

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Дугушкина Ксения Анатольевна

**ВКЛЮЧЕНИЯ И КСЕНОЛИТЫ В ОБЫКНОВЕННЫХ
И УГЛИСТЫХ ХОНДРИТАХ**

1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия,
геохимические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской Академии Наук

**Научные
руководители**

Берзин Степан Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук

Гроховский Виктор Иосифович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

**Официальные
оппоненты**

Плечов Павел Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, ФГБУН Минералогический музей имени Ферсмана РАН, директор

Скублов Сергей Геннадьевич, доктор геолого-минералогических наук, доцент, ФГБУН Институт геологии и геохронологии докембрия, главный научный сотрудник

Иванова Марина Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «10» марта 2023 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, сектор «А», аудитория 415.

E-mail: msu.04.02@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеке МГУ им. М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.5/2406>

Автореферат разослан «2» февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.016.5,
доктор химических наук

Е.Л. Белоконева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Метеориты являются важным источником информации о малых телах Солнечной системы и о процессах, происходивших на ранних этапах её формирования.

Метеоритика является динамично развивающейся научной областью, однако, несмотря на это, в метеоритных исследованиях остается много до конца не раскрытых вопросов. Одним из вопросов является выявление особенностей процессов, происходивших на доаккреционной стадии в протопланетном диске.

Благодаря исследованию метеоритов была получена информация о формировании и последующих этапах преобразования минерального вещества в протосолнечной небуле и на малых телах Солнечной системы. Сформировались представления о небулярных процессах, аккреции, эволюции вещества в недрах планет, спутников и астероидов, изучены импактные события и процессы космического выветривания.

Наиболее распространенным типом метеоритов по числу известных падений и находок являются хондриты – примитивные породы, не прошедшие планетарную дифференциацию, которые сохранили в себе следы процессов, происходивших на допланетной стадии развития Солнечной системы.

Хондриты получили такое название, поскольку содержат хондры — сферические образования силикатного состава. Хондриты образовались в процессе аккреции (слияния) хондр, тугоплавких включений и тонкозернистой матрицы, сформировавшихся в протосолнечной небуле.

Хондриты подразделяются на углистые (CI, CV, CM, CO, и др.), обыкновенные (H, L, LL), энстатитовые (EH, EL), более редкие R и K хондриты, а также несколько десятков неклассифицированных хондритов. Классы хондритов различаются по содержанию углерода, содержанию железа и его степени окисленности, изотопным отношениям кислорода и ряду других признаков. По отношениям стабильных изотопов (Ti, Cr, Ni, Mo) хондриты также классифицируются на углистые (CC) и неуглистые (NC) хондриты (Warren 2011; Kruijer et al. 2017; Scott et al., 2018).

Хондриты в разной степени подверглись метаморфизму в недрах родительских тел и классифицируются на петрологические типы 1-7 в зависимости от степени низкотемпературного водного (1-2 тип) или высокотемпературного «сухого» (тип 4-7) метаморфизма. Хондриты 1-3 петрологического типа называются неравновесными, хондриты 4-7 петрологических типов – равновесными, поскольку в них наблюдается уравнивание составов минералов (Van Schmus et al., 1967a; Weisberg et al., 2006a).

В неравновесных хондритах повсеместно встречаются ксенолиты и различного рода включения, попавшие на родительские тела в процессе аккреции. Исследование таких ксенолитов и включений позволяет раскрыть последовательность событий, происходивших с минеральным веществом в ранней Солнечной системе.

Цели и задачи исследования. Основная цель работы состояла в выяснении последовательности и характера процессов формирования минерального вещества включений и ксенолитов в обыкновенных и углистых хондритах.

В работе решались следующие задачи:

1. Реконструкция процессов формирования и преобразования богатых форстеритом включений.

2. Реконструкция условий формирования ксенолитов и микроксенолитов в хондритах.

3. Характеристика минерального состава и морфологии минеральных агрегатов богатых SiO_2 компонентов (SRC) в хондритах.

4. Изучение структурных, минералогических и химических особенностей хондритов, представленных различного рода аккреционными брекчиями.

Фактический материал и методы исследования. Диссертация основана на результатах исследования 29 образцов метеоритов (25 петрографических шлифов, 32 аншлифа), представленными фрагментами различных типов хондритов (Прил. 1, Табл. 1).

Изучение строения метеоритов проводилось с помощью сканирующих электронных микроскопов JEOL JSM-6390LV и TESCAN MIRA LMS, оснащенных энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН).

Состав минералов изучен при помощи электронно-зондового микроанализатора (EPMA) Cameca SX-100 с пятью волновыми спектрометрами и энергодисперсионной приставкой Bruker XFlash 6 (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН).

Изучение локальной ориентации кристаллических решеток проводилось методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ) на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, оснащенный детектором ДОЭ NordlysNano, (ресурсный центр «Геомодель» научного парка СПбГУ) и на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV, с приставкой ДОЭ NordlysNano Oxford Instruments (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН).

Измерение микроэлементного состава форстерита производилось на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой NexION 300S (PerkinElmer) с приставкой для лазерной абляции NWR 213 (ESI) при диаметре кратера 25 мкм (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН).

Съемка рамановских спектров с целью идентификации минералов проводилась на спектрометре LabRam HR 800 Evolution, оснащенный микроскопом Olympus VX-FM в (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН).

Личный вклад автора состоял в постановке целей и задач исследования, в обобщении полученных данных и формулировании выводов. Автором проанализирован большой объем зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования. Также личный вклад автора заключался в непосредственном

участию в проведении аналитических исследований и интерпретации полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Образование клиноэнстатитовой каймы в богатых форстеритом включениях в хондритах происходило за счет замещения форстерита по периметру в результате реакционного взаимодействия с небулярным веществом.

2. Необычный по строению ксенолит в метеорите Челябинск образовался в результате аккреции твердых и частично раскристаллизованных хондр в области формирования колосниковых оливиновых хондр (ВО) и может рассматриваться как макрохондра.

3. Метеорит Северный Колчим относится к классу НЗ.4, содержит класт хондрита НЗ.9 и может быть дополнительно классифицирован как геномиктовая брекчия.

Научная новизна.

1. Для трёх углистых (Allende, Northwest Africa 11781 и Northwest Africa 11179) и двух обыкновенных (Северный Колчим и Shinejinst) хондритов методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ) получены первые данные о богатых форстеритом включениях. Установлено, что клиноэнстатитовая кайма во включениях форстерита имеет реакционную природу и, по нашему мнению, сформировалась в результате взаимодействия с небулярным веществом в протопланетном диске. Показано, что кайма практически полностью сложена клиноэнстатитом.

2. Впервые изучен уникальный ксенолит в метеорите Челябинск, сложенный исключительно колосниковыми оливиновыми (ВО) хондрами и их фрагментами. Показано, что данный ксенолит возник в области формирования колосниковых оливиновых (ВО) хондр при аккреции твердых и частично раскристаллизовавшихся хондр.

3. Уточнена классификация метеорита Северный Колчим как НЗ.4. В этом метеорите был изучен класт, сложенный хондритом НЗ.9. Данный метеорит дополнительно классифицирован как геномиктовая брекчия. В метеорите Северный Колчим найдены и изучены богатые форстеритом включения, обогащенные Al хондры, богатые SiO_2 компоненты.

