На правах рукописи

ТЕПЛЯКОВА Светлана Николаевна

ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ ГРУППЫ IIE С СИЛИКАТНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ НА ПРИМЕРЕ МЕТЕОРИТА ЭЛЬГА

Специальность 25.00.09 – геохимия,
геохимические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), г. Москва.

Научный руководитель: Лоренц Кирилл Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории метеоритики (ГЕОХИ РАН).

Официальные оппоненты: Осадчий Евгений Григорьевич, доктор химических наук, профессор, заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт экспериментальной минералогии Российской академии наук (ИЭМ РАН), г. Черноголовка.

Бритвин Сергей Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры кристаллографии Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург.

Защита состоится « » 2017 г. в « » часов на заседании диссертационного совета Д 002.109.02 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институте геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) по адресу: 119991, Москва, ул. Косыгина 19, факс (495) 938-20-54.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГЕОХИ РАН и на сайте www.geokhi.ru в разделе Диссертации.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу ГЕОХИ РАН ученому секретарю диссертационного совета Д 002.109.002 Н. А. Мигдисовой. Пожалуйста, продублируйте отсканированный вариант отзыва с печатью и подписью по электронной почте dissovetal@geokhi.ru. В отзыве необходимо указать: ФИО лица, предоставившего отзыв, рабочий почтовый адрес, рабочий (контактный) телефон, адрес электронной почты, наименование организации, работником которой является указанное лицо, структурное подразделение и должность в этой организации.

По всем вопросам просим обращаться по телефону: 8 916 601 56 95

Автореферат разослан « » 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук Наталья Александровна Мигдисова

Общая характеристика работы

Актуальность исследований

Разнообразие химических групп железных метеоритов указывает на множественность их родительских тел. Принято считать, что железные метеориты - это фрагменты ядер астероидов, испытавших плавление и магматическую дифференциацию (Mittlefehldt, 1998). При этом генетические связи железных метеоритов и метеоритов других типов не всегда ясны. Часть вещества, фракционированного в недрах малых тел на ранних стадиях их эволюции, была полностью преобразована поздними процессами или необратимо утрачена в ходе аккреции в более крупные тела и потому не представлена метеоритами. Железные метеориты химической группы IIE чрезвычайно интересны для исследования металл-силикатного фракционирования вещества на ранних этапах развития Солнечной системы, а также в процессах, сопровождавших эволюцию астероидов, поскольку некоторые из них содержат силикатные включения примитивного хондритового или фракционированного состава. Исследования железных метеоритов становятся все более актуальными в связи с усовершенствованием точности и локальности методов химического и изотопного состава вещества, и развитием методов геохронологического датирования.

Особенности строения и состава астероидов, поверхность которых характеризуется большим содержанием металла (астероиды M-типа), не известны. Исключение составляют единичные радарные наблюдения, позволяющие предполагать наличие слоя металлических частиц по плотности близкого к лунному реголиту, на поверхности астероида M-типа 216 Клеопатра (Mitchel et al., 1995). Ряд M-астероидов в оптических спектрах отраженного излучения Солнца обнаруживают присутствие линий силикатов и гидратированных силикатов (Ostro et al., 1985; Lupishko and Belskaya, 1989; Feierberg et al., 1983, Jones et al., 1990, Rivkin et al., 1994; Hardersen, 2003; Hardersen et al., 2002). Эти минералы на поверхности железных M-астероидов вероятнее всего представляют собой экзогенный материал, часть которого могла поступать на поверхность M-астероидов в результате высокоскоростных ударных событий. При этом могло происходить образование вещества аналогичного по строению железным метеоритам с силикатными включениями. Таким образом, получение новых данных о свойствах железных метеоритов, которые могут свидетельствовать о процессах преобразования вещества на поверхности их родительских тел, чрезвычайно актуально для интерпретации результатов наблюдений поверхности железных астероидов, как при помощи наземных инструментов, так и с использованием космических аппаратов.

Исследования железных метеоритов становятся все более актуальны в связи с запланированным на 2025 год полетом космического аппарата к самому крупному астероиду

M-типа в главном поясе – астероиду 16 Psyche (Психея). В российских перспективных проектах космических исследований также поставлена задача посещения крупных астероидов главного пояса, в том числе и M-типа, знания о возможных особенностях строения поверхности которых необходимы для планирования состава полезной нагрузки и разработки программ научных экспериментов.

Цель и задачи исследования

Цель работы – определить источник вещества и условия образования силикатных включений в метеоритах группы IIE на примере метеорита Эльга и установить наиболее вероятный механизм образования железных метеоритов группы IIE.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Анализ минерального состава и структуры металла метеоритов группы IIE и силикатных включений в метеорите Эльга.
2. Установление валового химического состава и распределения редких элементов в металле метеоритов группы IIE и силикатных включениях метеорита Эльга.
3. Оценка скорости остывания железных метеоритов группы IIE на этапе кристаллизации и их термальной истории на посткристаллизационной стадии.
4. Моделирование кристаллизации железных метеоритов группы IIE и силикатных включений из H-хондритовых расплавов.

Для решения этих задач был использован комплекс минералого-петрографических и геохимических методов, включающих микроскопические, электронно-зондовые, масс-спектрометрические и радиохимические методы исследования вещества.

Фактический материал

В качестве фактического материала были использованы образцы метеоритов группы IIE из коллекции метеоритов Российской Академии Наук. Наиболее детально был изучен метеорит Эльга, первое исследование которого было выполнено более 50 лет назад.

Всего в ходе выполнения работы было изучено 8 аншлифов метеорита Эльга и 7 аншлифов метеоритов группы IIE: Верхнеднепровск, Тобычан, Miles и Watson, общей площадью 30.47 см^2 и 22 прозрачно-полированных шлифа силикатных включений метеорита Эльга, пять из которых были изготовлены автором работы. В метеорите Эльга автором было обнаружено и впервые исследовано 35 новых силикатных включений.

Основу диссертационной работы составили данные, полученные автором в ходе минералого-петрографических исследований и анализа химического состава вещества метеоритов группы IIE, в числе результатов которых 1300 электронно-зондовых анализов, 100 анализов методом лазерной абляционной масс-спектрометрии индуктивно-связанной плазмы (ЛА-ИСП-МС); 2 анализа методом инструментального нейтронно-активационного

анализа (ИНАА); 3 образца были изучены методом трансмиссионной электронной микроскопии, получено 40 Рамановских спектров.

Научная новизна и практическая значимость работы

Впервые получены актуальные данные о концентрациях 24 редких сидерофильных элементов в металле железных метеоритов группы IIE: Верхнеднепровск, Тобычан, Эльга, Miles и Watson.

Впервые показано, что составы металла метеоритов группы IIE соответствуют продуктам последовательной кристаллизации металла, сегрегированного из полностью расплавленного H-хондритового источника.

Выделены три генерации шрейберзита, форма выделения и состав которых могут служить индикаторами условий образования вмещающего металла метеоритов группы IIE.

На основе структуры и состава минералов в металле метеорита Эльга выполнена оценка скорости охлаждения и определены ключевые события в термальной истории метеорита.

На примере метеорита Эльга первые убедительно показано, что фракционированные силикатные включения в метеоритах группы IIE представляют собой химически однотипные зональные объекты, видимое разнообразие структур которых обусловленно случайностью положения включений относительно плоскости шлифа.

На основе данных о структуре и составе 15 силикатных включений впервые определен валовый состав вещества силикатных включений метеорита Эльга. Впервые продемонстрировано, что по многим параметрам средневзвешенный валовый химический состав силикатных включений наиболее близок к составу остаточного расплава при 75% равновесной кристаллизации или к составу расплава при 25% частичном плавлении H-хондритового источника.

Предложен непротиворечивый сценарий образования группы метеоритов IIE на едином родительском теле, в результате ударного события и смешения металлической и силикатной фракций на эродированной поверхности тела.

Вывод об универсальности состава зональных включений имеет практическую значимость для изучения других метеоритов с силикатными включениями. Выявленная последовательность событий в термальной и метаморфической истории метеорита Эльга дает основу для интерпретации результатов изучения расплавных металл-силикатных агрегатов в метеоритах других типов.

Защищаемые положения

1. Железные метеориты группы IIE являются продуктами последовательной фракционной кристаллизации металлического расплава, сегрегированного из полностью

расплавленного вещества H хондрита. Металл метеорита Эльга соответствует 60% стадии фракционной кристаллизации.

