.73
6	7.94	0.00	4.91	0.47	3.51	2.67	0.00	80.49	0.00
7	3.24	0.00	0.63	0.00	0.45	32.56	0.00	63.12	0.00
8	1.39	0.00	0.73	0.00	0.36	0.32	0.00	47.08	50.12
9	5.97	0.88	3.07	0.35	2.20	1.88	0.00	46.26	39.39
10	41.43	1.52	17.2	1.39	16.55	0.25	0.36	18.86	2.43
11	5.71	0.00	0.78	0.00	0.76	35.19	0.00	57.55	0.00
12	53.62	0.00	16.2	0.00	21.39	0.42	1.25	7.10	0.00
13	37.03	0.00	20.2	0.00	18.52	0.39	2.28	20.34	1.23
14	48.02	1.75	18.1	2.23	18.26	0.19	0.21	10.94	0.00

(б)

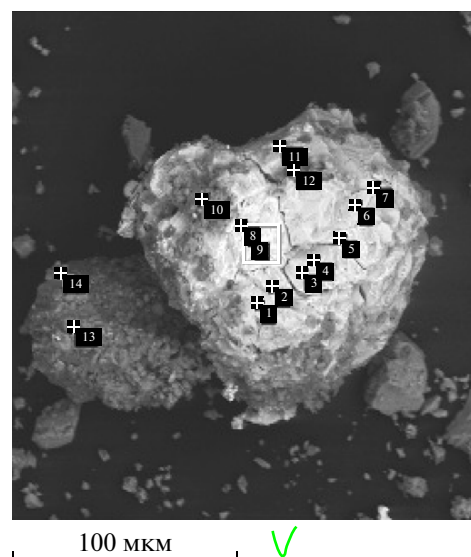


Рис. 6. Частицы чистого железа размером меньше зонда [2, 4, 5]. Остальное – гетит [1] и Fe-сульфиды [3]. Средний состав [6] отвечает магнетиту. Зерно овальной формы состоит из троилита [1, 7, 11] с включениями чистого железа [2–6], облеплено силикатами [10, 12–14].

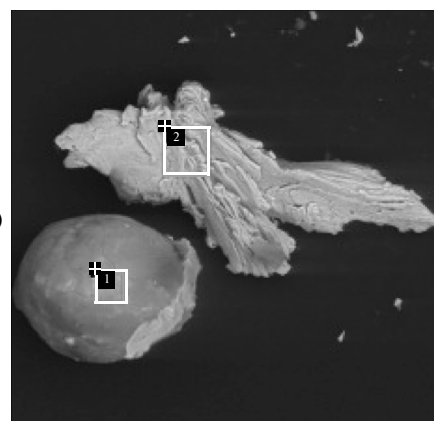
Зонд часто захватывает участки железа и Fe-сульфида [2–6], т.е. размеры включений железа близки к размеру зонда. В центре – включение тэнита (тетратэнита) [8, 9]. Хондрит Саратов.

концентраций в изученных метеоритах Fe–Ni сплавов (камасита + тэнита) и чистого железа. Так, в железных и железоканменных метеоритах зафиксированы Fe-окислы и гидроокислы, содержащие никель, в 408 точках, и не содержащие никель – в 105 точках; тогда как в каменных метеоритах Fe-окислы и гидроокислы, содержащие

никель, обнаружены в 15 точках, и не содержащие никель – в 28 точках. Естественно, в железных метеоритах концентрация металла гораздо больше, чем в каменных, что отражается в содержании Fe-окислов и гидроокислов, но при этом соотношение первых (с никелем) и вторых (без никеля) в железных метеоритах равно ~4, а в каменных ~0.5!

№	O	Fe
1	11.15	88.85
2	2.04	97.96

(a)

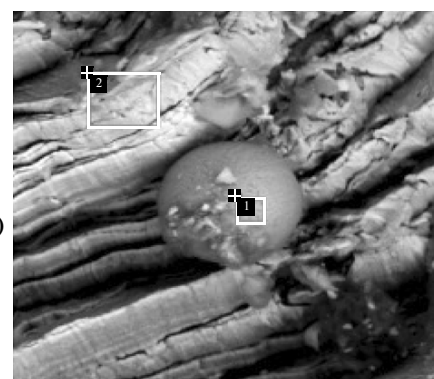


50 мкм

Electron image 1

Fe	Ni
100.00	0.00

(б)



20 мкм

Electron image 1

Рис. 7. Два шарика чистого железа: а) оплавленный шарик, покрытый тонкой пленкой окисления (1) и стружки (2) (Аньюйский гексаэдрит), б) шарик чистого железа среди чешуй камасита (Баббс Милл, октаэдрит).