4. В обыкновенных хондритах Северный Колчим и Shinejinst найдены и изучены богатые SiO_2 компоненты (SRC). Для этих метеоритов получены первые данные о локальной ориентировке минеральных индивидов в SRC методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ).

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты исследования минерального вещества метеоритов в перспективе могут быть использованы при формулировании целей и задач космических исследовательских миссий и, возможно, будут полезны при разработке мер противометеоритной (астероидной) безопасности.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, приложения и содержит 172 страницы, 39 рисунков, 21 таблицу. Список литературы включает 362 наименования.

Апробация работы. Результаты исследования отражены в 24 публикациях, в том числе в 3 статьях в журналах из перечня АК МГУ. Результаты исследований докладывались автором на российских и международных конференциях, в том числе: IX Всероссийская молодежная научная конференция «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (Екатеринбург, 2018 г); 81st Annual Meeting of the Meteoritical Society (Москва, 2018 г); Всероссийская научная конференция, посвященная 70-летию основания Уральского отделения Российского минералогического общества «VII Чтения памяти член-корр. РАН С.Н. Иванова» (Екатеринбург, 2018 г); X Всероссийская молодежная научная конференция «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (Екатеринбург – Миасс, 2019 г); XXVI Всероссийская научная молодежная конференция с международным участием «Уральская минералогическая школа-2020 Под знаком золота и платины» (Екатеринбург, 2020 г); XII Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (Екатеринбург, 2021 г); XIII Съезд РМО «Минералогия во всем пространстве сего слова: Проблемы развития минерально-сырьевой базы и рационального использования минерального сырья» и Федоровская сессия (Санкт-Петербург, 2021).

Благодарности. Автор благодарит научных руководителей кандидата геол.-мин. наук Степана Васильевича Берзина и кандидата техн. наук Виктора Иосифовича Гроховского за постановку темы, всестороннюю помощь и поддержку в осуществлении работы. Автор благодарен А.Ю. Пастуховичу, С.Ю. Степанову, Д.А. Клейменову, Е.В. Бурлакову за предоставленный метеоритный материал. Автор признателен К.С. Иванову, Ю.В. Ерохину, Н.В. Вахрушевой, А.Р. Богдановой, П.Б. Ширяеву, П.С. Козлову и всем сотрудникам лаборатории региональной геологии и геотектоники за полезные дискуссии, помощь в работе, а также всем, кто уделял внимание докладам автора на конференциях и совещаниях. Автор благодарен за помощь в проведении аналитических работ сотрудникам Центра коллективного пользования «Геоаналитик», в особенности Л.В. Леоновой, Н.Н. Фарраховой, Е.А. Панкрушиной, Д.А. Замятину, М.В. Червяковской, В.С. Червяковскому, И.А. Готтман, Н.С. Чебыкину. Автор благодарен В.В. Шиловских (ресурсный центр «Геомодель» научного парка СПбГУ). Автор выражает отдельную благодарность друзьям и близким за моральную поддержку и помощь в работе над диссертацией.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы ИГГ УрО РАН, Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030», а также исследовательских грантов, поддержанных РФФИ (проекты №17-05-00297 и № 19-35-90059).

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

***1^{oe} защищаемое положение.* Образование клиноэнстатитовой каймы в богатых форстеритом включениях в хондритах происходило за счет замещения форстерита по периметру в результате реакционного взаимодействия с небулярным веществом.**

В трех углистых хондритах Allende (CV3), Northwest Africa 11179 (CM2) и Northwest Africa 11781 (CM2) и в двух обычных хондритах Северный Колчим (НЗ.4) и Shinejinst (Н4) найдены и исследованы 48 богатых форстеритом включений.

Богатые форстеритом включения (forsterite-rich objects) являются общим компонентом неравновесных углистых, обычных и R-хондритов. Встречаются преимущественно в виде обособленных зерен в матрице хондритов, однако также известны находки форстерита в виде включений внутри хондр (Libourel et al., 2006; Krot et al., 2018; Marrocchi et al., 2018; Jacquet et al., 2020; и др.).

Рядом исследователей показано, что форстерит кристаллизовался в каплях расплава, обедненного FeO и обогащенного «труднолетучими» литофильными элементами (RLE), в т.н. «протохондрах», родительских хондрах или хондрах начальной генерации, с дальнейшим массовым разрушением последних и высвобождением зерен форстерита (McSween, 1977; Richardson et al., 1977; Roedder, 1981; Jones et al., 1992, 2000; Pack et al., 2004, 2005; Borisov et al., 2008; Russell et al., 2010; Jacquet et al., 2020; Perotti et al., 2021, и др.). Расплавные включения, встречающиеся в форстерите, представляют собой захваченный расплав из родительских хондр.

Изученные богатые форстеритом включения сложены крайне низкожелезистым форстеритом (f 0.002-0.2), содержащим существенную примесь RLE: CaO 0.3-1.0 мас.%, Al_2O_3 0.2-0.4 мас.%, TiO_2 до 0.13 мас.%, и аномально низкие содержания «умеренно летучих» Mn и Cr. По повышенному содержанию RLE (Al, Ca, Ti, V, Sc, Y, Zr) изученные богатые форстеритом включения близки к описанным в литературе включениям форстерита (Pack et al., 2004) и отличаются от железистого оливина из матрицы и хондр. В краевых частях зерен форстерита содержание FeO возрастает до 5.8 мас.% (f 0.06-0.10), при этом содержания RLE уменьшаются, возрастает содержание примеси MnO до 0.22 мас.%. От центра к краю зерен форстерита прослеживается зональность в интенсивности катодоллюминесценции. Для оливина из богатых форстеритом включений подобная зональность является вполне типичной (например, Pack et al., 2004, 2005).

В форстерите из углистых хондритов были встречены округлые каплевидные включения кислого стекла и камасита (Ni 5.6-7.4 мас.%). В двух включениях (RF-10, RF-19) встречены идиоморфные зерна шпинели. Средний состав шпинели Al_2O_3 68.9±1.8%, MgO 26.5±3.9%, Cr_2O_3 0.9%, FeO 2.8%, TiO_2 0.2%, MnO 0.1%, SiO_2 0.2% (N=4).

Многие богатые форстеритом включения окружены каймой низкокальциевого пироксена (энстатита или клиноэнстатита). Низкокальциевый пироксен ($\text{En}_{96\pm 3,1}\text{Fs}_{3\pm 2,7}\text{Wo}_{2\pm 1,1}$), слагающий кайму, характеризуется низким содержанием FeO 0.5-5.1 мас.%, обогащением RLE (CaO до 2.1 мас.%, Al_2O_3 до 1.8 мас.%, TiO_2 до 0.38 мас.%). Специального изучения каймы ранее не проводилось, и традиционно она называется реакционной (Pack et al., 2004).

Теоретически существуют два возможных пути формирования пироксеновой каймы: обрастание форстерита новообразованным пироксеном, или замещение форстерита пироксеном по периметру. В первом случае новообразованные минеральные индивиды низкокальциевого пироксена будут нарастать на поверхности зерен форстерита. При этом в кайме должна будет формироваться зона геометрического отбора индивидов энстатита, направленная в сторону внешней границы объекта. В случае замещения форстерита энстатитом будет происходить рост метакристаллов энстатита внутри форстерита. Зарождение индивидов будет происходить преимущественно от границ зерен форстерита. При этом возможно формирование зоны геометрического отбора по направлению от края к центру зерна форстерита (Берзин и др., 2020).

Методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ) было изучено четыре богатых форстеритом включения с пироксеновой каймой из углистых хондритов (Берзин и др., 2020).

Наиболее показательное богатое форстеритом включение RF-02 в метеорите NWA 11781 состоит из одного крупного и нескольких более мелких зерен форстерита (Прил.1, Рис.1). В результате ДОЭ-картирования установлено, что наиболее крупное зерно имеет блочное строение, с относительной разориентировкой отдельных блоков в пределах кристалла более чем на 3° (Прил. 1, Рис. 1, г-д). Подобное блочное строение наблюдается и в других богатых форстеритом включениях с разориентировкой отдельных блоков до 10° (Берзин и др., 2020).

Округлые богатые форстеритом включения, в отличие от хондр с форстеритом, не содержат мезостазис. В интерстициях между зернами форстерита наблюдаются редкие зерна высококальциевого пироксена (Прил., Рис.2). При этом в форстерите содержатся округлые включения высококальциевого стекла и камасита ($\text{Ni} \sim 6,2\%$). В результате ДОЭ-картирования установлено, что округлое включение (RF-08) состоит из нескольких зерен форстерита. Зерна форстерита образуют точки тройного сочленения (Прил.1, Рис.2, е). Аналогичные точки тройного сочленения наблюдаются в богатых форстеритом включениях обломочной формы. По периметру включения наблюдается пироксеновая кайма. Кроме того, пироксен встречается внутри включения на границе между зернами форстерита (Прил. 1, Рис. 2, д, е).

В ходе ДОЭ-картирования было также установлено, что кайма в изученных включениях сложена преимущественно клиноэнстатитом. В кайме одного из включений установлено небольшое количество (менее 10%) ромбического

энстатита, который, по всей видимости, псевдоморфно замещает клиноэнстатит. В некоторых индивидах клиноэнстатита наблюдается полисинтетическое двойникование.

Во всех изученных богатых форстеритом включениях кайма состоит из нескольких индивидов клиноэнстатита (Прил. 1, Рис. 1, в). Границы между зернами клиноэнстатита криволинейные, плавно изгибающиеся (Прил. 1, Рис. 1, б), и, по всей видимости, являются индукционными. Зона геометрического отбора в клиноэнстатитовой кайме на границе с форстеритом отсутствует. Следовательно, рост кристаллов энстатита не начинался от внешней поверхности зерен форстерита. Внутренняя структура энстатитовой каймы гранонематобластовая. Размер соседних зерен варьирует незначительно. Это указывает на то, что отдельные кристаллы клиноэнстатита росли одновременно, замещая форстерит.

Клиноэнстатит в кайме наследует повышенное содержание RLE (Al, Ca, Ti, V, Sc, Y, Zr), что также свидетельствует о его формировании за счет замещения зерен форстерита.

Таким образом, можно сделать вывод, что данная кайма сформировалась в результате замещения форстерита клиноэнстатитом в результате реакционного взаимодействия с внешней средой (вероятно, небулярным газом).

2^{ое} защищаемое положение. Необычный по строению ксенолит в метеорите Челябинск образовался в результате аккреции твердых и частично раскристаллизованных хондр в области формирования колосниковых оливиновых хондр (ВО) и может рассматриваться как макрохондра.

В одном из фрагментов метеорита Челябинск был найден уникальный по внутреннему строению ксенолит (Рис. 1). Ксенолит расположен на границе с ударно-расплавным прожилком («темной литологией»), имеет размер на срезе

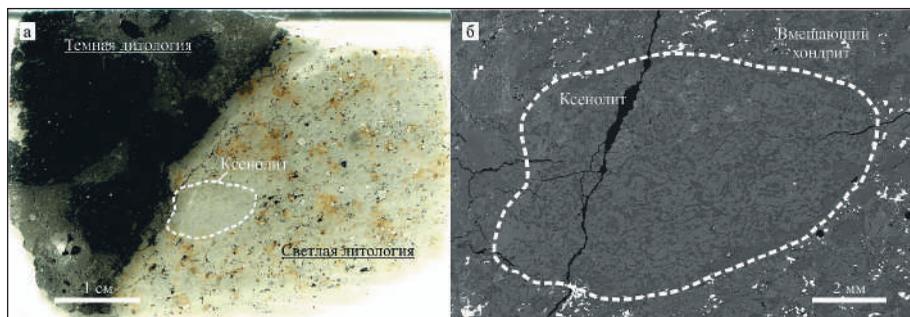


Рис. 1. Ксенолит в метеорите Челябинск. а – фотография шлифа в проходящем свете, без анализатора, б – изображение в обратно-отраженных электронах (BSE).

6×10 мм и форму близкую к овальной (Рис. 1). Границы с вмещающим хондритом («светлая литология») четкие, округлые (Берзин и др., 2016, 2019б).

В отличие от вмещающего хондрита (Берзин и др., 2016, 2019б) ксенолит сложен исключительно колосниковыми оливиновыми (ВО) хондрами и их фрагментами, пространство между которыми имеет строение аналогичное внутреннему строению данных хондр, не содержит обломочную матрицу (Рис. 1) и практически не содержит металл и троилит.

Все колосниковые оливиновые (ВО) хондры в ксенолите имеют близкое строение. Большая часть таких хондр сложена полыми скелетными монокристаллами оливина (Рис.2). Оливин (Fe_{29}) в пределах ксенолита имеет выдержанный химический состав и соответствует по составу оливину из вмещающего хондрита. Во внутренней части всех хондр наблюдается мезостазис с тонкозернистым диопсидом ($En_{44}Fs_9Wo_{47}$) (Рис. 2, а). Хондры

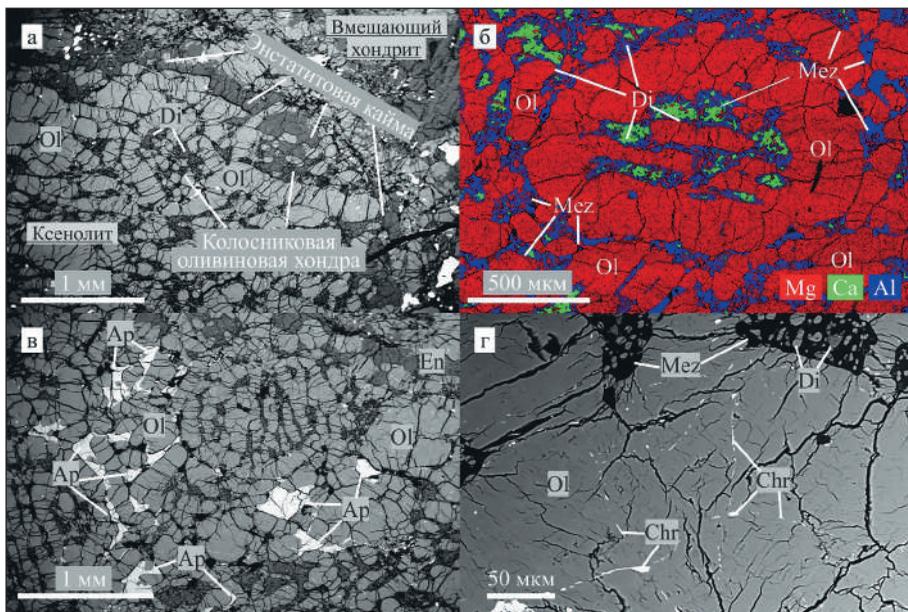


Рис. 2. Строение ксенолита в метеорите Челябинск. а – ортопироксеновая кайма на границе ксенолита и вмещающего хондрита, б-в – строение хондр и межхондрового пространства в ксенолите, в – апатит в ксенолите, г – ламели хромита в оливине. а, в-г – изображение в обратно-отраженных электронах (BSE), б – комбинированная карта распределения элементов (Mg – красный, Ca – зеленый, Al – синий). Ol – оливин, Di – диопсид, Mez – мезостазис, Ap – апатит, Chr – хромит, Enstatite rim – энстатитовая кайма.