2. Термальная история изученных метеоритов группы IIE включает 3 этапа: 1) быстрая неравновесная кристаллизация металлического и силикатного расплавов при T= 1511-1060°C со скоростью ~ 10-100°C/год; 2) медленное остывание со скоростью порядка 100°C/млн. лет при T= 870-450°C; 3) ударно-индуцированный нагрев и локальное плавление при температуре ≤1500°C с последующей кристаллизацией при T=1250-1350°C со скоростью охлаждения $\sim 7 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^6$ °/c.

3. Силикатные включения метеорита Эльга представляют собой химически однотипные объекты зонального строения. Распределение редкоземельных элементов в силикатных включениях наиболее соответствует H-хондритовому источнику. Валовый средневзвешенный химический состав силикатных включений наиболее близок к составу остаточного расплава при 75% равновесной кристаллизации или к составу расплава при 25% частичном плавлении H-хондритового источника.

4. Железные метеориты IIE наиболее вероятно образовались в результате ударного события на неполностью дифференцированном астероиде H-хондритового состава, при котором произошло повторное плавление фракционированного металла и его смешение с веществом примитивной хондритовой и дифференцированной оболочек с последующим быстрым охлаждением.

Публикации и апробация работы

Результаты работы были представлены в виде устных и стендовых докладов на международных и всероссийских конференциях: на конкурсе молодых ученых ИКИ РАН (2007, 2012), в Москве; на ежегодных конференциях международного метеоритного общества в 2006, 2009 и 2011 г; на 50-м международном микросимпозиуме Вернадский-Браун, Москва, 2009; на международной лунно-планетной конференции в 2009, 2010, 2011, 2012 г; на 10, 13 и 15 международной конференциях «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (г. Москва, 2009, 2012, 2014); на III Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (г. Миасс, 2011); на Всероссийском ежегодном семинаре по экспериментальной минералогии, петрологии, геохимии (2016); на XII Международной конференции "GeoRAMAN-2016" (г. Новосибирск, 2016). По теме диссертации опубликовано научных 22 работы (5 статей и 17 тезисов докладов).

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из одного тома, включает в себя введение, 6 глав, и заключение. Объем работы составляет 150 машинописных страниц, включая 48 иллюстраций

и 15 таблиц. Библиографический список включает 212 наименований.

Во введении показана актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель, новизна и практическая значимость работы. В первой главе (литературный обзор) изложены принципы структурной и химической классификаций железных метеоритов, представлены современные взгляды на механизм формирования структур распада твердого раствора в металле, описаны типы встречающихся силикатных включений в железных метеоритах, а также их геохимические, изотопные и геохронологические характеристики. Глава 2 содержит описание использованных методов. Глава 3 посвящена распределению редких сидерофильных элементов в метеоритах группы IIE. В главе 4 приведены результаты исследований структуры металла железных метеоритов группы IIE и определены физико-химические условия их образования. В главе 5 представлены результаты минералого-петрографического и геохимического исследования силикатных включений метеорита Эльга. В главе 6 представлен сценарий образования метеоритов группы IIE. Заключение содержит основные выводы работы.

Благодарности

С глубокой благодарностью автор вспоминает своих учителей академика РАН Н. П. Юшкина и к.г.-м.н. Г. Н. Лысюк. Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю к.г.-м.н., К. А. Лоренцу, а также безвременно ушедшему из жизни научному руководителю д.г.-м.н., М. А. Назарову, который был идейным вдохновителем исследований метеорита Эльга, положенных в основу настоящей диссертации. Автор благодарит сотрудников лаборатории метеоритики ГЕОХИ РАН за множество полезных дискуссий, организацию аналитических исследований и помощь в работе с образцами метеоритов – д.г.-м.н. Н. Р. Хисину, к.г.-м.н. М. А. Иванову и А. Я. Скрипник. Чрезвычайно интересным оказался образец метеорита Эльга, любезно предоставленный на изучение д.г.-м.н. С. Н. Бритвиным (СПбГУ). Особенно ценны были консультации и советы к.г-м.н. О. И. Яковлева, д.г.-м.н., профессора А. Т. Базилевского, д.г.-м.н., профессора А. А. Арискина. Работа во многом состоялась благодаря член-корр. РАН, д.г.-м.н. Ю. А. Костицину и сотрудникам лаборатории геохимии изотопов к.х.н. М. О. Аносовой, лаборатории методов исследования и анализа вещества и материалов к.ф-м.н. Н. Н. Кононковой, д.г-м.н. И. А. Рощиной, А. Л. Лоренцу, Д. Ю. Сапожникову. Автор глубоко признателен сотрудникам института Кристаллографии им. А. В. Шубникова и Института атомной энергии им. И. В. Курчатова – Васильеву А. В. и Артемову В. В. за бескорыстно предоставленную возможность проведения исследований состава и кристаллических структур минералов. Автор выражает глубочайшую благодарность доктору, профессору Муниру Хумаюну

(Университет Флориды, США) за плодотворную совместную работу по анализу содержаний редких элементов в железных метеоритах.

Введение

Во введении раскрывается предмет и цель работы, а также показана актуальность исследований железных метеоритов группы IIE на современном этапе изучения процессов эволюции малых тел на ранних стадиях формирования Солнечной системы.

Глава 1. Железные метеориты – состав, классификация и происхождение (литературный обзор)

Главными минералами железных метеоритов являются камасит (объемно-центрированная кубическая решетка или α-(Fe, Ni), 5-7% Ni), тэнит (гранецентрированная решетка или γ-(Fe, Ni), 7-30% Ni). Акцессорные минералы представлены шрейберзитом $(Fe,Ni)_3P$, когенитом (Fe_3C) и троилитом ($Fe_{1-x}S$). Редкие кислородсодержащие фазы представлены хромитом ($FeCr_2O_3$), фосфатами и силикатами (Buchwald, 1975; Mittlefehldt et al., 1998).

В зависимости от структуры, тесно связанной с валовым содержанием Ni, железные метеориты разделены на гексаэдриты, октаэдриты и атакситы. Химическая классификация железных метеоритов включает 13 химических групп, четко выделяющихся по содержанию в них Ni, Ga, Ge и Ir, три из которых (IAB, IIE, IVAB) содержат силикатные включения. Силикатные включения в метеоритах группы IIE разнообразны по минералогии, текстуре, химическому составу и имеют как хондритовый (примитивный), так и нехондритовый (фракционированный) состав: 1) хондритовые; 2) грубозернистые (0.4-11см) (Wasserburg et al., 1968; Ruzicka et al., 1999); 3) «габброидные» плагиоклаз+пироксен (Prinz et al., 1983; Ikeda et al., 1997; Ebihara et al., 1997; Ruzicka et al., 1999); 4) неполнокристаллические (пироксен+стекло или стекло+фосфат), 5) включения стекла (Osadchii et al., 1981; Prinz et al., 1983; Ikeda et al., 1997; Ebihara et al., 1997; Ruzicka et al., 1999; Hsu, 2003, 2004; Kurat et al., 2007). Ранее отмечалось (Ruzicka et al., 2006; Takeda et al., 2003a; Kurat et al., 2007), что в ряде силикатных включений имело место химическое неравновесие между высококремнистым стеклом основной массы и микролитами магнезиального пироксена и фосфатов. В качестве признака химического неравновесия указывалось распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) между микролитами пироксена и фосфата (10-100 × CI) и вмещающим стеклом (0.01-1 × CI) (Bunch et al. 1970; Ruzicka et al. 1999, 2006; Hsu, 2003; Takeda et al., 2003; Kurat et al., 2007). В предшествующих работах (Takeda et al., 2003; Hsu, 2003; Ruzicka et al., 2006; Kurat et

al., 2007) в составе силикатных включений в метеоритах группы IIE отмечались нерегулярные положительные и отрицательные Yb аномалии, происхождение которых оставалось неясным. Генетическая связь силикатных включений с H-хондритами была предположена на основании сходства изотопного состава кислорода (Clayton et al., 1983; Rubin et al., 1986).

