

УДК 550.382

## ВНЕЗЕМНЫЕ МАГНИТНЫЕ МИНЕРАЛЫ

© 2012 г. Д. М. Печерский, Г. П. Марков, В. А. Цельмович, З. В. Шаронова

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

Поступила в редакцию 09.11.2011 г.

Проведены термомагнитный, микронзондовый анализы и измерен ряд магнитных характеристик 25 метеоритов и 3 тектитов из коллекций Геологического музея им. В.И. Вернадского РАН и Музея естественной истории СВКНИИ ДВО РАН. В результате установлено, что во всех метеоритах, независимо от их типа, присутствуют одни и те же магнитные минералы, варьирует лишь их концентрация. Главный магнитный минерал изученных метеоритов — камасит с концентрацией никеля менее 10%, реже встречаются чистое железо, тэнит, шрейберзит и чрезвычайно редки такие магнитные минералы, как никель, некоторые феррошпинели, Fe–Al сплав и др. Перечисленные минералы, как правило, отсутствуют в коре Земли и других планет. Вероятнее всего, изученные метеориты представляют ядро и нижнюю мантию планет-источников метеоритов. Однообразие магнитных свойств метеоритов и типов термомагнитных кривых  $M(T)$  нарушается вторичными изменениями метеоритов на Земле. Как и в метеоритах, в осадках наблюдается то же самое однообразие: камасит является практически единственным космическим магнитным минералом, встречающимся в осадках повсеместно и связанным с космической пылью. Сходство составов камасита в железных метеоритах и в космической пыли объясняется общим их источником, а их различие состоит лишь в степени дробления материала родительского тела.

### ВВЕДЕНИЕ

Петромагнитные исследования проводятся, как правило, на земных объектах, однако Земля является лишь небольшой частью Солнечной системы, постоянно подвергающейся космическому воздействию. Ежегодно на Землю поступают многие тысячи тонн космического материала (метеориты, космическая пыль). Петромагнитные исследования этого материала в сочетании с микронзондовым анализом дают возможность не только получить информацию о космических объектах — источниках поступающего на Землю космического материала, но и выяснить роль и место Земли в космическом пространстве.

За последние годы накоплен большой объем петромагнитных данных, прежде всего, термомагнитного анализа (ТМА) до 800°C и микронзондового анализа (МЗА) металлических частиц, присутствующих в осадках разных регионов и разного возраста [Pechersky et al., 2008; Grachev et al., 2009; Pechersky, 2010; Печерский и др., 2011; Печерский, Шаронова, 2011 и др.]. Результаты этих исследований показывают, что в осадках широко распространены металлические частицы в небольших концентрациях (очень редко превышающих 10<sup>-3</sup>%, обычно порядка 10<sup>-4</sup>% и менее).

По составу металлические частицы в осадках можно разделить на три группы: 1) чистое железо, 2) камасит с преимущественной концентрацией Ni 5–6%, 3) Fe–Ni сплав, содержащий более 20% Ni вплоть до чистого никеля (рис. 1). 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 и, возможно, частично имеет земное происхождение. Концентрация в осадках других магнитных минералов космического происхождения, таких как тэнит и тетратэнит, менее 10<sup>-5</sup>%, а шрейберзит, троилит и пирротин (внеземного происхождения) в осадках практически не встречаются. Это невозможно объяснить только окислением железа, так как процесс вторичного окисления более вероятен для камасита, но именно он — главный сохранившийся компонент металлических частиц в осадках.

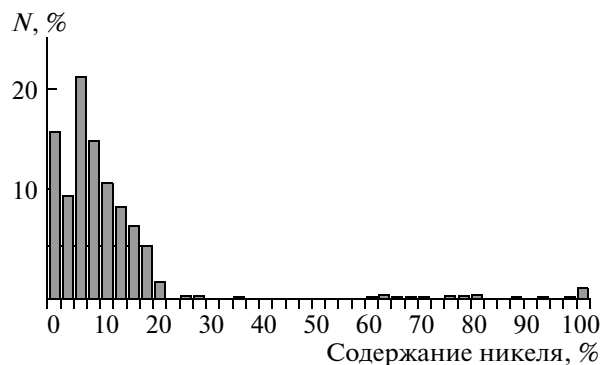
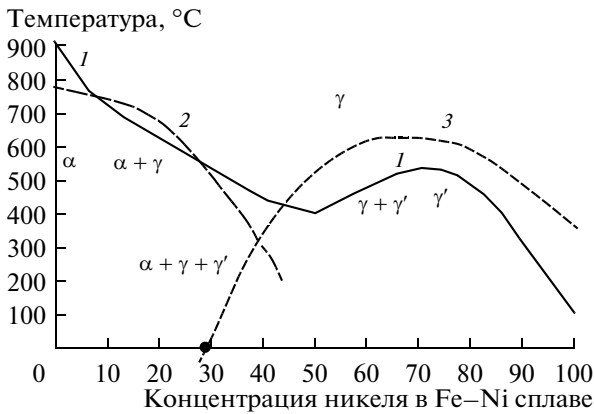


Рис. 1. Гистограмма содержания никеля (%) в металлических частицах из осадков по данным ТМА [Печерский, Шаронова, 2012].



**Рис. 2.** Фазовая диаграмма равновесия Fe–Ni сплавов [Cassiamani et al., 2006]. Линия 1 – граница области стабильного существования камасита ( $\alpha$ -фаза), тэнита ( $\gamma$ -фаза) и тетратэнита ( $\gamma'$ -фаза), выше линии 1 существует только тэнит; 2 – точки Кюри камасита; 3 – точки Кюри тэнита.

Сравнение результатов исследований металлических частиц в осадках с аналогичными данными по метеоритам поможет выяснить связь космической пыли, в частности, металлических частиц в ней, и метеоритов. Кроме того, как показал анализ мировых данных и видно из ряда обзоров [Гуськова, 1972; Kohout, 2009; Rochette et al., 2009; Terho et al., 1993; Weiss et al., 2009 и др.], исследования магнитных свойств метеоритов до сих пор сводились, во-первых, к измерениям магнитной восприимчивости, во-вторых, к попыткам оценить природу естественной остаточной намагниченности и палеонапряженности времени формирования космических тел-источников метеоритов, в-третьих, к измерениям магнитных свойств отдельно взятых метеоритов, гранул из хондритов, в-четвертых, к выяснению магнитных признаков тетратэнита, роли деформаций, ударной остаточной намагниченности и т.п. [Nagata et al., 1986; 1987; Rochette et al., 2009; Sugiura, Strangway, 1981; 1987; Uehara, Nakamura, 2006; Wasilewski, 1988; и др.] Магнитоминералогические обобщения, включающие комплекс терромагнитного, микронзондового и других видов анализа материала до сих пор не проводились.

Исследованию магнитных свойств, ТМА до  $800^\circ\text{C}$  в сочетании с МЗА с целью выяснения общих черт метеоритов и посвящена настоящая работа.

## ОБЗОР ДАННЫХ О МАГНИТНЫХ МИНЕРАЛАХ МЕТЕОРИТОВ

По данным Meteoritical Bulletin (2000–2010) в метеоритах присутствуют следующие магнитные минералы.

1. **Fe–Ni сплавы: камасит**, сплав с небольшим содержанием Ni (обычно 5–6%), **тэнит**, содержащий чаще 20–30% и гораздо реже более 40% Ni, **аваруит** с концентрацией Ni более 60%. В Meteoritical Bulletin (2000–2010), тэнит упоминается в 2–3 раза реже, чем камасит, преобладание камасита над тэнитом подчеркивается и средним содержанием никеля в железных метеоритах ( $8.81 \pm 3.48\%$ ), аваруит упоминается только в трех случаях. Камасит ( $\alpha$ -фаза) имеет упорядоченную объемноцентрированную кубическую решетку, у тэнита и аваруита ( $\gamma$ -фаза) – неупорядоченная гранецентрированная кубическая решетка, у тетратэнита ( $\gamma'$ -фаза) – упорядоченная гранецентрированная кубическая решетка. Как видно из фазовой диаграммы состояния Fe–Ni сплавов (рис. 2), ниже черной линии присутствует система камасит–тэнит–тетратэнит в зависимости от содержания никеля и температуры, выше черной линии присутствует только тэнит. Видно также, что в области температур, близких к точкам Кюри ( $T_c$ ) камасита и тэнита, происходит структурный переход  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ , температуру которого при ТМА легко спутать с  $T_c$ . В большинстве случаев камасит содержит не более 10% Ni, а для такого состава температура структурного перехода камасит  $\rightarrow$  тэнит выше  $T_c$  камасита, следовательно, при ТМА метеоритов, как правило, фиксируется именно  $T_c$  камасита.

Фазовая диаграмма (рис. 2) показывает также, что тэнит, содержащий менее 30% Ni, имеет отрицательную  $T_c$ , т.е. при комнатной температуре и выше такой тэнит – парамагнетик. Следовательно, в интервале концентраций никеля в сплаве от 0 до 30% обнаруженные у метеорита  $T_c > 500^\circ\text{C}$  относятся исключительно к камаситу. В свою очередь,  $T_c$  камасита, содержащего более 50% Ni, ниже комнатной температуры, т.е. в этой области концентраций ТМА должен фиксировать исключительно тэнит. Отметим, что для тетратэнита и тэнита есть магнитный признак их различия [Nagata et al., 1986; 1987]: у тетратэнита на порядки выше коэрцитивная сила, чем у тэнита, поэтому при необратимом фазовом переходе тетратэнит  $\rightarrow$  тэнит коэрцитивная сила ( $H_c$ ), остаточная коэрцитивная сила ( $H_{cr}$ ) и отношение остаточной намагниченности насыщения к намагниченности насыщения ( $M_{rs}/M_s$ ) резко падают. Плоская форма кривой  $M(T)$  до  $500\text{--}700^\circ\text{C}$  характерна для тетратэнита, а резкий спад  $M(T)$  выше  $700^\circ\text{C}$  – признак структурного перехода камасит  $\rightarrow$  тэнит [Nagata et al., 1986; 1987; Wasilewski, 1988]. Удельная намагниченность насыщения Fe–Ni-сплава, содержащего менее 20% Ni, практически постоянна ( $M_s = 217.75 \text{ Ам}^2/\text{кг}$  при комнатной температуре), с увеличением содержания Ni выше 20% ее зависимость близка к линейной, у чистого никеля  $M_s = 56.7 \text{ Ам}^2/\text{кг}$  [Бозорт, 1956].