претерпели значительные деформации, об этом свидетельствует ярко выраженное блочное погасание зерен оливина.

По периферии ксенолита наблюдается практически непрерывная кайма мощностью 50-150 мкм, сложенная энстатитом $En_{73}Fs_{26}Wo_2$ (N=3), идентичным по составу энстатиту во вмещающем хондрите (Рис. 2, а,в). Протяженные участки каймы по 8-15 мм сложены монокристаллами энстатита.

Местами в оливине наблюдаются структуры распада с ламелями хромита (Рис. 2, г). Хромит во включениях имеет состав Cr_2O_3 53.2%, FeO 32.6%, TiO_2 4.1%, Al_2O_3 5.4%, MnO 0.5%, MgO 2.7%, V_2O_5 1.0%, SiO_2 0.6%. Такой же состав имеет хромит, находящийся в виде редких зерен в матрице вмещающего хондрита.

Ксенолит содержит многочисленные зерна апатита, расположенные в интерстициях между зернами оливина как внутри хондр, так и в пространстве между хондрами (Рис. 2, а,в). Минерал отличается устойчивым химическим составом и относится к хлорапатиту (Cl 4.55-4.98 мас.%).

Близкий состав слагающих ксенолит минералов (оливин, хромит, апатит) и минералов вмещающего хондрита свидетельствует об уравнивании состава минералов в ходе метаморфизма в недрах родительского тела метеорита Челябинск. Учитывая, что Челябинск относится к 5 петрологическому типу, это вполне согласуется с данными об уравнивании составов минералов при метаморфизме в обыкновенных хондритах (Huss et al., 2006, Суханова и др., 2022). Таким образом, составы слагающих ксенолит минералов не являются в полной мере информативными. Однако, можно сделать выводы об условиях формирования ксенолита исходя из особенностей его внутреннего строения.

Ксенолит имеет некоторое сходство с крупными магматическими включениями (large igneous inclusions) (Ruzicka et al., 2019). При этом он сложен колосниковыми оливиновыми ВО хондрами, пространство между которыми имеет аналогичное данным хондрам строение, из этого можно сделать вывод, что ксенолит сформировался при аккреции твердых и частично раскристаллизовавшихся колосниковых оливиновых хондр, и, вероятно, капель расплава, представляющих незастывшие хондры. Ксенолит можно также рассматривать как гигантскую ВО макрохондру с включениями более мелких ВО хондр.

Скорость остывания расплавов, при которой наблюдается формирование скелетных кристаллов оливина, аналогичных колосниковым оливиновым хондрам была определена экспериментально (Lofgren et al., 1990) и составляет 500-2300 °C/ч. Т.е. время кристаллизации ВО хондр исчислялось часами или даже минутами после события нагрева, приведшего к плавлению вещества – предшественника хондр.

На момент формирования ксенолита в его состав были включены твердые ВО хондры и их обломки, частично раскристаллизовавшиеся ВО хондры и слабо раскристаллизованные капли расплава. А значит все эти хондры сформировались в результате нескольких повторяющихся и видимо достаточно локальных событий нагрева. При этом близость структуры разных ВО хондр и пространства

между хондрами в ксенолите не позволяет предполагать их разные скорости остывания.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что формирование ксенолита происходило в области формирования однотипных колосниковых оливиновых (ВО) хондр. Отсутствие твердых нерасплавленных предшественников в ВО хондрах, а также отсутствие пылевидной матрицы в ксенолите указывает на полное плавление исходного вещества при хондрообразовании. Кроме того, довольно близкие валовые составы ВО хондр в пределах ксенолита свидетельствуют об однородности вещества в области формирования данного ксенолита.

В дальнейшем в результате аккреции ксенолит попал на родительское тело метеорита Челябинск.

Наличие энстатитовой каймы свидетельствует о реакционном взаимодействии ксенолита с окружающей средой (вероятно, с небулярным газом). Поскольку кайма сложена относительно крупными зёрнами энстатита, можно предположить, что изначально реакционная кайма могла быть тонкозернистой и, возможно, неоднородной и была замещена энстатитом, в ходе перекристаллизации в недрах родительского тела метеорита Челябинск. Подобные реакционные каймы известны в колосниковых оливиновых хондрах (Jacquet et al., 2012), в порфириновых оливиновых и оливин-пироксеновых хондрах (Libourel et al., 2006).

Наличие ламелей хромита в зёрнах оливина, вероятно, указывает на изначально более высокие содержания железа и хрома в последнем. Распад твердого раствора на оливин и хромит мог произойти в ходе метаморфизма в родительском теле метеорита Челябинск.

Ксенолиты наиболее распространены в тех типах метеоритов, которые ассоциируются с поверхностью астероидов (в реголитовых брекчиях, говардитах, неравновесных обыкновенных хондритах 3.0-3.5 петрологических типов и др.), поскольку процесс аккреции обломков метеоритов разных типов продолжался на протяжении всего времени существования поверхности астероида. Однако хондрит Челябинск относится к 5 петрологическому типу. Он подвергся метаморфизму в недрах родительского тела. И на момент аккреции глубинной части родительского тела метеорита Челябинск ксенолит уже успел сформироваться и претерпеть поверхностные изменения, приведшие к формированию пироксеновой реакционной каймы.

3^е защищаемое положение. Метеорит Северный Колчим относится к классу НЗ.4, содержит класт хондрита НЗ.9 и может быть дополнительно классифицирован как геномиктовая брекчия.

Метеорит Северный Колчим был найден в 1965 г. в России недалеко от п. Северный Колчим в Пермском крае геологом В.А. Сиговым в корнях упавшего дерева (Иванов, 1969). Метеорит имел вес около 2 кг и в настоящее время хранится в Уральском геологическом музее (г. Екатеринбург). Метеорит

изучался рядом исследователей (Иванов, 1969; Юдин, 1970; Назаров и др., 1983; Логинов, 2004; Ерохин и др., 2016, 2018, 2019) и был классифицирован ими как H4 хондрит.

Метеорит Северный Колчим сложен порфиоровыми (PO,POP) и в меньшей степени непорфиоровыми (RP, CC, G) хондрами, обломками хондр и обломочной тонкозернистой матрицей. В порфиоровых хондрах мезостазис-представлен полупрозрачным кислым стеклом, в котором может наблюдаться появление субмикронных игольчатых скелетных кристаллов диопсида.

Матрица имеет тонкозернистую структуру, местами переходящую в скрытокристаллическую, в тонком шлифе практически непрозрачна. В ней содержатся многочисленные мелкие обломки оливина и пироксена, а также обломки хондр.

