

Магнитные минералы метеоритов

Печерский Д.М.¹, Кандинов М.Н.², Марков Г.П.¹, Пляшкевич А.А.³, Цельмович В.А.¹, Шаронова З.В.¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ² Геологический музей им. Вернадского РАН (Москва),

³ Музей естественной истории СВКНИИ ДВО РАН (Магадан).

Аннотация

Впервые проведено обобщение магнитных свойств и данных термомагнитного и микрорентгеноспектрального анализов 25 метеоритов из коллекций Геологического музея им. В.И. Вернадского РАН (Москва) и Музея естественной истории СВКНИИ ДВО РАН (Магадан). Результаты исследований сопоставлены с мировыми данными, опубликованными в Метеоритном Бюллетене (2000-2009 г.г.). Во всех метеоритах независимо от их главных типов обнаружены одни и те же магнитные минералы, концентрация которых возрастает (в среднем на порядок) от каменных метеоритов к железным. Главный магнитный минерал изученных метеоритов – камасит с небольшой концентрацией никеля (мода 5-6%), заметно реже встречаются тэнит и шрейберзит. Эти три магнитных минерала по содержанию никеля образуют единый ряд: камасит-шрейберзит-тэнит. Они, как правило, отсутствуют в земной коре и корах других планет и, вероятно, представляют ядро и нижнюю мантию планет-источников метеоритов. Однообразие типов кривых $M(T)$ термомагнитного анализа и магнитных свойств нарушается вторичными изменениями метеоритов на Земле. Как и в метеоритах, в осадках наблюдается то же самое однообразие: камасит – практически единственный космический магнитный минерал, встречающийся в осадках повсеместно и связанный с космической пылью. Такое сходство объясняется тем, что главный источник камасита в космической пыли – железные метеориты.

Ключевые слова: метеориты, магнитные минералы, камасит, тэнит, шрейберзит, термомагнитный анализ, микрорентгеноспектральный анализ

Введение

За последние десять лет сотрудники Института физики Земли РАН (Печерский Д.М., Цельмович В.А., Шаронова З.В.), Казанского (Нургалиев Д.К., Гильманова Д.М.) и Саратовского университетов (Молостовский Э.А., Фомин В.А.) накопили большой материал по результатам петромагнитного и микрорентгеноспектрального анализов металлических частиц, присутствующих в осадках разных регионов и разного возраста (*Pechersky, 2010; Pechersky et al., 2008; Grachev et al., 2009; Печерский и др., 2011; Печерский, Шаронова, 2011*). Главные результаты сводятся к следующему: в осадках широко распространены металлические частицы в небольших концентрациях, очень редко превышающих 0,001%. При этом обычно отсутствует корреляция содержаний таких частиц, во-первых, с литологическими особенностями

осадков, во-вторых, с содержанием заведомо земных магнитных минералов: магнетита, гидроокислов железа и с общим содержанием железа в осадках (парамагнитная намагниченность). Отсутствие корреляции с земными процессами образования осадков свидетельствует о преимущественно космическом происхождении таких частиц, а повсеместное распространение позволяет говорить об их связи с космической пылью. Обнаружено 4 интервала глобального обогащения осадков металлическими частицами, возраст которых 12–13, 64–66, 84–86 и 94–96 млн. лет. По составу металлических частиц выделяются три группы. Первая группа представлена чистым железом, вторая – никелистым железом с преимущественной концентрацией 5-6% Ni; третья - частицами Fe-Ni сплава, содержащего более 20% Ni вплоть до чистого никеля. Первая и вторая группы распространены повсеместно, отражая свое закономерное присутствие в космической пыли, тогда как третья имеет сугубо локальное распространение, и связана, очевидно, с падением метеоритов и, возможно, частично имеет земное происхождение.

Сравнение этих результатов с аналогичными данными по метеоритам поможет выяснить связь космической пыли, в частности, металлических частиц в ней, с метеоритами. Кроме того, как показал анализ мировых данных (Гуськова, 1972; Kohout, 2009; Terho et al, 1993; Rochette, Weiss, Gattaccesa, 2009 и др.), исследования магнитных свойств метеоритов до сих пор были сосредоточены на измерениях и оценках, очень мало отражающих общую картину магнитных минералов метеоритов. Это, во-первых, измерения малоинформативной магнитной восприимчивости, во-вторых, попытки оценить природу естественной остаточной намагниченности и палеонапряженность времени формирования космических тел-источников метеоритов, в-третьих, измерения магнитных свойств отдельно взятых метеоритов, гранул из хондритов, в-четвертых, выяснение магнитных признаков тетраэнита, роли деформаций, ударной остаточной намагниченности и т.п. Обобщающих работ, включающих комплекс термомагнитного, микрозондового и других видов анализа материала, до настоящего времени не было. Исследованию магнитных свойств, термомагнитному анализу (ТМА) в сочетании с микрорентгеноспектральным анализом (МРСА) метеоритов и посвящена настоящая работа.

Краткий обзор сведений о магнитных минералах метеоритов

В 13 выпусках Метеоритного Бюллетеня за последние 10 лет (*Meteoritical Bulletin, 2000-2009*) в таблицах перечислены 14320 находок и падений метеоритов: из них каменных 14100 (в том числе лунных 150 и марсианских 50) и 220 железных. При этом в железные мы включили и палласиты и мезосидериты, т.е. все железокаменные метеориты. Из этих цифр видно насколько чаще встречаются каменные

метеориты по сравнению с железными, доля которых составляет 1,5% от общего числа собранных на Земле за 10 лет метеоритов. В тех же выпусках Бюллетеня приведено кратких петрографо-минералогических и геохимических характеристик для каменных метеоритов - 703, лунных - 71, марсианских - 41, железных – 112. Если общая доля железных метеоритов 1,5%, то в случае описанных метеоритов их доля возрастает до 12%. Следовательно, оценка соотношения главных типов метеоритов по таблицам Бюллетеня будет более объективной, чем по описаниям метеоритов. А по описаниям можно оценить частоту встречаемости в метеоритах интересующих нас магнитных минералов (табл. 1).

Сведения о магнитных свойствах метеоритов, такие как величина намагниченности и другие гистерезисные характеристики, данные термомагнитного анализа (ТМА) и т.д. в Бюллетене отсутствуют. В лучшем случае иногда упоминается малоинформативная величина магнитной восприимчивости.

Таблица 1. Встречаемость основных магнитных минералов в метеоритах (данные из *Meteoritical Bulletin, 2000 – 2009*)

Тип	сего	камасит	тэнит	варуит	Fe-сульфиды	шре йберзит	М агнетит
Каменные	15	3	46	2	415	36	6
Железные	12	1	0	1	39	29	0

Примечание: в метеоритах входят лунные Fe-сульфиды – троилит, реже пирротин метеоритах и 3 – в железных).

число каменных – 71 и марсианские – 41. преимущественно (85 в каменных

1. Это, прежде всего, Fe-Ni сплавы: **камасит**, сплав с небольшим содержанием Ni, обычно 5-6% (в табл. 1 в группу камасита включено и чистое железо, поскольку четко разделить их не удалось: очень часто точный состав сплава не приводится, а дается только название – камасит), **тэнит**, содержащий, обычно 20-30% Ni, гораздо реже более 40%, и только в трех случаях упоминается **аваруит** (более 60% Ni). Их главное различие - в кристаллической решетке. У камасита (α -фаза) **упорядоченная объемно-центрированная** кубическая решетка, у тэнита (γ -фаза) – **неупорядоченная гранецентрированная** кубическая решетка, у тетратэнита (γ' -фаза) – **упорядоченная**

гранецентрированная кубическая решетка. При петрографо-минералогическом описании метеорита в Бюллетене нередко приводится только название минерала и далеко не всегда – его состав.

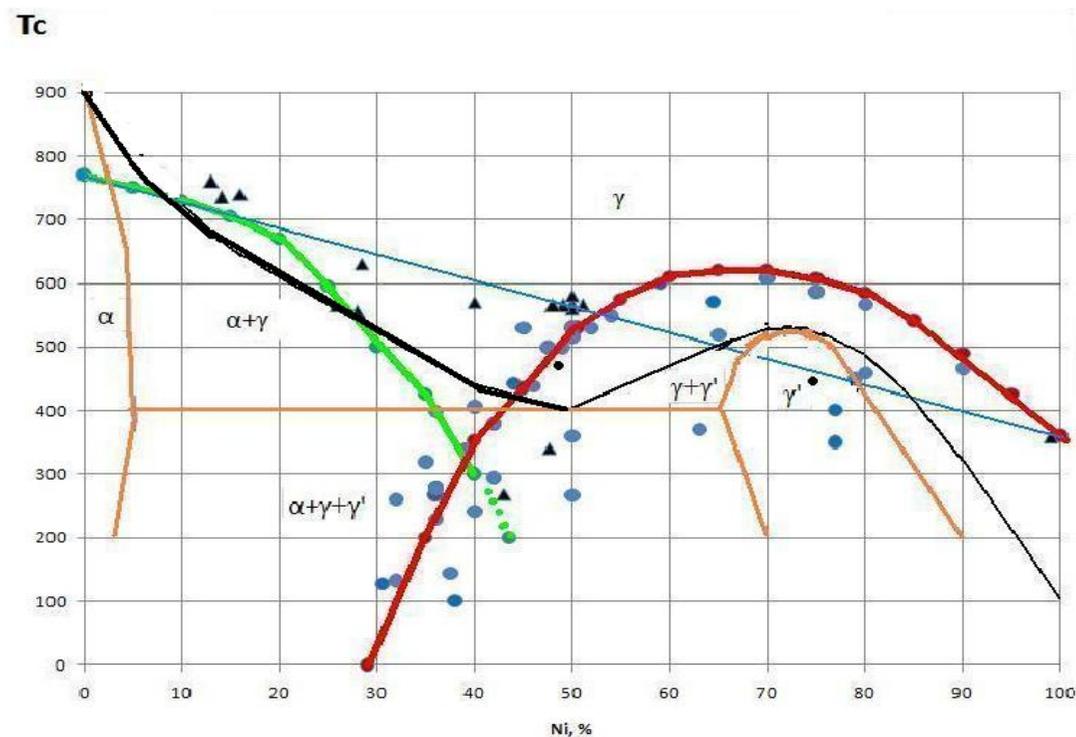


Рис.1. Фазовая диаграмма равновесия железо-никелевых сплавов (Cassiani et al., 2006). По оси абсцисс концентрация никеля в сплаве (%), по оси ординат – температура, °С. Черные и коричневые линии - области стабильного существования камасита (α -фаза), тэнита (γ -фаза) и тетратэнита (γ' -фаза). Зеленая линия – точки Кюри камасита, красная линия – точки Кюри тэнита. Синяя прямая линия – принятая для простоты линейная зависимость точки Кюри Fe-Ni сплава от содержания никеля. Синие кружки – данные для искусственных сплавов (из справочников), черные треугольники – для метеоритов (Nagata et al., 1986, 1987).

Как видно из фазовой диаграммы состояния Fe-Ni сплавов (рис.1), ниже коричневой линии присутствует система камасита-тэнита-тетратэнита в зависимости от содержания никеля и температуры, выше черной линии присутствует только тэнит. Видно также, что определение состава сплава при ТМА по точкам Кюри (T_c) неоднозначно. Так, например, с $T_c = 500^\circ\text{C}$ может быть и камасит, содержащий

30% Ni, и тэнит, содержащий 50% Ni, и аваруит, содержащий 90% Ni. Более того, в области температур, близких к точкам Кюри камасита и тэнита, происходит структурный переход $\alpha \leftrightarrow \gamma$, температуру которого легко спутать с T_c . В таких случаях требуется дополнительная независимая информация, например, данные МРСА. По этой информации в большинстве случаев камасит содержит не более 10% Ni, а для такого состава температура структурного перехода камасит \rightarrow тэнит **выше** T_c камасита, следовательно, для камасита мы, как правило, фиксируем именно точку Кюри. Фазовая диаграмма (рис.1) показывает также, что тэнит, содержащий менее 30% Ni, имеет отрицательную T_c , т.е. при комнатной температуре и выше такой тэнит - парамагнетик. Соответственно, в области содержаний в сплаве 0-30% Ni обнаруженные у метеорита $T_c > 500^\circ\text{C}$ относятся исключительно к камаситу. Для тетратэнита и тэнита есть простой 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. Столообразная форма кривой $M(T)$ до $500 - 700^\circ\text{C}$ – характерна для тетратэнита, а резкий спад $M(T)$ выше 700°C – признак структурного перехода камасит \rightarrow тэнит (Nagata et al., 1986,1987).