Отметим еще один важный факт, всегда наблюдаемый при ТМА Fe–Ni сплавов: “отставание”

температуры перехода тэнит  $\rightarrow$  камасит ( $T_{\gamma \rightarrow \alpha}$ ) при остывании образца от температуры перехода камасит  $\rightarrow$  тэнит ( $T_{\alpha \rightarrow \gamma}$ ) при его нагреве. Этот температурный сдвиг обусловлен тем, что границы фазовых областей на диаграмме равновесия Fe–Ni сплавов могут быть определены, только если скорость охлаждения не превышала  $\sim 10^\circ\text{C}$  в сутки [Бозорт, 1956]. Наблюдаемый сдвиг кривых  $M(T)$  в цикле нагрев–охлаждение является однозначным признаком присутствия в образце Fe–Ni сплава.

2. **Шрейберзит**  $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$  – ферромагнетик с содержанием никеля от 5% до 50%. Магнитные свойства природного шрейберзита почти не изучены. Для искусственных Fe–Ni фосфидов наблюдаются практически линейные зависимости  $M_s$  и  $T_c$  от содержания никеля [Meuser, Cadeville, 1962; Gambino et al., 1967].

3. **Когенит**  $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{C}$  – ферромагнетик, иногда встречающийся в метеоритах (упоминается только дважды). Магнитные свойства когенита изучены очень слабо.  $T_c$  цементита (искусственный аналог когенита)  $210^\circ\text{C}$ ,  $M_s = 128 \text{ Ам}^2/\text{кг}$ .

4. **Fe-сульфиды**. Среди них львиная доля в метеоритах принадлежит **троилиту**  $(\text{FeS})$  – антиферромагнетику с очень низкой намагниченностью. Кроме троилита, нередко встречаются **пирротин**  $(\text{FeS}_{1+x})$ , **пентландит**  $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ , **добреелит**  $(\text{FeCr}_2\text{S}_4)$  и другие сульфиды. Из них только моноклинный пирротин ( $0.1 < x < 0.25$ ) – ферримагнетик с  $M_s = 16 \text{ Ам}^2/\text{кг}$ ,  $T_c = 325\text{--}360^\circ\text{C}$ . Гексагональный пирротин – антиферромагнетик ( $0 < x < 0.1$ ) с  $M_s \leq 0.1 \text{ Ам}^2/\text{кг}$ ,  $T_c = 325^\circ\text{C}$ . Отметим, что Fe-сульфиды являются потенциальным источником магнетита – продукта их окисления в околоземном пространстве и на Земле.

5. **Магнетит**  $(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  – ферримагнетик, широко распространенный в земных горных породах. Судя по литературным данным, магнетит образуется в метеоритах чаще при вторичных изменениях по Fe–Ni сплаву, шрейберзиту и Fe-сульфидам, а также встречается в метеоритах и сам по себе. Магнетит практически не описан в железных метеоритах и встречается в 8% каменных метеоритов. Преобладание магнетита в каменных метеоритах по сравнению с железными можно объяснить тем, что минералы группы магнетита относятся к **корovým** метеоритам (по аналогии с земными условиями), остальные же, содержащие Fe–Ni сплав, вероятнее всего, к ядру и нижней мантии родительских тел метеоритов.

В земных магматических породах основного состава (базальты) кристаллизуются феррошпинели, наиболее распространен среди них титаномагнетит разного состава: от однородного, содержащего 12–14% титана до близкого к магнетиту [Печерский и др., 1975; Печерский, Диденко,

1995]. Это относится и к корovým метеоритам с Луны и Марса. По данным непосредственного изучения доставленных на Землю образцов лунных базальтов и собранных на Земле лунных метеоритов [Фрондел, 1978; Meteoritical Bulletin, 2000–2010], в них распространены хромит, ульвошпинель и их твердые растворы, ильменит, Fe-сульфиды (главным образом, пирротин и троилит), незначительные содержания чистого железа. По данным [Meteoritical Bulletin, 2000–2010] в метеоритах, представляющих марсианские базальты, распространены титаномагнетит и ульвошпинель, хромит, нередко с примесью титана, алюминия, магния, ильменит и Fe-сульфиды, главным образом, пирротин и троилит. Крайне редко упоминаются камасит и тэнит, возможно, связанные с импактными явлениями.

Иные условия в мантии. По данным измерений магнитных свойств образцов горных пород из верхней мантии (мантийные ксенолиты в базальтовых лавах, образцы перидотитов из океанской мантии и т.п.) из мантии под океаном) в ней отсутствуют первичные магнитные минералы группы магнетита [Петромагнитная модель литосферы, 1994].

6. **Ильменит**  $(\text{FeTiO}_3)$  – парамагнитный при комнатной температуре минерал, крайний член ряда твердых растворов ильменит-гейкилит-пирофанит и др., в частности, гемоильменитов  $(\text{Fe}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_3)$ . При  $x = 0.9\text{--}0.4$  гемоильменит является ферримагнетиком с  $M_s$  до  $60 \text{ Ам}^2/\text{кг}$  [Нагата, 1965]. В метеоритах присутствует только ильменит ( $x$  около 1) с небольшими примесями магния и др., т.е. парамагнетик.

## СОСТАВ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТЕОРИТОВ И ТЕКТИТОВ

### Образцы и методика исследований

Исследуемые образцы метеоритов: 25 метеоритов (всего 40 образцов) и 3 образца тектитов были отобраны из коллекций Геологического музея им. В.И. Вернадского РАН (Москва) и Музея естественной истории СВКНИИ ДВО РАН (Магадан) (табл. 1). Эти метеориты относятся к самым разным регионам Земли, времена падения их на Землю охватывают, по крайней мере, три века, поэтому исследуемая выборка образцов является вполне представительной для выявления общей картины в распределении, составе и магнитных свойствах присутствующих в метеоритах магнитных минералов.

При изучении метеоритов и тектитов выполнен комплекс магнитных измерений, ТМА и МЗА. Для измерения остаточной намагниченности использовался спин-магнитометр JR-6 (AGICO, Чехия) с чувствительностью  $2 \times 10^{-11} \text{ Ам}^2$ , для измерения коэрцитивной силы и остаточной

Таблица 1. Результаты термомангнитного и микрозондового анализов образцов метеоритов и тектитов

Метеорит, страна	Образец	$M_s$	$M_{rs}/M_s$	$M_{st}/M_s$	$H_{Cr}$	$H_{Cr}/H_c$	$H_{Cr}/H_c$	$H_{Cr}/H_{Cr}$	Камасит			Шрейберзит			$T_\gamma \rightarrow \alpha$	Тэнит			Другие минералы
									$T_c$	Ni <sub>it</sub>	Ni <sub>z</sub>	$T_c$	Ni <sub>it</sub>	Ni <sub>z</sub>		$T_c$	Ni <sub>it</sub>	Ni <sub>z</sub>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Августиновка, октаэдрит, Украина	Гр7366	6.3	0.19	1.0	15	1.6	1.38	720; 740	12; 7	3.6?	но	но	но	?	но	но	но	вторичные Fe-окислы	
	Гр7363	5.8	0.26	1.8	15	3.00	2.09	720; 750	12; 5	2.3?	но	но	но	?	но	но	но	вторичные Fe-окислы, ез Fe-Ni-Cr, Fe-Cr-Al, и Fe-Cu-Zn сплава;	
	Гр7364	7.7	0.28	0.9	29.0	1.79	2.14	720; 740	12; 7	3.6?	но	но	но	?	но	но	но	вторичные Fe-окислы	
Алискерово, октаэдрит, СВ Россия	АЛ-1	154.5	0.01	0.9	10	2.3	2.3	I-764 II-744	2.5 6.3	6.8 6.8	но		ез	630	но	но	ез14-17	алюмосиликаты; вторичные Fe-окислы	
Анойский, гексаэдрит, СВ Россия	АН-1	128.6																алюмосиликаты, ез троилита, хромита, добреселита, свинца, вторичные Fe-окислы	
Баббс Милл, октаэдрит, ША	Гр7389	143.3	0.01	0.26	25	1.48	1.48	738 600	7.7	6.6	но		ез	620	но	но	ез19.6	вторичные Fe-окислы, много магнетита	
Билибино, октаэдрит-гекс., СВ Россия	БИЛ-1	132.9	0.025	1.0	7.0	0.74	0.74	I-770 II-757	0 3.2	4.7 4.7	но		ез16-21.6	665 657	но	но	но	алюмосиликаты; вторичные Fe-окислы	
Биштубе, октаэдрит, Казахстан	Гр7369	4.7	0.19	0.2	10.9	9.9		770. 753 II-595	0; 4	0; 6.5	но	но	но	нет	но	но	ез75.7	Hg-Fe-Cu-сульфиды, ез свинца, втор. Fe-окислы	
Гросслибенталь, хондрит, Украина	Гр7373	1.13	0.02	0.95	80.0	5.2	0.15	730 630	9.7 17	14.3 14.3	но	но	но	650 200?	но	но	21-46	оливин, пироксен, тролит, пирротин, пенгландит, хромит, вторичные Fe-окислы, киноварь	
Джибсон, октаэдрит, Намибия	Гр7404	175.0	0.009	0.93	11		1.0	I-747 II-739	7.5		но	но		634 650	но	но			

