

Уточнение классификации и характеристика включений в метеорите Северный Колчим (Н3.4)

С. В. Берзин, К. А. Дугушкина, М. В. Червяковская, В. С. Червяковский, Е. А. Панкрушина, Е. В. Бурлаков

Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mail: sbersin@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.07.2020 г., принята к печати 15.03.2021 г.

Объект исследования. Фрагменты метеорита Северный Колчим. **Материалы и методы.** Изучение метеорита Северный Колчим выполнено в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН. Изучение класта и включений производилось на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV фирмы JEOL с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments. Валовый состав анализировался при съемке ЭДС спектров с площади хондры на срезе. Состав минералов изучался на электронно-зондовом микронализаторе Cameca SX-100. Измерение содержаний редких элементов в оливине осуществлялось на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой NexION 300S (PerkinElmer) с приставкой для лазерной абляции NWR 213 (ESI) при диаметре кратера 25 мкм. **Результаты.** По совокупности петрографических и минералогических признаков классификация метеорита Северный Колчим была уточнена как Н3.4. Кроме того, данный метеорит может быть также дополнительно классифицирован как геномиктовая брекчия (Genomict breccia). В метеорите Северный Колчим был изучен класт размером 6 × 6 мм, сложенный хондритом Н3.9. Он имеет несколько более высокую степень ударных преобразований S2, чем вмещающий хондрит. В метеорите были найдены и изучены тугоплавкие богатые форстеритом включения (англ. *refractory forsterite rich objects*). Включения сложены низкожелезистым форстеритом ($f = 0.004–0.2$, где f – отношение $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})_{\text{mol}}$). **Заключение.** Предполагается, что порфировые оливиновые хондры, состоящие из тугоплавкого форстерита и высококальциевого стекла в мезостазисе, скорее всего, являются родительскими для тугоплавких богатых форстеритом включений. Найденные в матрице хондрита обогащенные Al хондры и пироксеновые хондры с тридимитом, вероятнее всего, являются ксеногенными и происходят из области формирования энстатитовых хондритов.

Ключевые слова: метеорит, хондрит, класт, брекчия, микроксенолиты, тугоплавкие богатые форстеритом включения, Al-хондры, высокомагнезиальные хондры

Источник финансирования

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90059, изучение методом лазерной абляции проведено в ЦКП УрО РАН “Геоаналитик” в рамках темы № AAAA-A18-118053090045-8 государственного задания ИГГ УрО РАН

Classification and characteristic of inclusions in the Severny Kolchim meteorite (H3.4)

Stepan V. Berzin, Kseniya A. Dugushkina, Maria V. Chervyakovskaya, Vasiliy S. Chervyakovskiy, Elizaveta A. Pankrushina, Evgeniy V. Burlakov

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Uralian Branch of RAS, 15 Acad. Vonsovsky st., Ekaterinburg, 620016 Russia, e-mail: sbersin@yandex.ru

Received 17.07.2020, accepted 15.03.2021

Research subject. Fragments of the Severny Kolchim meteorite. **Materials and methods.** The study was performed in the *Geoanalyst* Centre for Collective Use, Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS. The clast and inclusions were studied using a scanning electron microscope JSM-6390LV from JEOL with an energy dispersing attachment INCA Energy 450 X-Max 80. The bulk chondrule compositions were obtained by EDS analysis of whole chondrule areas in thin

Для цитирования: Берзин С.В., Дугушкина К.А., Червяковская М.В., Червяковский В.С., Панкрушина Е.А., Бурлаков Е.В. (2021) Уточнение классификации и характеристика включений в метеорите Северный Колчим (Н3.4). *Литосфера*, 21(3), 409–430. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-3-409-430

For citation: Berzin S.V., Dugushkina K.A., Chervyakovskaya M.V., Chervyakovskiy V.S., Pankrushina E.A., Burlakov E.V. (2021) Classification and characteristic of inclusions in the Severny Kolchim meteorite (H3.4). *Litosfera*, 21(3), 409–430. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-3-409-430

© С.В. Берзин, К.А. Дугушкина, М.В. Червяковская, В.С. Червяковский, Е.А. Панкрушина, Е.В. Бурлаков, 2021

sections. The composition of minerals was studied using an electron microprobe analyser Cameca SX100 equipped with five wavelength spectrometers. The concentrations of trace elements in olivine were measured using a mass spectrometer with inductively coupled plasma NexION 300S (PerkinElmer) with a laser ablation attachment NWR 213 (ESI) at a crater diameter of 25 microns. *Results.* According to the revealed set of petrographic and mineralogical features, the meteorite was clarified as H3.4. In addition, this meteorite can be further classified as genomict breccia. In the Severny Kolchim meteorite, a 6×6 mm clast fragment composed of chondrite H3.9 was studied. This inclusion has a slightly higher degree of S2 shock transformations compared to the host rock. Refractory forsterite-rich objects were found and studied. These inclusions are composed of low-ferroan forsterite ($f = 0.004\text{--}0.2$, f – ratio $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})_{\text{mol}}$). *Conclusion.* The porphyry olivine chondrules consisting of refractory forsterite and high-calcium glass in mesostasis are likely to be parental to the refractory forsterite-rich inclusions. Al-rich chondrules and pyroxene chondrule with tridymite identified in the matrix of the chondrite are likely to be xenogenic, originating from the formation area of enstatite chondrites.

Keywords: meteorite, chondrite, xenolith, breccia, microxenoliths, refractory forsterite rich objects, Al-chondrule, high-magnesian chondrule

Funding information

The study was funded by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-35-90059, a study using laser ablation was performed in Centre for Collective Use "Geoanalyst" under No. AAAA A18-118053090045-8 state project IGG UB RAS

Acknowledgements

The authors are grateful to A.V. Mikheeva, S.V. Lepkha, I.A. Danilenko, L.V. Leonova and I.A. Gottman (Collective Use Centre "Geoanalyst", IGG UB RAS) for their analytical support.

ВВЕДЕНИЕ

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

Первые описания метеорита Северный Колчим были составлены О.К. Ивановым (1969) и И.А. Юдина (Юдин, 1970; Meteoritical Bulletin..., 1970). М.А. Назаровым с соавторами в 1983 г. методом электронно-зондового микроанализа получены первые данные по составу минералов, которые позволили классифицировать метеорит как неравновесный обыкновенный хондрит H3 (Назаров и др., 1983). М.А. Назаров с коллегами, а позднее В.Н. Логинов сообщили о развитии пентландита на границе зерен троилита и гипергенного гётита (Назаров и др., 1983; Логинов, 2004). Позднее в нашей совместной работе был опубликован состав пентландита из Северного Колчима и на основании, в частности, этих данных показана закономерность в изменении состава пентландита между разными группами и петрологическими типами обыкновенных хондритов (Ерохин и др., 2016). В 2018 г. Ю.В. Ерохиным и соавторами (2018, 2019) был существенно уточнен минеральный состав метеорита Северный Колчим и определен состав всех слагающих его минералов методом микрозондового анализа. Многими исследователями отмечается, что в этом метеорите преобладают облом-

ки хондр (Назаров и др., 1983; Ерохин и др., 2018, 2019). Он претерпел гипергенные изменения в виде развития гидроксидов железа по многочисленным трещинам, замещения преобладающей части металла и небольшой доли троилита гётитом (Назаров и др., 1983; Ерохин и др., 2018, 2019). В метеорите была описана хондра с каймой, обогащенной троилитом (Ерохин и др., 2019).

Первое сообщение о находке в метеорите Северный Колчим ксенолита было опубликовано М.А. Назаровым и соавторами (1983). Авторами обнаружен микроксенолит "полевошпатового ахондрита" размером 0.8 мм, имеющий субоффитовую тонкозернистую структуру и состоящий из ортопироксена (60%), оливина (22%) и лейстов плагиоклаза (18%) (Назаров и др., 1983). Из опубликованных данных сложно сделать однозначный вывод о генезисе данного микроксенолита. Кроме того, сопоставимый с хондрами размер позволяет предположить, что микроксенолит может быть обломком крупной обогащенной Al хондры.

Нами в метеорите Северный Колчим были встречены богатые форстеритом включения (Берзин, 2018a; Berzin, 2018b; Берзин и др., 2019). Данные включения считаются одними из наиболее ранних минеральных образований в протосолнечной небуле (Pack et al., 2004, 2005; Scott, Krot, 2014). Тугоплавкие включения редко встречаются в обыкновенных хондритах. Поэтому целью работы стали поиск и изучение включений и микроксенолитов в метеорите Северный Колчим, а также уточнение классификации метеорита.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучен фрагмент метеорита Северный Колчим, который был предоставлен сотрудниками Уральского геологического музея (г. Екатеринбург). Изготовлены два прозрачно-полированных шлифа общей площадью $\approx 4 \text{ см}^2$ (С-Кол, СК-02) и две полированные пластиинки общей площадью $\approx 10 \text{ см}^2$. Шлиф и полированные пластины ориентированы перпендикулярно поверхности метеорита.

Изучение метеорита выполнено в ЦКП “Геоналитик” ИГГ УрО РАН. Анализ класта и включений производился на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV фирмы JEOL с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments. Валовый состав хондр исследовался при съемке ЭДС спектров с площади хондры на срезе. Изучение состава минералов осуществлялось на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX-100.

Измерение содержаний редких элементов в оливине производилось на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой NexION 300S (PerkinElmer) с приставкой для лазерной абляции NWR 213 (ESI) при диаметре кратера 25 мкм. Для транспортировки материала пробы после абляции из ячейки LA приставки в горелку МС использовался газ Не марки А (ТУ 0271-135-31323949-2005) и Ar (ГОСТ 10157-79). Все оборудование находится в помещении класса чистоты 7 ИСО. Обработка результатов осуществлена в программе GLITTER V4.4. с применением внутреннего стандарта SiO_2 , в качестве внешнего первичного стандарта использовали стандартное стекло NIST SRM 610 (в качестве вторичного – стандартное стекло NIST SRM 612), измеренного методом “взятия в вилку” через 10–12 измерений. Погрешность измерения стандартного стекла NIST 610 для измеренных элементов варьируется в диапазоне от 3 до 7% (1σ), для NIST 612 – от 5 до 20% (1σ).