Железные метеориты IIE имеют похожий химический состав металла, независимо от содержащихся в них силикатных включений и их состава. В металле наряду с положительной корреляцией Au и As, характерной для магматических метеоритов (Scott and Wasson, 1976; Wasson and Wang, 1986; Wasson, 2017), были обнаружены нечеткие корреляции для некоторых пар совместимый-несовместимый элемент: Ga-Au, Ir-Au (Wasson, 2017). Для метеоритов группы IIE также характерны незначительные вариации содержания Ir в металле (1.12-7.95 мкг/г, Wasson, 2017) по сравнению с метеоритами магматических групп, в которых концентрации Ir различаются в 6000 раз в пределах группы. Кроме того, в металле метеоритов группы IIE обнаружены вариации изотопного состава Ge, которые объясняются испарением с потерей легких изотопов (Luais, 2007) на поверхности тела, вероятно, вследствие ударного события. Исследователи метеоритов группы IIE пришли к заключению о том, что металл был образован «немагматическим» путем, то есть кристаллизовался не в ядрах астероидов при фракционной кристаллизации расплава, а на поверхности в виде небольших металлических бассейнов расплава при ударном событии (Scott and Wasson, 1976; Wasson and Wang, 1986; Ebihara et al., 1997; Wasson, 2017). В пользу такой интерпретации свидетельствует мелкозернистая структура металла метеоритов группы IIE, в которых размер кристаллов γ-железа (от 1-11 см) невелик по сравнению с кристаллами в метеоритах IIIAB (до 2 м) (Wasson, 2017).

Глава 2. Методы исследования

Предварительное исследование образцов железных метеоритов группы IIE было проведено методом оптической микроскопии на микроскопе Leica DRMX, в лаборатории метеоритики (ГЕОХИ РАН). Химический состав фаз определялся методом электронно-зондового микроанализа на приборе Cameca SX 100 (ГЕОХИ РАН). Для определения концентраций сидерофильных элементов в металле использовался метод лазерно-абляционной масс-спектрометрии индуктивно-связанной плазмы (ЛА-ИСП-МС) в лаборатории National High Magnetic Field, Florida State University (NHMFL, FSU, USA). Концентрации редких и редкоземельных элементов в минеральных фазах силикатных включений определялись методом ЛА-ИСП-МС (лазер NewWave UP-213) на масс-спектрометре высокого разрешения ThermoElement-XR (ГЕОХИ РАН). Содержания редких

элементов для включения 2315-6F были определены в 20 мг навеске методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА, ГЕОХИ РАН). Электронно-микроскопическое исследование сидерит-шрейберзитовой ассоциации выполнено в Геологическом центре Потсдама Германии (GeoForschungsZentrum Potsdam) и Курчатовском исследовательском центре в Москве с использованием просвечивающих электронных микроскопов Tecnai G$_2$30ST и Titan 80-300. Рамановская спектроскопия минералов силикатных включений была выполнена на приборе Senterra Dispersive Raman Microscope (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany) в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН).

Глава 3. Геохимия сидерофильных элементов в металле метеоритов IIE

По результатам исследования состава металла пяти метеоритов группы IIE: Верхнеднепровск, Тобычан, Эльга, Miles и Watson методом ЛА-ИСП-МС была обнаружена слабо выраженная корреляция Ga-Au и еще менее выраженная корреляция Ir-Au, что не согласуется с «магматическими» кристаллизационными трендами. В тоже время, для изученных метеоритов группы IIE характерна положительная корреляция Au и As ($R^2 \sim 1$) также, как и для других метеоритов этой группы. Впервые полученные данные по концентрации Os методом ЛА-ИСП-МС и соотношения Re, Os, Ir в метеоритах группы IIE указывают на фракционирование, подобное наблюдаемому в магматических группах метеоритов. В изученных метеоритах отношение Os/Ir >1, что, вероятно, является следствием последовательной кристаллизации твердого металла в процессе фракционирования расплава. Поскольку оба элемента совместимы с твердой фазой, но Os предпочтительнее распределяется в твердый металл ($D_{Os} > D_{Ir}$, где D - коэффициент распределения элемента кристалл/жидкость), то положительный линейный тренд для отношения Os/Ir имеет меньший угол наклона по сравнению с этим трендом в хондритах, где отношение Os/Ir составляет ~ 1 (Campbell et al., 2002; Anders and Grevesse, 1989). Разделение Os и Ir в метеоритном металле связано исключительно с фракционированием в магматическом процессе, так как фракционирование Os от других элементов платиновой группы не характерно при конденсации вещества в протопланетном диске.

Изотопный состав кислорода силикатных включений метеоритов группы IIE указывает на генетическое сродство с H хондритами (Clayton and Mayeda, 1996). Металл метеоритов IIE по изотопному составу Cu и Mo близок к H-хондритам (Burkhardt et al., 2011; Bishop et al., 2012; McDermott et al., 2016). Однако, связь метеоритов группы IIE и H-хондритов подвергалась сомнению в следствие различия трендов Ga-Au и Ir-Au для IIE и H-хондритового металла (Wasson and Wang, 1986; Wasson and Scott, 2011). Силикаты в

метеоритах IIE более магнезиальны по сравнению с H-хондритами, а состав металла метеоритов группы IIE отличается от состава металла в H-хондритах по ряду элементов. На основании этих фактов Вассон (Wasson, 2017) предположил, что металл метеоритов группы IIE был сформирован на сходном с H-хондритовым, но более восстановленном и богатом металлом астероиде HH-типа, который может продолжает ряд известных химических групп хондритов LL-L-H.

Полученные автором данные о концентрациях сидерофильных элементов в метеоритах IIE (рис. 1) показывают, что все изученные метеориты (кроме метеорита Miles) обогащены тугоплавкими элементами по сравнению с металлом H-хондритов (Kong and Ebihara, 1997). Металл метеоритов группы IIE близок к составу металла H-хондритов по элементам, коэффициент распределения которых между металлом и жидкостью ~ 1, такими как Ni, Co, Ge и Ga, а также Pd, Au, As. Таким образом, по химическому составу металл H-хондритов является наиболее вероятным источником металла метеоритов группы IIE, что в комплексе с изотопными индикаторами указывают на генетическую связь металла метеоритов IIE с H-хондритами. В связи с этим, в настоящей работе рассмотрена модель образования метеоритов группы IIE при магматическом фракционировании металлических расплавов в родительском теле H-хондритового состава. Для проверки этой гипотезы была построена модель фракционной кристаллизации металлической выплавки из полностью расплавленного H-хондритового источника. Модель подразумевает, что при полном плавлении H-хондритового вещества, в металл-сульфидный расплав распределяются все главные и редкие сидерофильные и халькофильные элементы. Валовые составы восстановленной металлической выплавки из H хондрита были скомпилированы из средних составов хондритов (Wasson and Kallemeyn, 1988; Jarosewich, 1990; Fischer-Gödde et al., 2010).

Принципы моделирования были заимствованы из работ (Jones and Malvin, 1990; Chabot and Jones (2003). В процессе фракционной кристаллизации металлического расплава несовместимые элементы S, C и P постепенно накапливаются в остаточной жидкости, за счет чего происходит последовательное изменение D сидерофильных элементов между твердыми фазами и металлической жидкостью (Willis and Goldstein, 1982; Jones and Drake, 1983). При кристаллизации расплава с неметаллическим компонентом, например, в системе Fe-Ni-S(P, C), D сидерофильных элементов не постоянно и уравнение Рэлея, описывающее фракционную кристаллизацию, не может быть использовано для описания поведения системы. Поэтому, модель фракционной кристаллизации метеоритов IIE была построена на основе уравнения равновесной кристаллизации, с использованием метода локальных равновесий, иначе называемого методом последовательных конечных приращений. Суть

метода в разбиении процесса равновесной кристаллизации на конечное число стадий (ступеней температуры), для каждой из которых экспериментально устанавливаются зависимости D сидерофильных элементов-примесей от текущего содержания S, основной неметаллической примеси (-сей) в расплаве.

Результаты моделирования показывают, что от первого этапа к последнему наблюдается последовательное обеднение кристаллизующегося металла тугоплавкими сидерофильными элементами и соответственно обогащение остаточной жидкости несовместимыми элементами (рис. 1). Результаты моделирования хорошо совпадают с распределением сидерофильных элементов в метеоритах группы IIE. Составы метеоритов Верхнеднепровск, Тобычан, Watson и Эльга сопоставимы с составами твердой фазы, кристаллизующейся при ~30, ~30, ~40 и ~60% стадии фракционной кристаллизации исходной металлической жидкости.