Таблица 1. Продолжение

Метеорит, страна	Образец	$M_s$	$M_{rs}/M_s$	$M_{st}/M_s$	$H_{cr}$	$H_{cr}/H_c$	$H_{cr}/H_c$	$H_{cr}/H_c$	Камасит			Шрейберзит			$T_{\gamma \rightarrow \alpha}$	Тэнит			Другие минералы
									$T_c$	Ni <sub>it</sub>	Ni <sub>z</sub>	$T_c$	Ni <sub>it</sub>	Ni <sub>z</sub>		$T_c$	Ni <sub>it</sub>	Ni <sub>z</sub>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Забродье, хондрит, Белоруссия	Гр7445	4.0	0.03	0.62	17.1	5.4	1.99	I-750 II-734	4.9	5.4	но	но	но	625	но	но	17-48	оливин, пироксен, троилит	
Имилак, палласит, Чили	Гр7409	95.9	0.004	1.0	1.1	8.8	1.5	I-757 II-734	3.0 8.7	5.6	но	но	но	642 620	но	но	но	алюмосиликаты, оливин, ез ильменита вторичные Fe-окислы	
Камберленд Фолс, ахондрит, США	Гр7441	10.87	0.004	0.91	22.5		1.5	762; 630	2.0	5.7	но	но	22.3	655	но	но	42.8 22.7	оливин, ез никеля, троилит, пентландит, пирротин, киноварь	
Косбис Крик, октаэдрит, США	Гр7430	53.9 0.12	0.25 0.21	1.0	24.6 26.0	2	2.0	I-635; 720 II-606; 745	720 6.0	0-6.8 0-6.8			ез 34	нет 630	но	но	ез 31	вторичные вюстит, магнетит и другие Fe-окислы	
Красноярск, палласит, Россия	Гр7374	148.3	0.001	1.0	14.6	24.3		734	8.7	5.4	но		28.3	620	но	но	но	алюмосиликаты, пентландит, пирротин, киноварь ез свинца, сурьмы, касситерита, ильменита; вторичные Fe-окислы	
Красноярск, сепарат оливина	Гр7375	0.7	0.16	1.0	26.5	2.1	1.62	но	но	но	150	32	29	нет	но	но	но	I-III-285 – Fe-окисел; оливин, ез троилита, киновари, вторичные Fe-окислы	
Красноярск, магнитн. фракция из олив. сепарата	Гр7375м	16.9	0.26	0.87				750	4.9		168	29.5	29	662	но	но	но	вторичный магнетит $T_c = 600^\circ\text{C}$ (2%); оливин; вторичные Fe-окислы	
Красноярск, слабomagн. фр.	Гр7375ш	0.7		4.0					но	но					но	но	но	Fe-окисел с S и Ni (30% $M_s$ ), магнетит	
Красноярск, палласит, Россия	мн29874	123.9	0.002	0.98	17		1.76	750	4.9	4.8	но	но	27.9	620 250?	но	но	н.о.	оливин; ез троилита, корунда, киновари; вторичные Fe-окислы	
Марьялахти, палласит, Россия	Гр6490	172.8	0.001	0.98	15	150	1.13	759	2.7	3.0	но.	но	ез 56.6	640	но	но	ез 26; 54	силикаты Fe-Al сплав	
Омолон, палласит, СВ Россия	ОМ-1	102.0	0.008	0.9	17		1.59	I-762 II-744	2.0 6.3		210	24	23.8	I-725; 644 II-725; 658	но	но	27-48	оливин, вторичные Fe-окислы	

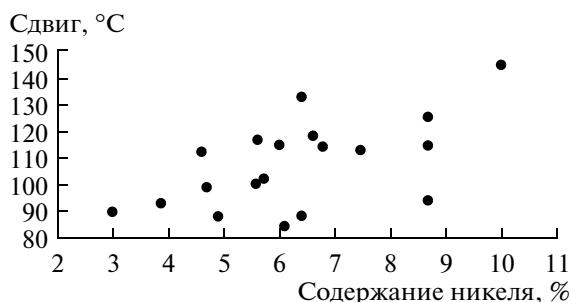
Таблица 1. Продолжение

Метеорит, страна	Образец	$M_s$	$M_{Fe}/M_s$	$M_{Si}/M_s$	$H_{Cr}$	$H_{Cr}/H_C$	$H_{Cr}/H_{CrT}/H_{CrT}$	Камасит			Шрейберзит			$T\gamma \rightarrow \alpha$	Тэнит			Другие минералы	
								$T_c$	Ni	Ni3	$T_c$	Ni	Ni3		$T_c$	Ni	Ni3		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Омолон, палласит, СВ Россия	Гр0010а Гр0010в	147.8 149.4	0.003	1.0	14.5 11.5		0.9 1.09	760 но	2.5 но	4.6 4.1	но но	но но	но 24	649	но но	но но	но но	вторичные Fe-окислы	
Оханск, хондрит, Россия	Гр7387	20.7	0.13	0.98	46		0.76	734	8.7	5.6	но	но	но	640	560	53	45.3	оливин, троилит, пирротин, $\epsilon$ -Si-Fe-сульфидов	
Санта Катарина, железный, Бразилия	Гр7362	6.62 0.2	0.056 0.12	0.95 0.78	16 12	2.29		1-747 II-750	5.6 4.9	0.2-4.6 0.2-4.6	но	но	но	630 605	но	но	но	вторичные Fe-окислы	
Сао Жулиао ди Морейра, гексаоктаэдрит Португалия	Гр7428 Гр7427	113.1 105.7	0.003 0.001	0.9 0.97	11.5 15	20.4	1.09 1.60	I-но II-но 760 758	но 2.4 3.0	5.7 4.8 4.8	1-335 II-325	12 13	11.6 13 но.	?	но но но но	но но но но	но но но но	вторичные Fe-окислы Fe-Al сплав, корунд, герцинит, вторичные Fe-окислы	
Саратов, хондрит, Россия	Гр7379	17.7	0.016		75		1.12												
»	Гр.7380	16.1	0.014	0.98	75.8	27.4		I-765 II-755 III-752	1.0 3.6 4.4	0 3.3	но	но	но	?	I-630	65			
»	Гр7381	16.3	0.015	0.97	164	24.5		I-750 I-750	4.9 4.9		но	но	но	?	I-615 II-580	65 55			
» обобщение данных МЗА	Гр7379- 7380- 7381- 7383									0 3.3	но	но	но		но	но	20.7 47.1		оливин, пироксен, троилит, пирротин, пентландит, алюмосиликаты; $\epsilon$ -Fe-хромита, Cr-Fe-шпинели, добреселита, меди, киновари, никеля
Сейман, октаэдрит СВ Россия	СМ-1	95.8	0.016	0.77	9.0		1.78	I-762 II-745	2.0 6.1	8.7 8.7	но		25.8	670	но	но	11-21		оливин, пироксен; вторичные Fe-окислы
Сихотэ-Алинь, гексаоктаэдрит, Россия	Гр7439 Гр7439а	137.4 153.5	0.003	1.0	26.5		1.28	I-767 II-752 767	0.7 4.4 0.7	5.7 5.7 5.7	но	но	но	650	но	но	ез16; 49.6 но		оливин, пироксен, алюмосиликаты; $\epsilon$ -троилита, пентландита, Al-феррошпинели, карбонаты, вторичные Fe-окислы

Таблица 1. Окончание

Метеорит, страна	Образец	$M_s$	$M_{rs}/M_s$	$M_{st}/M_s$	$M_{st}/M_s$	$H_{cr}$	$H_{cr}/H_c$	$H_{cr}/H_c$	$H_{cr}/H_c$	Камасит			Шрейберзит			$T_{\gamma \rightarrow \alpha}$	Тэнит			Другие минералы
										$T_c$	Nit	Niz	$T_c$	Nit	Niz		$T_c$	Nit	Niz	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
Тектиты молдавит; Чехия	Гр7601,	0.026	0.12	?	25.5		1.08	но	но	но	но	но	но		но	но	но			
индошнит	7604-1,	0.017																	алюмосиликатное	
индошнит	7604-2	0.386						745	6	но	но	но	но		но	но	но	стекло;		
Вьетнам	гр7605	0.074						720?	12?	но	но	но	но		но	но	но	магнетит; 0.02–0.08%		
Толука, октаэдрит,	Гр7436	100.9	0.008	0.95	12		1.17	1-750	4.9	6.4	но	но	но	602	но	но	но	Вторичные		
Мексика	гр7437	101.1	0.002	1.01	13		1.83	II-743	6.6	6.4			е334	603	но	но	но	Fe-окислы		
Хайнгольд-сидерит Германия	Гр7405	0.56	0.12		53.7	9.7				5.8				?				46.3; 65.7	силикаты, Ст-Fe шпинель, вторичные Fe-окислы	
Хессле, хондрит, Швеция	Гр7406	4.9	0.062	1.06	76.0	18.1	0.37	760;	2.5	0.6	но	но.	но	670	но	но	но	52.8	оливин, пироксен;	
Эвекинот, октаэдрит	ЭГВ-1	84.4	0.034	0.95	62.0		0.36	I-761;	2.5	10	но	но	е3.38	585	?	?	е319–52		ез никеля; троилит, пирротин; вторичные Fe-окислы	
СВ Россия								650	15	10				265					хром;	
								II-738;	7.8	10				585						вторичные Fe-окислы
								650	15	10				265						

Примечания: метеорит – название метеорита, его тип и страна находки; образец – музейный номер образца;  $M_s$  – удельная намагниченность насыщения образца до нагрева, Ам<sup>2</sup>/кг;  $M_{rs}$  – удельная остаточная намагниченность насыщения;  $M_{st}$  – удельная намагниченность насыщения, измеренная после нагрева образца до 800°С;  $H_{cr}$  – остаточная коэрцитивная сила, измеренная до нагрева образца, мТл;  $H_c$  – коэрцитивная сила, измеренная после нагрева образца до 800°С, в колонках “камасит”, “шрейберзит”, “тэнит” –  $T_c$  – точка Кюри, °С, I, II – первый и второй нагрев, Nit и Niz – содержание никеля в данном минерале, соответственно, по данным термоманнитного анализа и по данным микрозондового анализа;  $T_{\gamma \rightarrow \alpha}$  – температура перехода тэнит–камасит при остывании образца, °С, е3 – единичные зерна, но – минерал не обнаружен.



**Рис. 3.** Сдвиг (уменьшение) температуры структурного перехода тэнит → камасит при охлаждении образца относительно точки Кюри камасита (в основном по результатам второго нагрева, когда измеренная точка Кюри приближается к расчетной). По оси абсцисс – среднее содержание никеля в камасите (%), измеренное микрозондом, по оси ординат – величина сдвига, °С.

коэрцитивной силы – прибор Variable Field Translation Balance (Petersen Instruments, Германия), для измерения намагниченности насыщения и ТМА – термо-вибромагнитометр конструкции Н.М. Аносова и Ю.К. Виноградова (ИФЗ РАН) с чувствительностью  $10^{-8}$  Ам<sup>2</sup>. При ТМА проводились непрерывные измерения намагниченности ( $M$ ) в постоянном магнитном поле 600 мТл в процессе нагрева образца до 800°С и последующего охлаждения до комнатной температуры. Цикл нагрев–охлаждение, как правило, повторялся дважды.

Для оценки концентрации магнитного минерала в образце кривая  $M(T)$  экстраполировалась от каждой точки Кюри до комнатной температуры, в результате определялась величина  $M_s$  минерала с данной точкой Кюри; отношение полученной величины  $M_s$  к известной намагниченности насыщения данного минерала есть содержание данного минерала в образце.