Возбуждение спектров рамановского рассеяния в целях идентификации фазового состава выполнено на спектрометре Horiba LabRam HR800 Evolution, оборудованном микроскопом Olympus BX-FM, дифракционной решеткой 600 шт/мм и охлаждаемым CCD-детектором. Спектры возбуждались Не-Не- и Ar-лазером (длина волны 633 и 514 нм соответственно, мощность $\approx 2 \text{ мВт}$ за объективом); использовались объективы Olympus 100Х и 50Х (NA = 0.9 и 0.7) в режиме конфокальной съемки с пространственным разрешением 1–3 мкм (Щапова и др., 2020). Аналитический сигнал собирается объективом микроскопа в геометрии 180°. Калибровка осуществлялась при помощи неоновой лампы. Для идентификации фазового состава применялась база данных KnowItAll и Ruff.info.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Метеорит Северный Колчим сложен хондрами, обломками хондр и обломочной тонкозернистой матрицей. В метеорите преобладают порфировые оливиновые (РО) и оливин-пироксеновые хондры (POP). Также присутствуют порфировые пироксеновые (РР), эксцентрически лучистые пироксеновые (RP), колосниковые оливиновые (ВО) и скрыто-кристаллические (СС) хондры. Хондры варьируют по размеру от 0.1 до 0.8 мм, средний размер ≈ 0.3 мм, что достаточно типично для Н-хондритов, по данным (Scott, Krot, 2014). Вокруг нескольких хондр наблюдаются мелкозернистые расплавные каймы (igneous rim), обогащенные металлом. Такие каймы свидетельствуют о повторяющемся процессе ходрообразования, т.е. ранее сформированные хондры обрастают хондрами более поздних генераций (Krot et al., 2018). Мезостазис хондр представлен полупрозрачным кислым стеклом. В мезостазисе некоторых пироксеновых и оливин-пироксеновых порфировых хондр наблюдается появление субмикронных игольчатых скелетных кристаллов диопсида.

Матрица в метеорите имеет тонкозернистую структуру, местами переходящую в скрыто-кристаллическую, содержит многочисленные обломки хондр и более мелкие обломочные зерна оливина и пироксена. Обломочные зерна кислого стекла крайне редки. Матрица непрозрачная или практически непрозрачная в тонком шлифе, при этом на ее непрозрачность влияет и значительная степень земного выветривания. Матрица имеет следы начавшейся перекристаллизации, она пронизана тончайшими микропрожилками гидроксидов железа, доля которых доходит до 3–5% от объема метеорита. Размеры новообразованных зерен оливина и пироксена достигают первых десятков микрометров. Металл и троилит присутствуют в виде как вкрапленности в некоторых хондрах, так и отдельных зерен в матрице. Размеры зерен металла и троилита составляют 50–200 мкм. Кроме того, в метеорите встречено и крупное пластинчатое скопление зерен троилита размером 3×1 мм.

Металл окислен более чем на 60%, зерна троилита окислены в среднем на 20–30%. Силикаты в тонком шлифе откашены в коричневый цвет.

Структура и состав хондритового включения

В одном из шлифов нами был обнаружен класти (обломок), отличающийся по структуре от вмещающего хондриита (рис. 1). Данный класти на срезе имеет остроугольную обломочную форму, близкую к трапециевидной, и размер 6 × 6 мм. Границы резкие, хорошо прослеживаемые. Через класти и вмещающий его хондриит проходят насквозь трещины, заполненные земными гипергенными гидроксидами железа.

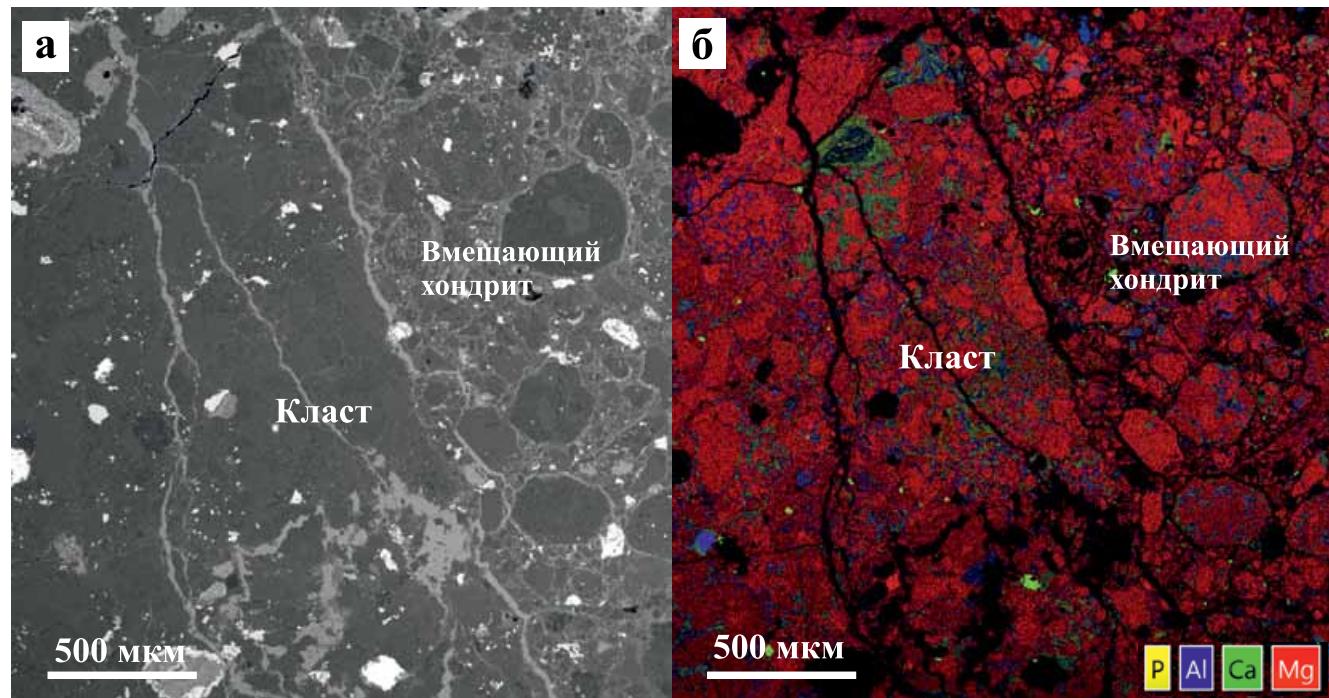


Рис. 1. Класт хондрита H3.9 в матрице метеорита Северный Колчим.

а – изображение в обратноотраженных электронах (BSE); б – комбинированная карта распределения элементов (Mg – красный, Ca – зеленый, Al – синий, P – желтый).

Fig. 1. Chondrite clast 3.9 in the Severny Kolchim meteorite matrix.

а – back-scattered electron image (BSE); б – combined elemental map (Mg – red, Al – blue, Ca – green, P – yellow).

Класт состоит из хондр и перекристаллизованной матрицы. По размеру и типам хондр он не отличается от вмещающего хондрита. В нем, как и в окружающем его метеорите, встречены обломки хондр. Их границы четкие и не затронуты перекристаллизацией. Матрица класти практически прозрачная, местами хорошо просвечивающая в тонком шлифе. Матрица состоит из новообразованных индивидов оливина и пироксена размером 5–100 мкм, в интерстициях между которыми наблюдаются кислое стекло и, возможно, тонкозернистый плагиоклаз. Металл и сульфиды находятся в виде тонкой вкрапленности в некоторых хондрах и матрице, а также в виде зерен неправильной формы размером 100–700 мкм. Все это однозначно свидетельствует о большей степени высокотемпературного метаморфизма по сравнению с таковой вмещающего хондрита.

Класт затронут процессами выветривания меньше, чем вмещающий его хондрит. Металл замещен гидроксидами на 10–20%, троилит замещается гидроксидами только вблизи сквозных трещин, силикаты хондр и матрицы имеют слабый коричневый оттенок. Вероятно, это связано с тем, что более перекристаллизованная матрица обломка была менее проницаема для земных поверхностных вод по сравнению с вмещающим хондритом.

Железистость оливина в класте варьирует от 0.16 до 0.23 (табл. 1) и в целом совпадает с железистостью оливина из вмещающего хондрита, как по нашим данным, так и по данным Ю.В. Ерохина с соавторами (2018, 2019). Вариации содержания железа в оливине в класте и вмещающем хондрите оценены при помощи процентного среднего отклонения (Percent Mean Deviation, или PMD) (Dodd et al., 1967). Показатель PMD для содержания FeO в оливине из класти, по данным микрозондового анализа, равен 5% (N = 23). Аналогичный показатель для оливина из вмещающего хондрита, рассчитанный по нашим микрозондовым анализам и анализам, опубликованным Ю.В. Ерохиным с соавторами (2019), составил 35% (N = 38). Гистограммы по железистости форстерита из вмещающего метеорита и хондрилового класти изображены на рис. 2.

Ортопироксен в класте имеет железистость f – 0.17 (см. табл. 1). Состав ортопироксена из класти, согласно данным Ю.В. Ерохина с соавторами (2018, 2019), в целом совпадает с составом ортопироксена из вмещающего хондрита. Аналогично совпадает состав хромовой шпинели (см. табл. 1) в класте и вмещающем его метеорите.