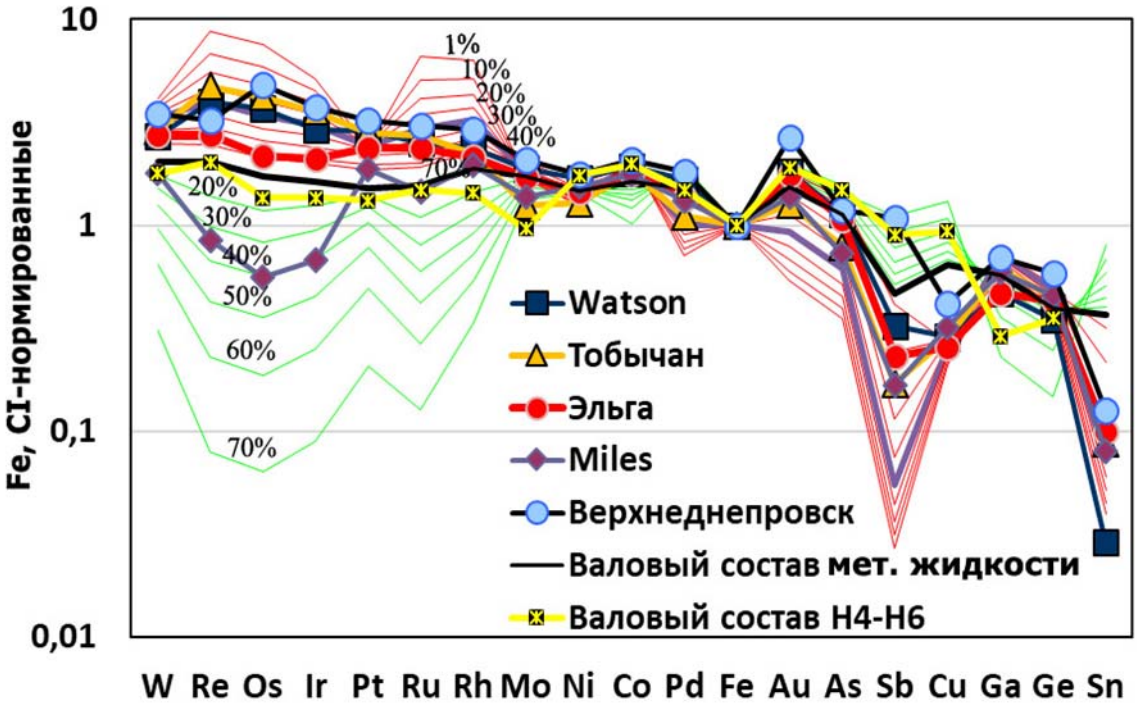


Рис. 1. Модельные составы жидкого (зеленый) и твердого металла (красный), формирующиеся при кристаллизации H-хондритовой модельной металлической жидкости (черный) по сравнению с метеоритами группы IIE и валовым составом металла равновесных H4-6 хондритов; % - степень фракционной кристаллизации.

Состав металла метеорита Miles аномален по сравнению со всеми изученными метеоритами группы IIE, т.к. сильно обеднен как тугоплавкими совместимыми с твердой фазой элементами Re, Os, Ir, Pt, Ru, что характерно для остаточных жидкостей, так и несовместимыми элементами Pd, Au, As, Sb, Cu, и Sn, что является свойством твердой фазы при фракционной кристаллизации. Однако, по ряду геохимических признаков метеорит

Miles следует рассматривать, как твердую фракцию, образованную, в результате 70% стадии кристаллизации исходного расплава.

Глава 4. Структура и минеральный состав металла метеоритов группы IIE

Для многих метеоритов характерна октаэдритовая или реликтовая октаэдритовая структуры. Некоторые метеориты группы IIE имеют поликристаллическое мелкозернистое строение с размерами зерен до нескольких см. В изученных автором метеоритах группы IIE было выделено 3 типа структур, соответствующих разным этапам истории метеоритов 1) первичные, формирующиеся при кристаллизации из расплава; 2) вторичные - результат субсолидусных превращений в металле; 3) ударно-метаморфические.

Первичная магматическая структура метеоритов группы IIE выражена в поликристаллическом строении металла. От исходных родительских кристаллов тэнита (γ-железа) в металле сохранились реликтовые полигональные участки. Размер родительских кристаллов γ-железа варьирует от 1 до 6 см. На границах кристаллов тэнита располагаются округлые или амебовидные силикатные включения, троилитовые нодули и крупные ксеноморфные выделения шрейберзита, образующие также прерывистые каймы на контактах силикатных и троилитовых включений и вмещающего металла. Этот шрейберзит отличается наименьшим содержанием Ni – 16.7 ат. % по сравнению с шрейберзитом, образующимся при распаде твердого раствора. Шрейберзитовые каймы вокруг неметаллических включений и выделения ксеноморфного шрейберзита оторочены ленточным камаситом.

Метеориты группы IIE имеют похожие структуры металла, которые указывают на единый механизм их формирования. Небольшой размер реликтов зерен γ-железа указывает на существенно более высокую скорость кристаллизации металла метеоритов группы IIE по сравнению с железными метеоритами магматических групп (Wasson, 2017). Морфология силикатных включений и их взаимоотношения с зернами тэнита свидетельствуют о том, что исходно они представляли собой ликвирующие частицы силикатного расплава. При кристаллизации глобулярные обособления несмесимых силикатной, сульфидной и фосфидной жидкостей концентрировались в пространстве между гранями растущих кристаллов тэнита. Отдельные порции несмесимых расплавов были сдавлены растущими кристаллами тэнита настолько, что сформировали линейные или дугообразные прожилковидные тела, некоторые из которых соединяют силикатные включения.

Кристаллизация металлического расплава, по составу отвечающего металлу метеорита Эльга в системе Fe-Ni-P, начинается с ~1511°C (Raghavan, 1988), при этом кристаллизуется γ-фаза, которая должна содержать ~0.2 мас. % P из расплава (Narayan and

Goldstein, 1981). Кристаллизация расплава завершается 1000°C с образованием тэнита и шрейберзита. При температуре 1060-1100°C (Doan and Goldstein, 1970) составы γ-фазы близки к составу октаэдритовых и гранулярных участков металла родительских кристаллов тэнита (исходная γ-фаза), а остаточной жидкости (10.7 мас. % Ni, 12.7 мас. % P) – к составу ксеноморфного железистого шрейберзита в метеорите Эльга, что, вероятно, указывает на закалку при данной температуре. При температурах ниже 1060°C в равновесии находятся фазы такого состава, которые не наблюдаются в метеорите Эльга.

Ранее Кларк и Голдштейн предполагали субсолидусное образование ксеноморфного шрейберзита в металле при температуре выше 850°C. В работах (Ikeda and Prinz, 1996, 1997; Ruzicka, 1999; Ruzicka and Hutson, 2010) предполагается, что каймы шрейберзита на силикатных включениях образуются при восстановлении фосфора из силикатов. Однако, основная масса ксеноморфного шрейберзита структурно не связана с силикатными включениями, а его морфология и состав не соответствуют тем, которые возникают при субсолидусных реакциях. Вероятнее всего, ксеноморфный шрейберзит кристаллизовалась непосредственно из металлического расплава, как было предположено (Buchwald, 1975; Hofmann et al., 2009).

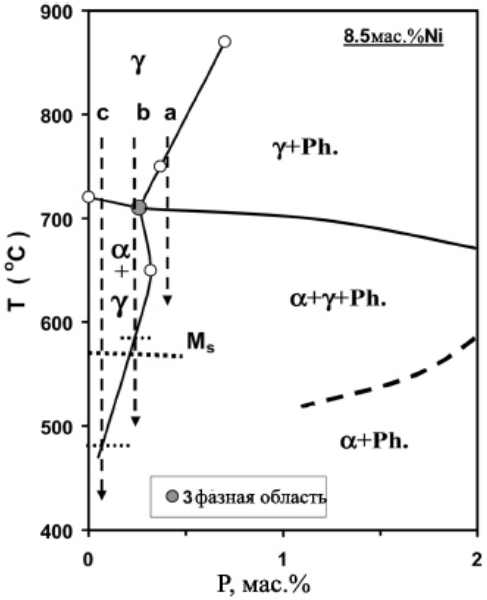


Рис. 2. Фазовая диаграмма состояния Fe-Ni-P с постоянным содержанием Ni (8.5 мас.%). Ms – начало мартенситного превращения. Вертикальные пунктирные линии a, b, c представляют сплавы с различным содержанием P. Сплавы a, b, c образуют структуры по механизмам II, III, V соответственно; образование видманштеттеновой структуры (белые кружки – экспериментальные данные из работы Doan and Goldstein, 1970).