Обособленное образование чистого железа и Fe–Ni сплавов выражается в трехмодальном распределении N по содержанию никеля в самородном железе, в первую очередь, в существовании обособленной группы чистого железа (рис. 2). При этом соотношение числа случаев Fe–Ni сплава и чистого железа (рис. 2в) равно ~ 5 , что близко к соотношению числа случаев Fe-окислов и гидроокислов, содержащих никель, к числу случаев “чистых” (без никеля) Fe-окислов и гидроокислов.

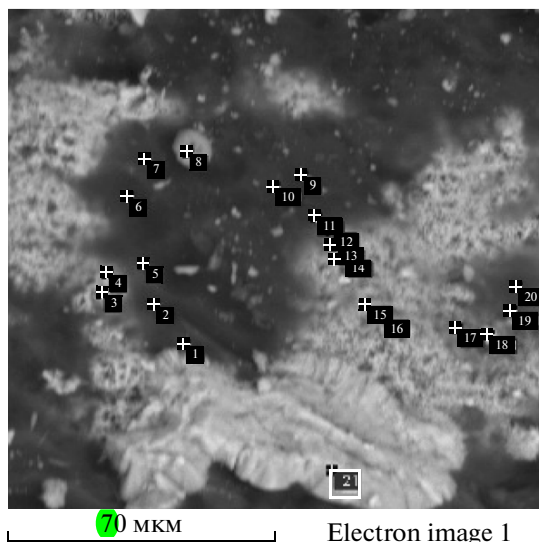
Как отмечено выше, почти во всех образцах наблюдаются очень тонкие ламели (часто меньше размера зонда) тэнита, камасита и чистого железа. Такие структуры, очевидно, яв-

ляются результатом распада твердого раствора Fe–Ni. Терромагнитный признак таких структур и их гомогенизации при нагреве — уменьшение точек Кюри камасита после нагрева образцов до 800°C . Такая тенденция хорошо видна на рис. 9.

При первом нагреве точки Кюри в большинстве случаев не зависят от содержания никеля и очень близки к T_c чистого железа (около 770°C). При втором нагреве происходит заметное уменьшение T_c , что, очевидно, связано с гомогенизацией твердого раствора, и ее величина уже становится зависимой от концентрации никеля в камасите.

№	O	Cl	Ca	Fe	Ni
1	26.97	7.88	0.00	65.16	0.00
2	28.83	6.22	1.92	63.03	0.00
3	20.10	7.16	0.00	72.18	0.56
4	21.49	6.61	0.00	71.27	0.63
5	18.29	8.31	0.00	73.40	0.00
6	16.45	4.03	2.64	76.88	0.00
7	39.20	7.16	0.00	53.64	0.00
8	42.18	6.85	0.00	50.98	0.00
9	22.46	11.79	0.00	60.93	4.82
10	9.66	10.66	0.00	79.68	0.00
11	10.50	9.09	0.62	78.81	0.98
12	6.19	8.90	0.00	83.88	1.03
13	6.93	7.27	0.00	85.79	0.00
14	35.95	3.52	2.06	57.46	1.02
15	9.84	6.83	0.00	82.32	1.00
16	6.12	6.13	0.20	87.54	0.00
17	21.74	7.06	0.00	71.20	0.00
18	44.21	0.99	0.18	53.03	1.59
19	8.16	7.75	0.00	82.99	1.09
20	19.15	9.04	0.00	71.81	0.00
21	27.43	3.95	0.00	64.90	3.71

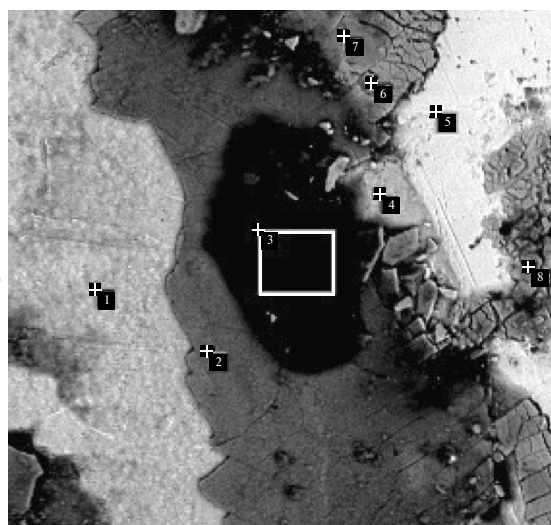
(a)