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).

Остановимся еще на одном важном моменте: на «отставании» 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 ($T_{\alpha \rightarrow \gamma} > T_{\gamma \rightarrow \alpha}$), всегда наблюдаемом нами в данном исследовании при ТМА Fe-Ni сплавов. Этот сдвиг обусловлен тем, что границы фазовых областей на диаграмме равновесия Fe-Ni сплавов могут быть определены, только если скорость охлаждения не превышала $\sim 10^\circ$ в сутки. Структура сплавов, охлажденных с большей скоростью, характеризуется экспериментальной фазовой диаграммой (рис.2, Бозорт,1956), в соответствии с которой должен наблюдаться температурный сдвиг на кривой $M(T)$ при нагреве и охлаждении. Это является однозначным признаком присутствия в образце Fe-Ni сплава.

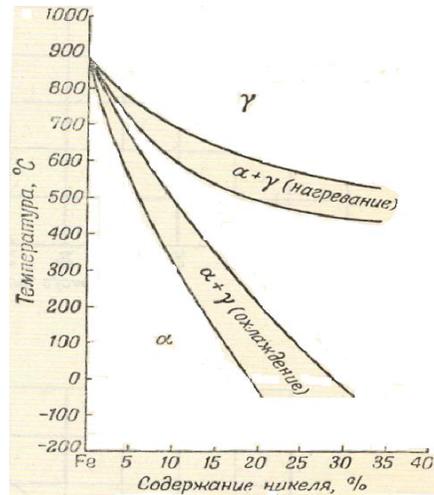


Рис.2. Экспериментальная диаграмма состояния необратимых Fe-Ni-сплавов (Бозорт, 1956)

Тэнит встречается, примерно, в 2-3 раза реже, чем камасит (табл.1). Преобладание камасита над тэнитом подчеркивается средним содержанием никеля в железных метеоритах, по данным Бюллетеня - $8,81 \pm 3,48\%$. Возможно, эта средняя величина содержания никеля (~9%) отражает состав железного ядра планет, в том числе и Земли.

Распределение содержания никеля в металлической части метеоритов явно одномодальное с модой 6% (рис. 3). Отсутствие на гистограмме чистого железа и тэнита, содержащего более 22% Ni, объясняется тем, что в гистограмму рис. 3 вошли результаты химического анализа всей металлической части метеорита, а не отдельных его составляющих, как камасит, тэнит и др.

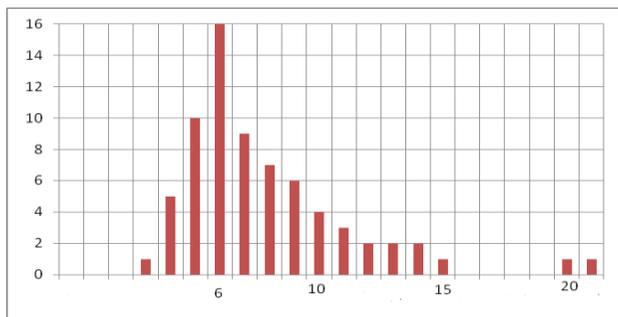
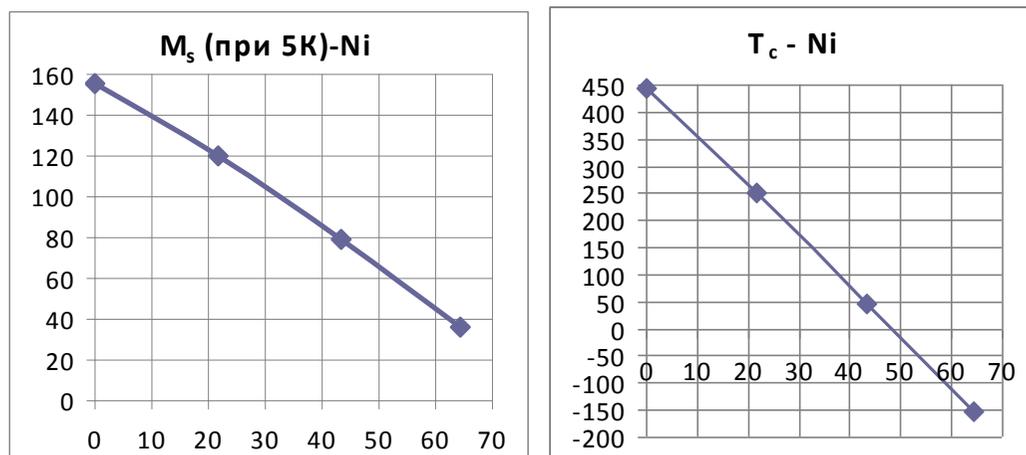


Рис.3. Распределение примеси никеля в Fe-Ni сплаве из метеоритов, данные химического анализа (*Meteoritical Bulletin, 2000–2009*)

2. Следующий магнитный минерал метеоритов **шрейберзит** $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$ – ферромагнетик. По данным Бюллетеня, содержание никеля в шрейберзите варьирует от 5% до 50%. Магнитные свойства природного шрейберзита почти не изучены. Есть сведения об искусственных Fe-Ni фосфидах и их магнитных свойствах (*Meyer and Cadaville, 1962; Gambino et al., 1967*). По этим данным существуют практически линейные зависимости удельной намагниченности насыщения (рис.4а) и точки Кюри (рис.4б) от содержания никеля в Fe-Ni фосфидах.



а

б

Рис.4. Зависимости удельной намагниченности насыщения (а), точки Кюри (б) от содержания Ni в Fe-Ni фосфидах.

3. **Когенит** $(\text{Fe,Ni})_3\text{C}$ – еще один ферромагнетик, встречающийся в метеоритах. В просмотренных нами описаниях в Бюллетене он упоминается только дважды. Магнитные свойства когенита изучены очень слабо. Точка Кюри цементита (искусственный аналог когенита) 210°C . Удельная намагниченность насыщения $128 \text{ Ам}^2/\text{кг}$.

4. **Fe-сульфиды**. Среди них львиная доля принадлежит **троилиту** (FeS) , он – антиферромагнетик с очень низкой намагниченностью. Кроме троилита, нередко встречаются **пирротин** (FeS_{1+x}) , **пентландит** $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$, **добреелит** $(\text{FeCr}_2\text{S}_4)$ и другие сульфиды. Из них только пирротин – магнитный минерал. Fe-сульфиды, в частности, пирротин, широко распространены на Земле и их магнитные свойства неплохо изучены. **Гексагональный пирротин** антиферромагнетик, $0 < x < 0,1$, удельная намагниченность насыщения $M_s \leq 0,1 \text{ Ам}^2/\text{кг}$, точка Кюри $T_c = 325^\circ\text{C}$. **Моноклинный пирротин**, $0,1 < x < 0,25$. Ферримагнетик, удельная намагниченность насыщения $M_s = 16 \text{ Ам}^2/\text{кг}$, точка Кюри $T_c = 325^\circ\text{C}$, отмечаются и более высокие точки Кюри до $350\text{-}360^\circ\text{C}$.

Отметим, что Fe-сульфиды являются потенциальным источником магнетита, продукта их окисления. Этот процесс, несомненно, ярко проявляется в метеоритах в околоземном пространстве и на Земле.

5. **Магнетит** (Fe_3O_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, троилиту и другим Fe-сульфидам, а также встречается в метеоритах и сам по себе. В группу «магнетит» объединены все встреченные в Бюллетене близкие к магнетиту минералы: феррошпинели, в частности, ульвошпинель, титаномагнетит, хромит, хромистый магнетит и другие.

Магнетит практически не описан в железных метеоритах и встречается в 8% каменных метеоритов (табл.1). Такое распределение магнетита в метеоритах трудно объяснить образованием магнетита в результате окисления минералов метеоритов. В этом случае следовало бы ожидать более частого присутствия магнетита именно в железных метеоритах из-за окисления на разных стадиях попадания в атмосферу Земли и долгого пребывания на ее поверхности. Такие примеры известны и описаны в литературе. Магнетит, гематит и гидроокислы железа широко распространены в земных осадках. Гематит и гидроокислы железа, несомненно, земного происхождения. Тесная корреляция содержания магнетита с содержанием гематита и гидроокислов железа, с литологическими особенностями осадков свидетельствует о том, что магнетит имеет преимущественно земное происхождение (Pechersky, 2008, 2010). Преобладание магнетита в каменных метеоритах по

сравнению с железными можно объяснить тем, что минералы группы магнетита относятся к **коровым** метеоритам, по аналогии с земными условиями, остальные же, содержащие Fe-Ni сплав, к ядру и мантии планет-источников метеоритов. Например, в магматических породах основного состава (базальты) кристаллизуются разные феррошпинели, наиболее распространен среди них титаномагнетит разного состава, от однородного, содержащего 12-14% титана (рифтовые) до широких вариаций состава титаномагнетита, от подобного рифтовым, до близкого к магнетиту (*Печерский и др., 1975; Печерский, Диденко, 1995*). Это относится и к коровым 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 Бюллетеня, в 42 метеоритах, представляющих марсианские базальты, описаны титаномагнетит и ульвошпинель (18), хромит, нередко с примесью титана, алюминия, магния (26), ильменит (21) и Fe-сульфиды, главным образом, пирротин и троилит (29), и крайне редко упоминаются камасит и тэнит, возможно связанные с импактными явлениями. Перечисленные Fe-Ti-окислы, отнесенные нами в группу магнетита, заметно реже отмечаются в других метеоритах, особенно это относится к собственно магнетиту. Чаще он представляет продукт переплавления, окисления металла в земной атмосфере. Кроме того, в результате вторичных изменений метеоритов на Земле (выветривание и т.п.) может появиться и магнетит, но не титаномагнетит и тем более ульвошпинель и другие феррошпинели.

6.Ильменит (FeTiO_3)– парамагнитный при комнатной температуре минерал, крайний член ряда твердых растворов ильменит-гейкилит-пирофанит и др., в частности, гемоильменитов ($\text{Fe}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$). Минерал широко распространен в земных горных породах. В интервале $x=0,9-0,4$ он является ферримагнетиком и его M_s достигает $60 \text{ Ам}^2/\text{кг}$ (*Нагата, 1965*). Как следует из Бюллетеня, в метеоритах весьма часто присутствует именно ильменит (x около 1) с небольшими примесями магния и др., следовательно, в метеоритах присутствует только парамагнитный его вариант.

В заключение краткого обзора данных о метеоритах отметим явное сходство составов основных металлических частиц в метеоритах и в осадках: это камасит, с очень близкими модами содержания никеля 6% у метеоритов (рис.3) и у осадков (рис.5).

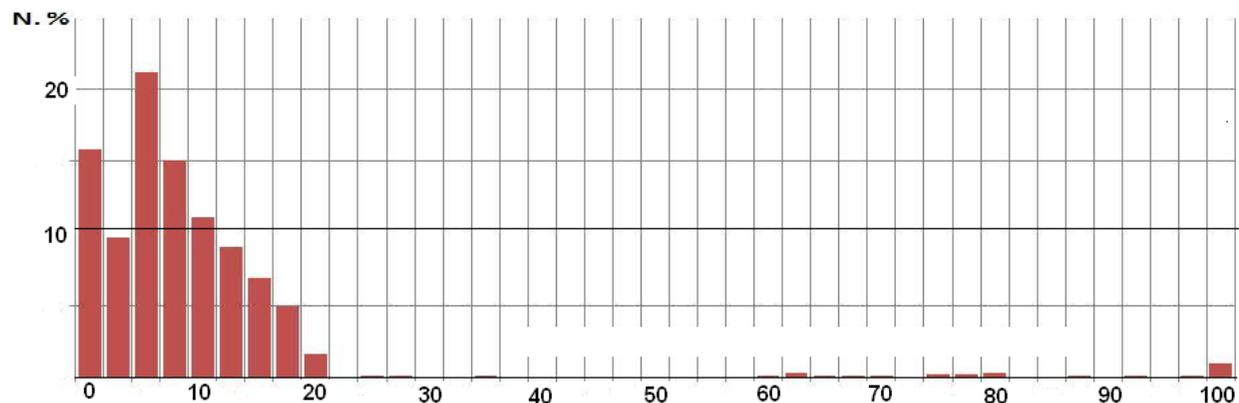


Рис.5. Относительное распределение примеси никеля в металлических частицах из осадков по данным термомагнитного анализа (Печерский, Шаронова, 2011).