Составы минералов в метеорите не уравновешены. В оливине отношение $Fe/(Fe+Mg)_{\text{мол.}}$ варьирует от 0.01 до 0.20. Вариации содержания железа в оливине оценены при помощи процентного среднего отклонения (Percent Mean Deviation, или PMD) (Dodd et al., 1967). Показатель PMD для содержания FeO в оливине, составил 35 % (N = 38), по классификации (Sears et al., 1980) следует отнести к петрологическому типу 3.4. В ортопироксене наблюдается аналогичная картина с отсутствием минерального равновесия по вариациям железистости ($Fe/(Fe+Mg)_{\text{мол.}}$ 0.03-0.17).

В метеорите присутствуют богатые форстеритом включения обломочной формы с содержанием FeO 0.5-1.0 мас.%, по краям зерен, возрастающим до 5-9 мас.%, а также родительские хондры богатых форстеритом включений (Прил. 1, Рис. 2, а-в).

Поскольку метеорит имеет непрозрачную матрицу без водосодержащих силикатов с признаками начала перекристаллизации, это позволяет отнести метеорит к 3.3-3.5 петрологическому типу согласно классификации (Huss et al., 2006). Это согласуется с данными о слабо девитрифицированном изотропном стекле в мезостазисе хондр с редкими субмикронными зёрнами кальциевого пироксена. Альбит в мезостазисе хондр выявлен не был.

Таким образом, по совокупности петрографических и минералогических признаков петрологический тип метеорита Северный Колчим может быть уточнен как 3.4. Степень ударных преобразований определена как S1 по (Stoffler et al., 1991, 2019). Степень земного выветривания W3 по (Wlotzka, 1993).

В хондрите Северный Колчим был обнаружен обломок (класт) размером 6×6 мм,

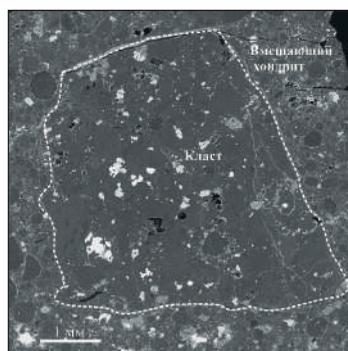


Рис. 3. Класт хондрита в матрице метеорита Северный Колчим. Изображение в обратно-отраженных электронах (BSE).

отличающийся по структуре от вмещающего хондрита (Рис. 3). Границы резкие, хорошо прослеживаемые. Класт состоит из хондр и перекристаллизованной матрицы. По размеру и типам хондр он не отличается от вмещающего хондрита. Границы хондр четкие и не затронуты перекристаллизацией.

В оливине в класте отношение $Fe/(Fe+Mg)_{\text{мол.}}$ варьирует от 0.16 до 0.20 и в целом совпадает с железистостью оливина из вмещающего хондрита. Низкокальциевый пироксен в класте имеет железистость $Fe/(Fe+Mg)_{\text{мол.}}$ ~0.17. На классификационной диаграмме содержания железа в оливине и пироксене для обыкновенных хондритов (Bearley et al., 1998) класт так же, как и вмещающий хондрит, попадает в поле Н-типа.

Показатель PMD (Dodd et al., 1967) для содержания FeO в оливине из класта по данным электронно-зондового микроанализа 5% (N=23), что согласно классификации (Sears et al., 1980) позволяют отнести класт к петрологическому типу 3.9. Состав камасита и тэнита варьирует в пределах: камасит - Ni от 3.5 до 7.1 мас.%, тэнит - Ni от 30.5 до 45.3 мас.%.

Матрица в класте практически прозрачная и состоит преимущественно из новообразованных зерен оливина и пироксена размером 5-100 мкм. Появляются обособленные зерна хлорапатита (Cl 5.6 мас.%) и мерриллита. Металл и троилит в матрице присутствуют преимущественно в виде новообразованных зерен размером 100-700 мкм. Это также позволяет отнести класт к петрологическому типу 3.8-4 согласно (Huss et al., 2006). Однако отсутствие четко диагностированного плагиоклаза в хондрах и в матрице не позволяет отнести класт к равновесному 4 петрологическому типу согласно той же классификации (Huss et al., 2006).

Степень ударных преобразований - S2 по (Stoffler et al., 1991, 2019). Класт в большей степени был подвергнут ударным преобразованиям по сравнению с вмещающим его хондритом. Степень земного выветривания в класте составляет W2 по (Wlotzka, 1993).

Тот факт, что класт в большей степени затронут высокотемпературным метаморфизмом, чем вмещающий его хондрит, свидетельствует о том, что он сформировался на том же или родственном родительском теле Н-хондритов, но на большей глубине, откуда был выбит в результате ударного события.

Учитывая присутствие в Северном Колчине класта, не отличающегося от него по составу, но отличающегося по степени метаморфизма (петрологическому типу), данный метеорит может быть также дополнительно классифицирован как геномиктовая брекчия (Genomict breccia) по классификации (Bischoff et al., 2006).

В метеорите были встречены две обогащенные Al хондры (англ. «Al-rich chondrule»). Такие хондры являются редкими компонентами хондритов, однако находки были описаны в большинстве групп хондритов: обыкновенных (Bischoff et al., 1984; Russell et al., 2000; Krot et al., 2001; MacPherson et al., 2005), углистых (Sheng et al., 1991; Krot et al., 2002a, 2002b, 2006, Akaki et al., 2007; Zhang et al., 2014, 2019) и R-хондритах (Rout et al., 2008, 2010). Они имеют относительно высокое содержание Al_2O_3 (>10 мас. %).

Хондра AlCh-01 имеет порфиновую структуру. Состоит из зерен низкокальциевого пироксена $En_{0.89\pm 0.04}Fs_{0.10\pm 0.05}W_{0.02\pm 0.01}$ (N=2), обрастающего по периметру высококальциевым пироксеном $En_{0.61\pm 0.06}Fs_{0.08\pm 0.02}W_{0.30\pm 0.08}$ (N=3). Мезостази́с между зернами пироксена заполнен слабо девитрифицированным стеклом. В стекле находятся зерна шпинели. Средний состав шпинели по данным ЭДС анализов: SiO_2 0.7±0.3%, Al_2O_3 55.2±0.1%, Cr_2O_3 12.3±0.2%, FeO 15.2±0.3%, MnO 0.1±0.2%, MgO 15.9±0.2% (N=4).

Хондра AlCh-02 имеет скрытокристаллическую структуру и сложена слабо девитрифицированным кислым стеклом. В центральной части хондры различимы редкие субмикронные зерна сульфидов и Fe-Mg силикатов. Данная хондра очень сильно обогащена алюминием, её предположительно можно отнести к хондрам, образовавшимся при переплавке кислого стекла мезостази́са хондр (по MacPherson et al., 2005; Russell et al., 2018).

В метеорите были встречены богатые SiO_2 компоненты: порфиновые пироксеновые хондры с тридимитом и отдельные включения тридимита, некоторые из которых находятся в сростании с низкожелезистым энстатитом (Прил.1, Рис. 3 и 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были изучены фрагменты 29 метеоритов. Были изучены найденные ксенолиты и включения в трех углистых и трех обыкновенных хондритах. Изучено 48 богатых форстеритом включений, 14 богатых кремнезём компонентов.

Были получены первые данные по изучению богатых форстеритом включений методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ). В результате картирования установлено, что включения состоят из одного или нескольких зерен форстерита. Выявлено внутреннее блочное строение зерен форстерита с разориентировкой блоков до 10°. Впервые показано, что клиноэнстатитовая кайма в богатых форстеритом включениях имеет реакционную природу и сформировалась в результате взаимодействия с окружающей средой (вероятно небулярным веществом). Подобное взаимодействие носило широко распространенный, но не всеобъемлющий характер, и может быть связано с процессами формирования преобладающей массы железомagneзиальных хондр.