Вторичные структуры распада в металле метеоритов группы IIE. Для изученных метеоритов группы IIE характерны вторичные структуры распада твердого раствора (видманштеттеновы структуры), образованные в родительских кристаллах тэнита. Все изученные метеориты группы IIE относятся, в основном, к классу тонкоструктурных октаэдритов, или имеют реликтовую тонкозернистую октаэдритовую структуру.

После кристаллизации металла метеорита Эльга вещество метеорита должно было находиться в условиях, при которых могло происходить медленное остывание в интервале температур 870 – 450°C, необходимое для формирования октаэдритовой структуры металла.

Исходя из средних содержаний Ni-8.48 мас. % и P-0.86 в металле октаэдритовых участков металла метеорита Эльги, можно предполагать, что видманштеттенова структура могла сформироваться по механизму II, описанному в работе (Yang, 2006): $\gamma \rightarrow \gamma + Ph \rightarrow \alpha + \gamma + Ph$, где γ - тэнит, α - камасит, Ph – фосфид.

Образование фосфида происходит при температуре ниже 870°C. По химическому составу эта генерация шрейберзита более никелистая (27 ат. % Ni), чем ксеноморфный железистый шрейберзит, формирующийся из расплава. Рост кристаллов камасита начинается при температуре 700°C из исходной фазы – тэнита (рис. 2).

На границах зерен шрейберзит-камасит и камасит-тэнит наблюдается узкая область с пониженным содержанием Ni в камасите и повышенным содержанием Ni в тэните (и/или шрейберзите), известная, как эффект Агрелла, возникающий при температурах ниже 450°C (Wood., 1964; Powell B., 1969).

Поскольку в металле метеорита Эльга отсутствуют М-образные профили концентрации Ni в тэните, а вместо них присутствуют Λ-профили, для металла характерен эффект «столкновения» балок камасита и минимальная ширина тэнитовых лент (обычно менее 20 мкм), что делает невозможным использование методов Вуда и Голдштейна. Поэтому скорость охлаждения для металла была определена по 2 методикам: методу, разработанному для мезосидеритов, и соответствует 100°C на млн. лет в интервале температур 870 – 450°C. Отсутствие облачного тэнита может указывать на то, что охлаждение металла ниже 450°C было быстрым.

Ударно-метаморфические структуры метеоритов группы IIE. В зависимости от величины ударного давления (табл. 1) в железных метеоритах возникают различные ударно-метаморфические структуры: пластические и хрупкие деформации, механическое двойникование в камасите, перекристаллизация и грануляция видманштеттеновой структуры, а также области локального плавления (ОЛП).

Деформации и двойникование возникают при температурах не выше 600°C (Uhlig, 1955). Перекристаллизация видманштеттеновой структуры происходит при нагреве ~750-800°C, и сопровождается образованием гранулярной структуры камасита и ореолов мартенсита вокруг областей локального плавления с изменением химического состава и структуры шрейберзита (табл. 1).

В результате локального нагрева выше температуры плавления, в железных метеоритах возникают области локального плавления (Wood, 1967; Scott, 1982; Bennet, 1996). В результате неравновесной кристаллизации Fe-Ni-S-P расплавов переменного состава в ОЛП формируются дендритные или ячеистые структуры (Flemings, 1967) в

интерстициальное пространство дендритов тэнита выполняется микрозернистыми P, S-содержащими фазами (Chabot et al., 2000).

По минералогическому составу ОЛП в метеорите Эльга выделено четыре типа минеральных ассоциаций: камасит-троилитовые (Kam-Tr), камасит-шрейберзитовые (Kam-Sch), камасит-троилит-шрейберзитовые (Kam-Tr-Sch) и сидерит-шрейберзитовые (Sid-Sch).

Камасит-троилитовые ОЛП представляют собой участки микрозернистых ячеистых структур – “Fizzed troilite” (табл. 1). Вуд предположил (Wood, 1967), что такая структура является следствием плавления при температуре выше 988°C.

Камасит-шрейберзитовые и камасит-троилит-шрейберзитовые области локального плавления в метеоритах Эльга и Watson (табл. 1) контактируют с шрейберзитом и/или троилитом и часто окружены микрокристаллическим ореолом перекристаллизованного металла (мартенсита). Некоторые ОЛП достигают размеров нескольких сотен микрон, но при этом не охватывают кристаллический агрегат исходных фаз полностью, что наиболее ярко иллюстрирует узколокальный характер плавления, который наиболее вероятен при ударных процессах (Smith, 1977).

Kam-Sch и Kam-Tr-Sch образования в метеоритах Эльга и Watson, а также Верхнеднепровск состоят из микрокристаллических выделений камасита, объединяющихся в дендритовидные структуры, погруженные в шрейберзитовую или шрейберзит-троилитовую матрицу. В соответствии с фазовой диаграммой Fe-P (Raghavan, 1988) ОЛП Kam-Sch образований в изученных метеоритах образуются при температуре около 1450°C (Эльга) - 1500°C (Watson и Верхнеднепровск) (рис. 3а). Кристаллизация ОЛП с образованием

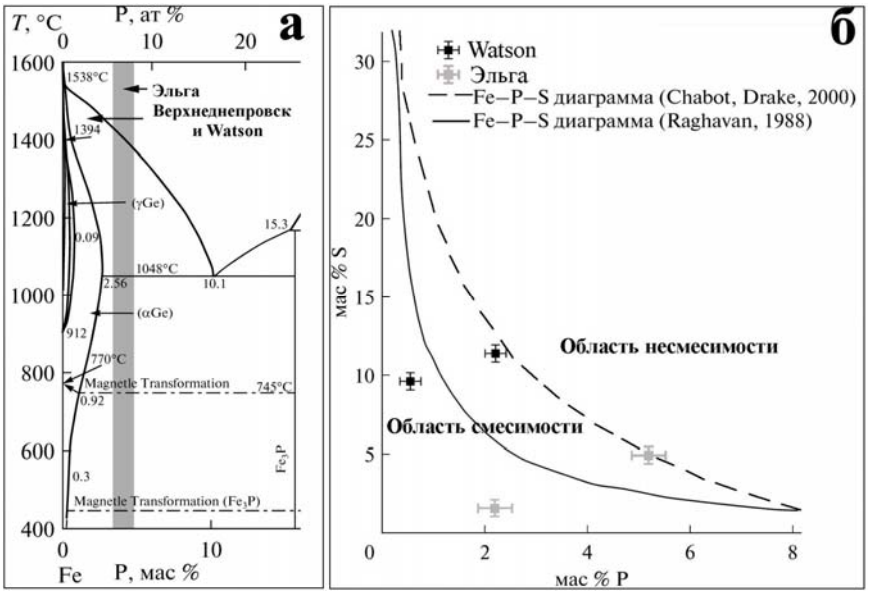
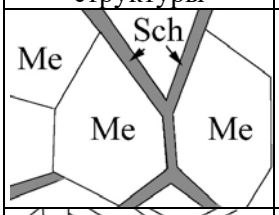
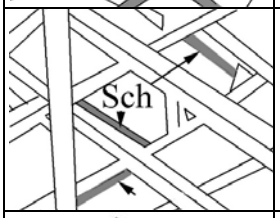
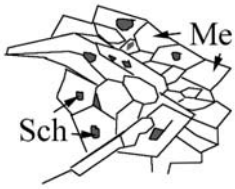
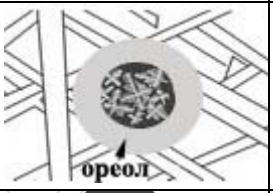
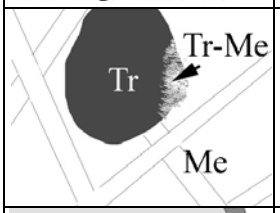
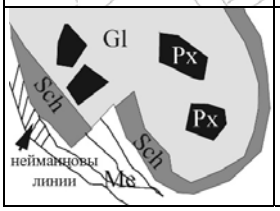


Рис. 3. а) Положение составов Kam-Sch агрегатов ОЛП на фазовой диаграмме Fe-P (Raghavan, 1988); б) Положение составов Kam-Tr-Sch агрегатов из ОЛП на диаграмме Fe-P-S. Пунктирная линия отделяет область смесимости от области сосуществования несмешиваемых жидкостей по данным (Chabot, 2000) при 1250°C IW, 1250°C QFI, 1350°C IW; черная линия по данным (Raghavan, 1988).