Концентрация в осадках остальных минералов, приведенных в табл. 1, резко уменьшается по сравнению с метеоритами. Так, тэнита и тетратэнита в осадках существенно меньше, чем в метеоритах, шрейберзит, троилит и пирротин (космического происхождения) в осадках практически не встречаются. Это невозможно объяснить окислением железа в металлах и шрейберзите, т.к. процесс вторичного окисления более вероятен для камасита, но именно он – главный сохранившийся компонент металлических частиц в осадках. Окислением скорее можно объяснить отсутствие в осадках троилита, пентландита и пирротина, повсеместно присутствующих в метеоритах (табл.1).

II. Состав и магнитные свойства магнитных минералов метеоритов

Образцы и методика исследований. Исследуемые образцы были отобраны из коллекций метеоритов Геологического музея им. Вернадского РАН (Москва) и музея естественной истории СВКНИИ ДВО РАН (Магадан). Это метеориты из московской коллекции (в скобках указаны номер образца, страна места находки метеорита): Августиновка (гр7363, гр7364, гр7366, Украина), Баббс Милл (гр7389, США), Биштюбе (гр7368, гр7369, гр7370, Казахстан), Гросслибенталь (гр7373, Украина), Джибеон (гр7404, Намибия), Забродье (гр7445, Белоруссия), Имилак (гр7409, Чили), Камберленд фолс (гр7441, США), Косбис Крик (гр7430, США), Красноярск (гр7374, гр7375, мн29874, Россия), Марьялахти (гр6490, Россия), Омолон (гр0010, Россия), Оханск (гр7387, Россия), Саратов (гр7379, гр7380, гр7381 и гр7383, Россия),

Санта-Катарина (гр7362, Бразилия), Сао Жулиао де Морейро (гр7427, гр7428, Португалия), Сихотэ-Алинь (гр7439, Россия), Толука (гр7436, гр7437, Мексика), Хайнхольц (гр7405, Германия), Хессле (гр7406, Швеция); 3 образца тектитов, 7601 - молдавит (Чехословакия, Богемия); 7604 и 7605 - индошинит типа Муонг-Нонг (Вьетнам, провинция Данат); метеориты из магаданской коллекции (страна не указана, т.к. все перечисленные метеориты найдены на территории Магаданской области, Россия): Алискерово (АЛ-1), Анюйский (АН-1), Билибино (БИЛ-1), Омолон (ОМ-1), Сеймчан (СМ-1), Эгвекинот (ЭГВ-1). Всего 25 метеоритов, в том числе 13 железных метеоритов, 6 железокремнистых (5 палласитов и 1 мезосидерит) и 6 каменных метеоритов (5 хондритов и один ахондрит). Ряд метеоритов в коллекциях музеев представлены несколькими образцами, которые нами изучены, так что в сумме набирается 40 образцов. Изученные нами метеориты относятся к разным местам 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 вполне представительна для выявления общей картины в распределении, составе и магнитных свойствах присутствующих в метеоритах магнитных минералов.

При изучении метеоритов выполнен комплекс магнитных измерений, ТМА и микрорентгеноспектрального (МРСА) анализов. Для микронзондовых исследований использовался микронзонд «Тескан ВегаII» с энергодисперсионным спектрометром. Микроскопические исследования проведены при помощи оптического микроскопа «Olympus BX51M». Исследования проводились в Геофизической обсерватории «Борок», филиале ИФЗ РАН. Использована методика исследования микрочастиц в оптическом микроскопе с последующим электронно-зондовым микроанализом и сравнением полученных результатов. Фото, полученные в оптическом микроскопе, были обработаны с помощью программы CombineZP (Alan Hadley), позволяющей в режиме трехмерной микроскопии склеить одиночные нерезкие фото в одно, тем самым поднять глубину резкости. Отобранные для изучения на микронзонде частицы метеоритов наносились на двухсторонний проводящий угольный скотч и прикатывались стеклянной палочкой для того, чтобы поверхность частиц была ориентирована параллельно поверхности столика. Это позволяло анализировать частицы с приемлемым качеством анализа, не прибегая к полировке объекта в шлифе, что привело бы к дополнительному загрязнению объекта и потере ряда частиц. Микронзондовые исследования проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 0.2 нА.

Магнитные измерения и ТМА проводились в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН. Образцы для измерений помещались в чистый каолин. Для измерения остаточной намагниченности использовался спин-магнитометр JR-6 (AGICO,

Чехия) с чувствительностью $2,4 \cdot 10^{-6}$ А/м, для измерения намагниченности насыщения и ТМА – вибро-термомагнитометр конструкции Н.М.Аносова и Ю.К.Виноградова (ИФЗ РАН), его чувствительность 10^{-8} Ам²/кг, измерения велись в постоянном магнитном поле 600 мТл. При ТМА проводились непрерывные измерения M_s при нагреве образца до 800°С и последующем охлаждении до комнатной температуры. Цикл нагрев-охлаждение, как правило, повторялся дважды.

Концентрация магнитного минерала в образце определялось следующим образом: кривая M(T) экстраполировалась от точки Кюри данного минерала до комнатной температуры, в результате определялась величина M_s минерала с данной точкой Кюри; затем вычислялось отношение полученной величины к известной намагниченности насыщения чистого минерала с данной точкой Кюри, которое показывает содержание данного минерала в образце. Для камасита и тэнита (*Бозорт, 1956*) и шрейберзита (*Gambino et al., 1967*) известна зависимость M_s -содержание никеля, для магнетита $M_s = 92$ Ам²/кг, для гематита и гетита принята $M_s = 0,5$ Ам²/кг.

Результаты исследований метеоритов. Результаты изучения каждого метеорита сведены в табл. 2 и в Приложении, где представлены результаты МРСА с фотографиями и данные измерений магнитных свойств каждого образца метеоритов. Электронный адрес Приложения:

таблица 2. Результаты термомагнитного и микрозондового анализов образцов метеоритов и тектитов

Метеорит, страна	образец	s	rs/ s	st/ s	cr	cr/ c	crt/ cr	T _c	Камасит		Шрейберзит			γ→α	Тэнит			Другие минералы	
									Ni _т	Ni _з	Ni _з	T _c	Ni _т		Ni _з	T _c	Ni _т		
1								9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	19	
вк, Августино октаэдрит, Украина	p7366	,3	,19	,0	5	,6	,38	0	720;74	2; 7	,6?	o	o	.o	o	.o	o	вторичные Fe-окислы	
	p7363	,8	,26		5		,00	0	720;75	2; 5	,3?	o	o	o	o	o	o	вторичные Fe-окислы, ез Fe-Ni-Cr, Fe-Cr-Al, и Fe-Cu- Zn сплава;	
		,9	,26	,8	2,5		,09	0										вторичные Fe-окислы	
	p7364	,8		,9	2		,14	0	720;74	2;7	,6?	o	o	o	o	o	o		
		,7	,28		9,0		,79												
о, Алискеров октаэдрит,	Л-1	54,5	,01	,9	0		,3		I-764 II-744	,5	,8	o		з	30	o	o	з14-17	аломосиликаты; вторичныеFe- окислы

СВРоссия									,3	,8								
Анойский, гексаэдрит СВРоссия	Н-1	28,6	,02	,7	,2		,6	I-762 II- 758	,9	,9	о		з	65	00	2,0	но.	алюмосиликаты, ез троилита, хромита, добреелита, свинца, вторичные Fe-окислы
Милл, ША	Баббс октаэдрит, р7389	43,3	,01	,26	5		,48	738 600	,7	,6	о		ез	20	о	о	з19,6	вторичные Fe-окислы , много магнетита
Билибино, гекс., СВРоссия	ИЛ-1	32,9	,025	,0	,0		,74	I-770 II- 757	,2	,7	о		з 16- 21,6.	65	но	о	о	алюмосиликаты, вторичные Fe- окислы
Биштюбе, октаэдрит, Казахстан	р7369 р7370	,7 8,4	,19 ,003	,2 ,0	0,9 6,0	,9		770 753		,5	о	о	о	ет	о	о	з 75,7 о	Hg-Fe-Cu-сульфиды, ез свинца, вторичные Fe- окислы
Гросслибе нталь, хондрит, Украина	р7373	,13 ,49	,02	,95	0,0	,2	,15	730 630	,7 7	4,3 4,3	о	о	о	50 00?	о	о	1-46.	оливин, пироксен, троилит, пирротин, пентландит, хромит, вторичные Fe- окислы, киноварь
Джибеон, октаэдрит, Намибия	р7404	75,0	,009	,93	1		,0	I-747 II- 739	,5		о	о		34 50	о	о		
Забродье, хондрит, Белоруссия	р7445	,0	,03	,62	7,1	,4	,99	I-750 II- 734	,9 ,7	,4 ,4	о	о	но	25 00	о	о	7-48	оливин, пироксен, троилит
Имлак, палласит, Чили	р7409	5,9	,004	,0	,1	,8	,5	I-757 II- 734	,0 ,7	,6	.о	.о	.о	42 20	о	о	о	алюмосиликаты, оливин, ез ильменита вторичные Fe- окислы
Камберленд Фоллс, хондрит, США	р7441	0,87	,004	,91	2,5		,5	762; 630	,0	,7	о	о	2,3	55	о	о	2,8 2,7	оливин, ез никеля, троилит, пентландит, пирротин, киноварь
Крик, США	Косбис октаэдрит, р7430	3,9 ,12	,25 ,21	,0	4,6 6,0		,0	I- 635; 720 II- 607;745	20 ,0	-6,8 -6,8			з 34	ет	о	о	з 31	вторичные вюстит, магнетит и другие Fe-окислы
Красноярск, Россия	палласит, р7374	48,3	,001	,0	4,6	4,3		734	,7	,4	о		8,3	20	о	о	о	алюмосиликаты, пентландит, пирротин, киноварь ез свинца, сурьмы, касситерита, ильменита; вторичные Fe-окислы

Красноярск, сепарат оливина	p7375	,7	,16	,0	6,5	,1	.62	но	о	о	50	2	9	ет	о	о	о	I-III-285 – Fe-окисел; оливин, ез троилита, киновари, вторичныеFe-окислы
Красноярск, магнитн. фракция из олив. сепарата	p7375м	6,9	,26	,87				750	,9		68	9,5	9	62	о	о	о	вторичный магнетит T _c =600°C (2%); оливин; вторичные Fe-окислы
Красноярск, слабомагн. фр.	p7375ш	,7		,0				.	о	о	о	о	о		о	о	о	Fe-окисел T _c =280°C (30%M _s), магнетит
Красноярск, палласит, Россия	n29874	23.9	.002	,98	7		.76	750	,9	,8	о	о	7,9	20	о	о	..о.	оливин; троилита, корунда, киновари; вторичные Fe-окислы
Марьялахт и, палласит, Россия	p6490	72.8	,001	,98	5	50	.13	759	,7	,0	о.	о	356,6	40	о	о	326,54	силикаты Fe-Al сплав
Омолон, палласит, СВРоссия	M-1	02,0	,008	,9	7		,59	I-762 II-744	,0	,6	10	4	3,8	-725;644	о	о	7-48	оливин, вторичныеFe-окислы
Омолон, палласит, СВРоссия	p0010a	47,8	,003	,0	4,5		,9	760 но	,5	,6	о	о	о	49	о	о	о	вторичныеFe-окислы
	p0010в	49,4			1,5		,09		о	,1	о	о	4		о	о	о	
Оханск, хондрит, Россия	p7387	0.7	,13	,98	6		.76	734	,7	,6	о	о.	о	40	60	3	5,3	оливин, троилит, пирротин, ез Cu-Fe-сульфидов
Санта Катарина, железный, Бразилия	p7362	,62	,056	,95	6	,29	,25	I-747 II-750	,6	4,9	о	о	о	30	о	о	о	вторичные Fe-окислы
Сао Жулиао ди Морейра, гексаоктаэдрит Португалия	p7428	13,1	,003	,9	1,5	0.4	,09	I-но II-но 760 758	о	,7	-335	2	1,6		о	о	о	вторичныеFe-окислы Fe-Al сплав, корунд,
	p7427	05,7	,001	,97	5		,60		,4	,8	I-325	3	3	70	о	о	о	герцинит, вторичныеFe-окислы
Саратов, хондрит, Россия	p7379	7,7	,016		5		.12											
	p.7380	6,1	,014	,98	5,8	7,4		I-765 II-755 III-752	,0	,3	о	о	о		-630	5		
									,6									