В матрице метеоритов Allende и Северный Колчим были изучены порфиновые оливиновые хондры, состоящие из форстерита и высококальциевого стекла в мезостази́се, которые являются родительскими для богатых форстеритом включений. Данные находки подтверждают гипотезы об образовании богатых форстеритом включений из «протохондр», обедненных FeO и обогащенных «труднолетучими» литофильными элементами.

В шлифах изучены богатые форстеритом включения округлой формы с точками тройного сочленения между зернами оливина методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ). Предложены два возможных объяснения

данных наблюдений. Во-первых, такие включения могли сформироваться за счет нагрева «протохондр» и практически полной потери ими более летучего вещества мезостазиса. Во-вторых, возможно, что мы наблюдаем в шлифе срезы краевой части «протохондр», в которые не попал мезостазис, находящейся преимущественно в центральной части «протохондр».

В метеорите Челябинск LL5 изучен необычный ксенолит, который сложен колосниковыми оливиновыми хондрами (ВО) и их фрагментами, соединенными мезостазисом. Показано, что ксенолит сформировался в результате аккреции твердых колосниковых оливиновых хондр, частично раскристаллизовавшихся хондр и капель расплава, представляющих незастывшие хондры. Такая аккреция могла произойти при сближенном во времени формировании однотипных ВО хондр в локальной области протосолнечной небулы. Подобное скопление колосниковых оливиновых хондр было обнаружено и изучено впервые. В хондритах колосниковые оливиновые хондры распределены достаточно равномерно.

Уточнена классификация метеорита Северный Колчим как H3.4. Степень ударных преобразований S1. Степень земного выветривания W3. Также данный метеорит дополнительно классифицирован как геномиктовая брекчия (Genomict breccia) по классификации (Bischoff et al., 2006), поскольку в метеорите присутствует класт (обломок) хондрита H3.9. Класт имеет несколько более высокую степень ударных преобразований S2. Вероятнее всего класт сформировался на том же или родственном родительском теле H-хондритов, но на большей глубине, откуда был выбит в результате ударного события. В Северном Колчипе найдены и изучены богатые форстеритом включения, родительские хондры богатых форстеритом включений, обогащенные Al хондры и богатые кремнеземом компоненты (SRC).

Всего в ходе работы были изучены фрагменты 29 метеоритов. Изучено 48 богатых форстеритом включений, 14 богатых кремнеземом компонентов. Были изучены и зарегистрированы 13 новых метеоритов, найденных Метеоритной экспедицией УрФУ в пустынях Атакама (Чили), Южное Гоби (Монголия), Деште-Лут (Иран).

Полученные данные расширяют наши представления о процессах, происходивших с минеральным веществом на доаккреционной стадии развития протопланетного диска.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных АК МГУ

1. **Дугушкина К.А.**, Берзин С.В. Новый углистый хондрит CM2 из Северо-Западной Африки (Northwest Africa 11781) // Литосфера. - 2019. - №4. - С.580-587. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-580-587. Импакт-фактор (РИНЦ): 0,681. Личный вклад автора – 80%.
2. Берзин С.В., Коротеев В.А., **Дугушкина К.А.**, Шиловских В.В., Замятин Д.А., Степанов С.Ю. Природа клиноэнстатитовой каймы в тугоплавких богатых

форстеритом включениях из углистых хондритов: первые результаты исследования методом дифракции отраженных электронов (EBSD) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. - 2020. - Т.495. - №1. - С.15-18. DOI: 10.31857/S2686739720110031. Импакт-фактор: 0.633. Личный вклад автора – 60%.

3. Берзин С.В., **Дугушкина К.А.**, Червяковская М.В., Червяковский В.С., Панкрушина Е.А. Бурлаков Е.В. Уточнение классификации и характеристика включения в метеорите Северный Колчим (Н3.4) // Литосфера. - 2021. - №3. - С.409-430. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-3-409-430. Импакт-фактор (РИНЦ): 0,681. Личный вклад автора – 60%.

Публикации в прочих изданиях, в сборниках и материалах конференций

1. **Дугушкина К.А.**, Берзин С.В. Первый микроксенолит в метеорите Gao-Cuenie (H5) // Ежегодник-2017. - 2018. - № 165. - С.177-179.
2. **Дугушкина К.А.**, Берзин С.В. Новый углистый хондрит из Северо-Западной Африки // Минералы: строение, свойства, методы исследования. - 2018. - № 9. - С.66-67.
3. Берзин С.В., **Дугушкина К.А.** Микроксенолит в метеорите Gao-Guenie (H5) // Минералы: строение, свойства, методы исследования. - 2018. - № 9. - С.26-27.
4. **Dugushkina K.A.**, Berzin S.V. Microxenolite in Gao-Guenie meteorite (H5) // Meteoritics & Planetary Science. - 2018. - Vol. 53. Is. S1. #6020.
5. **Дугушкина К.А.**, Панкрушина Е.А. Рамановская спектроскопия железистых оливинов и тугоплавких богатых форстеритом включений в углистых хондритах. // Металлогения древних и современных океанов. - 2019. - № 1. - С.291-293.
6. Берзин С.В., **Дугушкина К.А.**, Шиловских В.В., Замятин Д.А., Степанов С.Ю. Первые результаты изучения включений тугоплавкого форстерита в углистых хондритах методом дифракции отраженных электронов (EBSD) // Уральская минералогическая школа. - 2019. - № 25. - С.24-26.
7. **Дугушкина К.А.**, Берзин С.В., Замятин Д.А. Природа энстатитовой каймы в тугоплавких богатых форстеритом включениях: исследование методом EBSD // Минералы: строение, свойства, методы исследования. – 2019. - № 10. - С.80-81.
8. **Dugushkina K.A.**, Berzin S.V. New Carbonaceous Chondrite from Northwest Africa. In: Votyakov, S., Kiseleva, D., Grokhovsky, V., Shchapova, Y. (eds) Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. - 2020. - С.23-27.
9. Pastukhovich A.Iu., Berzin S.V., **Dugushkina K.A.**, Grokhovsky V.I., Chervyakovskaya M.V. New unique brachinite-like achondrite Calama 029 // Meteoritics & Planetary Science. - 2019. - Vol.54. #6148.
10. **Дугушкина К.А.**, Берзин С.В., Шиловских В.В., Замятин Д.А., Степанов С.Ю. Тугоплавкие включения, богатые форстеритом, в углистых хондритах: исследование методом EBSD // Металлогения древних и современных океанов. - 2020. - № 1. - С. 247-250.
11. Берзин С.В., **Дугушкина К.А.**, Пастухович А.Ю., Гроховский В.И. Уникальный метеорит Calama 029 // Минералы: строение, свойства, методы исследования. - 2020. - № 11. - С. 40-41.