Металл в класте представлен камаситом, тэнитом и тетратэнитом, состав этих минералов приведен в табл. 2. Состав камасита и тэнита варьирует

Таблица 1. Состав минералов в класте и вмещающем хондрите Северный Колчим, мас. %

Table 1. Composition of minerals in the clast and in the host chondrite Severny Kolchim, wt. %

№	Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	f
Вмещающий хондрит													
70	<i>Ol</i>	39.5	H. o.	H. o.	H. o.	16.4	0.49	44.3	H. o.	H. o.	H. o.	100.8	0.17
71	<i>Ol</i>	38.9	H. o.	H. o.	H. o.	16.3	0.46	43.6	H. o.	H. o.	H. o.	99.6	0.17
74	<i>Ol</i>	39.0	H. o.	0.47	0.37	17.1	0.52	41.7	0.52	0.23	0.12	100.1	0.19
58	<i>Ol</i>	39.7	H. o.	H. o.	H. o.	17.6	0.48	42.5	0.05	H. o.	H. o.	100.4	0.19
59	<i>Ol</i>	38.9	H. o.	0.03	H. o.	18.3	0.45	41.6	H. o.	H. o.	H. o.	99.5	0.20
65	<i>Ol</i>	39.5	H. o.	H. o.	H. o.	18.4	0.46	42.1	H. o.	H. o.	H. o.	100.6	0.20
78	<i>Ol</i>	39.4	H. o.	H. o.	H. o.	17.4	0.47	42.9	H. o.	H. o.	H. o.	100.2	0.18
67	<i>Opx</i>	56.4	H. o.	0.48	0.87	11.0	0.20	30.4	0.62	0.05	H. o.	100.1	0.17
68	<i>Opx</i>	55.5	H. o.	0.45	0.69	9.9	0.53	30.7	0.68	H. o.	H. o.	98.5	0.15
69	<i>Opx</i>	58.1	H. o.	0.35	0.52	3.8	0.51	35.5	0.64	H. o.	H. o.	99.5	0.06
111	<i>Opx</i>	57.9	H. o.	0.17	0.41	6.4	0.33	34.6	0.23	H. o.	H. o.	100.1	0.09
95	<i>Opx</i>	57.5	H. o.	0.19	0.38	6.8	0.30	34.4	0.18	0.09	H. o.	99.8	0.10
96	<i>Opx</i>	58.7	H. o.	0.24	0.41	2.4	0.25	37.6	0.23	H. o.	H. o.	99.8	0.03
90	<i>Opx</i>	56.2	H. o.	0.46	0.56	6.6	0.29	34.5	0.36	0.07	H. o.	99.0	0.10
75	<i>Crsp</i>	H. o.	1.84	6.22	58.04	29.0	0.70	3.2	H. o.	H. o.	H. o.	99.1	
Класт													
13	<i>Ol</i>	38.8	H. o.	0.10	H. o.	15.2	0.45	43.9	0.18	H. o.	H. o.	98.8	0.16
14	<i>Ol</i>	38.8	H. o.	0.24	H. o.	16.3	0.47	42.5	0.47	H. o.	H. o.	99.0	0.18
15	<i>Ol</i>	38.9	H. o.	H. o.	H. o.	17.2	0.42	43.6	0.06	H. o.	H. o.	100.2	0.18
19	<i>Ol</i>	38.6	H. o.	0.24	H. o.	18.7	0.49	41.0	H. o.	H. o.	H. o.	99.1	0.20
27	<i>Ol</i>	38.8	0.14	H. o.	H. o.	17.9	0.53	42.7	H. o.	H. o.	H. o.	100.1	0.19
28	<i>Ol</i>	38.7	0.13	H. o.	H. o.	17.9	0.45	43.0	H. o.	H. o.	H. o.	100.3	0.19
11	<i>Ol</i>	39.1	H. o.	H. o.	H. o.	17.4	0.46	44.1	H. o.	H. o.	H. o.	101.1	0.18
12	<i>Opx</i>	55.6	0.15	0.50	0.58	10.9	0.46	30.1	0.45	H. o.	H. o.	98.7	0.17
16	<i>Opx</i>	55.3	0.15	0.43	0.39	11.0	0.48	29.6	0.77	H. o.	H. o.	98.1	0.17
17	<i>Gl</i>	59.6	H. o.	22.2	1.03	2.5	H. o.	0.2	5.48	6.68	0.45	98.2	
25	<i>Gl</i>	62.4	0.23	9.60	H. o.	8.3	0.16	13.5	1.17	4.77	0.07	100.3	
29	<i>Gl</i>	56.8	0.16	21.7	H. o.	4.8	H. o.	0.2	5.78	7.03	0.29	97.1	
30	<i>Gl</i>	58.3	0.31	21.1	1.58	2.5	H. o.	0.6	5.72	7.16	0.30	97.7	
33	<i>Crsp</i>	H. o.	1.31	5.59	57.8	29.7	0.82	2.4	0.32	H. o.	H. o.	98.0	

Примечание. Здесь и далее: *Ol* – оливин, *Opx* – ортопироксен, *Gl* – кислое стекло, *Crsp* – хромовая шпинель, сумма Fe³⁺ и Fe²⁺ представлена в виде FeO, f – отношение Fe/(Fe + Mg)_{mol} в оливине и пироксене. Здесь и далее в таблицах состав минералов определен методом EPMA на Cameca SX100 (ИГГ УрО РАН). Н. о. – содержание элемента ниже пределов обнаружения.

Note. Hereafter: *Ol* – olivine, *Opx* – orthopyroxene, *Gl* – glass, *Crsp* – chrome spinel, the sum of Fe³⁺ and Fe²⁺ is represented as FeO, f-ratio Fe/(Fe + Mg)_{mol} in olivine and pyroxene. Hereinafter in the tables, the composition of the minerals was determined by EPMA on a Cameca SX100 (IGG UB RAS). H. o. – element content below the detection limits.

в пределах, мас. %: камасит – Ni от 3.45 до 7.13, тэтнит – Ni от 30.49 до 45.32. Камасит и тэнит в класте попадают в соответствующие поля составов камасита и тэнита во вмещающем хондрите, однако характеризуются несколько меньшими вариациями состава. Тетратэнит в класте соответствует составу тетратэнита во вмещающем хондрите (см. табл. 2, ан. 41).

Фосфаты в класте представлены хлорапатитом и мерриллитом (табл. 3). По содержаниям F и Cl апатит из класте соответствует апатиту из вмеща-

ющего хондриита, состав которого варьирует в широких пределах (Ерохин и др., 2019).

В класте обнаружена высокомагнезиальная хондра размером 400 мкм с неровными границами. Хондра сложена преимущественно низкожелезистым ортопироксеном (f = 0.06), содержит небольшое количество кислого стекла, а также включения металла и сульфидов, частично замещенных гидроксидами железа. Состав минералов высокомагнезиальной хондры в класте приведен в табл. 4.

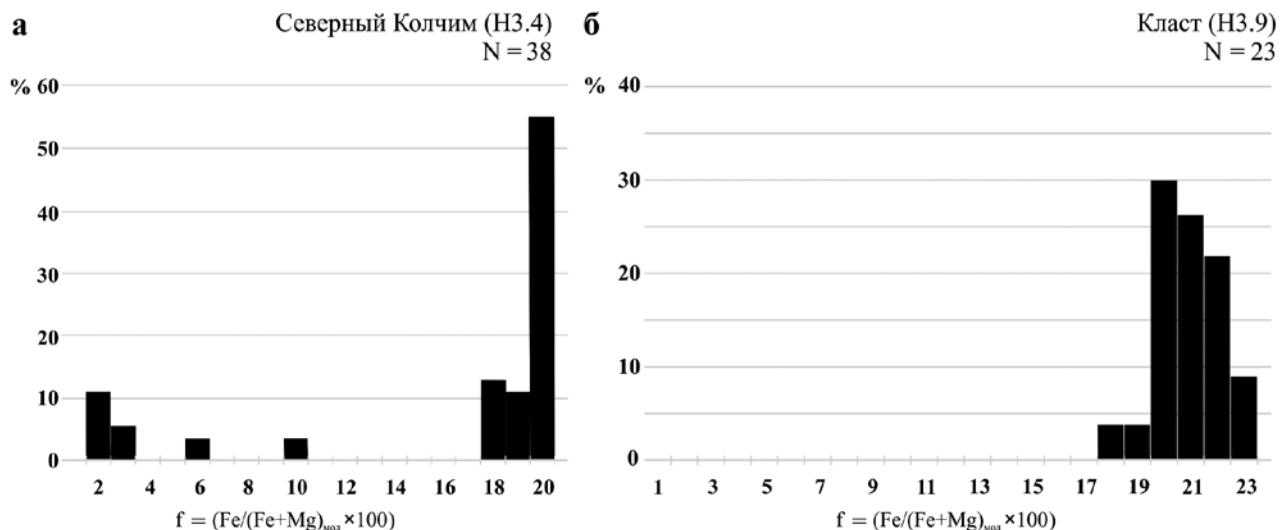


Рис. 2. Гистограммы железистости форстерита из вмещающего метеорита (а) и хондритового кластика (б).

Fig. 2. Histograms of forsterite ferruginosity from the host meteorite (a) and chondrite clast (b).

Тугоплавкие, богатые форстеритом включения

Всего в метеорите было найдено 23 тугоплавких, богатых форстеритом включения. Большая их часть имеет остроугольную обломочную, реже округлую форму, размер 50–250 мкм и, по всей видимости, представлена фрагментами более крупных объектов (рис. 3а–г).

Включения сложены низкожелезистым форстеритом ($f = 0.004$ – 0.10) (табл. 5). При этом форстерит содержит существенную примесь “тугоплавких” элементов Ca и Al (CaO – 0.30–0.98 и Al₂O₃ – 0.11–0.37 мас. %) и имеет аномально низкие содержания умеренно летучих Mn и Ni (ниже пределов обнаружения электронно-зондового микронализа, см. табл. 5). В краевых частях зерен форстерита содержание железа возрастает ($f = 0.06$ – 0.10), при этом содержание CaO уменьшается до 0.10 мас. %, Al₂O₃ – до 0.17 мас. % и ниже, появляется примесь MnO – до 0.22 мас. % (см. табл. 5).

В некоторых тугоплавких, богатых форстеритом включениях оливин находится в срастании с энстатитом ($f = 0.01$ – 0.07), который содержит примеси CaO – до 0.5, Al₂O₃ – до 1.6 и пониженное содержание MnO – 0.13 мас. % и менее.

Также в некоторых включениях наблюдается присутствие высококальциевого стекла, средний состав которого, по данным ЭДС, мас. %: SiO₂ – 46.8 ± 1.8 , TiO₂ – 0.8 ± 0.6 , Al₂O₃ – 29.5 ± 1.1 , Cr₂O₃ – 0.2, FeO – 1.4 ± 0.4 , MgO – 2.1 ± 1.7 , CaO – до 15.7, Na₂O – до 14.9, K₂O – 1.8 (N = 4) (см. рис. 3в, г).

Микроэлементный состав оливина из тугоплавких богатых форстеритом включений (RF-20, RF-22, RF-25, RF-26) и из хондр, содержащих тугоплавкий форстерит (RCh-01, RCh-02), по данным

лазерной аблации, приведен в табл. 6, диаграмма распределения элементов показана на рис. 4. Для сравнения на спайдер-диаграмму также были вынесены данные по LA-ICP-MS низкожелезистого тугоплавкого форстерита из углистых хондридов (Pack et al., 2005). В изученных включениях форстерита прослеживаются обогащение труднолетучими элементами (Zr, Sc, Y, Ti, V) и обеднение умеренно летучими элементами (Cr, Co, Ni, Mn). В целом полученные анализы попадают в поле спектров тугоплавкого форстерита из углистых хондридов (Pack et al., 2005).

Хондры, содержащие тугоплавкий форстерит (refractory forsterite)

В метеорите Северный Колчим встречены две хондры и один обломок хондры, содержащие тугоплавкий форстерит. Хондры относятся к порфировым оливиновым (РО). Они имеют немного неровную округлую форму, размер 400 и 700 мкм соответственно.