-*-	p7381	6,3	,015	,97	64	4,5		I-750 II-750	,4 ,9 4,9		o	o	o		-615 I-580	5 5			
-*- обобщение данных МЗА	p7379- 7380- 7381- 383									0 3,3	o	o	o		o	o	0,7 7,1	оливин, пироксен, троилит, пирротин, пентландит, алюмосиликаты; ез Fe-хромита, Cr-Fe-шпинели, добреелита, меди, киновари, никеля	
Сеймчан, октаэдрит СВ Россия	M-1	5,8	,016	,77	,0			I-762 II-745	,0 ,1	,7 ,7	o		5,8	70 60	o	o	1-21	оливин, пироксен; вторичныеFe- окислы	
Алинь, Сихотэ- гексаоктаэ дрит, Россия	p7439 p7439a	37.4 53.5	,003	,0 ,97	6.5		752	I-767 II- 767	,7 ,4 ,7	,7 ,7 ,7	o o	o o	o o	50 35	o o	o o	316; 9,6 o	оливин, пироксен, алюмосиликаты; ез троилита, пентландита, Al-феррошпинели, карбонаты, вторичные Fe-окислы	
Чехия Тектиты молдавит; индошини индошини Вьетнам	p7601, 604-1, 604-2 p7605	,026 ,017 ,386 ,074	,12		5,5			но 745 720?	o 2?	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o	алюмосиликатное стекло; магнетит, 0,02- 0,08%	
Толука, октаэдрит, Мексика	p7436 p7437	00,9 01,1	,008 ,002	,95 ,01	2 3		743 742	I-750 II- I-751 II-	4,9 ,6 ,6 ,8	,4 ,4 ,4 ,4	o o	o o	o 334	02 03 20 20	o o	o o	o o	Вторичные Fe-окислы	
Хайнгольц мезосидерит Германия	p7405	,56	,12		3,7	,7				,8			o				6.3; 5,7	силикаты, Cr-Fe шпинель, вторичныеFe- окислы	
Хессле, хондрит, Швеция	p7406	,9	,062	,06	6,0	8.1		760; 680	,5 7	,6 5,0	o o	o o	o o	70 0 2	o o	o o	2,8	оливин, пироксен; ез никеля; троилит, пирротин; вторичные Fe- окислы	
Эгвекиног,								I-761;											силикаты; треворит,

октаэдрит СВ Россия	ГВ-1	4,4	,034	,95	2,0		,36	650	,5	0	о	о	3,38	85			319-52	хром; вторичныеFe- окислы
								П-738;	5	0				65				
								650	,8	0				85				
									5	0				65				

Пояснения: метеорит – название метеорита, его тип и место находки; образец – номер образца; M_s – удельная намагниченность насыщения образца до нагрева, Ам²/кг; $M_{гс}$ – удельная остаточная намагниченность насыщения; $M_{ст}$ – удельная намагниченность насыщения, измеренная после нагрева образца до 800°C; $H_{сг}$ – остаточная коэрцитивная сила, измеренная до нагрева образца, мТл; H_c – коэрцитивная сила, мТл; $H_{сгт}$ – остаточная 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, $N_{гт}$ и $N_{гз}$ – содержание никеля в данном минерале, соответственно, по данным термомагнитного анализа и по данным микрозондового анализа; $T_{г\rightarrow\alpha}$ – температура перехода тэнит-камасит при остывании образца, °С. ез – единичные зерна, но – минерал не обнаружен.

Из обнаруженных и проанализированных микрозондом магнитных минералов наиболее отчетливо определяется ТМА камасит во всех метеоритах по двум признакам: а) при нагреве, как правило, фиксируется точка Кюри, т.к. температура структурного перехода камасит→тэнит ($T_{\alpha\rightarrow\gamma}$) находится выше или близка T_c при содержании никеля в камасите до 10% и б) после нагрева до 800°C при охлаждении фиксируется температура структурного перехода тэнит→камасит ($T_{\gamma\rightarrow\alpha}$), сдвинутая относительно T_c примерно на 100°, что соответствует диаграмме состояния искусственных Fe-Ni сплавов (см. рис.2). По разным причинам этот сдвиг заметно колеблется, но виден тренд увеличения сдвига по мере роста содержания никеля в камасите (рис.6). В одном лишь метеорите Биштюбе, содержащем только чистое железо, сдвиг $T_{\gamma\rightarrow\alpha}$ при охлаждении отсутствует.

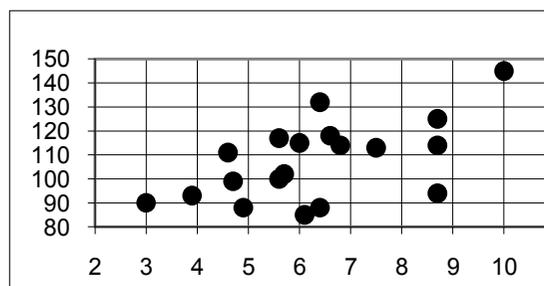


Рис.6. Сдвиг (уменьшение) температуры структурного перехода тэнит→камасит при охлаждении образца относительно точки Кюри камасита (в основном по результатам второго нагрева, когда измеренная точка Кюри приближается к расчетной). По оси абсцисс – среднее содержание никеля в камасите (%), измеренное микрозондом, по оси ординат – величина сдвига, °С.

Тэнит, Fe-Ni сплав, содержащий чаще более 30%Ni, присутствует по данным МРСА в 12 образцах из 40, причем нередко это единичные зерна, которые не фиксируются ТМА (табл.2). ТМА тэнит зафиксирован только в трех образцах (Оханск, Саратов, Эгвекино).

Кроме того, тэнит, содержащий менее 30% Ni, парамагнетик при комнатной температуре. Такой тэнит обнаружен МРСА в 5 метеоритах и еще в трех в виде единичных зерен. Любопытно, что среди метеоритов, содержащих тэнит, 4 –железных, 2 – железокремнистых и 6 – кремнистых, т.е. почти все образцы кремнистых метеоритов содержат тэнит, хотя по литературным данным (Бюллетень, 2000-2009) тэнит встречается в железных метеоритах вдвое чаще, чем в кремнистых (табл.1).

Четко фиксируется при ТМА по точке Кюри шрейберзит, содержание никеля в нем соответствует диаграмме рис.4. Микронзондом шрейберзит обнаружен в 40% образцов, но в заметных количествах он зафиксирован и МРСА, и ТМА лишь в трех метеоритах (Красноярск, Омолон, Сао Жулиао де Мореира). Единичные зерна шрейберзита обнаружены еще в 9 метеоритах (Аньюйский, Августиновка, Билибино, Камберленд Фоллс, Косбис Крик, Сеймчан, Сихотэ Алин, Толука и Эгвекинот), но они не обнаружены ТМА, т.е. их вклад в $M_s < 1\%$. В остальных 13 метеоритах шрейберзит не обнаружен ни под микроскопом, ни ТМА. В тех метеоритах, где шрейберзит обнаружен, его распределение крайне неравномерно. Так, например, в метеорите Красноярск в большом количестве присутствует шрейберзит только в образце гр7375, а в образцах 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 Мореира в образце гр7428 сплошной шрейберзит, а в образце гр7427 он не обнаружен. Содержание никеля в шрейберзите колеблется от 8 до 66% (Марьялахти) и широко варьирует независимо от приуроченности к камаситу (11-45% Ni), тэниту (25-37% Ni) или силикатам (19-33% Ni). Хотя прослеживается такая тенденция: среднее содержание никеля в шрейберзите на контакте с камаситом 20%, с тэнитом – 30%.

В метеоритах Саратов (гр7380), Хессли и Камберленд Фоллс обнаружены микронзондом единичные мелкие зерна никеля. Естественно, они не обнаружены ТМА, т.к. их концентрация очень низкая (вклад в $M_s \ll 1\%$).

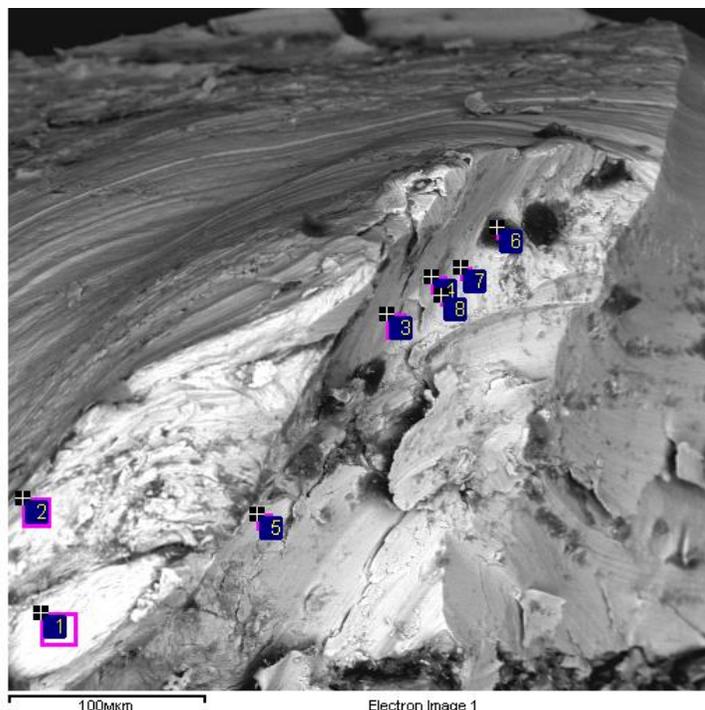
В двух метеоритах Марьялахти и Сао Жулиао де Мореира (гр7427) встречены несколько зерен Fe-Al сплава в виде включений в камасите. Состав Fe-Al-сплава мало меняется, зерна слабо окислены. Средний состав: 4,1% O; 4,6% Al; 89,9% Fe (n=13) (Марьялахти) и 2,5% O; 6,2% Al; 78,1% Fe; 0,2% Ni; (n=6) (Сао Жулиао де Мореира). 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) (рис.7). При просмотре **выпусков Бюллетеня** не обнаружено упоминания Fe-Al-сплава, т.е. это явление для метеоритов весьма редкое, хотя искусственный сплав достаточно

широко известен, например, магнитно-мягкие сплавы железа и алюминия алфер и алфенол. В некоторых зонах сплава отмечено повышенное содержание углерода, который также может входить в состав сплава.

Рис.7. Пример Fe-Al сплава (3-8) в камасите (1,2). (Сао Жулиао де Мореира, гр7427). Богатые алюминием участки тяготеют к краям Fe-Al сплава (3,5). Черные пятна – обогащение углеродом (6), фазы мелкие и неоднородные, разрешен зонда не хватает для точной идентификации Fe-Al-C сплава.

	l	e	i
1		7.08	.92
2		4.26	.74
3	5.73	4.27	
4	4.23	5.77	
5	6.96	3.04	
6	1.27	4.90	3.83
7		.53	5.47
8		3.76	6.24

В слаб
примесь сер
содержания с



ен Fe-окисел с постоянной
Fe; 4.3% Ni. Распределение
углерода является постоянным

компонентом данного минерала. Концентрации никеля несколько варьируют и зависят, очевидно, от состава камасита, по которому образуется этот минерал.