Electron image 1

№	O	Na	Fe	Ni
1	3.83	0.00	85.65	10.52
2	30.17	1.19	68.64	0.00
3	34.04	0.00	65.96	0.00
4	1.36	0.00	89.59	9.06
5	24.45	0.00	74.50	1.06
6	0.00	0.00	92.01	7.99
7	26.98	2.07	70.95	0.00
8	26.45	1.57	70.31	1.67

(б)



Electron image 1

Рис. 8. Частично сохранившееся чистое железо (10–13, 15, 16, 19) на фоне вторичных окислов (3–5, 17, 20) и гидро-окислов (1, 2, 7–9, 14, 18, 21) железа. Черные пятна – участки, обогащенные углеродом. Fe-окислы и гидроокислы, не содержащие никеля, образуют обособленные (темные) участки. Метеорит Косбис-Крик (а). Стадии вторичного окисления камасита: белый неизменный [6], светло-серая, шагреновая поверхность – появление слабого окисления по камаситу [1, 4]; темно-серый слой окислов железа (гематит и магнетит), под которым находится чистое железо [2, 3, 7], граница между Fe-окислами, содержащими (1, 4) и не содержащими никель (2, 3, 7), отражает границу между камаситом и чистым железом (5, 8), Черный участок, близкий гетиту, обогащен углеродом [3]. Метеорит Омолон (б).

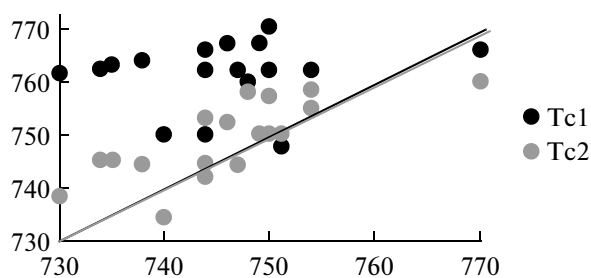


Рис. 9. Смещение измеренных точек Кюри (по оси ординат) в сторону расчетных (по оси абсцисс) после нагрева образцов метеоритов до 800°C. Tc1 — результат первого нагрева, Tc2 — результат второго нагрева.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главный результат проведенных исследований — это существование среди металлов метеоритов трех обособленных групп: 1) чистого железа, 2) камасита с модой 3–6% Ni и 3) тэнита с модой ~50% Ni. Между этими группами наблюдаются перерывы в составах сплава по содержанию никеля, хотя согласно диаграммам состояния в системе железо–никель существует непрерывный ряд твердых растворов. Такую обособленность в составах металлических частиц метеоритов, нашедшую свое отражение в трехмодальном виде гистограмм распределения N по концентрации никеля в Fe–Ni сплаве, логично объяснить специфическими особенностями расплава (расплавов), процессов их кристаллизации и последующего распада.

Судя по различным формам выделений чистого (без никеля) железа в исследуемых образцах, существуют два основных варианта образова-

ния чистого железа в метеоритах: “первичный” при кристаллизации из расплава и “вторичный” как результат распада твердого раствора Fe–Ni.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 13-05-00348. Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ № 14.Z50.31.0017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Печерский Д.М., Нургалиев Д.К., Фомин В.А., Шаронова З.В., Гильманова Д.М. Космическое железо в осадках мела // Физика Земли. 2011. № 5. С. 379–394.
- Печерский Д.М., Шаронова З.В. Терромагнитное свидетельство наличия частиц железа в осадках // Физика Земли. 2012. № 1. С. 44–62.
- Печерский Д.М., Марков Г.П., Цельмович В.А., Шаронова З.В. Внеземные магнитные минералы // Физика Земли. 2012а. № 7–8. С. 103–120.
- Печерский Д.М., Марков Г.П., Цельмович В.А., Шаронова З.В. 2012б. <http://paleomag.ifz.ru/books/2012-pechersky-et-al-meteorite-data-supplement.rar>
- 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 терромагнитного и микрозондового анализов // Физика Земли. 2013. № 3. С. 131–153.
- Фрондел Д.У. Минералогия Луны. М.: Мир. 1978. 334 с.
- Bozorth R.M. Ferromagnetism. D. New York: Van Nostrand Reinhold Co. Inc., 1951. 784 с.
- Cassamari G., Kayre J.D., Ferro R., Klotz U.E., Locaze J., Wollants P. Critical evaluation of the Fe–Ni, Fe–Ti, and Fe–Ni–Ti alloy systems // Intermetallic. 2006. V. 14. P. 1312–1325.
- Meteoritical Bulletin. № 84 (2000) — № 98 (2010).