В обеих хондрах находится практически незональный низкожелезистый тугоплавкий форстерит ($f = 0.01$, CaO – 0.4–0.6 мас. %). Мезостазис хондры RCh-02 состоит из нераскристаллизовавшегося высококальциевого стекла, средний состав которого по данным ЭДС, мас. %: SiO₂ – 55.2 ± 0.1 , TiO₂ – 0.8, Al₂O₃ – 21.1 ± 0.2 , Cr₂O₃ – 0.6, FeO – 0.4, MgO – 5.6 ± 0.2 , MnO – H. o., CaO – 11.3 ± 0.2 , Na₂O – 4.8 ± 0.2 , K₂O – 0.3% (N = 2). Мезостазис хондры RCh-01 представлен девитрифицированным стеклом близкого состава со структурами распада клинопироксена в кислом стекле (см. рис. 3д, е). Размер микрокристаллов клинопироксена 2–5 мкм.

Таблица 2. Состав металла и троилита в класте и во вмещающем хондрите Северный Колчим (выборочные анализы), мас. %

Table 2. Composition of metal and troilite in the clast and in the host chondrite Severny Kolchim (sample analyzes), wt. %

№	Минерал	Fe	Ni	S	Co	Сумма
Вмещающий хондрит						
90	<i>Kam</i>	94.1	5.7	H. o.	0.30	100.1
95	<i>Kam</i>	94.6	6.3	H. o.	0.40	101.3
99	<i>Kam</i>	92.9	7.1	H. o.	0.38	100.4
100	<i>Kam</i>	92.6	8.2	H. o.	0.38	101.2
77	<i>Tae</i>	57.4	43.2	H. o.	H. o.	100.6
91	<i>Tae</i>	64.3	36.9	H. o.	H. o.	101.2
94	<i>Tae</i>	67.9	32.5	H. o.	H. o.	100.4
87	<i>Tt</i>	47.4	52.9	H. o.	H. o.	100.3
88	<i>Tt</i>	50.12	50.4	H. o.	H. o.	100.5
102	<i>Tt</i>	48.7	52.0	H. o.	H. o.	100.7
Класт						
40	<i>Kam</i>	93.5	5.7	H. o.	0.46	99.7
47	<i>Kam</i>	92.9	5.5	H. o.	0.28	98.7
54	<i>Kam</i>	91.1	6.4	H. o.	0.31	97.8
31	<i>Kam</i>	92.8	7.1	H. o.	0.43	100.3
33	<i>Kam</i>	94.7	6.2	H. o.	0.37	101.3
37	<i>Kam</i>	95.7	3.5	H. o.	0.40	99.6
39	<i>Kam</i>	95.8	5.2	H. o.	0.28	101.3
40	<i>Kam</i>	94.3	5.5	H. o.	0.39	100.2
44	<i>Kam</i>	94.8	6.5	H. o.	0.45	101.8
45	<i>Kam</i>	93.9	7.0	H. o.	0.44	101.3
46	<i>Kam</i>	93.4	7.1	H. o.	0.39	100.9
48	<i>Kam</i>	94.9	5.9	H. o.	0.38	101.2
50	<i>Kam</i>	96.6	5.2	H. o.	0.42	102.2
53	<i>Kam</i>	94.4	6.6	H. o.	0.46	101.5
54	<i>Kam</i>	93.7	6.3	H. o.	0.39	100.4
55	<i>Kam</i>	94.4	6.1	H. o.	0.39	100.9
46	<i>Tae</i>	68.8	30.5	H. o.	H. o.	99.3
35	<i>Tae</i>	59.1	39.7	H. o.	H. o.	98.8
43	<i>Tae</i>	65.3	34.8	H. o.	H. o.	100.1
41	<i>Tt</i>	48.8	50.8	H. o.	0.50	100.1
44	<i>Tro</i>	63.6	0.1	36.3	H. o.	100.0
Магнезиальная хондра в класте						
48	<i>Kam</i>	91.6	6.5	H. o.	0.35	98.5
49	<i>Tro</i>	63.2	0.8	36.1	H. o.	100.1
52	<i>Tro</i>	63.1	H. o.	36.2	H. o.	99.3

Примечание. *Kam* – камасит, *Tae* – тэнит, *Tt* – тетратэнит, *Tro* – троилит.

Note. *Kam* – kamacite, *Tae* – taenite, *Tt* – tetrataenite, *Tro* – troilite.

В хондре RCh-01 по всему внешнему периметру наблюдается замещение оливина низкожелезистым энстатитом. Средний состав энстатита по данным ЭДС: $\text{En}_{98 \pm 0.01} \text{Fs}_{1 \pm 0.01} \text{Wo}_{1 \pm 0.01}$ (N = 3). Содержание MnO ниже пределов обнаружения. Данный энстатит близок по составу к энстатиту из других включений тугоплавкого форстерита. В обеих хондрах присутствуют каплевидные включения металла и троилита, преимущественно сконцентрированные в наружной части хондр. Микроэлементный состав форстерита из хондр (RCh-01, RCh-02) по данным лазерной абляции, представлен в табл. 6, диаграмма распределения элементов показана на рис. 4. По распределению редких элементов форстерит из хондр близок по составу к обособленным обломочным зернам тугоплавкого форстерита, что свидетельствует в пользу их возможного генетического родства.

Обломок хондры имеет размер 60×25 мкм и содержит идиоморфные зерна оливина, погруженные в частично раскристаллизованное стекло. В оливине наблюдается зональность по составу. Центральная часть зерен сложена низкожелезистым форстеритом ($f = 0.01$, $\text{CaO} = 0.6$ мас. %), периферия более железистая ($f = 0.15$). Мезостазис состоит из кислого стекла со скелетными игольчатыми кристаллами клинопироксена. Средний состав стекла по данным ЭДС – анализов, мас. %: $\text{SiO}_2 = 64.2 \pm 0.1$, $\text{TiO}_2 = 0.8 \pm 0.2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.6 \pm 0.2$, $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0.4 \pm 0.1$, $\text{FeO} = 2.8 \pm 1.7$, $\text{MnO} = 0.7 \pm 0.3$, $\text{MgO} = 2.4 \pm 0.3$, $\text{CaO} = 3.9 \pm 0.5$, $\text{Na}_2\text{O} = 9.3 \pm 0.5$, $\text{K}_2\text{O} = 0.2$ (N = 2).

Высокомагнезиальные хондры и их обломки

В метеорите Северный Колчим нами были найдены и изучены 11 высокомагнезиальных хондр и их обломков, а также 5 мелких фрагментов низкожелезистого энстатита.

Высокомагнезиальные хондры представлены порфировыми пироксеновыми и оливин-пироксеновыми разностями, состоящими из низкожелезистого энстатита ($f = 0.01$ – 0.06) и более железистого оливина ($f = 0.02$ – 0.16). Хондры имеют как окружную, так и неровную форму (рис. 5). Размер варьирует в широких пределах – от 100 до 800 мкм. Примерно в половине хондр присутствуют каплевидные включения металла и троилита. Как отмечалось ранее, одна высокомагнезиальная хондра была найдена внутри кластика. Валовый состав высокомагнезиальных хондр представлен в табл. 7.

Энстатит внутри высокомагнезиальных хондр представлен слабо зональными зернами. Содержание FeO варьирует от 0.5–2.5 мас. % в центральной части зерен до 4.0–7.0 мас. % в краевых частях (см. табл. 4). Данная зональность может быть связана как с процессом кристаллизации энстатита, так и с начавшимся высокотемпературным метаморфизмом хондриита. В энстатите из высокомагнезиальной хондры внутри кластика наблюдается несколь-

Таблица 3. Состав мерриллита и апатита из класта в метеорите Северный Колчим, мас. %**Table 3.** Composition of merrillite and apatite from the clast in the Severny Kolchim meteorite, wt %

№	Минерал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	F	P ₂ O ₅	Cl	Сумма
58	Меррилллит	1.2	0.09	2.4	3.53	45.3	2.87	Н. о.	44.6	Н. о.	100.20
57	Апатит	0.3	Н. о.	1.1	Н. о.	52.6	0.31	0.36	41.2	5.63	101.60
59	Апатит	0.9	Н. о.	1.1	1.14	51.6	0.39	0.47	40.2	5.58	101.60

Таблица 4. Состав силикатов в высокомагнезиальных хондрах и включениях низкожелезистого энстатита в метеорите Северный Колчим, мас. %**Table 4.** The composition of high-magnesian chondrules and the inclusions of low-Fe the enstatite in meteorite Severny Kolchim, wt %

Объект	№	Min	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	f
Высокомагнезиальные хондры														
MgCh-01	104	<i>Opx</i>	56.9	0.14	5.38	0.58	3.6	0.19	29.4	2.52	0.91	Н. о.	99.6	0.06
	105	<i>Opx</i>	59.4	0.19	1.18	0.52	0.5	Н. о.	38.2	0.57	Н. о.	Н. о.	100.6	0.01
	114	<i>Ol</i>	42.4	Н. о.	0.01	0.43	2.5	0.40	53.7	Н. о.	Н. о.	Н. о.	99.4	0.03
	116	<i>Ol</i>	42.6	Н. о.	0.01	Н. о.	2.4	0.36	54.2	0.05	Н. о.	Н. о.	99.6	0.02
	115	<i>Opx</i>	56.4	Н. о.	0.25	Н. о.	1.9	0.41	40.3	0.21	Н. о.	Н. о.	99.4	0.03
	117	<i>Opx</i>	58.2	Н. о.	0.28	0.48	2.1	0.34	37.1	0.25	Н. о.	Н. о.	98.6	0.03
	118	<i>Opx</i>	59.0	Н. о.	0.26	0.42	1.9	0.26	37.8	0.22	Н. о.	Н. о.	99.9	0.03
MgCh-03	121	<i>Opx</i>	57.7	Н. о.	0.24	0.47	7.2	0.28	34.0	0.19	Н. о.	Н. о.	100.2	0.11
	123	<i>Opx</i>	58.9	Н. о.	0.24	Н. о.	2.8	0.12	36.9	0.12	Н. о.	Н. о.	99.2	0.04
	124	<i>Opx</i>	59.2	Н. о.	0.15	0.37	4.1	0.20	36.1	0.13	Н. о.	Н. о.	100.2	0.06
	125	<i>Opx</i>	57.8	Н. о.	0.33	0.69	3.0	0.13	35.9	0.22	Н. о.	Н. о.	98.1	0.05
	119	<i>Gl</i>	58.4	0.74	21.4	0.67	4.5	Н. о.	0.5	2.79	8.51	0.45	97.9	
	120	<i>Gl</i>	60.1	0.59	19.6	0.71	3.8	Н. о.	2.3	3.13	8.41	0.42	99.0	
Высокомагнезиальная хондра внутри класта хондриита H3.9														
MgCh-05	21	<i>Opx</i>	57.7	Н. о.	1.56	0.48	4.0	0.35	34.0	0.96	0.24	0.09	99.5	0.06
	22	<i>Opx</i>	57.3	Н. о.	0.23	0.46	4.5	0.35	36.4	0.38	0.13	Н. о.	99.9	0.06
	23	<i>Gl</i>	69.5	0.46	17.2	Н. о.	0.7	0.19	0.82	1.13	4.80	2.93	97.9	
	24	<i>Gl</i>	68.7	0.52	16.9	0.36	0.8	0.23	2.15	3.56	4.69	2.81	100.8	
Мелкие включения низкожелезистого энстатита														
En-01	101	<i>Opx</i>	59.4	Н. о.	0.32	0.63	1.8	0.20	37.9	0.22	Н. о.	Н. о.	100.5	0.03
En-02	110	<i>Opx</i>	57.8	0.16	1.68	0.54	0.7	0.13	36.5	2.33	Н. о.	Н. о.	99.8	0.01
En-03	91	<i>Opx</i>	58.2	Н. о.	0.25	0.61	3.6	0.40	36.9	0.25	Н. о.	Н. о.	100.2	0.05
	92	<i>Opx</i>	58.4	Н. о.	0.21	0.56	3.5	0.28	37.5	0.17	Н. о.	Н. о.	100.7	0.05
En-04	94	<i>Opx</i>	57.5	Н. о.	0.20	0.47	5.1	0.29	35.7	0.20	Н. о.	Н. о.	99.5	0.07