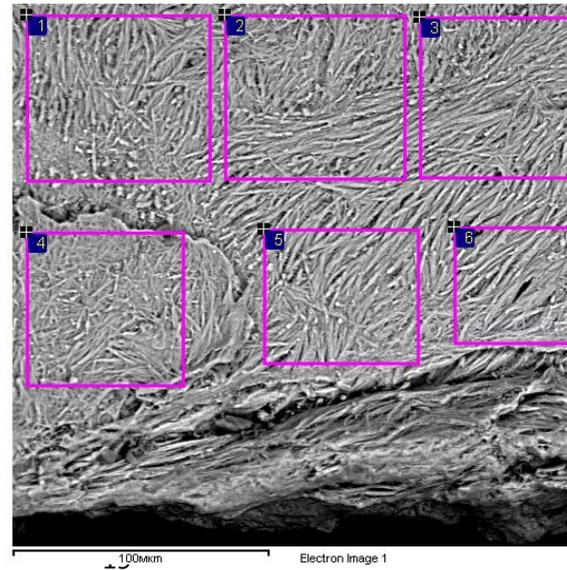
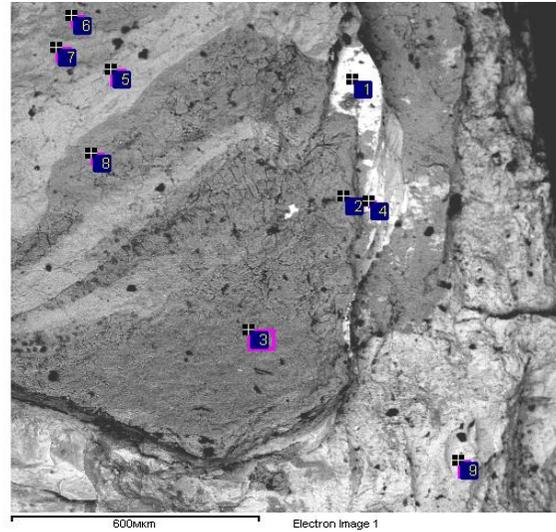
Рис.8. Примеры Fe-окисла с постоянной примесью серы и никеля (метеорит Красноярск, гр7375ш).

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.

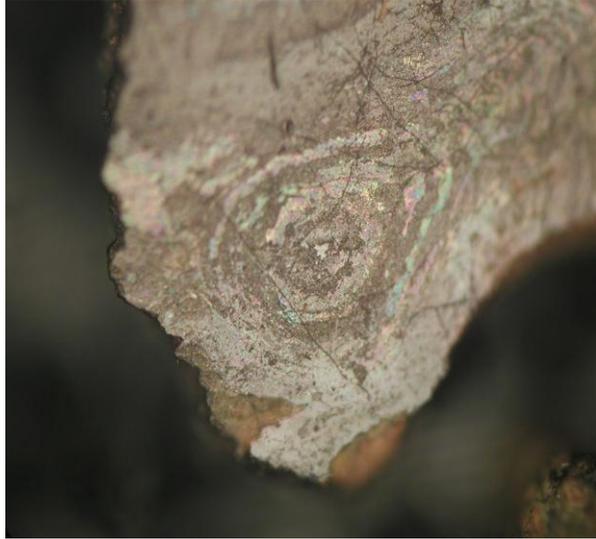
	l	i	e	i
1	.43	.74	.06	3.75
2	7.84	.48	.14	.00
3	7.39	.00	.27	.44
4	.62	.29	.00	.57
5	1.66	.29	.44	.00
6	0.09	.33	.49	.49
7	9.78	.00	.27	.00
8	8.96	.28	.42	.00
9	.99	.40	.24	.00

	e	i
1	8.76	.25
2	1.06	.57
3	0.01	.12
4	8.27	.06
5	9.30	.39
6	0.11	.07

Б,



В) Крупные зерна (оптический микроскоп). Поле з



Формы выделения минерала довольно разнообразны: корки на других минералах (рис.8а), волокна (рис.8б), крупные зерна (рис.8в). $T_c \approx 280-290^\circ\text{C}$. Очевидно, этот минерал содержит только Fe^{3+} , поэтому устойчив при нагревах. Точка Кюри близка к точке Кюри магнезиоферрита и якобсита. На кривой $M(T)$ нагрева и более ярко – на кривой охлаждения (рис.9) присутствуют только две магнитные фазы: интересующий нас Fe-окисел с примесью серы и никеля с $T_c = 280^\circ\text{C}$ 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 $M_s = 0,69 \text{ Ам}^2/\text{кг}$ и после нагрева до 800°C она выросла в 4,6 раза). На долю магнетита приходится 79% (рис.9), т.е. $2,5 \text{ Ам}^2/\text{кг}$. Следовательно, содержание магнетита в образце составляет $2,5/92 = 2,7\%$, остальные 97,3% приходятся практически только на фазу с $T_c = 280^\circ\text{C}$ (рис.9). Т.е. удельная намагниченность насыщения этой фазы примерно равна $(3,17-2,5)/0,973 \approx 0,69 \text{ Ам}^2/\text{кг}$, что близко удельной намагниченности насыщения гематита ($M_s = 0,5 \text{ Ам}^2/\text{кг}$).

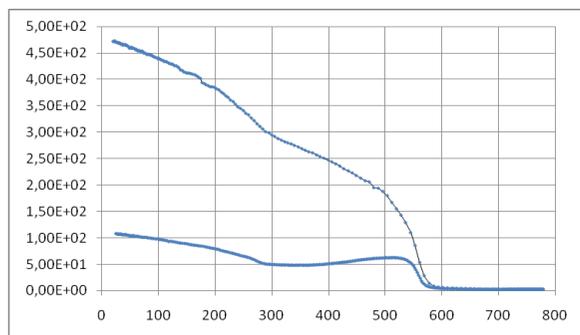


Рис.9. Результат ТМА образца gr7375ш. Цикл нагрев-охлаждение.

МРСА всех изученных метеоритов показал, что такие Fe-окислы с постоянной примесью серы и никеля в небольших количествах присутствуют во многих метеоритах, например, Августиновка, Биштюбе, Гросслибентале, Забродье, Косбик Крик, и связаны исключительно с участками заметного изменения метеоритов. Кроме того, примесь серы того же порядка присутствует в ряде зерен камасита, тэнита, шрейберзита, оливина (см. Приложение).

Fe-сульфиды железа, главным образом, троилит, а также пирротин, пентландит обнаружены микронзондовым анализом примерно в 30% образцов. При этом они присутствуют в заметных количествах **во всех** каменных метеоритах, в виде единичных зерен обнаружены только в одном железном (Сихотэ-Алинь) и одном железоканном метеорите (Красноярск) и **отсутствуют** в остальных железных и железоканнных метеоритах. Отчасти последний факт можно объяснить заметным вторичным окислением: 7 из 16 железных и железоканнных метеоритов, в которых отсутствуют Fe-сульфиды, заметно окислены. 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, а это слабомагнитный антиферромагнетик, во-вторых, часто пирротин представлен в виде единичных зерен.

Ни ТМА, ни МРСА не обнаружен в изученных образцах когениит.

Неоднократно при ТМА фиксировался в заметных количествах магнетит. Судя по всему, и в том числе по данным микронзондирования, это вторичный продукт окисления камасита и других магнитных минералов. Магнетит, как и другие окислы железа,

гематит, гетит и т.п., не имеют отношения к дозовой истории метеорита и не представляют интереса в данной работе, а лишь искажают картину первичных магнитных минералов.

Остальные обнаруженные в изученных метеоритах минералы, как феррошпинели, корунд, добрелит, Fe-Al сплав, киноварь и др. скорее экзотические, а не закономерно присутствующие в метеоритах. Киноварь присутствует в двух видах, во-первых, в виде единичных зерен, например, в метеорите Камберленд Фоллс, среди силикатов, как первичное образование и, во-вторых, в нескольких метеоритах в заметных количествах, как заведомо вторичное образование, покрывающее вторичные гидроокислы железа. Наиболее отчетливо вторичная природа киновари видна в метеорите Гросслибенталь.

Результаты изучения тектитов. Все три исследуемых тектита (молдавита 7601, индошиниты 7604 и 7605) (см. табл.2, Приложение) – стёкла, близкие по составу к алюмосиликатам. По данным МРСА 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 7604 и 7605 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 (7601) в индошинитах 7604 и 7605 появляются железо и натрий. Кроме того, в тектите 7605 небольшая примесь титана. Рудных зерен при МРСА не обнаружено ни в одном кусочке тектита.

Значения удельной намагниченности насыщения тектитов низкие: $M_s = 0.026$ (7601), 0,017 и 0,386 (7604-2), 0,047 и 0,074 Ам²/кг (7605). $M_{fs}/M_s = 0,12$; $H_{cr} = 25.5$ мТл (7601). Эти данные показывают, что в изученных тектитах присутствует незначительное количество магнитных минералов, состояние их ближе к псевдооднодоменному, размер зерен заметно меньше размера луча микрозонда. После нагрева коэрцитивность меняется незначительно: $H_{crit}/H_{cro} = 1,08$, тогда как величина намагниченности падает в несколько раз, очевидно, за счет окисления (уничтожения) магнетита. На кривой M(T) фиксируется $T_c = 580^\circ\text{C}$, это магнетит. Судя по величине M_s , его концентрация в разных образцах колеблется от 0,02 до 0,08%. В более магнитном образце 7604-2 кроме магнетита 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%. Примесь никеля в камасите, согласно T_c , 6%. У образца 7605 практически чистая гиперболическая кривая M(T) (Приложение), свидетельствующая о явном преобладании парамагнитного материала, на ее фоне намечаются магнитные фазы с $T_c=500^\circ\text{C}$ и 720°C ?, доля каждой в величине M_s менее 5%, вероятнее всего, это титаномagnetит и камасит. Из данных микрозондового анализа и ТМА можно предположить, что изученные тектиты, скорее

всего, сеть результат плавления земного материала, в котором присутствуют зерна космического происхождения, что демонстрирует связь с падением метеорита. Т.е. изученные тектиты есть продукт импактного события.

III. Обсуждение результатов.

Общие черты формирования ряда камасит-шрейберзит-тэнит. Мы обращаем главное внимание на *общие черты*, а не на особенности каждого типа метеорита и, тем более, каждого минерала (об этом можно прочесть в *Приложении*). Т.е. хотим увидеть за деревьями лес.

Одним из главных результатов нашего исследования является распределение никеля в Fe-Ni-сплавах метеоритов (в камасите и тэните) (рис.10) и в шрейберзите (рис.11).

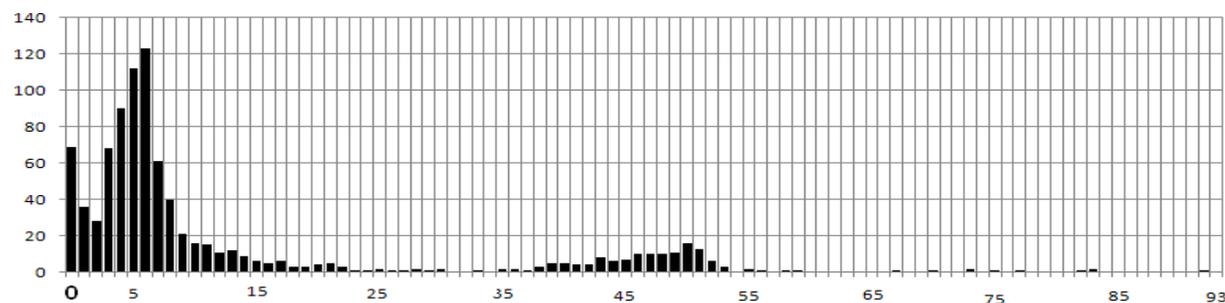


Рис.10. Распределение примеси никеля (%) в Fe-Ni-сплаве из исследованных метеоритов, данные МРСА. По оси ординат число определений никеля.