микродендритных структур тэнита в шрейберзитовой матрице происходила с высокой скоростью охлаждения порядка $7 \cdot 10^4$-$4 \cdot 10^6$°С·сек$^{-1}$ (Scott, 1982) и завершилась при температуре 1000°С (Doan and Goldstein, 1970).

Таблица 1. Этапы образования различных структур в метеорите Эльга

Изображение структуры	Структура	Морфология шрейберзита	Состав шрейберзита	Структурный тип	Параметры образования
	Полигональная	Ксеноморфный, размер до 1 см	$Fe_{2.40}Ni_{0.60}P$ Ni -16.7 ат.%	Магматический	1510-1060°С
	Видманштеттенова	Ламели, размер до 50х500 мкм	$Fe_{1.9}Ni_{1.1}P_{0.9}$ Ni - 27.6 ат.%	Субсолидусный	870-450°С V-скорость, охлаждения V=100°С/млн. лет
	Гранулярная	Изометричный, размер 250 мкм-1.5 мм	$Fe_{1.7}Ni_{1.4}P_{0.9}$ Ni -34.4 ат.%	Ударно-метаморфический	> 700°С
	Дендритная; ОЛП Kam-Sch, Kam-Tr-Sch	В интерстициях дендритов, размер~1-2 мкм	$Fe_{2.6}Ni_{0.5}P_{0.9}$ Ni -12.5 ат.%	Ударно-метаморфический	Kam-Sch, Kam-Tr-Sch, 1250-1500°С V~$7 \cdot 10^4$-$4 \cdot 10^6$°С/сек
	Ячеистая ОЛП Kam-Tr			Ударно-метаморфический	~900°С P=10-20 гПа.
	Механическая деформационная			Ударно-метаморфический	< 600°С

Kam-Tr-Sch ОЛП, составы которых располагаются в области смесимости системы Fe-S-P (Raghavan, 1988; Chabot et al., 2000) кристаллизовались при температуре 1250-1350°С (рис. 3б) с образованием дендритов тэнита в шрейберзит-троилитовой матрице.

Метеорит Эльга содержит ОЛП не только на границе металла и включений ксеноморфного шрейберзита и/ или троилитовых нодулей, но и на контактах металла и

силикатных включений (Osadchii et al., 1981; Теплякова и др., 2012), в отличии от других метеоритов группы IIE.

В метеорите Эльга только в 3 из 10 силикатных включений, содержащих ОЛП, обнаружены объекты дендритной структуры, в составе которых присутствуют кислородсодержащие фазы. В одной из ОЛП была обнаружена необычная минеральная Sid-Sch ассоциация, локализующаяся на участке ОЛП, внутри силикатного включения (Теплякова и др., 2012). Этот агрегат состоит из микродендритов сидерита в шрейберзитовой матрице, окружен гало силикатного расплава, насыщенного микронными глобулами шрейберзита. Присутствие сидерита в этих областях было независимо подтверждено методами TEM, EELS, рамановской спектроскопии. Морфологически Sid-Sch дендриты имеют сходство с Kam-Sch ОЛП. Шрейберзит в Sid-Sch ОЛП отличается минимальным содержанием Ni по сравнению с шрейберзитом других генераций. В качестве возможных механизмов образования Sid-Sch ОЛП в метеорите Эльга были предложены 2 сценария. Согласно одному из них, сидерит может образоваться в результате преобразования метеорита в земных условиях. Согласно другому сценарию Sid-Sch агрегаты формируются из расплава непосредственно при образовании области локального плавления. Однако, на данном этапе исследования ни один из вышеописанных сценариев не может удовлетворительно объяснить все структурно-минералогические особенности Sid-Sch ОЛП.

Глава 5. Минералогия и геохимия силикатных включений в железном метеорите Эльга

Главные фазы силикатных включений - это высококальциевый пироксен и стекло; низкокальциевый пироксен и фосфат – второстепенные минералы. Акцессорными минералами являются фаза кремнезема, хромит, ильменит, троилит, пентландит и филлосиликато-подобный минерал. Отмеченные ранее оливин и плагиоклаз (Кваша и др., 1974; Пляшкевич, 1962; Osadchii et al., 1981) в изученных силикатных включениях не обнаружены.

Выделено 5 типов текстур

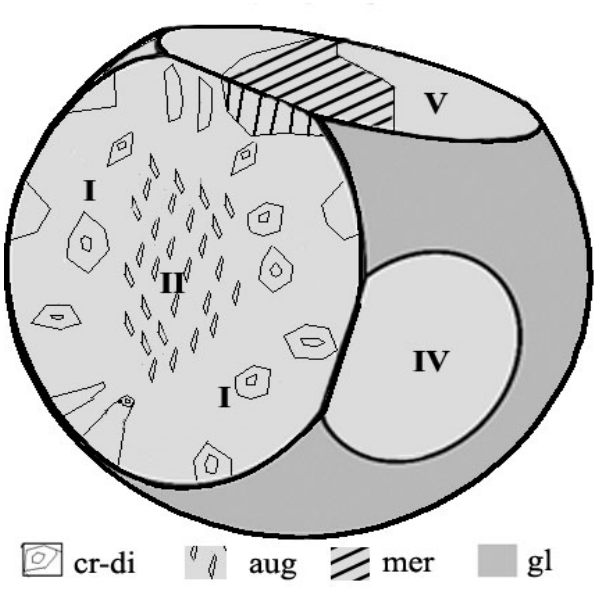


Рис. 4. Схематическое строение зонального силикатного включения в объеме. В зависимости от сечения в плоскости аншлифа наблюдаются разные типы структур (римские цифры); cr-di – футряровидные кристаллы хромдиопсида, aug – удлиненно-призматические кристаллы авгита, mer – мерриллит, gl – стекло.

силикатных включений, которые различаются по модальному содержанию стекла, пироксена и фосфата. Тип I - относительно крупнозернистые (500 - 1300 мкм) фазы, приуроченные к стенкам включений, с высоким содержанием стекла; тип II - микролиты 50-150 мкм в стекловатой основной массе; тип III – комбинация типа I и II; тип IV – стекло; тип V – стекло с крупными выделениями мерриллита. Наблюдения показывают, что выделенные структурные типы представляют собой разные срезы однотипных округлых или амебовидных объектов зонального строения (рис. 4).

Во включениях I, II, III типов распределение РЗЭ в стеклах имеет широко варьирует относительно хондритовых содержаний – 0.2-12 × CI. Спектры нормированных на CI РЗЭ имеют плоскую форму с глубоким Eu минимумом, Eu/Eu*=0.1-0.3. Стекла обогащены Rb (30 × CI) и Nb (33 × CI) и очень обедненены Cr (0.02 × CI) по сравнению с CI хондритами. В стеклах II и III типа наблюдается негативная Yb аномалия, которая зеркально симметрична положительным Yb аномалиям в мерриллите силикатных включений. Стекла включений IV типа более обогащены РЗЭ и имеют меньшие вариации их относительных содержаний, чем стекла, содержащие пироксены (I-III тип). Для стекол IV типа характерно экстремальное обогащение Rb (700 × CI), высокие концентрации Nb (37 × CI) и глубокая негативная Eu аномалия. Все пироксены обладают глубокой Eu аномалией, Eu/Eu*=0.03 и обогащены тяжелыми РЗЭ по отношению к легким. Мерриллит обогащен легкими РЗЭ (100 × CI) по сравнению с тяжелыми (30 × CI), имеет позитивную Eu аномалию - 120 × CI, Eu/Eu*=0.03, а также небольшую позитивную Yb аномалию.

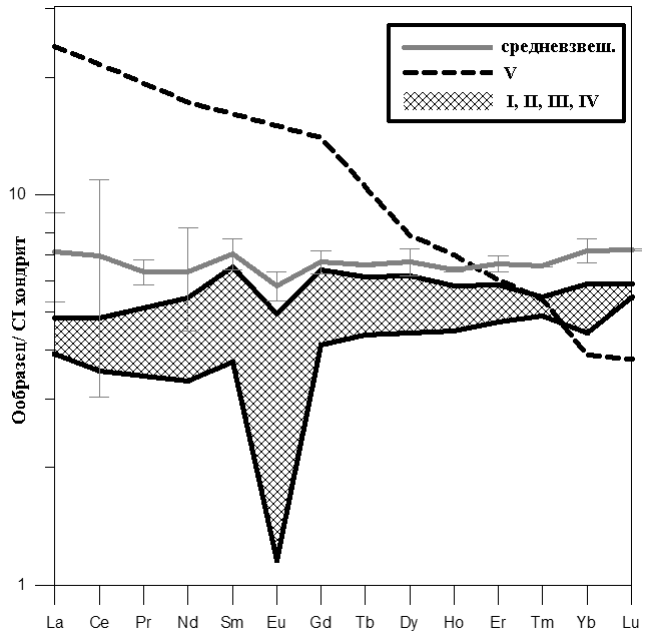


Рис. 5. Распределение РЗЭ нормированных по CI хондритам (Anders and Grevesse, 1989) в валовых составах силикатных включений **I, II, III, IV** типов (заштрихованная область), **V** типа (пунктир), средневзвешенном составе - серая линия. На графике показаны ошибки среднего значения содержаний элементов в средневзвешенном составе.