Для микрозондовых исследований использовался микрозонд “Тескан Вега II” с энергодисперсионным спектрометром. Применялась методика исследования микрочастиц в оптическом микроскопе с последующим МЗА. Оптические микроскопические исследования проведены при помощи микроскопа “Olympus BX51M”. Фото, полученные в оптическом микроскопе, были обработаны с помощью программы Combine ZP (Alan Hadley), позволяющей в режиме трехмерной микроскопии склеить одиночные нерезкие фото в одно, тем самым поднять глубину резкости. Отобранные для изучения на микрозонде 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 в

шлифе, что привело бы к дополнительному загрязнению объекта и потере ряда частиц. Микрозондовые исследования проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 0.2 нА, размер луча зонда ~2 мкм.

### Результаты исследований магнитных минералов метеоритов

Все результаты исследований сведены в табл. 1 и см. (Приложение)<sup>1</sup>.

**Камасит.** Из всех обнаруженных и проанализированных микрозондом магнитных минералов при ТМА во всех метеоритах (кроме метеорита Биштыбе, содержащего только чистое железо) наиболее отчетливо определяется камасит по двум признакам: а) при нагреве, как правило, фиксируется  $T_c$ , так как  $T_{\alpha} \rightarrow \gamma$  выше или близка к  $T_c$  при содержании никеля в камасите до 10% (рис. 2) и б) при охлаждении от 800°С фиксируется  $T_{\gamma} \rightarrow \alpha$ , сдвинутая относительно  $T_c$  примерно на 100° [Бозорт, 1956]. По разным причинам этот сдвиг заметно колеблется, но виден тренд увеличения сдвига по мере роста содержания никеля в камасите (рис. 3).

**Тэнит,** содержащий чаще более 30% Ni, присутствует по данным МЗА в 12 образцах, причем нередко в виде единичных зерен, которые не фиксируются при ТМА (табл. 1, [Печерский и др., 2011, приложение]). При ТМА тэнит зафиксирован только в трех образцах (Оханск, Саратов, Эгвекино). Среди метеоритов, содержащих тэнит, 4 – железных, 2 – железокремнистых и 6 – кремнистых, т.е. все изученные образцы кремнистых метеоритов содержат тэнит. При этом, камасит и тэнит не образуют непрерывного ряда твердых растворов, а кристаллизуются обособленно. Так, в образцах метеоритов Гросслибенталь, Забродье, Оханск, Саратов, Хайнгольц и Эгвекино встречаются обособленные крупные зерна и участки, сростки камасита и тэнита, что четко фиксируется под микрозондом при сканировании, например, в хондрите Саратов (рис. 4). Обособленность (независимость) кристаллизации трех главных магнитных минералов камасита, тэнита и шрейберзита, подчеркивается отсутствием корреляции между концентрациями этих минералов: коэффициент линейной корреляции между содержаниями камасита и тэнита  $R_{kt} = -0.082$ , между содержаниями камасита и шрейберзита  $R_{kш} = -0.087$ , между содержаниями тэнита и шрейберзита  $R_{тш} = -0.073$ .

Помимо обособленных образований камасита и тэнита, везде встречаются тонкие ламели тэнита в камасите, как результат распада последнего [Nagata et al., 1986; 1987]. Ламели тэнита обычно

<sup>1</sup> Электронный адрес: <http://paleomag.ifz.ru/books/2012-pechersky-et-al-meteorite-data-supplement.rar>.



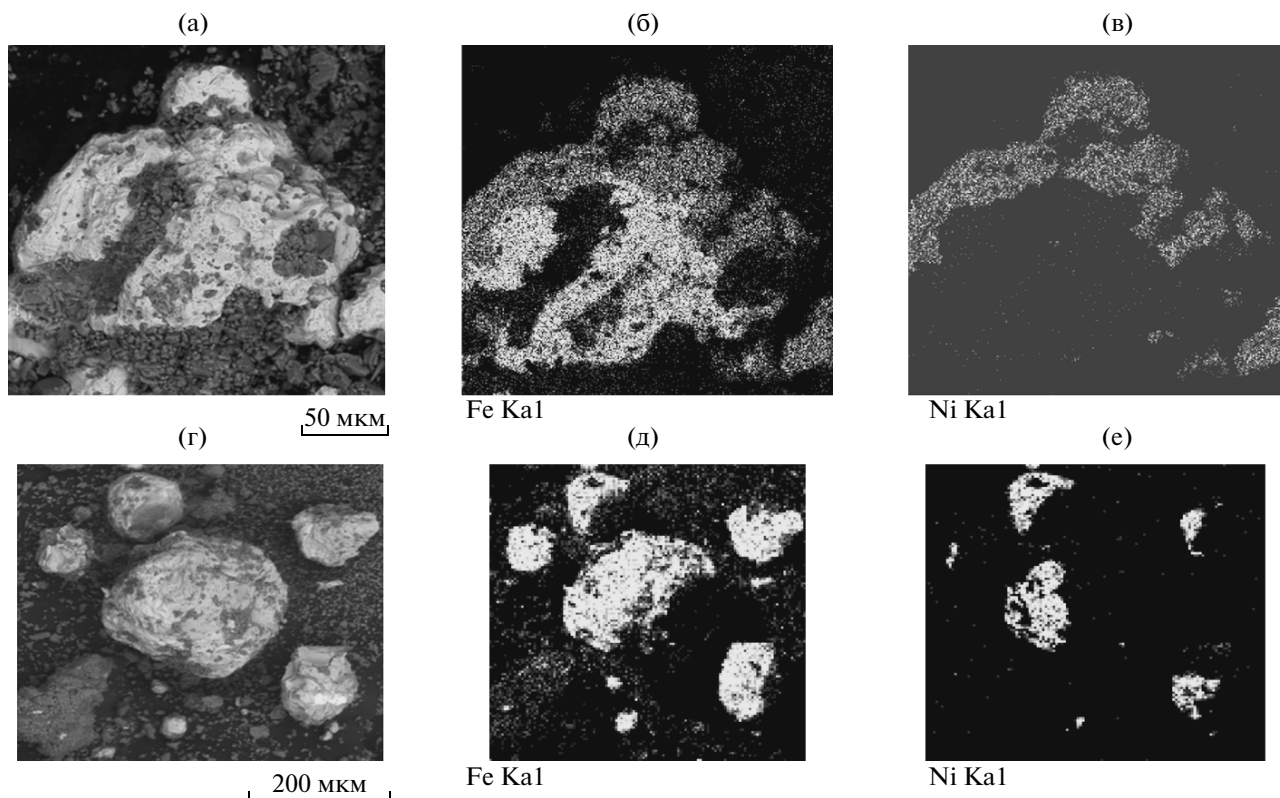


Рис. 4. Зерна, состоящие из тэнита и камасита (а), (г). Контуры того и другого видны на картах сканирования по железу (б), (д) и никелю (в), (е). Метеорит Саратов.

тоньше размера зонда и видны лишь по некоторому увеличению содержания никеля, при этом оценивается средний состав камасита. Терромагнитный признак существования таких структур – уменьшение точек Кюри камасита после нагрева образцов до  $800^{\circ}\text{C}$ . Такая тенденция хорошо видна на рис. 5. При первом нагреве точки Кюри в большинстве случаев не зависят от содержания никеля и очень близки к  $T_c$  чистого железа, т.е. в большинстве изученных метеоритов камасит представляет собой тонкие ламели тэнита в почти чистом железе. При втором нагреве происходит гомогенизация твердого раствора, заметное уменьшение  $T_c$  и ее величина становится зависимой от концентрации никеля в камасите.

**Шрейберзит** четко фиксируется при ТМА по точке Кюри, содержание никеля в нем соответствует экспериментальной зависимости для искусственных Fe–Ni фосфидов [Meier, Cadeville, 1962; Gambino et al., 1967]. Микронзондом шрейберзит обнаружен в 40% образцов, но в заметных количествах он зафиксирован и МЗА, и ТМА лишь в трех метеоритах (Красноярск, Омолон, Сао Жулиао де Морейра). Единичные зерна шрейберзита обнаружены микронзондом еще в 9 метеоритах (Аньюйский, Августиновка, Билибино, Камберленд Фоллс, Косбис Крик, Сеймчан,

Сихотэ-Алинь, Толука и Эгвекино), но они не обнаружены при ТМА, т.е. их вклад в  $M_s \ll 1\%$ . В остальных 13 метеоритах шрейберзит не обнаружен ни МЗА, ни ТМА.

В тех метеоритах, где шрейберзит обнаружен, его распределение крайне неравномерно. Так, например, в метеорите Красноярск шрейберзита достаточно много только в образце гр7375, а в об-

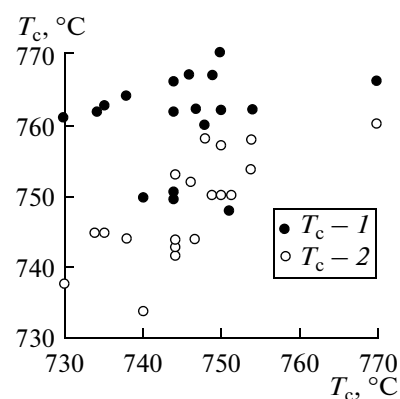
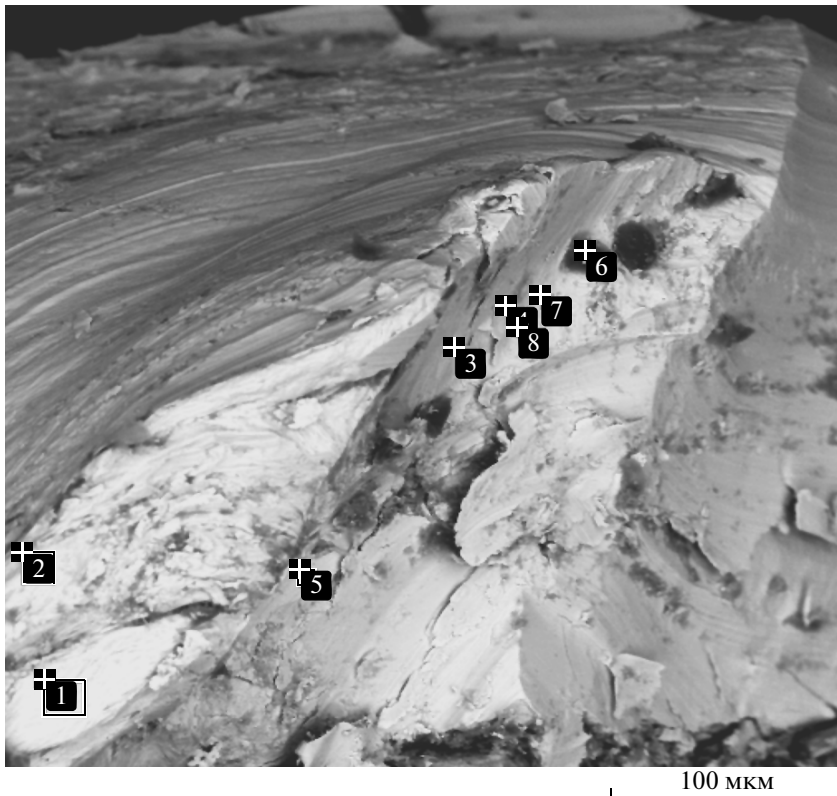


Рис. 5. Смещение измеренных точек Кюри в сторону расчетных после нагрева образцов метеоритов до  $800^{\circ}\text{C}$ : 1 – первый нагрев, 2 – второй нагрев.