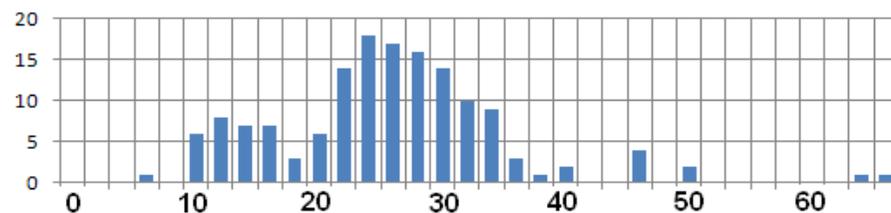
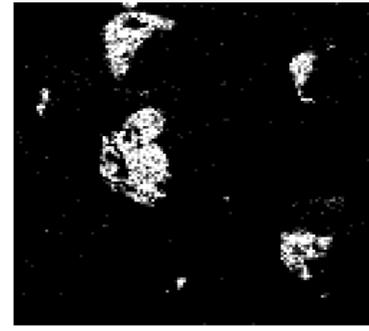
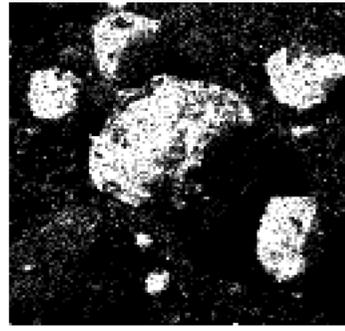
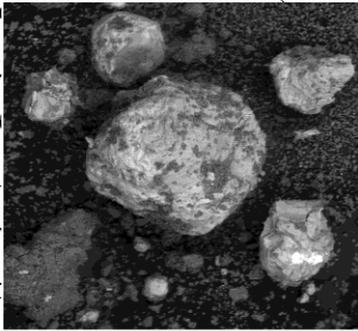


Рис.11. Распределение примеси никеля в шрейберзите из исследованных метеоритов, данные МРСА. По оси ординат число определений никеля.

Из гистограммы (рис.10) видно, что число случаев фиксации тэнита почти в 6 раз меньше, чем камасита. Отчетливо видно трехмодальное рапределение: 1 – чистое железо с модой 0% Ni, 2 – камасит с модой 5-6% Ni и 3 – тэнит, с модой 50% Ni. Первые две моды

(чистое железо, камасит, шрейберзит, вторичные тэниты). В образцах



В образцах камасита и тэнита, что четко фиксируется под микроскопом, например, в кондрите Саратов при сканировании (рис.12,13).

тэнит в осадках встречается «полняется» содержанием никеля в группы: первая с модой 11-12% Ni, содержанием фосфора: камасит-шрейберзит-тэнит образуют три соединения. крупные зерна или участки,

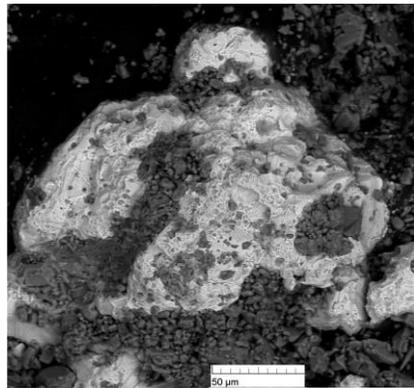
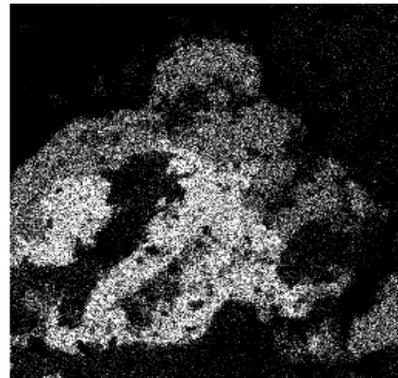
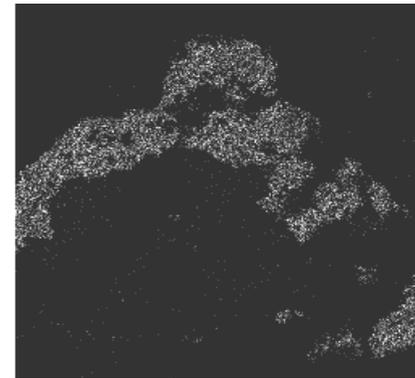


Рис.12. Зерно, состоящее из железа (а) и никеля (б). Метеорит Саратов



Fe Ka1



Ni Ka1

сканирования по железу (а) и по никелю (б)

Рис.13. Округлые зерна камасита, тэнита и их сростки (а). б – сканирование по железу, в – сканирование по никелю. Метеорит Саратов.

Помимо обособленной кристаллизации камасита и тэнита, везде встречаются тонкие ламели тэнита в камасите, как результат распада последнего (Nagata et al,1986,1987). Ламели тэнита обычно тоньше размера зонда и видны лишь по некоторому увеличению содержания никеля. Главный признак существования таких структур – это уменьшение точек Кюри камасита после нагрева образцов до 800°C. Такая тенденция хорошо видна на рис.14. При первом нагреве точки Кюри в большинстве случаев не зависят от примеси никеля и очень близки к T_c чистого железа. При втором нагреве происходит заметное уменьшение T_c и ее величина зависит от концентрации никеля в камасите. Результат первого нагрева объясняется тем, что в большинстве изученных метеоритов камасит представляет собой тонкое чередование (ламели) тэнита в почти чистом железе. При микрозондировании с размером микрозонда, бóльшим размеров ламелей, получается средний состав камасита. Второй нагрев приводит к гомогенизации твердого раствора, частичной или полной, что выражается в уменьшении T_c вплоть до совпадения ее с расчетной и появления зависимости T_c от содержания никеля в камасите.

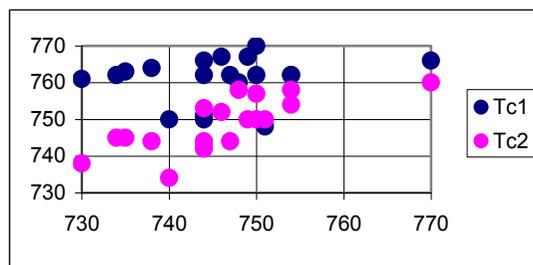


Рис.14. Смещение точек Кюри в сторону расчетных (отложены по оси абсцисс) после нагрева образцов метеоритов до 800°С. T_{c1} – результат первого нагрева до 800°С, T_{c2} – результат второго нагрева.

Остальные обнаруженные в изученных метеоритах минералы, такие как феррошпинели, самородный никель, корунд, добреелит, ильменит, Fe-Al сплав и др. скорее экзотические, а не закономерно присутствующие в метеоритах. Киноварь присутствует в двух видах, во-первых, в виде единичных зерен, например, в метеорите Камберленд Фоллс, среди силикатов, как первичное образование и, во-вторых, в нескольких метеоритах в заметных количествах, как заведомо вторичное образование, покрывающее вторичные гидрокислы железа. Наиболее ярко видна вторичная природа киновари в метеорите Гросслибенталь. В ряде метеоритов присутствует Fe-окисел с примесью серы и никеля вторичного происхождения.

Сравнение магнитных минералов трех главных типов метеоритов. Рассмотрим особенности распределения и состава магнитных минералов по трем главным типам метеоритов в соответствии с принятой классификацией (табл.3).

Таблица 3.

Средние характеристики разных типов метеоритов

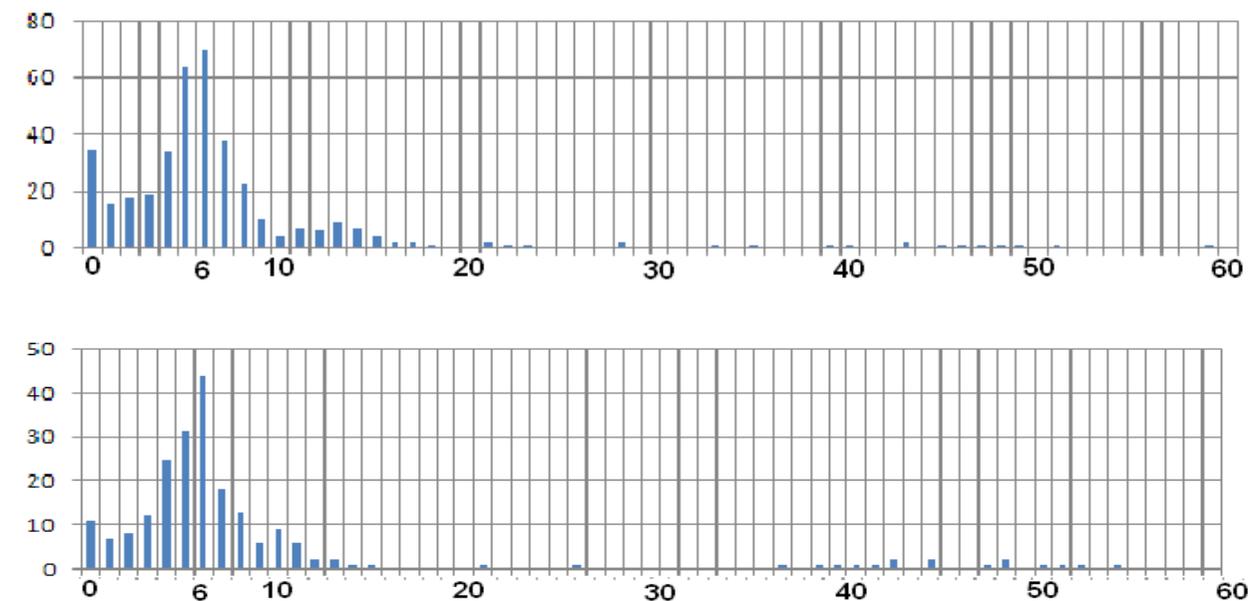
Характеристика	Тип метеорита		
	жел езные	железока менные	каме нные
Доля образцов с камаситом, %	100	100	100
Доля образцов с тэнитом, %	~50	~40	100
Доля образцов с шрейберзитом, %	~50	~70	~10
Среднее содержание камасита, % (разброс)	58 (18-83)	53 (20-82)	5,3 (1-7)
Среднее содержание тэнита, % (разброс)	1,4 (0-10)	2,7 (0-20)	1,5 (1-4)

Среднее 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
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
M_s , Ам ² /кг	124	123	12,5
T_c , °C (вклад в M_s , %)	755 (86)	753 (87)	756 (87)
$T_{\gamma \rightarrow \alpha}$, °C	642	643	640

О концентрации магнитных минералов проще всего судить по величине удельной намагниченности насыщения, однако истинная картина концентрации первичных магнитных минералов существенно искажена вторичным их окислением, приводящим к образованию, главным образом, практически немагнитных (по сравнению с первичными минералами) гидроокислов железа и гематита. Если исключить из рассмотрения сильно окисленные железные метеориты, состоящие почти сплошь из вторичных окислов железа ($M_s < 5$ Ам²/кг), то получается, что концентрация магнитных минералов различается между железными и каменными метеоритами на порядок (табл.3). При этом средние M_s у железных и железокаменных метеоритов очень близки, что очевидно, объясняется тем, что в железных метеоритах заметнее степень окисления.

Посмотрим с чем связана разница средних M_s рассмотренных образцов железных и каменных метеоритов. Камасит присутствует во всех образцах (табл.3), количество тэнита растет от железных к каменным; близкое распределение шрейберзита в железных и железокаменных метеоритах, и он обнаружен только в одном образце каменного метеорита (ахондрит Камберленд Фоллс). Из приведенных

данных видно, что шрейберзит тяготеет к металлической части метеоритов, а тэнит – к каменной. Последнее наглядно демонстрирует рисунок 15, который показывает, что в железных метеоритах Fe-Ni сплав, содержащий более 20%Ni (тэнит) присутствует лишь в виде единичных зерен (рис.15а), близкая картина наблюдается в железокремнистых метеоритах, где несколько возрастает число зерен тэнита, содержащих 40-50%Ni (рис.15b), наконец, в каменных метеоритах, доля тэнита, содержащего 39-52%Ni, с модой 50%Ni существенно возрастает (рис.15c). В каменных метеоритах происходит некоторая перегруппировка никеля между камаситом и тэнитом: если в железных и железокремнистых метеоритах мода в камаситовой части гистограммы 6%Ni, то в каменных метеоритах мода 3%Ni, при этом растет доля тэнита. Отмеченная перегруппировка никеля не сказывается на его среднем содержании в трех типах метеоритов. Отметим, что во всех типах метеоритов присутствует чистое железо в виде отдельной группы (рис.15). Наименее выразительна его мода в железокремнистых метеоритах (рис.15b).