ко более высокое содержание FeO – 4.0–4.5%, что, вероятно, связано с большей степенью уравновешивания составов ортопироксена. Отличительной чертой энстатита из высокомагнезиальных хондр по сравнению с энстатитом из тугоплавких, богатых форстеритом вклюений, является постоянное присутствие в нем примеси MnO выше пределов обнаружения микрозондового анализа – 0.12–0.41 мас. % (см. табл. 4).

В большинстве высокомагнезиальных хондр присутствует относительно железистый оливин с содержанием FeO 11.4–13.5 мас. %. В наиболее крупной хондре MgCh-06 встречены зональные зерна

оливина с вариациями содержаний FeO T= 4.5–15.8 мас. %. И только в одной хондре MgCh-03 обнаружен относительно низкожелезистый оливин с содержанием FeO 2.4–2.5 мас. % (см. табл. 4). В низкожелезистом оливине из высокомагнезиальных хондр, в отличие от богатых форстеритом вклюений, наблюдаются присутствие примеси MnO (0.36–0.41 мас. %) и отсутствие заметных примесей “тугоплавких” элементов Ca, Al, Ti (см. табл. 4).

Мезостазис в высокомагнезиальных хондрах представлен кислым стеклом, состав которого варьирует между отдельными хондрами. В стекле в целом наблюдается преобладание Na над Ca. В сте-

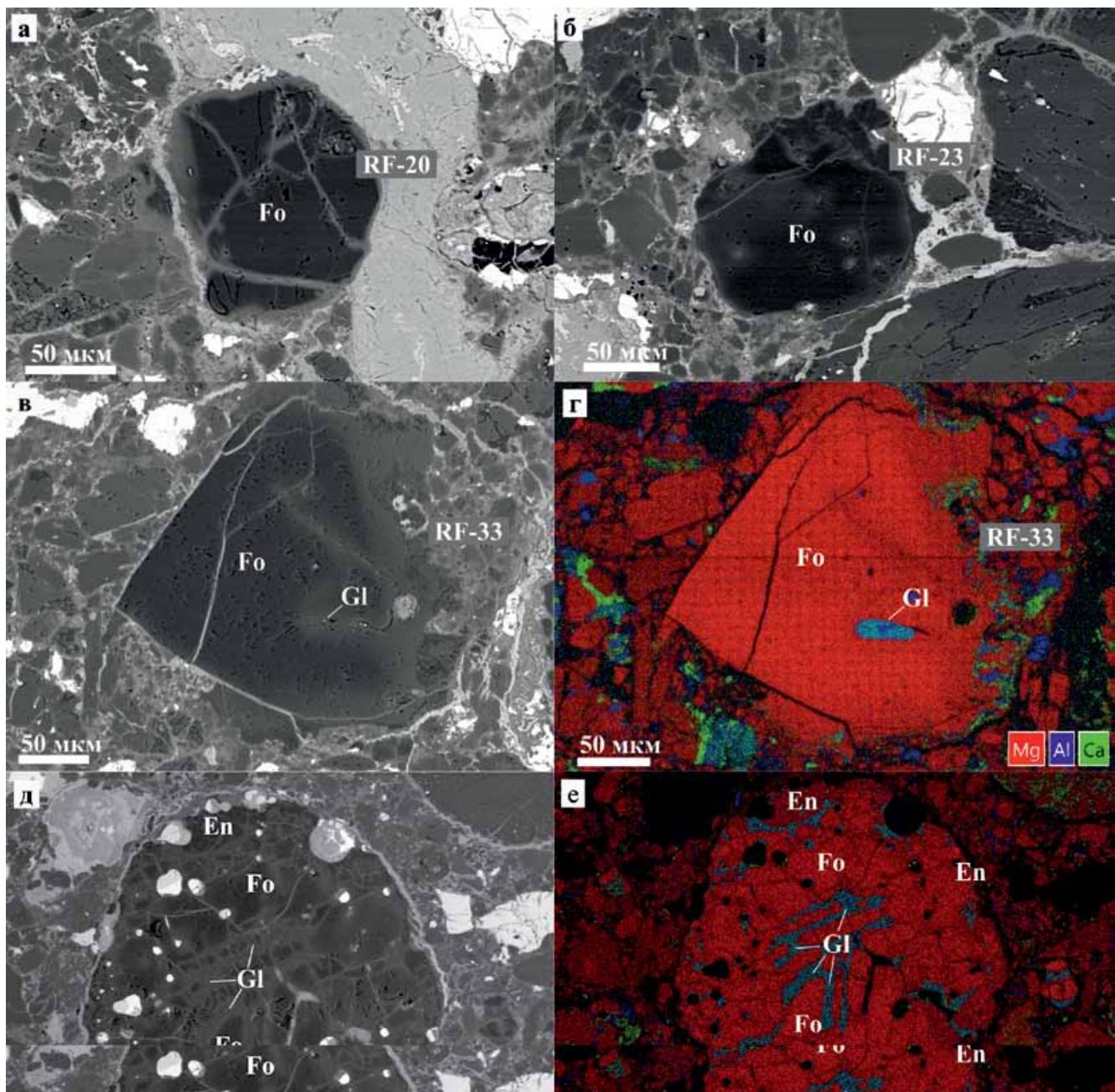


Рис. 3. Тугоплавкие, богатые форстеритом включения (а–г) и хондра, содержащая тугоплавкий форстерит (д, е), из обычного хондриита Северный Колчим.

а–в, д – изображения в обратноотраженных электронах (BSE); г, е – комбинированные карты распределения элементов (Mg – красный, Ca – зеленый, Al – синий), *Fo* – форстерит ($f = 0.004\text{--}0.200$), *En* – энstatит, *Gl* – стекло.

Fig. 3. Refractory forsterite rich objects (a–g) and chondrule containing refractory forsterite (d, e) in ordinary chondrite Severny Kolchim.

a–v, d – back-scattered electron images (BSE); g, e – combined elemental maps (Mg – red, Al – blue, Ca – green), *Fo* – forsterite ($f = 0.004\text{--}0.200$), *En* – enstatite, *Gl* – glass.

клей из высокомагнезиальной хондры MgCh-05 внутри класт отмечается содержание K_2O до 2.5 мас. %, а в стекле из крупной высокомагнезиальной хондры

MgCh-06 содержание K_2O составляет 9–10 мас. %. Из второстепенных элементов в стекле стоит выделить примесь TiO_2 0.5–0.7 мас. % (см. табл. 4).

Таблица 5. Состав оливина и ортопироксена в богатых форстеритом включениях в метеорите Северный Колчим, мас. %
Table 5. Composition of olivine and orthopyroxene in forsterite-rich inclusions in the Severny Kolchim meteorite, wt %

Объект	№	Min	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма	f
RF-20	100	Ol	42.8	0.18	H. o.	0.4	H. o.	55.5	0.98	99.8	0.004
RF-21	102	Ol	42.4	0.26	H. o.	0.6	H. o.	55.9	0.64	99.8	0.006
	103	Ol	42.6	0.30	H. o.	0.4	H. o.	55.7	0.71	99.7	0.004
RF-22	106	Ol	42.8	0.16	H. o.	0.7	H. o.	55.5	0.47	99.6	0.01
	107	Ol	41.4	0.10	H. o.	5.4	0.22	52.3	0.17	99.6	0.06
	109	Ol	46.7	0.29	H. o.	8.5	0.15	44.4	0.21	100.3	0.10
	108	Opx	59.1	0.55	0.55	2.5	0.13	367.0	0.36	100.1	0.04
RF-23	113	Ol	43.1	H. o.	H. o.	2.0	H. o.	54.8	0.30	100.1	0.02
RF-24	112	Ol	42.7	0.27	H. o.	0.7	H. o.	55.8	0.55	100.1	0.01
	64	Ol	42.0	0.22	H. o.	0.5	H. o.	56.6	0.71	100.2	0.005
RF-26	65	Ol	42.0	0.37	H. o.	0.7	H. o.	56.6	0.61	100.5	0.007
	76	Ol	41.8	0.17	H. o.	0.5	H. o.	56.6	0.52	99.7	0.005
	77	Ol	42.3	0.26	H. o.	0.5	H. o.	56.3	0.74	100.1	0.005
RF-27	66	Ol	42.3	0.15	H. o.	0.8	H. o.	57.1	0.59	101.1	0.008
	78	Ol	41.8	0.11	H. o.	1.0	H. o.	56.3	0.54	100.1	0.01
RF-28	97	Ol	42.2	0.24	H. o.	1.5	H. o.	55.2	0.65	99.8	0.02
RF-29	98	Ol	42.0	H. o.	H. o.	1.3	H. o.	55.6	H. o.	98.8	0.01
RF-30	93	Ol	42.4	0.15	H. o.	1.9	H. o.	55.5	0.50	100.4	0.02