Распределение РЗЭ в валовых составах включений разных структурных типов является отражением вариаций модального содержания пироксена, стекла и мерриллита. Поскольку нами было показано, что силикатные включения — это однотипные объекты зонального строения, был рассчитан теоретический средневзвешенный (на площадь среза

включения) валовый химический состав вещества силикатных включений (рис. 5). В отличие от спектров распределения РЗЭ во включениях разных структурных типов, средневзвешенный состав включений демонстрирует плоский спектр (La/Lu)n=1, обогащение РЗЭ относительно хондритов до 7 × CI, с небольшим европиевым минимумом (Eu/Eu*=0.9). Заметное обеднение сидерофильными элементами W, Mo, Ni, Co, Fe, Ge по сравнению с хондритами прослеживается независимо от их летучести.

Ранее доминировала тенденция рассматривать различные по структуре фракционированные силикатные включения в метеоритах группы IIE как генетически различные объекты. Это приводило к неоднозначности в интерпретации результатов и построению сложнейших, во многом противоречивых генетических сценариев для дифференцированных силикатных включений, выделенных в группу Weekeroo Station (Mittlefehldt et al., 1998). Такой подход был следствием отсутствия данных о строении включений в трех измерениях.

Морфология включений в метеорите Эльга свидетельствует о том, что исходно они представляли собой частицы силикатного расплава, ликвировавшего в металлической жидкости. Зональность включений, выражающаяся в общем уменьшении размера зерен и пропорции стекла и микролитов от границ к центру, вероятно, отражает начало кристаллизации расплава включений на контакте с металлом, а затем - резкое ускорение кристаллизации, вызванное быстрым охлаждением. Меррилит в силикатных включениях содержит до 0.17 мас. % K_2O и 2.7 мас. % Na_2O, и сильно обогащен РЗЭ (до 300 × CI), что соответствует кристаллизации этой фазы из расплава в виде высокотемпературного α-мерриллита при температуре 1300 - 1700° C (Ando, 1958; Jolliff et al., 1993; Sha, 2000). Футляровидная форма микролитов пироксена и фосфата, а также стекловатая структура основной массы включений указывают на скорость охлаждения расплава порядка 10° $сек^{-1}$, и для центральных частей включений со сноповидной формой агрегатов кристаллов пироксена - до 100° $сек^{-1}$ (Walker et al., 1978). Закалка произошла при температуре выше температуры кристаллизации плагиоклаза. Для мерриллита характерна положительная Yb аномалия, для стекла – отрицательная. Следовательно, вариации модальных содержаний этих фаз в разных случайных срезах зональных силикатных включений будут приводить к появлению случайных положительных или отрицательных Yb аномалий на спектрах РЗЭ. Это, по-видимому, наиболее простое объяснение Yb аномалий, наблюдавшихся ранее во включениях других метеоритов группы IIE (Takeda et al., 2003а, б; Hsu, 2003; Ruzicka et al., 2006; Kurat et al., 2007).

Отрицательная корреляция отношений Fe/Mn и Fe/Mg в ортопироксенах силикатных включений метеорита Эльга на фоне слабовыраженных корреляций Mn и Mg, Fe и Mg,

вероятно связана с частичным перераспределением железа в форме Fe^0 из силикатного расплава в металлический за счет его высокого коэффициента распределения $металл_ж/силикат_ж$.

Несмотря на высокие содержания щелочных металлов Rb и K, валовый средневзвешенный состав силикатных включений метеорита Эльга на графиках K/Rb, La/Hf, Rb, Th находится на H-хондритовом тренде, что служит подтверждением единства источника силикатных включений и H-хондритов.

При компьютерном моделировании процессов кристаллизации H хондритовой жидкости (Ariskin et al., 1997) при fO_2 =IW (Fe-FeO буфер) и давлении 1 бар показано, что средневзвешенный валовый состав силикатных включений совпадает (за исключением содержания K и Fe) с составом расплава, который должен образоваться при 75-80% равновесной кристаллизации расплава H хондрита. Избыток K и Rb в средневзвешенном валовом составе силикатных включений не соответствует его расчетной концентрации в расплаве, что можно, однако, объяснить присутствием повышенного содержания K и Rb минералов (Dodd, 1970; Mittlefehldt et al., 1998; Rubin, 1997; Krot et al., 1994) в исходном хондритовом веществе включений. Пониженное содержание в среднем составе силикатных включений по сравнению с тем в модельной жидкости, соответствует восстановлению 2 мас. % Fe, признаки которого отражены в отрицательной корреляции MG# - Fe/Mn.

Распределение РЗЭ в средневзвешенном валовом составе вещества силикатных включений также в целом наиболее близко к модельному расплаву при 75% равновесной кристаллизации H хондрита, для которого, однако, характерно меньшее, чем у силикатных включений обогащение РЗЭ относительно CI хондрита (4 против 7 × CI) и большее обеднение тяжелыми РЗЭ по сравнению с легкими. Также вероятно, что силикатные включения образовались в результате 20-25% частичного плавления H хондрита, при котором состав расплава должен быть эквивалентен остаточному расплаву, образующемуся при равновесной кристаллизации 70-75% H хондритового расплава. Повышенные концентрации РЗЭ в силикатных включениях по сравнению с моделями можно объяснить присутствием в их источнике фосфатов с повышенным содержанием РЗЭ по сравнению со средним их содержанием для хондритовых фосфатов. Значительный разброс содержаний РЗЭ в фосфатах обыкновенных хондритов (100-200 × CI, Ward, 2016) допускает такую возможность.

Моделирование (Ariskin et al., 1999) кристаллизации расплава, состав которого соответствовал средневзвешенному валовому составу силикатных включений, хорошо воспроизводит минеральный и химический составы фаз силикатных включений. На ликвидусе при температуре 1285°C появляется оливин и исчезает при температуре 1135°C,

реагируя с расплавом с образованием пироксена. Клинопироксен и пижонит кристаллизуются при температурах 1200°C и 1140°C, соответственно. При температуре 1088°C из остаточного расплава начинается кристаллизация плагиоклаза, который в изученных включениях отсутствует, следовательно, система была закалена при температуре выше ~1095°C.

Глава 6. Сценарий образования метеоритов группы IIE

Все множество предложенных ранее сценариев, в рамках которых рассматривается образование железных метеоритов группы IIE, было поделено на 3 группы моделей: эндогенная (Wasserburg et al., 1968; Prinz et al., 1980; McCoy, 1995), экзогенная (Scott et al., 1976; Osadchii et al., 1981; Olsen et al., 1994; Casanova et al., 1995; Ikeda and Prinz, 1996; Ebihara et al., 1997) и гибридная (Bunch et al., 1970; Ruzicka et al., 1999; Hsu, 2003). Однако, ни один из предложенных в разное время сценариев образования IIE не учитывает всех особенностей строения и состава металла и силикатных включений метеоритов группы IIE.