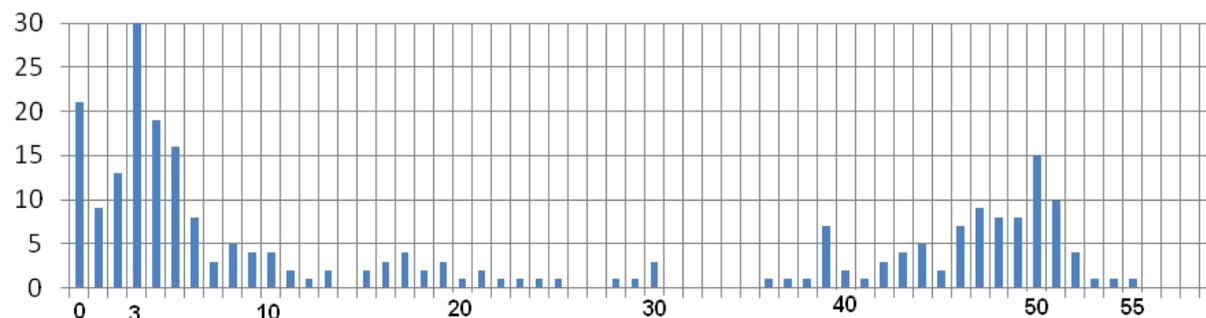


Рис.15. Распределение примеси никеля в Fe-Ni сплаве в метеоритах разного типа, данные МРСА: а – железные метеориты, б – железокаменные и с – каменные метеориты. По оси ординат число определений никеля.

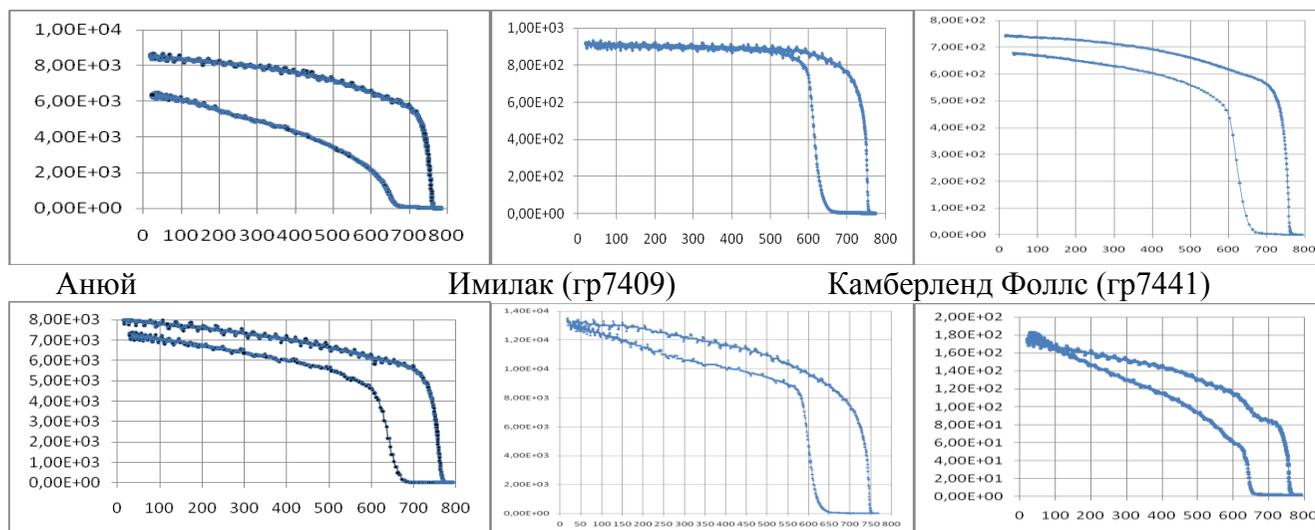
Гистограммы (рис.15) построены исключительно по данным МРСА, они отражают число случаев фиксации зерен того или иного состава, не характеризую их общей концентрации в данном образце. Концентрацию камасита, тэнита и шрейберзита можно оценить по совокупности данных ТМА (см. методику) и МРСА, но лишь приблизительно из-за большой роли вторичного окисления магнитных минералов, наиболее ярко выраженного в железных метеоритах. По этой причине при оценке среднего содержания камасита в железных метеоритах исключены образцы, содержащие менее 5% камасита. Получилось (табл.3), что содержание камасита в железных метеоритах на порядок выше, чем в каменных метеоритах; среднее содержание тэнита в пределах ошибки определения одинаково во всех типах метеоритов. Кажущееся противоречие с рис. 15с объясняется тем, что рис.15 отражает *относительное* распределение камасита. Это видно и по данным ТМА: в железных метеоритах в ~40 раз больше камасита, чем тэнита, тогда как в каменных только в 3,5 раза (табл.3).

Обращает на себя внимание очень близкая картина распределения примеси никеля в Fe-Ni сплавах железных метеоритов (рис.15а) и в осадках (рис.5). Выше мы отмечали сходство содержания никеля в метеоритах (рис.3) и осадках (рис.5). Сравнение рис.15а и 5 показывает связь металлических частиц в осадках, в первую очередь, именно с железными метеоритами.

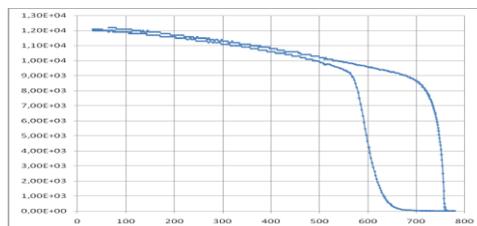
Распределение шрейберзита крайне неравномерно, его содержание в железных метеоритах варьирует от нуля до 90% при этом ТМА обнаружил шрейберзит только в 3 образцах, в железокаменных – от нуля до 44%, ТМА зафиксировал шрейберзит в 2 образцах, в каменных метеоритах ТМА не обнаружил его ни в одном образце, МРСА зерна шрейберзита обнаружены только в одном образце.

Следующая характеристика – средняя концентрация никеля в камасите, тэните и шрейберзите. В разных типах метеоритов оно различается незначительно (табл.3): 5-6% Ni в камасите, 23-27% Ni в шрейберзите и 47-50% Ni в тэните. По содержанию никеля эти три минерала образуют независимо от типа метеоритов закономерную последовательную триаду камасит-шрейберзит-тэнит (рис.10,11).

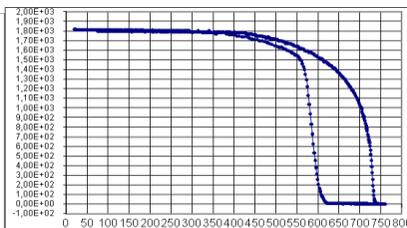
Об однородности магнитных минералов свидетельствует сходный тип кривых M(T) (рис.16): а) среди *всех* типов метеоритов чаще встречаются столообразные и близкие к столообразным кривые нагрева M(T) (признак возможного присутствия тетратэнита), при втором нагреве кривая M(T) приобретает классическую для ферромагнетиков параболическую форму Q-типа; б) точка Кюри главной магнитной фазы на кривой нагрева $T_c = 740-770^\circ\text{C}$, средние значения T_c в трех типах метеоритов различаются всего на $1-3^\circ$ (табл.3), это камасит, и его вклад в намагниченность явно определяющий, доля его в M_s в среднем 86-87%; в) у *всех* изученных образцов на кривой M(T) охлаждения фиксируется температура структурного перехода тэнит→камасит $670-585^\circ\text{C}$, средние значения $T_{\gamma\rightarrow\alpha}$ в трех типах метеоритов различаются, как и T_c , на $1-3^\circ$ (табл.3). Отличными по форме кривыми M(T) обладают метеориты Гросслибенталь и Эгвекинот, где, кроме камасита, заметен вклад тэнита, но сохраняется второй общий признак – структурный переход при охлаждении тэнит→камасит $630-650^\circ\text{C}$ (рис.16), а также образцы, представляющие фракцию шрейберзита (Омолон, OM-1; Красноярск, гр7375 и Сао Жулиао де Мореира, гр7428, рис.17). Описанная картина ТМА существенно нарушается процессами вторичного окисления метеоритов, где почти не сохранились первичные магнитные минералы (Августиновка, Баббс Милл, Биштюбе гр7369, Забродье, Косбис Крик, Санта-Катарина, примеры на рис.18).



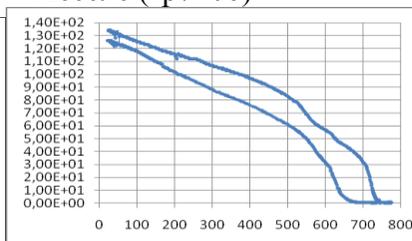
Билибино



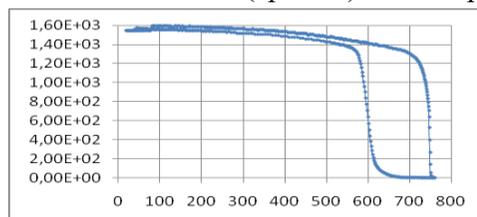
Красноярск (МН29874)



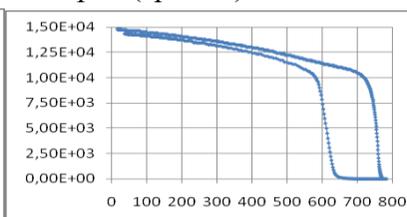
Хессле (гр7406)



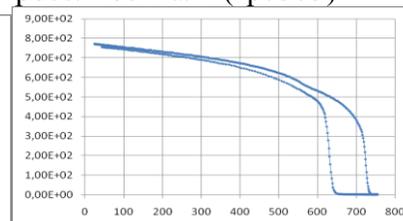
Сихотэ-Алинь (гр7439)



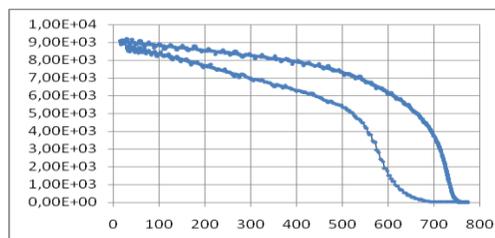
Красноярск (гр7374)



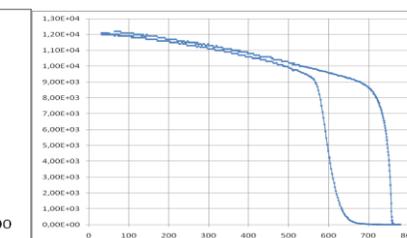
Гросслибенталь (гр7373)



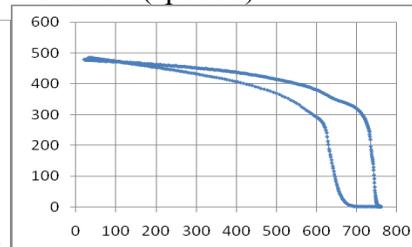
Толука (гр7437)



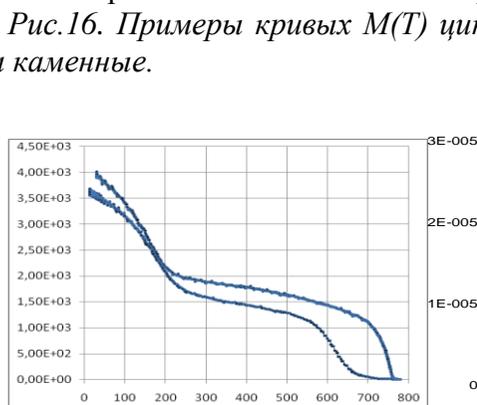
Сеймчан



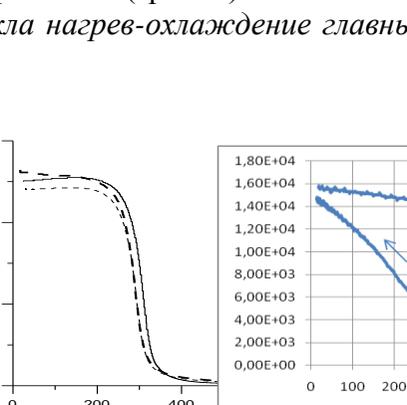
Оханск (гр7387)



Алискерово



Марьялахти (гр6490)



Саратов (гр7383)

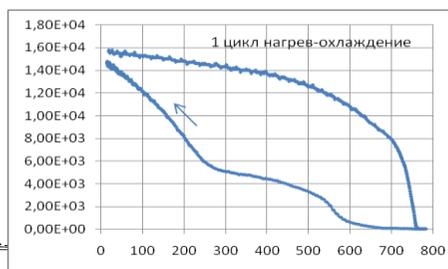


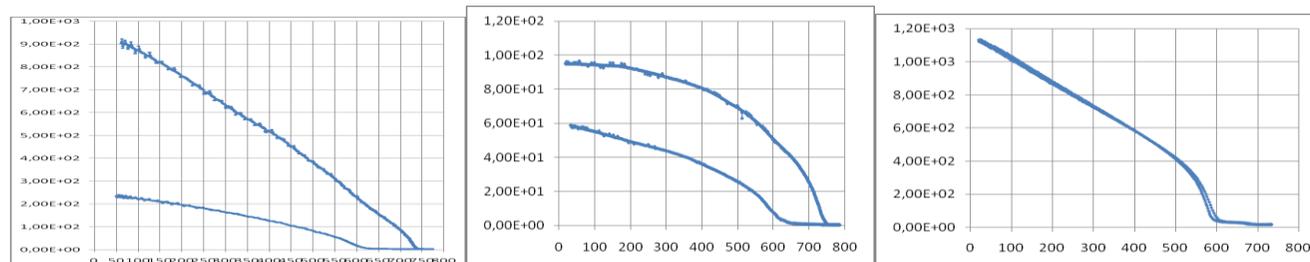
Рис.16. Примеры кривых $M(T)$ цикла нагрев-охлаждение главных типов метеоритов: слева железные, в середине железокремниевые, справа каменные.