12. **Дугушкина К.А.**, Берзин С.В., Пастухович А.Ю., Дэмбэрэл С., Гроховский В.И. Включения кремнезема в метеоритах Shinejinst (H4) и Северный Колчим (H3) // Минералы: строение, свойства, методы исследования. - 2020. - № 11. - С.83-84.
13. **Dugushkina K.A.**, Berzin S.V., Zamyatin D.A. The Nature of the Enstatite Rim in Refractory Forsterite-Rich Inclusions: An EBSD Study. In: Votyakov, S., Kiseleva, D., Grokhovsky, V., Shchapova, Y. (eds) Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. - 2020. - С. 59-63.
14. Pastukhovich A.Iu., Demberel S., Grokhovsky V.I., Sharygin V.V., Berzin S.V., **Dugushkina K.A.**, Larionov M.Yu., Muravyev L.A., Nasan-Ochir T., Petrova E.V., Yakovlev G.A. The First Russian-Mongolian Meteorite Expedition to the Gobi Desert. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. - 2020. - С.185-190.
15. **Дугушкина К.А.**, Берзин С.В. Метеорит Северный Колчим: уточнение классификации и минералогия включений // Уральская минералогическая школа. - 2020. - № 26. - С.32-33.
16. Берзин С.В., **Дугушкина К.А.**, Червяковский В.С. Включения тугоплавкого форстерита и хондры типа IA в обыкновенных и углистых хондритах // Минералы: строение, свойства, методы исследования. - 2021. - № 12. - С.14-15.
17. **Дугушкина К.А.**, Берзин С.В., Панкрушина Е.А., Пастухович А.Ю., Гроховский В.И., Чебыкин Н.С., Дэмбэрэл С. Богатые SiO₂ компоненты (SRC) в метеорите Shinejinst (H4): результаты исследований методами рамановской спектроскопии и дифракции отраженных электронов (EBSD) // Минералы: строение, свойства, методы исследования. - 2021.- № 12. - С.40-42.
18. **Dugushkina K.A.**, Berzin S.V., Pankrushina E.A., Pastukhovich A.Iu., Grokhovsky V.I., Chebykin N.S., Demberel S. SiO₂-rich components in ordinary chondrite Shinejinst (H4) // Meteoritics and Planetary Science. - 2021. - Volume 56, Issue S1. #6094.
19. Берзин С.В., **Дугушкина К.А.**, Бураков Е.В. Минералогия включений метеорита Северный Колчим (H3.4) // Материалы XIII Съезда Российского минералогического общества «Минералогия во всем пространстве сего слова: Проблемы развития минерально-сырьевой базы и рационального использования минерального сырья» и Федоровской сессии. - 2021. - Том 2. - С.5-6.
20. **Дугушкина К.А.**, Берзин С.В., Шиловских В.В., Замятин Д.А. Тугоплавкие богатые форстеритом включения в хондритах: изучения методом дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD) // Материалы XIII Съезда Российского минералогического общества «Минералогия во всем пространстве сего слова: Проблемы развития минерально-сырьевой базы и рационального использования минерального сырья» и Федоровской сессии. - 2021. - Том 2. - С. 213-214.
21. **Дугушкина К.А.**, Берзин С.В., Степанов С.Ю. Ксенолит в метеорите Челябинск (LL5): минералогия, строение и механизм формирования // XIII Всероссийская школа молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия»: Сборник материалов, ИЭМ РАН, Черноголовка. - 2022. - С. 23-24.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица А1. Каталог изученных метеоритов

№	Название метеорита	Тип
1	Северный Колчим	H3.4
2	Korra Korrabes	H3
3	Shinejinst	H4
4	Calama 077	H4
5	Calama 079	H4
6	Calama 080	H4
7	Gandom Beryan 013	H4
8	Харабали	H5
9	Каргополье	H5
10	Яраткулова	H5
11	Sierra Gorda 044	H5
12	Gandom Beryan 012	H5
13	Gao-Guenie	H5
14	Calama 085	(H(L)3)
15	Los Vientos 363	L5
16	Sierra Gorda 030	L5
17	Кунашак	L6
18	Озерное	L6
19	Урал	L6
20	Viñales	L6
21	Northwest Africa 7301	LL3
22	Челябинск	LL5
23	Calama 078	LL5
24	Calama 029	LL7
25	Allende	CV3
26	Northwest Africa 11781	CM2
27	Northwest Africa 11179	CM2
28	Jbilet Winselwan	CM2
29	Northwest Africa 10881	CO3

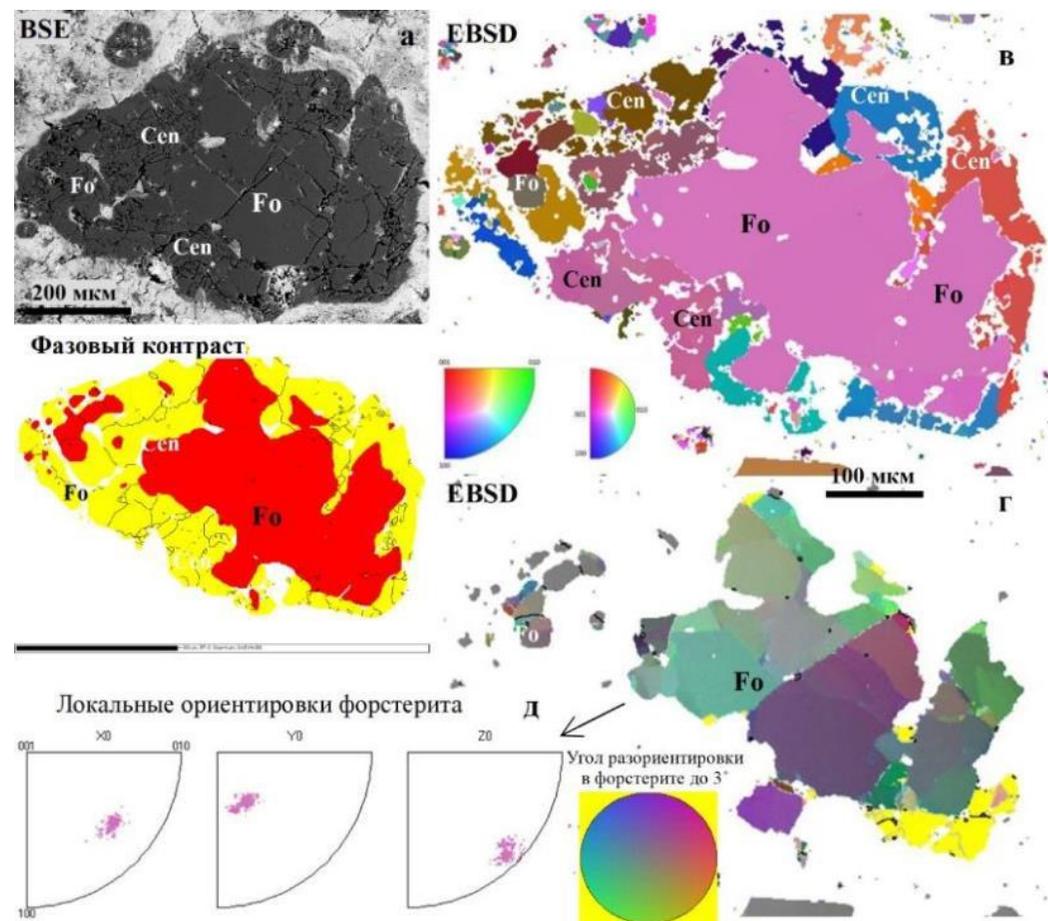


Рис. 1. Строение клиноэнстатитовой (Cen) каймы в богатом форстеритом (Fo) включении (RF-02) в метеорите NWA 11781 (CM2) по данным СЭМ и ДОЭ. а – изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE); б – фазовый контраст; в – карты ориентации кристаллов ДОЭ - цвета Эйлера; г-д – карта локальных ориентировок кристаллической решетки форстерита по данным ДОЭ с максимальной разориентировкой внутри кристалла до 3° и обратные полюсные фигуры для наиболее крупного зерна форстерита.