	C	Al	Fe	Ni
1			97.08	
2			94.26	2.92
3		65.73	34.27	5.74
4		34.23	65.77	
5		66.96	33.04	
6	61.27	14.90	23.83	
7		4.53	95.47	
8		13.76	86.24	

Рис. 6. Пример Fe–Al сплава (3–8) в камасите (1, 2), (Сао Жулиао де Морейра, гр7427). Богатые алюминием участки тяготеют к краям Fe–Al сплава (3, 5). Черные пятна – обогащение углеродом (6), фазы мелкие и неоднородные.

разцах гр7374 и МН29874 – лишь единичные зерна; в метеорите Омолон в образце ОМ-1 много шрейберзита, в гр0010в – единичные зерна, в образце гр0010а шрейберзит не обнаружен; в метеорите Сао Жулиао де Морейра в образце гр7428 очень много шрейберзита, а в образце гр7427 он не обнаружен [Печерский и др., 2011, Приложение]. Содержание никеля в шрейберзите колеблется от 8 до 66% (Марьялахти), при этом среднее содержание никеля в шрейберзите на контакте с камаситом 20%, с тэнитом – 30%.

**Когенит** в изученных образцах не обнаружен ни ТМА, ни МЗА.

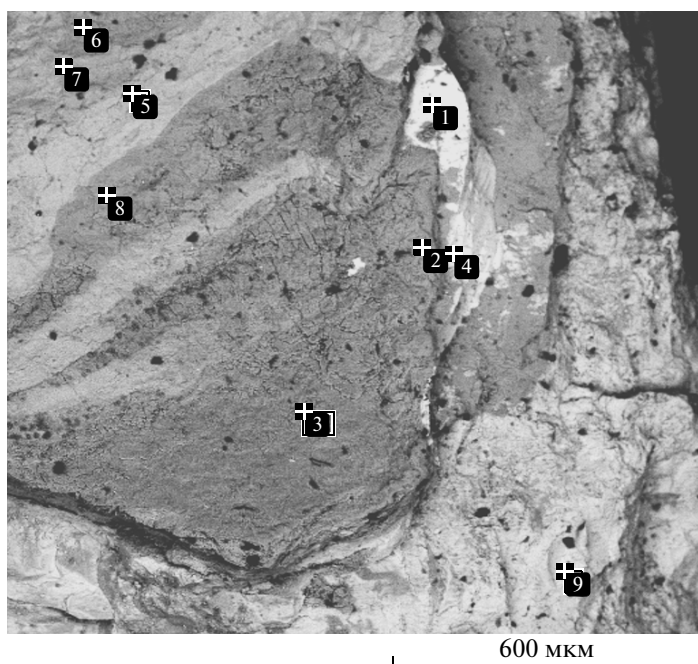
**Никель.** В метеоритах Саратов, Хессли и Камберленд Фоллис обнаружены микроскопом единичные зерна никеля, но они не обнаружены при ТМА, т.е. их вклад в  $M_s \ll 1\%$ .

**Fe–Al сплав.** В двух метеоритах: Марьялахти и Сао Жулиао де Морейра (гр7427) обнаружены зерна редкого для метеоритов **Fe–Al сплава** в виде включений в камасите (рис. 6). Средний состав Fe–Al-сплава: 4.1% O; 4.6% Al; 89.9% Fe ( $n = 13$ ) (Марьялахти) и 2.5% O; 6.2% Al; 78.1% Fe; 0.2% Ni; ( $n = 6$ ) (Сао Жулиао де Морейра). К краям последнего тяготеют участки с повышенным содержанием алюминия (9.7% O; 16.7% Al; 57.9% Fe;

1.6% Ni;  $n = 5$ ) и углерода (6.3% O; 17.1% Al; 21.5% Fe; 55% C;  $n = 5$ ). Отметим, что искусственные **Fe–Al** сплавы достаточно широко известны, например, алфер и алфенол.

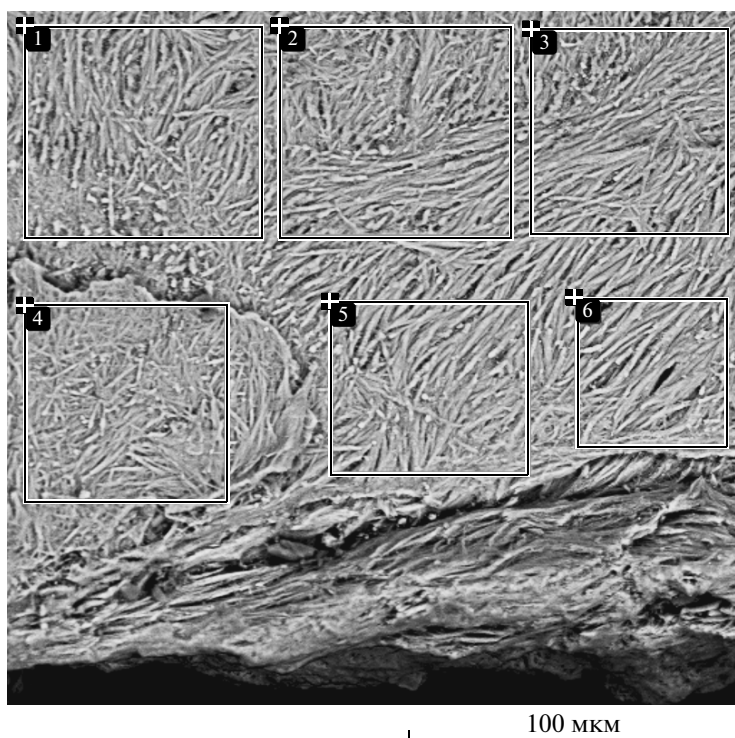
**Fe-окисел с примесью серы и никеля.** В слабомагнитной фракции из метеорита Красноярск (гр7375ш) обнаружен Fe-окисел с примесью серы и никеля (рис. 7). Его средний состав: 44.3% O; 2.4% S; 47.5% Fe; 4.3% Ni. Содержание серы колеблется в относительно небольших пределах (от 1.8 до 2.8%). Концентрация никеля варьирует, преимущественно от 2 до 7%, очевидно, в зависимости от состава камасита, по которому образуется этот минерал. Формы выделения минерала разнообразны, например, корки на других минералах (рис. 7а), волокна (рис. 7б). Очевидно, этот минерал содержит только  $Fe^{3+}$ , поэтому устойчив при нагревах. Точка Кюри ( $T_c = 280–290^\circ C$ ) близка к точке Кюри магнезиоферрита и якобсита. На кривых  $M(T)$  нагрева и охлаждения (рис. 8) присутствуют только две магнитные фазы: интересующий нас Fe-окисел с примесью серы и никеля с  $T_c = 280^\circ C$  и магнетит. По этим данным можно оценить удельную намагниченность насыщения Fe-окисла с примесью серы и никеля. Суммарная величина  $M_s = 3.17 \text{ Ам}^2/\text{кг}$  (исходная  $M_s =$

(a)



	O	Al	Si	P	S	Fe	Ni
1	8.43	0.74	1.06	13.75	0.00	43.71	32.30
2	27.84	1.48	1.14	0.00	1.95	62.35	5.24
3	47.39	0.00	0.27	0.44	1.93	45.33	4.62
4	3.62	1.29	0.00	0.57	0.00	90.14	4.38
5	21.66	0.29	0.44	0.00	0.78	74.91	1.92
6	40.09	0.33	0.49	0.49	2.38	49.25	6.97
7	39.78	0.00	0.27	0.00	1.68	53.66	4.61
8	38.96	0.28	0.42	0.00	2.26	49.94	7.15
9	8.99	0.40	0.24	0.00	31.27	59.10	0.00

(б)



	O	S	Fe	Ni
1	38.76	2.25	55.96	3.04
2	41.06	2.57	53.90	2.47
3	40.01	2.12	54.84	3.04
4	38.27	2.06	56.56	3.11
5	39.30	2.39	55.24	3.06
6	40.11	2.07	55.36	2.46

Рис. 7. Примеры Fe-оксида с примесью серы и никеля (метеорит Красноярск, гр7375ш): (а) – корка на камасите (2, 3, 6–8) – темно-серое. Виден процесс переработки камасита: белый – остатки камасита (4), светло-серые полосы – окисленный камасит (5); (1) – включение шрейберзита, (9) – троилит; (б) – тонкие “волокна”.

= 0.69 Ам<sup>2</sup>/кг и после нагрева до 800°С она выросла в 4.6 раза). На долю магнетита приходится 79% (рис. 8), т.е. 2.5 Ам<sup>2</sup>/кг, содержание магнетита в об-

разце составляет 2.5/92 = 2.7%, остальные 97.3% приходятся на фазу с T<sub>c</sub> = 280°С (рис. 8). Таким образом, M<sub>s</sub> этой фазы равна (3.17–2.5)/0.973 ≈

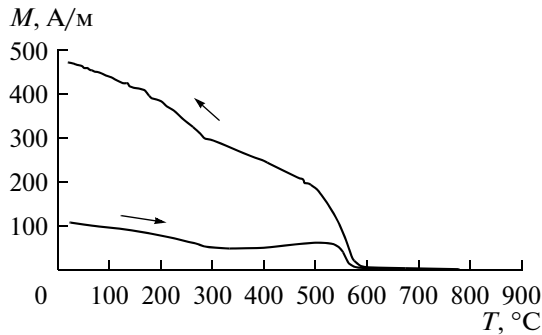


Рис. 8. Кривые  $M(T)$  образца гр7375ш (метеорит Красноярск), цикл нагрев–охлаждение.