На основании полученных данных и результатов анализа возможных астероидных обстановок мы пришли к заключению, что наиболее вероятно, и металл, и силикаты метеоритов группы IIE произошли с одного дифференцированного тела. Металл должен был фракционировать по составу и кристаллизоваться в ядре, в различной степени фракционированные силикатные компоненты, вероятно, представляют собой различные горизонты силикатной оболочки тела. Родительское тело должно было представлять собой относительно крупный (сотни км) астероид с дифференцированной внутренней частью и хондритовой оболочкой. Плавление металла и смешение металлического расплава с твердыми или расплавленными силикатными включениями происходило на поверхности в ударном процессе. Сценарий образования метеоритов группы IIE включает в себя 3 этапа: 1) аккреция H-хондритового тела и его неполная дифференциация на металлическое ядро, силикатную мантию и внешний недифференцированный слой. При последовательной фракционной кристаллизации расплава от границы ядра к центру, ядро должно было стать концентрически-зональным по распределению сидерофильных элементов, что нашло отражение в составах железных метеоритов группы IIE; 2) в результате катастрофического ударного события произошло частичное разрушение астероида с обнажением части ядра и мантии. За счет последующих ударных событий на поверхности такого астероида должен был образоваться слой реголита, который включал себя хондритовое вещество внешней оболочки и породы мантии; 3) ударные события на участке поверхности, где под слоем реголита находился металл, по составу соответствующий тому или иному метеориту группы IIE, приводили к образованию металлического ударного расплава с погруженными в него

частицами реголита. Специфика метеоритов IIE по составу силикатных включений в этом случае могла быть результатом крупномасштабной латеральной неоднородности реголита, покрывавшего металлический фундамент. На начальном этапе постударной модификации кратера смесь металлического и силикатного расплавов охлаждалась с высокой скоростью в поверхностных условиях на границе с космическим пространством, результатом чего явились частичная потеря металлом легколетучих элементов Ga и Ge, образование поликристаллических структур металла и закалочных структур силикатных включений. Металл с силикатными включениями, сохранявший относительно высокую температуру, был захоронен под покровом обломочного материала при модификации кратера. Это было причиной медленного остывания закристаллизованного металла, что привело к образованию видманштеттеновой структуры в металле метеорита Эльга и других IIE при температурах в интервале 870-450C° со скоростью охлаждения около 100°C на 1 млн. лет.

В серии последующих ударных событий метеориты группы IIE Эльга и Watson, а также Верхнеднепровск (Bevan, 1979; Buchwald, 1987) и Нечаево (Van Roosbroek et al., 2017) испытали локальный нагрев и плавлении металла при температуре ~1500°C, механические деформации, и, в конечном счете, были выброшены с поверхности родительского тела IIE.

Заключение

Полученные данные по геохимии сидерофильных элементов указывают на то, что металл метеоритов группы IIE образовался на разных стадиях фракционной кристаллизации металлической жидкости, сегрегированной из полностью расплавленного H-хондритового источника. В данной работе показано, что метеориты группы IIE обладают сходными структурами металла, возникшими в результате быстрой кристаллизации расплава, относительно медленного охлаждения в твердом состоянии и, в ряде случаев, повторного быстрого ударно-индуцированного нагрева, сменившегося быстрым охлаждением. Также показано, что форма выделения и состав шрейберзита могут служить индикаторами условий образования железных метеоритов. Силикатные включения в метеорите Эльга универсальны по составу и строению, и вероятно, образовались при 75% равновесной кристаллизации или в результате 25% частичного плавления H-хондритового источника. Вероятно, железные метеориты группы IIE с силикатными включениями могут быть продуктами смешения ударных металлических расплавов с примитивным или в разной степени фракционированным веществом на поверхности не полностью дифференцированного, частично разрушенного H-хондритового астероида. Механизмы образования структур металла и силикатных включений, исследованные в метеоритах IIE, должны были иметь

место при образовании некоторых железных метеоритов других химических групп, которые обладают аномальным металлографическим строением.

Список работ по теме диссертации

Статьи:

1. **Теплякова С.Н**. Эволюция расплавов в железных ядрах малых планет // Астрономический Вестник, 2011, Том 45, № 6, с. 529-536.
2. **Теплякова С.Н.,** Хисина Н.Р., Артемов В.В., Васильев А.Л. Наноминералогия дендритных включений в железном метеорите Эльга // Записки Российского Минералогического Общества, 2012, Часть 141, № 2, с. 42-52.
3. Хисина Н.Р., **Теплякова С.Н**., Вирт Р., Ширяев А.А., Сенин В.Г., Аверин А.А. Углеродсодержащие фазы в железном IIE метеорите Эльга // Труды ВЕСЭМПГ-2016, с. 112-113.
4. Хисина Н.Р., **Теплякова С.Н.**, Сенин В.Г., Ширяев А.А., Аверин А.А. Углеродсодежащие фазы в зонах ударного плавления метеорита Эльга // Геохимия, 2017, 4, с. 1-15.
5. **Теплякова С.Н.**, Лоренц К.А., Иванова М.А., Кононкова Н.Н., Аносова М.О., Рязанцев К.М., Костицын Ю.А. Минералогия силикатных включений в железном метеорите группы IIE Эльга // Геохимия, 2018, 1, с. 1-25.

Тэзисы докладов:

1. **Teplyakova S. N.** Records of Impact Events in the Elga (IIE) Iron // Meteorit. Planet. Sci. 2006. V. 41, Suppl, #5025.pdf.
2. **Теплякова С.Н.**, Назаров М.А. Структура и происхождение силикатных включений в железном метеорите Эльга // IV конференция молодых ученых. Фундаментальные и прикладные космические исследования, 2007, с. 17-18.
3. **Teplyakova S.N.**, Nazarov M.A. Silicate inclusions in the Elga (IIE) iron // Meteorit. Planet. Sci. 2009. Suppl., #5338.pdf.
4. **Teplyakova S.N.**, Kostitsyn Y.A., Nazarov M.A. Trace element contents of silicate inclusions in the Elga (IIE) iron // Vernadsky-Brown Microsymposium, 2009, p. 50.
5. **Теплякова С.Н.**, Иванова М.А., Лоренц К.А., Корочанцев А.В., Корочанцева Е.В., Садиленко Д.А., Скрипник А.Я., Борисовский С.Е. NWA 5549 – Новый железный метеорит с силикатными включениями // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о земле, 10, 2009, с. 323-326.
6. **Teplyakova S.N.**, Kostitsyn Y.A., Kononkova N.N. Diferentiated precursor for silicate inclusions in the Elga iron meteorite // Lunar and Planet. Sci. Conf., 41, 2010. #1686.pdf.

7. **Teplyakova S. N.**, Lorenz C. A., Ivanova M. A., Korochantsev A.V., Borisovsky S.E., Franchi I.A., and Humayun M. The new silicate-bearing iron meteorite NWA 6369 paired to NWA 5549 // Lunar and Planet. Sci. Conf., 42, 2011, #1260.pdf.
8. **Теплякова С.Н.**, Хисина Н.Р., Артемов В.В., Васильев А.Л. Новый тип сидерит-шрейберзитовых дендритных включений в железном метеорите Эльга // III Всероссийская молодежная научная конференция. Минералы: строение, свойства, методы исследования. Миасс, 2011.
9. **Teplyakova S.N.**, Humayun. M. Siderophile elements in the Elga (IIE) metal // Meteorit. Planet. Sci. 2011. Suppl., #5286.pdf.
10. **Teplyakova S.N.**, Artemov V.V., Vasiliev A.L. Unusual siderite-bearing dendrites in melt pockets of the Elga IIE Iron // Lunar and Planet. Sci. Conf., 42, 2012, #1064.pdf.
11. **Teplyakova S. N.**, Humayun M., Lorenz C. A., Ivanova M. A. A common parent body for IIE iron meteorites and H chondrites // Lunar and Planet. Sci. Conf., 43, 2012, #1130.pdf.
12. **Теплякова С.Н.** Родительское тело железных метеоритов группы IIE // IX конференция молодых ученых. Фундаментальные и прикладные космические исследования, ИКИ РАН, 2012, с. 79.
13. **Теплякова С.Н.**, Кононкова Н.Н. Оценка скорости охлаждения металла железного метеорита Эльга (IIE) // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле, 13, 2012, с. 258-261.
14. Nazarov M.A., **Teplyakova S.N.**, Brandstaetter F., Ntaflos Th. Fluorine-bearing merrillite from a silicate inclusion of the Elga (IIE) iron meteorite // Lunar and Planet. Sci. Conf., 44, 2013, #1342.pdf.
15. **Теплякова С. Н**., Хисина Н.Р., Вирт Р. Наноминералогия включений шрейберзита с микрографической структурой в силикатном веществе метеорита Эльга // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле, 15, 2014, с. 219-222.
16. Хисина Н.Р., **Теплякова С.Н.**, Сенин В.Г., Ширяев А.А., Аверин А.А. Углеродсодержащие фазы в железном IIE метеорите Эльга // ВЕСЭМПГ-125, 2016, с. 19–20.
17. Khisina N.R., Shiryaev A.A., Averin A.A., **Teplyakova S.N.**, Wirth R. Raman spectroscopy of carbonaceous and oxide phases in impact-melted zones of Elga meteorite // GeoRaman, 2016, p. 66.