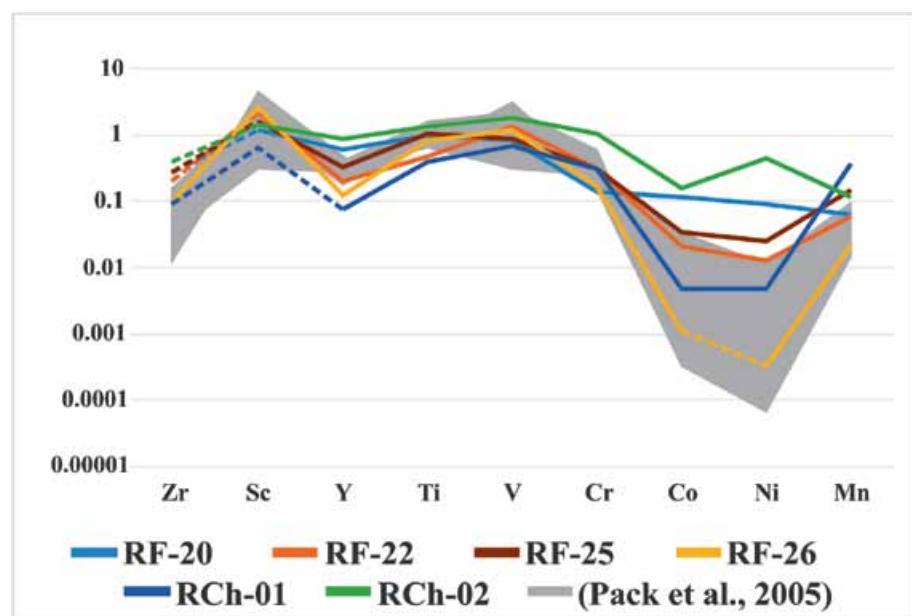


Рис. 4. Спайдер-диаграмма содержания редких элементов в тугоплавких, богатых форстеритом включениях (RF-20, RF-22, RF-25, RF-26) и тугоплавком форстерите из хондритов (RCh-01, RCh-02) из метеорита Северный Колчим, нормированных по CI хондриту (Wasson, Kallemeyn, 1988).

Серая область – данные лазерной абляции (Pack et al., 2005); штриховой линией выделены минимумы для элементов, содержание которых ниже пределов обнаружения, точки минимума соответствуют $\frac{1}{2}$ предела обнаружения (см. табл. 6).

Fig. 4. Spider diagram of trace element content in the refractory forsterite-rich objects (RF-20, RF-22, RF-25, RF-26) and in the refractory forsterite from the chondrules (RCh-01, RCh-02) from the Severny Kolchim meteorite, normalized by CI chondrite (Wasson, Kallemeyn, 1988).

Gray area – laser ablation data (Pack et al., 2005); the dotted line shows the minimum for elements whose content is below the detection limits; the minimum points correspond to $\frac{1}{2}$ of the detection limit (see Table 6).

Таблица 6. Микроэлементный состав форстерита в метеорите Северный Колчим (LA-ICP-MS), г/т

Table 6. Trace element composition of forsterite in the Severny Kolchim meteorite (LA-ICP-MS), ppm

Эле- мент	Содержание							Эле- мент	Содержание						
	RF-20	RF-22	RF-23	RF-25	RF-26	RCh-01	RCh-02		RF-20	RF-22	RF-23	RF-25	RF-26	RCh-01	RCh-02
Li	<2.6	1.13	<4.1	0.7	<0.4	0.67	<2.5	Te	<14.5	13.86	<23.0	<17.5	H. о.	H. о.	9.73
Be	<12.4	<12.3	H. о.	6.77	0.89	1.75	<25.0	Cs	<0.51	<0.19	<0.76	<0.67	H. о.	<0.12	<0.55
Sc	6.89	13.23	<1.9	9.67	15.16	3.88	8.41	Ba	H. о.	0.71	11.36	H. о.	H. о.	H. о.	3.86
Ti	430.0	204.1	232.6	454.1	340.2	164.6	579.4	La	H. о.	H. о.	0.44	<0.33	H. о.	H. о.	0.18
V	46.3	75.69	197.7	48.85	67.25	38.39	99.36	Ce	0.15	H. о.	0.87	0.13	H. о.	H. о.	1.19
Cr	377.6	837.5	9698	820.1	445.0	836.9	2811	Pr	<0.19	H. о.	0.12	H. о.	H. о.	H. о.	0.15
Mn	121.8	110.9	557.9	274.8	43.1	690.3	222.3	Nd	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	0.47
Co	59.18	10.52	243.5	17.88	<1.1	2.38	82.72	Sm	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.
Ni	974.1	134.3	1325	275.8	<7.0	50.73	4741	Eu	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	0.14
Cu	<16.5	<12.7	<26.2	<14.9	<6.0	<3.2	<24.7	Gd	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.
Zn	<10.9	6.4	64.71	35.34	<5.4	19.92	<19.5	Tb	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	<0.21	H. о.	0.17
Ga	1.13	0.75	25.14	<2.5	0.77	1.07	<3.7	Dy	H. о.	H. о.	0.56	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.
Ge	<8.6	<7.1	<15.6	<6.8	<6.5	<3.8	<14.2	Ho	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	0.026	H. о.	0.26
As	<21.5	<13.5	<42.1	13.34	<16.7	<8.8	24.17	Er	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	0.11	H. о.	0.37
Se	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	<106.0	<61.41	H. о.	Tm	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	0.025	H. о.	H. о.
Rb	<1.7	<1.88	6.26	<2.2	0.098	<0.26	<2.2	Yb	0.63	H. о.	0.38				
Sr	<1.3	<1.42	12.96	<1.29	<0.58	<0.39	5.56	Lu	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.
Y	0.9	0.3	2.17	<0.97	<0.36	<0.22	1.31	Hf	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	0.44
Zr	<2.1	<1.5	9.56	<2.15	0.37	<0.69	<3.0	Ta	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.
Nb	H. о.	0.39	<2.0	H. о.	0.12	<0.32	<2.5	W	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.
Mo	<4.2	H. о.	<6.7	1.6	0.28	H. о.	2.16	Tl	<0.88	<0.69	<0.72	<0.77	0.039	0.077	0.37
Ag	<1.8	H. о.	<2.9	1.41	H. о.	<0.57	0.5	Pb	<0.91	<0.52	3.02	<1.18	<0.58	0.19	0.29
Cd	<1.7	<1.63	<3.8	<4.1	0.18	0.71	H. о.	Bi	<0.37	<0.37	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	0.1
In	<0.2	H. о.	<0.6	<0.48	0.075	<0.135	0.093	Th	H. о.	H. о.	0.13	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.
Sn	<1.8	<1.5	<4.0	<1.86	<1.5	<0.92	<2.6	U	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.	H. о.
Sb	H. о.	H. о.	<2.9	H. о.	<1.3	<1.1	<2.6								

Примечание. RF-20, RF-22, RF-25, RF-26 – тугоплавкие, богатые форстеритом включения; RCh-01, RCh-02 – тугоплавкий форстерит из хондритов.

Note. RF-20, RF-22, RF-25, RF-26 – refractory forsterite-rich objects; RCh-01, RCh-02 – refractory forsterite from the chondrules.

Клинопироксен образует каймы вокруг зерен энстатита, а также присутствует в виде субмикронных зерен и игольчатых скелетных кристаллов в мезостазисе высокомагнезиальных хондритов. В мезостазисе наиболее крупной высокомагнезиальной хондрии MgCh-06 клинопироксен присутствует в виде зерен размером 10–50 мкм. Средний состав клинопироксена из этой хондрии, по данным ЭДС: $En_{52 \pm 0.04} Fs_{8 \pm 0.04} Wo_{40 \pm 0.03}$ (N = 5).

Металл и троилит присутствуют в высокомагнезиальных хондрах в виде каплевидных округлых или овальных включений размером до нескольких десятков микрон. Металл преимущественно заме-

щен гидроксидами железа, как и в остальном объеме метеорита.

Среди продуктов окисления зерна металла внутри высокомагнезиальной хондрии MgCh-06 нами встречено зерно вивианита, размером 80 мкм (см. рис. 5). Средний состав вивианита по данным ЭДС, мас. %: $FeO = 41.4 \pm 0.2$, $P_2O_5 = 28.8 \pm 0.3$, $NiO = 0.7 \pm 0.3$, $Cr_2O_3 = 0.2 \pm 0.2$, сумма – 71.3 % (N = 3). Вероятнее всего, формирование вивианита произошло при окислении в гипергенных условиях фосфидов железа или металла с заметной примесью фосфора, поскольку фосфаты метеоритов (апатит и мерилизит) достаточно устойчивы к процес-