$\approx 0.69$  Ам<sup>2</sup>/кг и совпадает с исходной  $M_s$  образца, т.е. в исходном состоянии магнитный материал в этой фракции представлен исключительно Fe-окислом с примесью серы и никеля.

МЗА всех изученных метеоритов показал, что такие Fe-окислы с примесью серы и никеля в небольших количествах присутствуют в метеоритах Августиновка, Биштюбе, Гросслибенталь, Забродье, Косбик Крик и связаны исключительно с участками заметного изменения метеоритов.

Fe-сульфиды, главным образом, троилит, а также пирротин и пентландит обнаружены МЗА примерно в 30% образцов. При этом они присутствуют в заметных количествах во всех каменных метеоритах и почти отсутствуют в железных и железокремнистых метеоритах (единичные зерна обнаружены только в одном железном метеорите Сихотэ-Алинь и одном железокремнистом метеорите Красноярск). Пирротин зафиксирован микронзондом в ряде образцов, но нет ни одного случая обнаружения пирротина с помощью ТМА. Это можно объяснить тем, что, во-первых, пирротин в метеоритах высокотемпературный гексагональный, т.е. слабомагнитный антиферромагнетик, и, во-вторых, часто пирротин представлен в виде единичных зерен.

Магнетит при ТМА фиксировался неоднократно в заметных количествах. Судя по всему, это вторичный продукт окисления камасита и других магнитных минералов. Магнетит, как и другие окислы железа (гематит, гетит и т.п.), не имеют отношения к доземной истории метеорита и не представляют интереса в данной работе, а лишь искажают картину первичных магнитных минералов.

Остальные обнаруженные в исследуемых метеоритах минералы (феррошпинели, ильменит, корунд, добреелит, Fe–Al сплав, киноварь и др., (см. Приложение) являются экзотическими, а не закономерно присутствующими в метеоритах.

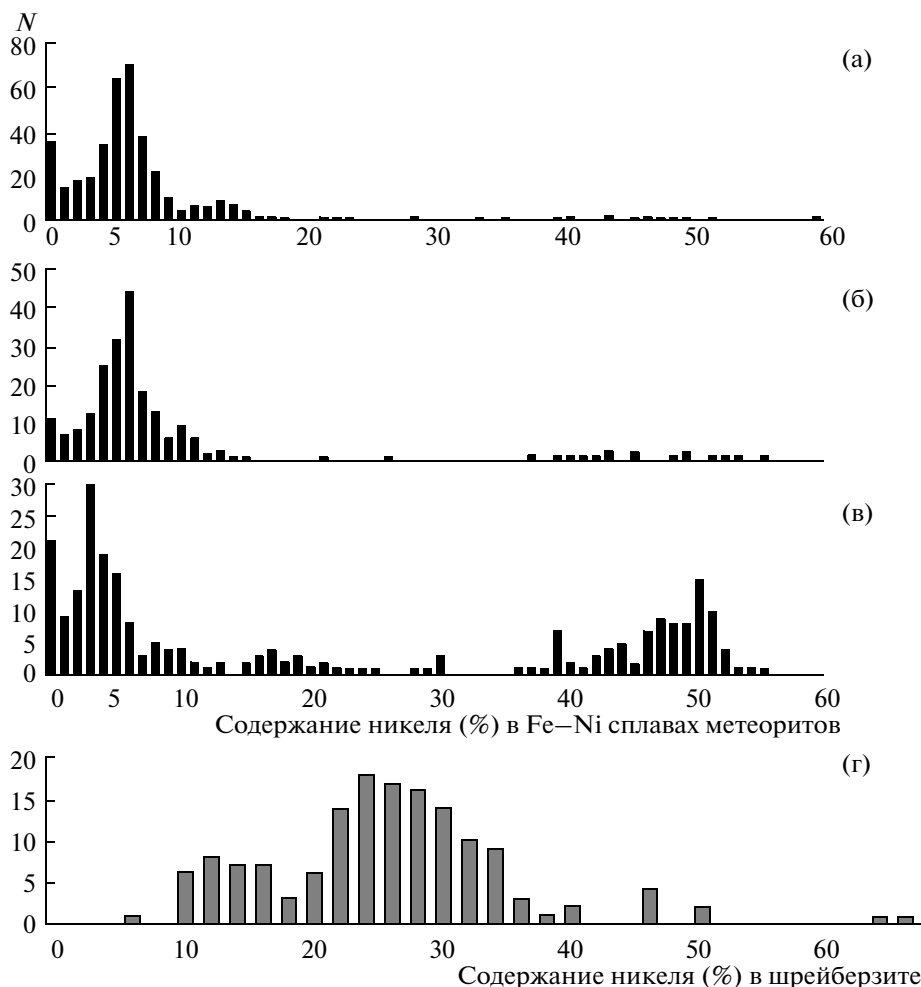
## Результаты изучения тектитов

Все три исследуемых тектита (молдавита 7601 и индошиниты 7604 и 7605) (см. табл. 1 и Приложение) — стекла, близкие по составу к алюмосиликатам. По данным МЗА средний состав образца молдавита (7601): 54% O; 5.1% Al; 35.4% Si; 2.7% K; 2% Ca; 1% Mg ( $n = 4$ ). В образцах индошинитов по содержанию кремния выделяются две группы, их средние составы: 1) 45.5% O, 6.3% Al, 37.2% Si, 2.5% K, 1.2% Ca, 5% Fe, 1% Mg, 0.8% Na ( $n = 5$ ); 2) 54.7% O, 6% Al, 31.7% Si, 1.6% K, 0.8% Ca, 2.6% Fe, 1.4% Mg, 1.1% Na ( $n = 8$ ). В отличие от молдавита в индошинитах появляются железо и натрий. Кроме того, в тектите 7605 имеется небольшая примесь титана. Рудных зерен в тектитах при МЗА не обнаружено.

Магнитные параметры ( $M_s = 0.026$  (7601), 0.017 (7604-1) и 0.386 (7604-2), 0.047 и 0.074 Ам<sup>2</sup>/кг (7605).  $M_{rs}/M_s = 0.12$ ;  $H_{cr} = 25.5$  мТл (7601) показывают, что в изученных тектитах присутствует незначительное количество магнитных минералов, состояние которых близко к псевдооднодоменному, размер зерен заметно меньше размера луча микронзонда. После нагрева коэрцитивность меняется незначительно:  $H_{ct}/H_{cr} = 1.08$ , тогда как величина намагниченности падает в несколько раз, очевидно, за счет окисления (уничтожения) магнетита. На кривой  $M(T)$  фиксируется  $T_c = 580^\circ\text{C}$  (магнетит). Судя по величине  $M_s$ , его концентрация в разных образцах колеблется от 0.02 до 0.08%. В более магнитном образце (7604-2) присутствует камасит с  $T_c = 745^\circ\text{C}$  (90%  $M_s$ ) и магнетит с  $T_c = 580^\circ\text{C}$  (10%  $M_s$ ), соответственно, содержание камасита 0.16%, магнетита — 0.04%. Концентрация никеля в камасите, согласно  $T_c$ , 6%. У образца 7605 практически чистая гиперболическая кривая  $M(T)$  см. (Приложение), свидетельствующая о явном преобладании парамагнитного материала, на ее фоне намечаются магнитные фазы с  $T_c = 500^\circ\text{C}$  и  $720^\circ\text{C}$  (?), доля каждой в величине  $M_s$  менее 5%, вероятнее всего, это титаномагнетит и камасит. Результаты МЗА и ТМА позволяют предположить, что изученные тектиты есть результат плавления земного материала, в котором присутствуют зерна космического происхождения, что демонстрирует связь с падением метеорита. Таким образом, изученные тектиты, скорее всего — продукт импактного события.

## СРАВНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МИНЕРАЛОВ ТРЕХ ГЛАВНЫХ ТИПОВ МЕТЕОРИТОВ

Одним из главных результатов настоящего исследования является распределение концентраций никеля в камасите, тэните (рис. 9а–9в) и в шрейберзите (рис. 9г). Гистограммы (рис. 9), построенные по данным МЗА показывают:



**Рис. 9.** Гистограммы содержания никеля (%) в Fe–Ni сплаве в метеоритах разного типа: (а) – железные метеориты, (б) – железокаменные; (в) – каменные метеориты; (г) – распределение содержания никеля (%) в шрейберзите из железных и железокаменных метеоритов. Данные МЗА. По оси ординат  $N$  – число определений никеля.

а) число случаев фиксации тэнита почти в 6 раз меньше, чем камасита;

б) трехмодальное распределение: 1 – чистое железо с модой 0% Ni, 2 – камасит с модой 5–6% Ni в железных и железокаменных метеоритах (рис. 9а, 9б) и 3% Ni в каменных метеоритах (рис. 9в), 3 – тэнит с модой 50% Ni в каменных метеоритах (рис. 9в);

в) в железных и железокаменных метеоритах Fe–Ni сплав, содержащий более 20% Ni (тэнит) присутствует лишь в виде единичных зерен (рис. 9а, 9б), в каменных метеоритах доля тэнита, содержащего 39–52% Ni, с модой 50% Ni существенно возрастает (рис. 9в);

г) между содержаниями никеля в камасите и в тэните наблюдается заметный провал, который “заполняется” содержанием никеля в шрейберзите (рис. 9г). Таким образом, по содержанию никеля образуется закономерная последовательность Fe–Ni сплавов с добавлением в средней части

фосфора: камасит-шрейберзит-тэнит. Это свидетельствует о том, что присутствие этих минералов в космическом теле есть результат общности процессов их образования, не сказавшихся на их концентрации (как отмечено выше, корреляция между содержаниями этих минералов отсутствует).