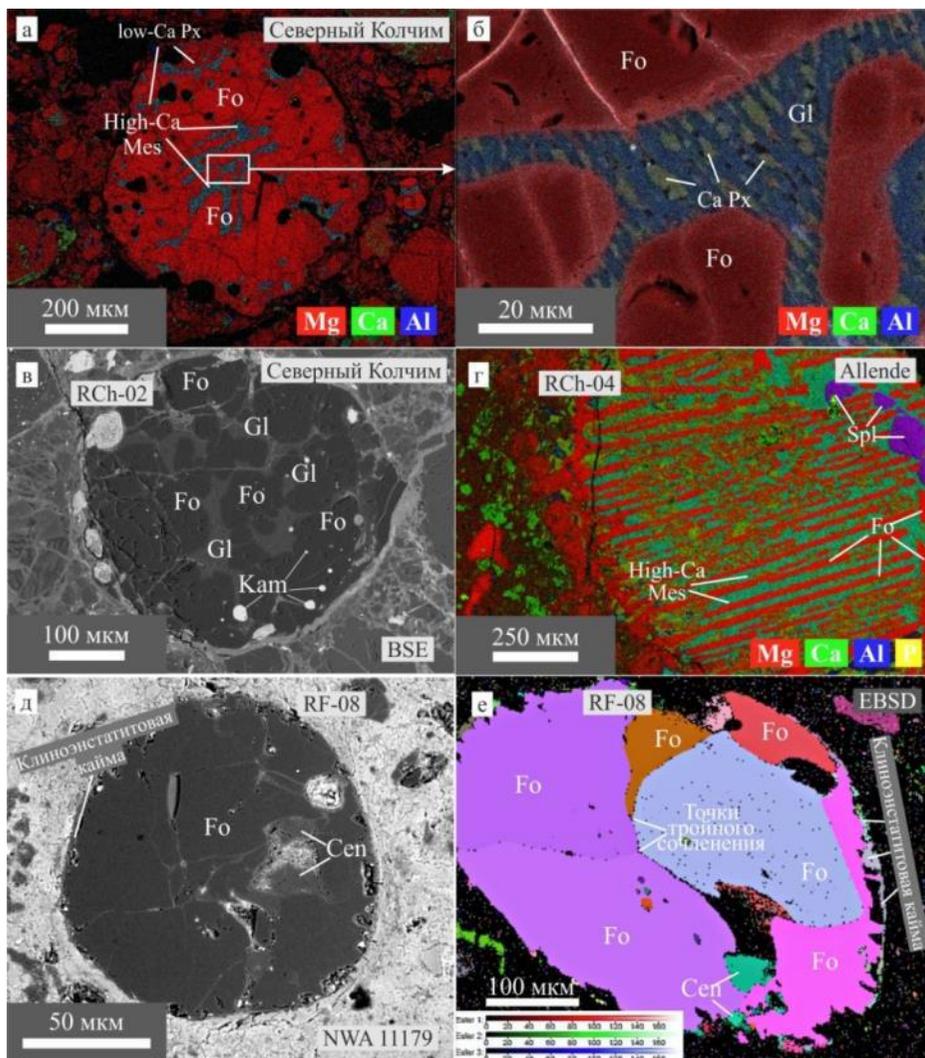


Рис. 2. Родительские хондры богатых форстеритом включений и округлое, хондроподобное богатое форстеритом включение.
 а, в – порфиоровые хондры из метеорита Северный Колчим,
 б – девитрифицированное стекло в мезостазисе хондры (а),
 г – хондра из метеорита Allende, д-е – округлое, хондроподобное богатое форстеритом включение RF-08; а,г – комбинированные элементные карты, б – комбинированная карта элементов, наложенная на изображение BSE, в, д - изображения в обратно рассеянных электронах (BSE), е – карта ДОЭ с цветами Эйлера.

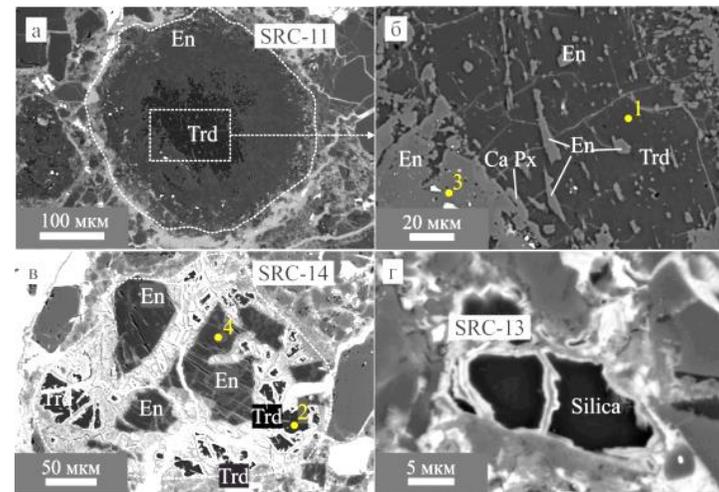


Рис. 3. Богатые кремнезёмом компоненты из метеорита Северный Колчим (НЗ.4).
 а,б – пироксеновая хондра, центральная часть которой сложена тридимитом (>99.4% SiO₂),
 в,г – включения тридимита в ассоциации с низкожелезистым клиноэнстатитом и гидроксидами железа. Изображения в обратно-отраженных электронах (BSE).
 En-клиноэнстатит, Ca Px-клинопироксен, Trd-тридимит,

● – точки регистрации рамановских спектров (1-4).

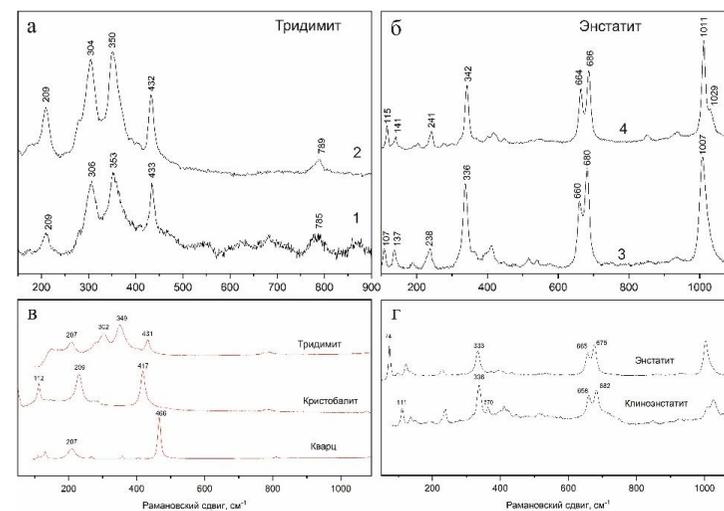


Рис. 4. Рамановские спектры.

а – тридимит (а – спектр 1 из SRC-11 (рис. 3 б), б – спектр 2 из SRC-14 (рис. 3 в)),
 б – энстатит (а – спектр 3 из SRC-11 (рис. 3 б), б – спектр 4 из SRC-14 (рис. 3 в)),
 в – эталонные спектры полиморфных модификаций SiO₂ (truff.unfo) (Kimura et al.,2005),
 г – эталонные спектры энстатита и клиноэнстатита (Lin, 2004).

Числа – положения колебательных мод.