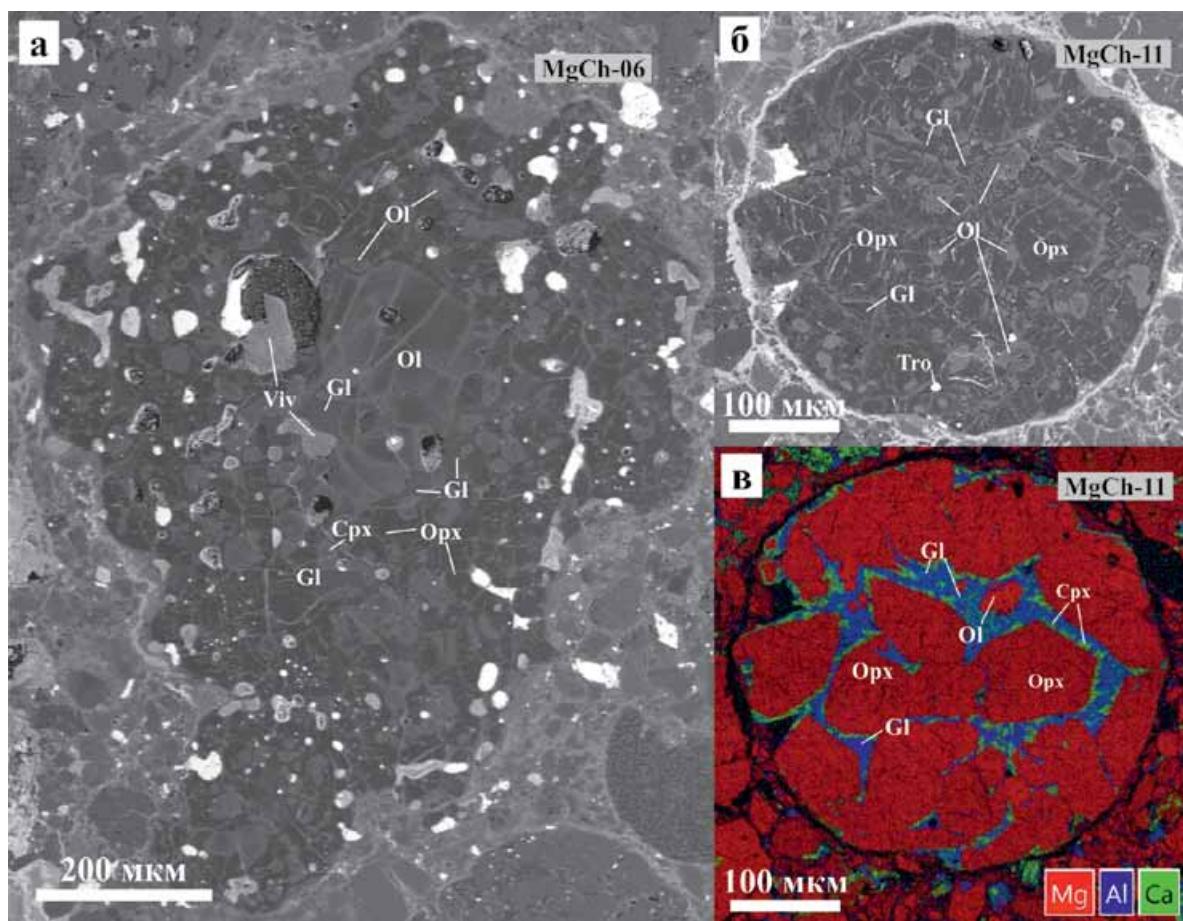


Рис. 5. Высокомагнезиальные хондры в метеорите Северный Колчим.

а, б – изображения в обратноотраженных электронах (BSE), в – комбинированная карта распределения элементов (Mg – красный, Ca – зеленый, Al – синий). Ol – оливин, Cpx – клинопироксен, Opx – ортопироксен, Viv – вивианит, Gl – стекло, Tro – троилит.

Fig. 5. High-Magnesian chondrules in the Severny Kolchim meteorite.

а, б – back-scattered electron images (BSE), в – combined elemental map (Mg – red, Al – blue, Ca – green). Ol – olivine, Cpx – clinopyroxene, Opx – orthopyroxene, Viv – vivianite, Tro – troilite, Gl – glass.

сам земного выветривания. Об этом же говорит тот факт, что зерно вивианита встречено в окисленном зерне металла внутри хондры.

Обогащенные Al хондры

В метеорите нами были встречены две обогащенные Al хондры (англ. Al-rich chondrule) диаметром 120 и 180 мкм соответственно (рис. 6).

Первая хондра имеет тонкозернистую порфиротипную структуру и состоит из зерен ортопироксена ($\text{En}_{89 \pm 0.04} \text{Fs}_{10 \pm 0.05} \text{Wo}_{1 \pm 0.01}$ (N = 2), обрастающего по периметру клинопироксеном ($\text{En}_{61 \pm 0.06} \text{Fs}_{9 \pm 0.02} \text{Wo}_{30 \pm 0.08}$ (N = 3), и зерен шпинели, погруженных в слабо девитрифицированное стекло (см. рис. 6а, б). Средний состав шпинели, по данным ЭДС-анализов, мас. %: 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). Средний состав стекла, по данным ЭДС анализов, мас. %: SiO_2 – 42.6 ± 2.1 , Al_2O_3 – 34.7 ± 0.9 , Cr_2O_3 – 0.3 ± 0.3 , FeO – 1.3 ± 1.2 , MgO – 0.2 ± 0.2 , CaO – 3.7 ± 1.7 , Na_2O – 13.4 ± 2.0 , K_2O – 3.8 ± 0.6 (N = 5). Внутри хондры находятся единичные зерна троилита и тэнита (Ni – 18 мас. %) размером 5–10 мкм. Валовый состав хондры представлен в табл. 7 (AlCh-01).

Вторая хондра имеет скрытокристаллическую структуру и сложена слабо девитрифицированным кислым стеклом (см. рис. 6в, г). В центральной части хондры различимы редкие субмикронные зерна сульфидов и Fe-Mg силикатов. Средний валовый состав хондры, по данным съемки ЭДС-спектров с площади отдельных неперекрывающихся участков хондры, представлен в табл. 7 (AlCh-02).

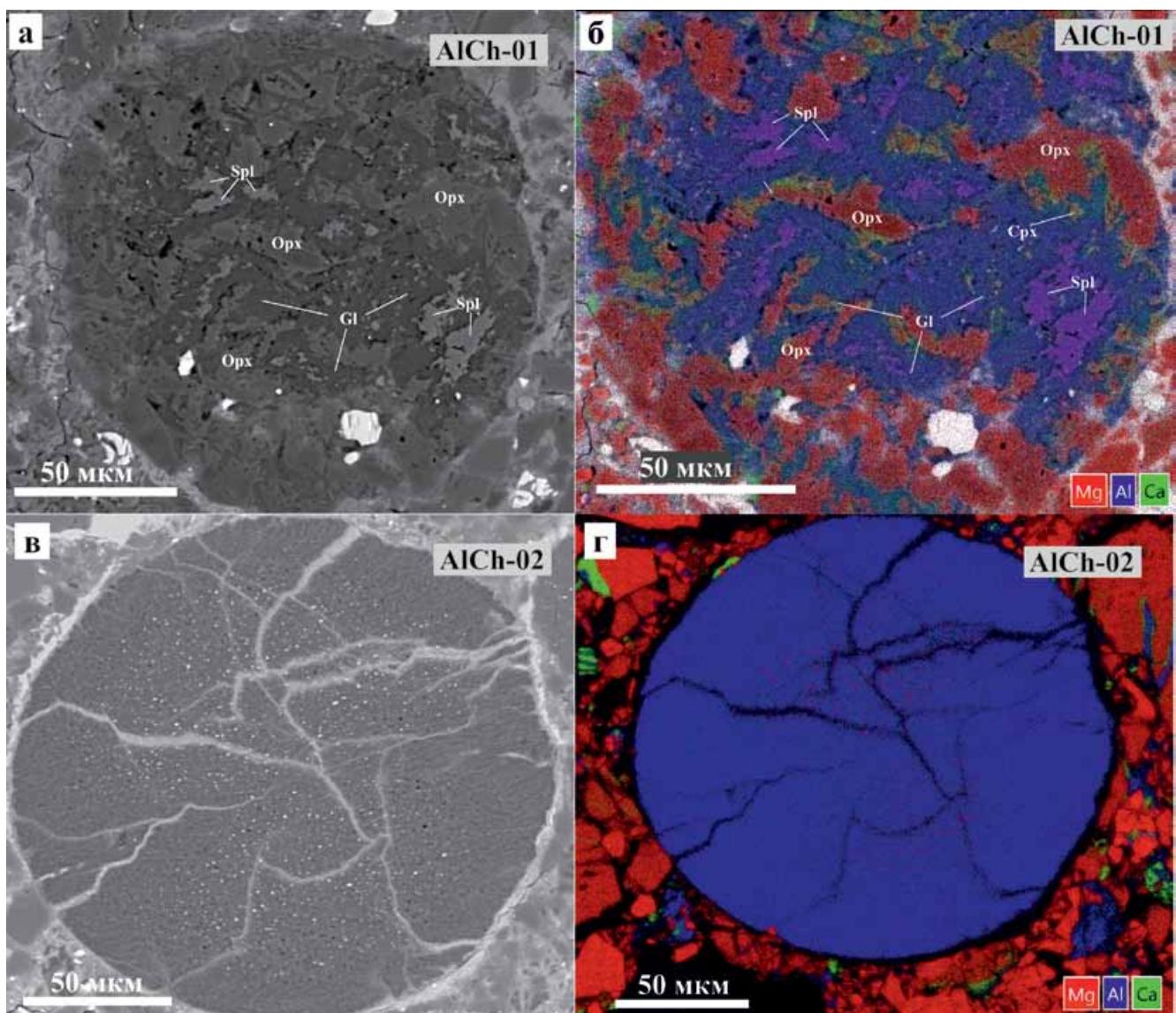


Рис. 6. Обогащенные алюминием хондры в метеорите Северный Колчим.

а, б – изображения в обратноотраженных электронах (BSE); в, г – комбинированные карты распределения элементов (Mg – красный, Ca – зеленый, Al – синий). *Opx* – ортопироксен, *Spl* – шпинель, *Gl* – стекло.

Fig. 6. Al-rich chondrules in the Severny Kolchim meteorite.

а, б – back-scattered electron images (BSE); в, г – combined elemental map (Mg – red, Al – blue, Ca – green). *Opx* – orthopyroxene, *Spl* – spinel, *Gl* – glass.

Включения тридимита

В метеорите была встречена порфировая пироксеновая хондра, состоящая из орто- и клинопироксена, центральная часть которой сложена фазой SiO_2 (рис. 7а, б). Хондра имеет диаметр 350 мкм и слегка неровные границы. Вдоль границы наблюдаются выделения гидроксидов Fe-Ni, скорее всего, гипергенного происхождения. Фаза SiO_2 по составу, по данным ЭДС, довольно чистая

($\text{SiO}_2 > 99.4\%$). Состав ортопироксена, по данным ЭДС: $\text{En}_{80}\text{Fs}_{18}\text{Wo}_2$. Состав клинопироксена, по данным ЭДС: $\text{En}_{46}\text{Fs}_{15}\text{W}_{41}$.

В матрице были обнаружены включения фазы SiO_2 , которые находятся в непосредственной близости с низкожелезистым ортопироксеном (рис. 7в, г). По составу ортопироксен похож на энстатит из тугоплавких включений: $\text{En}_{93 \pm 0.01}\text{Fs}_{6 \pm 0.01}\text{Wo}_{1 \pm 0.01}$ ($N = 3$). По данным ЭДС, фаза SiO_2 по составу чистая (до 99% SiO_2).