Гистограммы (рис. 9) построены исключительно по данным МЗА, они отражают число случаев фиксации зерен того или иного состава, не характеризуя количественно их общей концентрации в данном образце. Оценка концентрации камасита, тэнита и шрейберзита по совокупности данных ТМА и МЗА (см. методику) показывает, что, во-первых, суммарное среднее содержание магнитных минералов в железных метеоритах менее 70% (табл. 2), что, очевидно, объясняется заметным их окислением; во-вторых, содержание камасита в железных метеоритах на порядок выше, чем в каменных метеоритах (табл. 2); среднее содержание тэнита в пределах ошибки определения одинаково

Таблица 2. Средние характеристики главных типов метеоритов

Характеристика	Железные	Железокаменные	Каменные
Доля образцов с камаситом, %	100	100	100
Доля образцов с тэнитом, %	~50	~40	100
Доля образцов с шрейберзитом, %	~50	~70	~0
Доля образцов с Fe-сульфидами, %	~2	~2	100
Содержание камасита, % (разброс)	58 (18–83)	53 (20–82)	5.3 (1–7)
Содержание тэнита, % (разброс)	1.4 (0–10)	2.7 (0–20)	1.5 (1–4)
Содержание шрейберзита, % (разброс)	7 (0–90)	5 (0–44)	~0
Среднее содержание Ni в камасите, %	5.9	4.6	4.6
Среднее содержание Ni в тэните, %	47	50.3	49.3
Среднее содержание Ni в шрейберзите, %	26	27.8	22.3
$M_s$ , Ам <sup>2</sup> /кг	124	123	12.5
$H_{cr}$ , мТл	15	23	49
$H_{cr}/H_c$	7.2	11.2	16.1
$M_{rs}/M_s$	0.07	0.03	0.02
$T_c$ , °C (вклад в $M_s$ , %)	755 (86%)	753 (87%)	756 (87%)
$T\gamma \rightarrow \alpha$ , °C	642	643	640

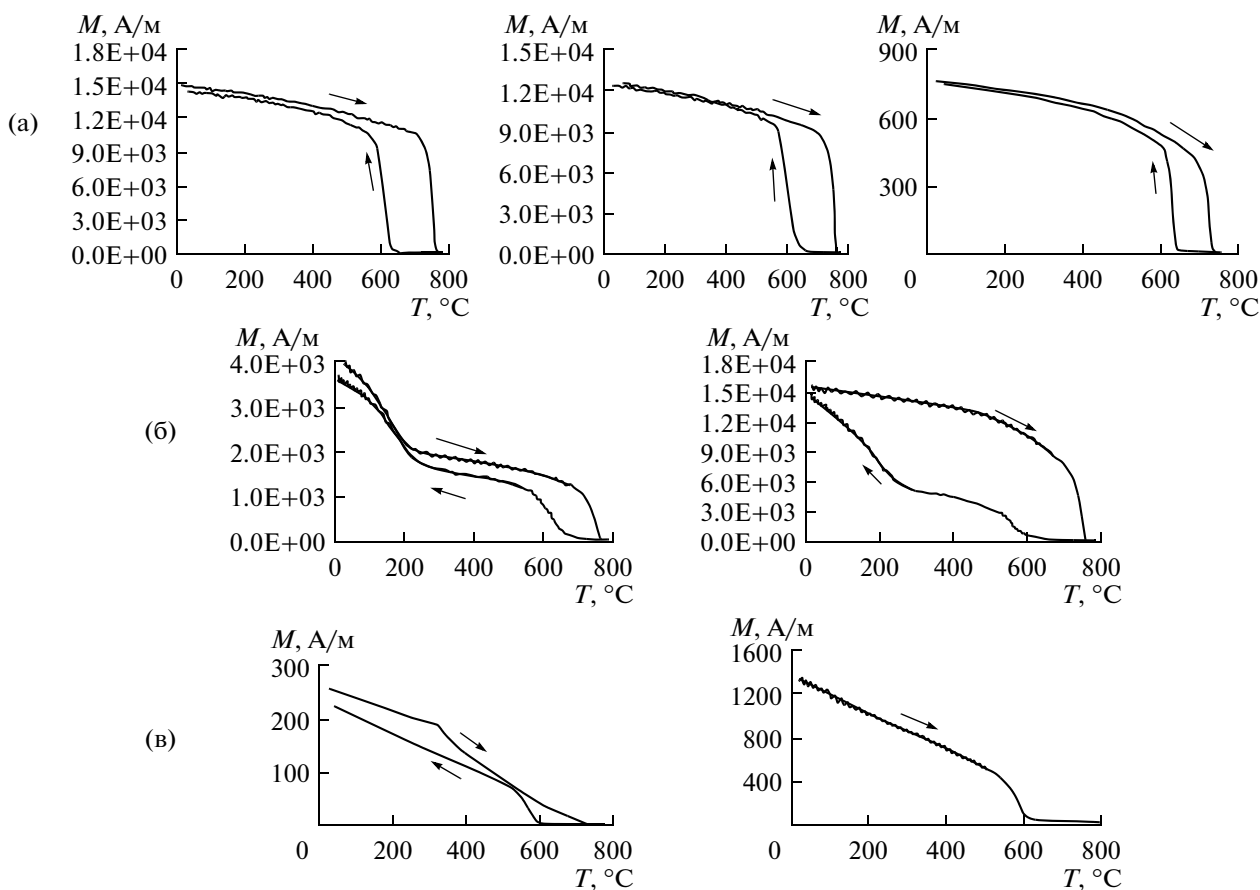
во во всех типах метеоритов (табл. 2); в-третьих, средняя концентрация никеля в камасите, тэните и шрейберзите в разных типах метеоритов различается незначительно (табл. 2), т.е. разные типы метеоритов различаются только концентрацией трех главных магнитных минералов, а не особенностями их составов. При этом камасит присутствует во всех образцах, шрейберзит тяготеет к металлической части метеоритов, а тэнит – к каменной (табл. 2).

Кажущееся противоречие с рис. 9в объясняется тем, что рис. 9 отражает относительное распределение камасита. Это видно и по данным ТМА: в железных метеоритах камасита примерно в 40 раз больше, чем тэнита, тогда как в каменных только в 3.5 раза (табл. 2).

Обращает на себя внимание очень близкая картина распределения содержания никеля в Fe–Ni сплавах железных метеоритов (рис. 9а) и в осадках (рис. 1). Сравнение рис. 1 и рис. 9а показывает связь железных метеоритов и металлических частиц в осадках, поэтому последние логично называть микрометеоритами [Grachev et al., 2009].

Об однообразии магнитных минералов в разных типах метеоритов свидетельствует сходный тип кривых  $M(T)$  (рис. 10а): 1) среди всех типов

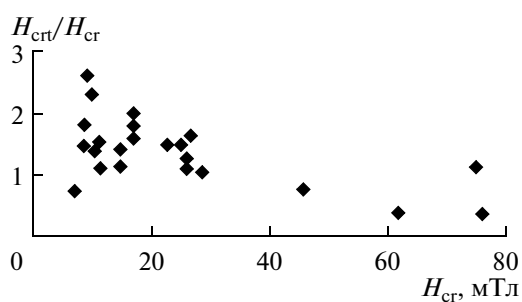
метеоритов явно преобладают плоские кривые нагрева  $M(T)$ , см. (Приложение), при втором нагреве кривая  $M(T)$  приобретает классическую для ферромагнетиков параболическую форму  $Q$ -типа; 2) точка Кюри главной магнитной фазы – камасита – на кривой нагрева  $T_c = 740–770^\circ\text{C}$ , средние значения  $T_c$  в трех типах метеоритов различаются всего на  $1–3^\circ$  (рис. 10, табл. 2), доля камасита в  $M_s$  в среднем  $86–87\%$ ; 3) у всех изученных образцов на кривой  $M(T)$  охлаждения фиксируется температура структурного перехода тэнит  $\rightarrow$  камасит  $670–585^\circ\text{C}$ , средние значения  $T\gamma \rightarrow \alpha$  в трех типах метеоритов различаются, как и  $T_c$ , на  $1–3^\circ\text{C}$  (табл. 2). Отличаются по форме кривых  $M(T)$  метеориты Гросслибенталь и Эгвекинот (рис. 10б), где, кроме камасита, заметен вклад тэнита, а также образцы, представляющие фракцию шрейберзита (Омолон, ОМ-1; Красноярск, гр7375 и Сао Жулиао де Мореира, гр7428 – рис. 10б). Однообразная картина ТМА нарушается процессами вторичного окисления метеоритов, в которых почти не сохранились первичные магнитные минералы (Августиновка, Баббс Милл, Биштюбе гр7369, Забродье, Косбис Крик, Санта-Катарина, см. (Приложение), примеры на рис. 10в).



**Рис. 10.** Примеры кривых  $M(T)$  главных типов метеоритов (цикл нагрев–охлаждение): (а) —  $M(T)$ , характерные для большинства метеоритов, слева железные, в середине железокосные, справа каменные; (б) — нетипичные для метеоритов кривые  $M(T)$ : Омолон (слева) — заметный вклад шрейберзита; Оханск (справа) — высокая доля тэнита по сравнению с другими метеоритами; (в) —  $M(T)$  сильно окисленных метеоритов: Августиновка (слева) — есть камасит, преобладает вторичный магнетит, который во время нагрева окислился до гематита; Косбис Крик (справа) — в образце весь первичный материал окислен, присутствует только вторичный магнетит.

Магнитная жесткость (остаточная коэрцитивная сила  $H_{cr}$ ) закономерно растет от железных к каменным метеоритам, возможно, отражая более заметный вклад высококоэрцитивного тетраэзнита в каменных метеоритах. Такое предположение подтверждается на примере метеоритов Гросслибенталь, Хессле и Эгвекинот, в которых на фоне относительно высокой  $H_{cr} = 50–80$  мТл происходит ее снижение после нагрева образца до 800°C в 3–5 раз. На рис. 11 видна тенденция уменьшения величины коэрцитивности после нагрева образца ( $H_{crT}$ ) по сравнению с исходной величиной  $H_{cr}$  с ростом  $H_{cr}$ , что также отражает наличие тетраэзнита, который переходит при нагреве в тэнит. Эта зависимость затушевывается окислением магнитных минералов, которое ведет к росту коэрцитивности.

Отметим, что приведенные в табл. 2 значения отношений  $H_{crT}/H_{cr}$  и  $M_{rs}/M_s$  во всех случаях находятся в пределах многодоменной области.



**Рис. 11.** Зависимость  $H_{crT}/H_{cr}$  от  $H_{cr}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты сочетания микронзондового и термомагнитного анализов показывают однообразие состава основных магнитных минералов в метеоритах независимо от их типов. Варьирует лишь концентрация одних и тех же минералов, возрастая (в среднем на порядок) от каменных

метеоритов к железным. Такое однообразие магнитных минералов свидетельствует об однообразии условий их образования, прежде всего окислительно-восстановительных условий, несмотря на большое разнообразие типов метеоритов, содержащих эти магнитные минералы.