Омолон (ОМ-1)

Сао Жулиао де Морейра (гр7428)

ЭгвекиноТ

Рис. 17. Нетипичные для метеоритов кривые $M(T)$: Омолон (ОМ-1) - заметный вклад шрейберзита; Сао Жулиао де Морейра (гр7428) – один шрейберзит; ЭгвекиноТ – высокая доля тэнита по сравнению с другими метеоритами.



Баббс Милл (гр7389)

Забродье (гр7445)

Косбис Крик (гр7430)

Рис.18. Примеры кривых $M(T)$ сильно окисленных образцов: Баббс Милл и Забродье – преобладает вторичный магнетит, который во время нагрева окислился до гематита; Косбис Крик – в образце весь первичный материал окислен, присутствует один вторичный магнетит.

Магнитная жесткость (остаточная коэрцитивная сила H_{cr}), которая отражает структурное состояние магнитных минералов, в частности, деформированность, размер зерен, а также присутствие высококоэрцитивного тетраэнита, закономерно растет, возможно, отражая более заметный вклад тетраэнита (как и тэнита) в каменных метеоритах. При этом значения отношений H_{cr}/H_c и M_{rs}/M_s во всех случаях находятся в пределах многодоменной области (табл.3).

Только в отдельных случаях (метеориты Гросслибенталь, Хессле и ЭгвекиноТ) отмечено на фоне относительно высокой $H_{cr} = 50-80$ Тл ее снижение после нагрева образца до 800°C в 3-5 раз, что говорит о возможном присутствии тетраэнита, переходящего в тэнит. Намечается общая тенденция: с ростом H_{cr} уменьшается ее величина после нагрева образца (H_{cr}) по сравнению с ее исходной величиной (рис.19), видимо, также отражая наличие тетраэнита, который переходит при нагреве в тэнит. Эта зависимость затушевывается окислением магнитных минералов, которое ведет к росту коэрцитивности.

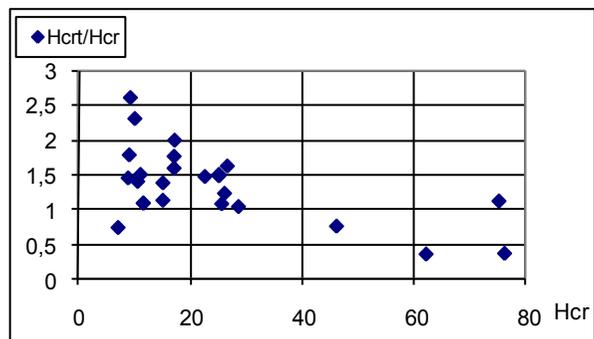


Рис.19. Зависимость H_{cr}/H_{cr} от H_{cr} .

Заключение

Результаты сочетания микрорентгеноспектрального и термомагнитного анализов показывают однообразие состава главных магнитных минералов в метеоритах независимо от их типов. Варьирует лишь концентрация одних и тех же минералов, в среднем на порядок меняясь от каменных метеоритов к железным. Главный магнитный минерал метеоритов – никелистое железо (камасит) с невысокой примесью никеля (мода 6% Ni в железных и железокатенных метеоритах и 3% Ni в каменных метеоритах), шрейберзит и тэнит. По содержанию никеля они образуют закономерную триаду: камасит (0-9%, среднее 5% Ni) - шрейберзит (10-34%, среднее 27% Ni) - тэнит (38-53%, среднее 51% Ni). Можно говорить о некотором принципиальном различии между железными и каменными метеоритами по соотношению камасита, шрейберзита и тэнита. Шрейберзит явно тяготеет к Fe-Ni сплаву: он присутствует в железных и железокатенных метеоритах, и его почти нет в каменных метеоритах. В то же время в железных метеоритах содержание тэнита в ~40 раз меньше, чем камасита, а в каменных метеоритах – только в 3,5 раза меньше, при этом среднее содержание тэнита примерно одинаково во всех типах метеоритов.

У всех типов метеоритов преобладает близкий к столообразному вид кривых $M(T)$ термомагнитного анализа. Отклонения от главных видов кривых $M(T)$ вызваны, в первую очередь, **вторичными** изменениями метеоритов на подходе к Земле, в земной атмосфере и во время пребывания на земной поверхности.

Однообразие магнитных минералов в метеоритах, естественно, определяется однообразием условий формирования их родительских тел.

Сравним эту ситуацию с земной обстановкой (*Печерский и др., 1975; Печерский, Диденко, 1995*). Так, в земных рифтовых и срединно-океанических базальтах, где $T-fO_2$ условия довольно однообразны, магнитные минералы представлены титаномагнетитом, который содержит 12-14% титана. В островодужных вулканитах, где $T-fO_2$ условия широко варьируют, соответственно, широк спектр разнообразных титаномагнетитов, от подобных рифтовым, до близких к магнетиту. Близкая к описанной восстановительная ситуация характерна для лунных и марсианских магматических пород, где образуются высокотитанистые титаномагнетиты, в частности, распространена ульвошпинель, феррошпинели, близкие к хромиту, и в небольших количествах встречается чистое железо (без никеля!), при этом, что самое главное, в них, как правило, отсутствуют Fe-Ni сплавы и шрейберзит. Очевидно, каменные метеориты, содержащие минералы группы магнетита и не содержащие Fe-Ni сплавы и шрейберзит, относятся к коровым.

Совершенно иные условия в мантии. По имеющимся данным непосредственных измерений магнитных свойств образцов горных пород из верхней мантии (мантейные ксенолиты в базальтовых лавах, о, в ней отсутствуют первичные магнитные минералы, т.е. магнитные минералы коры, минералы группы магнетита (Петромагнитная модель..., 1994). Главное в том, что в коре и верхней мантии нет Fe-Ni сплавов и шрейберзита. Следовательно, среди изученных нами метеоритов коровые отсутствуют. Логично предположить, что изученные метеориты – это материал ядра и прилегающих частей мантии планет-источников метеоритов.

Для разреза планет намечается следующая схема: кора – минералы группы титаномагнетита; в мантии магнитные минералы коры отсутствуют, по мере приближения к ядру в мантии появляются Fe-сульфиды, Fe-Ni сплавы и шрейберзит, для образования которых необходимы главные компоненты: железо, никель, фосфор и сера. Судя по распределению шрейберзита и Fe-сульфидов, сера сосредотачивается в мантии, тогда как фосфор тяготеет к ядру. Концентрация магнитных минералов, в первую очередь камасита и шрейберзита, нарастает вплоть до близкого к 100% содержания в ядре.

Трудно представить круг случайно подобранных в нашей коллекции образцов, что они образовались из одного тела, одной планеты, хотя этот вариант очень напрашивается. Наиболее вероятно, что имел место единый сценарий формирования серии однотипных планет, точнее, внутренней части планет – ядра и прилегающих к ядру частей мантии. На Земле, например, объем мантии составляет 86%, объем

ядра 12,6% и объем коры – 1,4% от общего объема Земли. Соотношение «объемов» метеоритов следующее: каменные мантийные 97% (все каменные метеориты, кроме лунных и марсианских метеоритов, т.е. эта цифра максимальная, на самом деле в нее попало какое-то число коровых метеоритов), железные (ядро) – 1,5% и каменные коровые (лунные и марсианские) – 1,4%. Получается, что на долю ядра (железных метеоритов) приходится почти на порядок меньший объем, чем на долю земного ядра. Возможно, объем ядра разрушенных планет (планеты) был на порядок меньше земного. Или, если это серия тел, то у большинства из них, возможно, железного ядра просто не было. Очень малый объем корового материала по сравнению с остальной частью планет объясняет очень редкое присутствие среди метеоритов коровых пород, в частности, среди метеоритов исследуемой коллекции 1,5% от 25 метеоритов (меньше половины одного образца).

В заключение вернемся к распространению металлических частиц в осадках. Как и в метеоритах, в осадках то же самое однообразие - камасит практически единственный космический магнитный минерал в осадках, встречающийся повсеместно и связанный с космической пылью. Учитывая такое сходство, можно заключить, что главный источник камасита в космической пыли – метеориты. Причем, в первую очередь – железные метеориты, о чем свидетельствует аналогия гистограмм примеси никеля в Fe-Ni сплаве из железных метеоритов (рис.15а) и металлических частиц из осадков (рис.5), очень низкая концентрация тэнита в тех и других. В осадках отсутствует широкое распространение и шрейберзита. В космическую пыль если и попадают тэнит и шрейберзит, то их, примерно, на порядок меньше, чем камасита. Концентрация камасита в осадках составляет обычно менее $10^{-4}\%$, соответственно, содержание тэнита и шрейберзита составит менее $10^{-5}\%$, т.е. на пределе чувствительности методов петромагнитных измерений.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 10-05-00117а

Литература

Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Изд. Иностранной литературы, 1956. 784 с.

Гуськова Е.Г. Магнитные свойства метеоритов, М.: Наука. 1972

Нагата Т. Магнетизм горных пород. М.: Мир, 1965. 348с.

Петромагнитная модель литосферы. Ред. И.К.Пашкевич, Д.М.Печерский. Киев: Наукова Думка, 1994. 345с.

Печерский Д.М., Багин В.И., Бродская С.Ю., Шаронова З.В. Магнетизм и условия образования изверженных горных пород. Л.: Наука, 1975. 288с.

Печерский Д.М., Диденко А.Н. Палеоазиатский океан: петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. М.: изд. ОИФЗ РАН, 1995. 296с.

Печерский Д.М., Нурғалиев Д.К., Фомин В.А., Шаронова З.В., Гильманова Д.М. Космическое железо в осадках мела-даниа // Физика Земли. 2011. № 5. С. 379-394

Печерский Д.М., Шаронова З.В. Термомагнитное свидетельство наличия частиц железа в осадках // Физика Земли. 2011. №12.

Фрондел Д.У. Минералогия Луны. М.: Мир, 1978. 334с.

Cassiani G., Kayzre 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.

Gambino R. J., T. R. Mcguire, and Y. Nakamura. Magnetic Properties of the Iron-Group Metal Phosphides // Journal of applied physics. 1967. V. 38. No 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. A.F.Grachev. 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. No 60. P. 3-51.

Meteoritical Bulletin, No84 (2000) – No98 (2010).

A. J. P. Meyer and M. C. Cadevill. 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., J. Danon, and M. Funaki, Magnetic properties of Ni-rich iron meteorites // *Mem. National Inst. Polar Res., Spec. Issue.* 1987.V. 46. P. 263-282.

Nagata T., M. Funaki, and J. Danon, Magnetic properties of tetrataenite-rich iron meteorites // *Mem. National Inst. Polar Res., Spec. Issue.* 1986. V. 41P.364-370.

Pechersky D.M. Metallic iron and nickel in Cretaceous and Cenozoic sediments: the results of thermomagnetic analysis // *Journal Environmental Protection*. 2010. V.1. No 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 extraterrestrial materials // *Elements*. 2009. V. 5. P.223-228.

Terho M., Pesonen L.J., Kukkonen I.T., Bukovanska M. The petophysical classification of meteorites // *Studia Geophysica et Geodaetica*. 1993. V. 37. P.65-82.