2. Главный магнитный минерал метеоритов — камасит с невысокой концентрацией никеля (модя 6% в железных и железокремнистых метеоритах и 3% в каменных метеоритах), присутствуют также шрейберзит и тэнит. По содержанию никеля эти три минерала образуют закономерную триаду: камасит (0–9%, среднее 5% Ni) — шрейберзит (10–34%, среднее 27% Ni) — тэнит (38–53%, среднее 51% Ni). Шрейберзит явно тяготеет к Fe–Ni сплаву: он присутствует в железных и железокремнистых метеоритах, и его почти нет в каменных метеоритах. 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. тэнит тяготеет к каменным метеоритам.

3. У всех типов метеоритов наблюдается похожий вид кривых  $M(T)$  термомагнитного анализа. Отклонения от него вызваны, в первую очередь, вторичными изменениями метеоритов в земной атмосфере и во время пребывания на земной поверхности.

4. В земных, лунных и марсианских базальтах (породах коры) обычны титаномагнетиты, феррошпинели, но, самое главное, в них отсутствуют Fe–Ni сплавы и шрейберзит. Очевидно, каменные метеориты, содержащие минералы группы магнетита и не содержащие Fe–Ni сплавы и шрейберзит, относятся к коровым. Следует подчеркнуть, что в отличие от однообразия состава основных магнитных минералов в метеоритах, состав основных магнитных минералов — титаномагнетитов земной, лунной и марсианской коры колеблется в больших пределах, прежде всего, в зависимости от T-fO<sub>2</sub> 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 близких к магнетиту. Подобная ситуация характерна для марсианских базальтов, в лунных базальтах в высоко восстановительных условиях кристаллизуется ульвошпинель и другие феррошпинели, содержащие только двухвалентное железо.

5. Для разреза планет можно предложить следующую схему: кора — минералы группы магнетита, главным образом, титаномагнетиты; в верхней мантии магнитные минералы коры отсут-

ствуют и по мере приближения к ядру в мантии появляются Fe-сульфиды, Fe–Ni сплавы и шрейберзит, для образования которых необходимы железо, никель, фосфор и сера. Судя по распределению шрейберзита и Fe-сульфидов, сера в основном сосредотачивается в нижней мантии, тогда как фосфор тяготеет к ядру. Концентрация магнитных минералов, в первую очередь камасита и шрейберзита, нарастает вплоть до близкого к 100% содержанию в ядре.

6. Однообразие состава магнитных минералов метеоритов свидетельствует о единых условиях их образования, т.е. о едином сценарии формирования ядра и прилегающих к ядру частей мантии однотипных планет. Это согласуется с существующими представлениями о происхождении Солнечной системы [Жарков, 1983; Хаббард, 1987; Маракушев и др., 1992; McFadden et al., 2007 и др.]. Прежде всего, это единство химического состава ядер планет-гигантов, Земли и метеоритов. Так, содержание химических элементов (исключая водород и гелий) в фотосфере Солнца и в хондритах практически одинаково. По преобладанию среди метеоритов хондритов (~90%) можно заключить что планеты (планета) распадались в поясе астероидов преимущественно на примитивной (хондритовой) стадии до расслоения на ядро и внешние оболочки.

Однообразие состава металлической фазы на этой стадии вполне естественно. В дальнейшем, несмотря на процесс дифференциации и т.п., металлическая фаза тех и других аналогична по содержанию никеля и других примесей. Учитывая огромную роль T-fO<sub>2</sub>, что видно на примере земной ситуации, можно полагать, что окислительно-восстановительные условия в расплаве при кристаллизации железных метеоритов и палласитов изменялись мало. Отчасти это объясняется также тем, что гравитационная дифференциация (гравитационное расслаивание), когда легкие элементы уходят вверх, тяжелые — вниз, не должна сказываться на таких металлах, как никель (близкий к главному компоненту — железу). Необходимо отметить, что однообразие составов магнитных минералов выражается “глобально” в подобии гистограмм содержаний никеля в камаситовой их части, и главное — в средних значениях содержания никеля, колебания же единичных значений, особенно заметные у шрейберзита, очевидно, отражают местные особенности процесса формирования планетного материала.

О едином сценарии формирования ядра и прилегающих к ядру частей мантии однотипных планет говорит и единство возраста. К.Паттерсон еще в 1956 году писала об одном возрасте метеоритов и Земли —  $4.55 \pm 0.07$  Ga [Patterson, 1956]. Более поздние определения возраста различных метеоритов мало отличаются от полученного



К. Паттерсон и от принятого возраста Солнечной системы – 4567 Ма [Encyclopedia Britannica; McFadden et al., 2007; Baker et al., 2005; Bonvier, Wadhwa, 2010 и др.]. Более молодой возраст метеоритов связывается с такими наложенными процессами, как гидратация, окисление, ударный метаморфизм и др.

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%. Получается, что на долю ядра планет (железных метеоритов) приходится почти на порядок меньше, чем на долю земного ядра. 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 из астероидного пояса [Хаббард, 1987] и, видимо, отвечает доле металлического железа в разрушенных планетах (планете), образующих пояс астероидов.

Малый объем корового материала по сравнению с остальной частью планет объясняет редкое присутствие среди метеоритов коровых пород, в частности, отсутствие таковых среди изученных метеоритов.

7. Сходство гистограмм распределений содержания никеля в Fe–Ni сплаве из железных метеоритов и металлических частиц из осадков свидетельствует об одном источнике железных метеоритов и камасита в космической пыли. Различие их – лишь в степени дробления исходного материала родительского тела (планеты), т.е. магнитные металлические частицы из осадков следует называть микрометеоритами.

Авторы выражают благодарность Михаилу Николаевичу Кандинову и Анне Алексеевне Пляшкевич за предоставленные коллекции образцов метеоритов и обсуждение результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бозорт Р.* Ферромагнетизм. М.: изд-во Иностранной литературы. 1956. 784 с.
- Гуськова Е.Г.* Магнитные свойства метеоритов. Л.: Наука. 1972. 108 с.
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука. 1983. 415 с.
- Маракушев А.А., Грановский Л.Б., Зиновьева Н.Г., Митрейкина О.Б.* Космическая петрология. М.: изд-во МГУ. 1992. 325 с.
- Нагата Т.* Магнетизм горных пород. М.: Мир. 1965. 348 с.
- Петромагнитная модель литосферы / Пашкевич И.К., Печерский Д.М. (ред.) Киев: Наукова Думка. 1994. 345 с.
- Печерский Д.М., Багин В.И., Бродская С.Ю., Шаронова З.В.* Магнетизм и условия образования изверженных горных пород. Л.: Наука. 1975. 288 с.
- 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., Нургалиев Д.К., Фомин В.А., Шаронова З.В., Гильманова Д.М.* Космическое железо в осадках мела-дании // 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.
- Фрондел Д.У.* Минералогия Луны. М.: Мир. 1978. 334 с.
- Хаббард У.* Внутреннее строение планет. М.: Мир. 1987. 328 с.
- 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. issue 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.
- Cassamani 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.
- Encyclopedia Britannica.* Art. Meteorites. Second edition. Eb.com.
- Gambino R.J., Mcguire T.R., Nakamura Y.* Magnetic Properties of the Iron-Group Metal Phosphides // Journal of applied physics. 1967. V. 38. № 3. P. 1253–1255.
- 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. Grachev A.F. Abhandlungen der geologischen bundesanstalt, band 63. 2009. P. 89–134.
- Kohout T.* Physical properties of meteorites and their role in planetology. Report series in geophysics. Helsinki. 2009. № 60. P. 3–51.
- McFadden L., Weissman P.R., Johnson T.V.* Encyclopedia of the Solar System. 2007. 992 p.
- Meteoritical Bulletin. № 84 (2000)–№ 98 (2010).
- Meyer A.J.P., Cadevill M.C.* Magnetic Properties of the Fe–Ni Phosphides. Proc. Intern. Conf. on Mag. and Cryst. 1961. J. Phys. Soc. Japan 17, Supplement B-1. 1962. P. 223–225.
- Nagata T., Danon J., Funaki M.* Magnetic properties of Ni-rich iron meteorites // Mem. National Inst. Polar Res., Spec. Issue. 1987. V. 46. P. 263–282.
- Nagata T., Funaki M., Danon J.* Magnetic properties of tetraenite-rich iron meteorites // Mem. National Inst. Polar Res., Spec. Issue. 1986. V. 41. P. 364–370.
- Patterson C.* Age of meteorites and the Earth // Geochim. et cosmochim. Acta. 1956. V. 10. P. 230–237.
- 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., Nourgaliev D.K., Trubikhin V.M.* Native iron in Miocene sediments // Russ. J. Earth Sci. 2008. V. 10, ES6004, doi: 10.2205/2008ES000306.

- Rochette P., Weiss B.P., Gattacceca J.* Magnetism of extra-terrestrial materials // *Elements*. 2009. V. 5. P. 223–228.
- Sugiura N., Strangway D.W.* The magnetic properties of the Abee meteorite: evidence for a strong magnetic field in the early solar system // *Proc. Lunar Planet. Sci.* 1981. 128. h. 1243–1256.
- Sugiura N., Strangway D.W.* Magnetic studies of meteorites. Lairetta D.S., McSween H.Y. (Eds.) *Meteorites and the Early Solar System II*. University of Arizona Press. 1987. Arizona. P. 595–615.
- Terho M., Pesonen L.J., Kukkonen I.T., Bukovanska M.* The petrophysical classification of meteorites // *Studia Geophisica et Geodaetica*. 1993. V. 37. P. 65–82.
- Uehara M., Naramura N.* Experimental constraints on magnetic stability of chondrites and paleomagnetic significance of dusty olivines // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006. 250. P. 292–305.
- Wasilewski P.* Magnetic characterization of the new magnetic mineral tetrataenite and its contrast with isochemical taenite // *Phys. Earth and Planet. Interiors*. 1988. V. 52. P. 150–158.
- Weiss B.P., Gattacceca J., Stanley S., Rochette P., Christensen U.R.* Paleomagnetic records of meteorites and early planetary differentiation // *Space Sci. Rev.* 2009. P. 1–49. doi 10.1007/s11214-009-9580-z

---

Сдано в набор 15.03.2012 г.	Подписано к печати 13.06.2012 г.	Формат 60 × 88 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>		
Цифровая печать	Усл. печ. л. 15.0	Усл. кр.-отт. 2.3 тыс.	Уч.-изд. л. 14.0	Бум. л. 7.5
	Тираж 147 экз.	Зак. 320		

---

Учредители: Российская академия наук, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

---

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90  
Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”  
Отпечатано в ППП “Типография “Наука”, 121099 Москва, Шубинский пер., 6