Таблица 7. Валовый состав высокомагнезиальных хондр, обогащенных Al хондр и хондр с тугоплавким форстеритом в метеорите Северный Колчим по данным ЭДС-анализа**Table 7.** Gross composition of high-magnesian chondrules, Al-rich chondrules and chondrule with refractory forsterite in the Severny Kolchim meteorite according to EDX analysis

Хондра	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₂	NiO	Сумма
Высокомагнезиальные хондры														
MgCh-01	56.2	H. o.	4.3	0.4	4.1	31.5	H. o.	3.0	0.5	H. o.	H. o.	H. o.	H. o.	100
MgCh-04	52.7	H. o.	1.9	0.4	6.7	37.6	H. o.	0.7	H. o.	H. o.	H. o.	H. o.	H. o.	100
MgCh-06	45.4	H. o.	3.1	1.0	12.6	30.9	H. o.	1.2	0.8	0.5	0.4	3.3	0.8	100
MgCh-08	51.6	H. o.	4.4	0.9	10.1	28.5	0.6	2.5	H. o.	0.2	H. o.	0.5	0.7	100
Хондра с тугоплавким форстеритом														
RCh-01	39.6	H. o.	3.1	0.6	12.2	41.5	H. o.	1.7	H. o.	H. o.	H. o.	0.9	0.5	100
Обогащенные Al хондры														
AlCh-01	44.9	0.5	21.0	1.1	8.0	11.9	H. o.	4.2	5.8	1.1	H. o.	1.1	0.3	100
AlCh-02														
Среднее, N = 7	58.5±1.3	0.9±0.1	21.5±0.5	2.3±0.4	2.9±0.7	1.3±1.1	H. o.	3.7±0.2	8.3±0.4	0.4±0.04	H. o.	0.1±0.1	H. o.	100

Методом рамановской спектроскопии установлено, что в обоих объектах фаза SiO₂ представлена тридимитом (рис. 8а). Также обнаружено, что низкокальциевый пироксен представлен клиноэнститом (рис. 8б).

Эталонные спектры полиморфных модификаторов SiO₂ приведены на рис. 8в (gruff.info). Кварц, тримидит и кристобалит однозначно различаются по рамановским спектрам. Характерный набор колебательных мод, соответствующих валентным и деформационным колебаниям связи Si—O в тетраэдре SiO₄, представлен на рис. 8в.

Эталонные спектры энстатита и клиноэнститита (Lin, 2004) представлены на рис. 8г. Как можно видеть из указанной работы, самым характерным отличием энстатита от клиноэнститита является спектральный диапазон в области решеточных колебаний, а именно – для энстатита характеристической является мода около 75 см⁻¹, что не свойственно клиноэнстититу.

Некоторые отличия положений колебательных мод эталона и исследуемого образца могут быть связаны с разупорядочением или структурными напряжениями (Щапова и др., 2020).

ОБСУЖДЕНИЕ

Классификация метеорита Северный Колчим

Метеорит имеет непрозрачную матрицу без водосодержащих силикатов с признаками начала перекристаллизации, что позволяет отнести его к петрографическому типу 3.3–3.5 в соответствии с классификацией (Huss et al., 2006). Это согласуется с данными о слабо девитрифицированном изо-

тропном стекле в мезостазисе хондр с редкими субмикронными зернами клинопироксена. Альбит в мезостазисе хондр выявлен не был. По вариациям содержания FeO в оливине (PMD 35% (N = 38)) метеорит Северный Колчим, по классификации (Sears et al., 1980), следует отнести к петрографическому типу 3.4. Как показали наблюдения, в метеорите присутствует даже низкожелезистый тугоплавкий оливин с содержанием FeO 0.5–1.0%, по краям зерен возрастающим до 5–9 мас. % (см. табл. 5). Аналогичная картина с отсутствием минерального равновесия наблюдается по вариациям железистости в ортопироксене. Вариации содержания Со в камасите из вмещающего хондриита Северного Колчима, рассчитанные по небольшой выборке наших микрозондовых анализов и опубликованных анализов (Ерохин и др., 2019), характеризуются PMD 30% (N = 7), что, по классификации (Sears et al., 1980), соответствует петрографическому типу 3.5. Таким образом, по совокупности петрографических и минералогических признаков петрографический тип метеорита может быть уточнен как 3.4.

В оливине из хондр в метеорите Северный Колчим наблюдаются трещины, однако отсутствует волнообразное угасание. В ортопироксене из хондр также проявлены трещины по спайности. Ударные эффекты в тонкозернистой матрице также не проявлены. Таким образом, степень ударных преобразований может быть определена как S1 (Stoffler et al., 1991, 2019). Степень земного выветривания W3 (Wlotzka, 1993), она незначительно уменьшается от края метеорита к внутренней части в пределах площади шлифа (первые сантиметры).

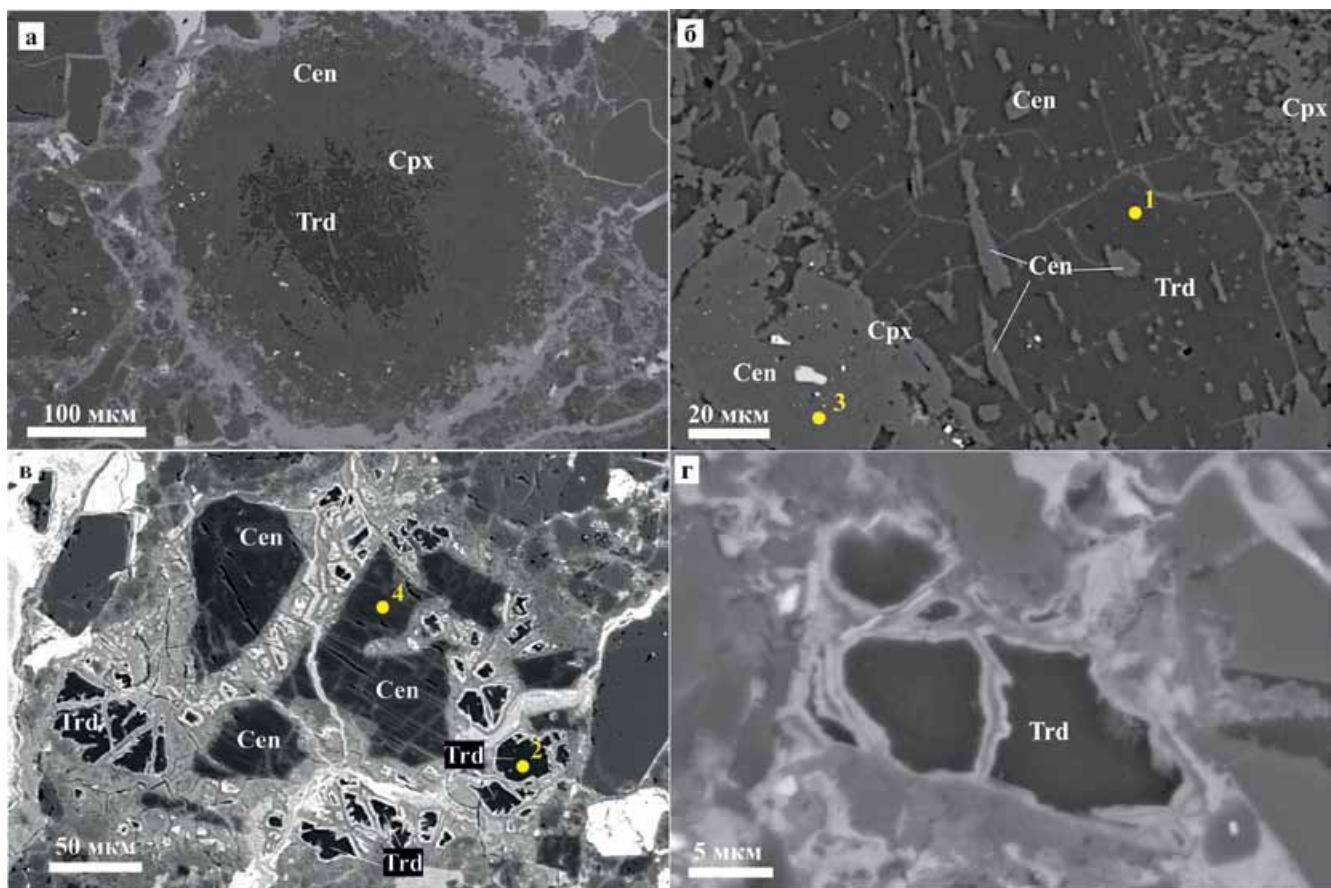


Рис. 7. Тридимит в метеорите Северный Колчим.

а, б – пироксеновая хондра, центральная часть которой сложена тридимитом (>99.4 мас. % SiO_2); в, г – включения тридимита в ассоциации с низкожелезистым клиноэнстатитом и гидроксидами железа. Изображения в обратноотраженных электронах (BSE). Cen – клиноэнстатит, Cpx – клинопироксен, Trd – тридимит, отмечены точки регистрации рамановских спектров (1–4).

Fig. 7. Tridymite inclusions in the Severny Kolchim meteorite.

а, б – pyroxene chondrule, the central part of which is composed of tridymite (>99.4 wt % SiO_2); в, г – inclusions of tridymite in association with low-Fe clinoenstatite. Images in back-reflected electrons (BSE). Cen – clinoenstatite, Cpx – clinopyroxene, Trd – tridymite, points of registration of Raman spectra (1–4).

Класт хондрирового метеорита

Матрица кластера почти прозрачная и состоит из новообразованных зерен преимущественно оливина и пироксена размером 5–100 мкм. Появляются обособленные зерна апатита и меррилита. Металл и троилит присутствуют преимущественно в виде новообразованных зерен размером 100–700 мкм. Это позволяет отнести класт к петрографическому типу 3.8–4 (Huss et al., 2006). Однако отсутствие четко диагностированного плагиоклаза в хондрах и матрице не дает возможности отнести класт к равновесному петрографическому типу 4, согласно той же классификации (Huss et al., 2006).

Вариации содержания FeO в оливине (PMD 5% ($N = 23$) (Sears et al., 1980)) позволяют отнести класт

к петрографическому типу 3.9. При этом стоит отметить, что значение 5% является пограничным между петрографическими типами 3.9 и 4. Содержания железа в ортопироксene варьируют в более широких пределах в основном за счет присутствия в класте высокомагнезиальной порфировой пироксеновой хондры с низкожелезистым энстатитом ($f = 0.06$). Однако следует учитывать, что, согласно данным (Huss et al., 2006), в отличие от оливина, некоторая неравновесность в составе ортопироксена может сохраняться в обычных хондриях вплоть до петрографического типа 4 включительно.

Методом микрозондового анализа был определен состав камасита (см. табл. 2). Поскольку камасит в класте присутствует как в матрице, так и внутри хондр (Afiaffalab, Wasson, 1980), в неравновес-

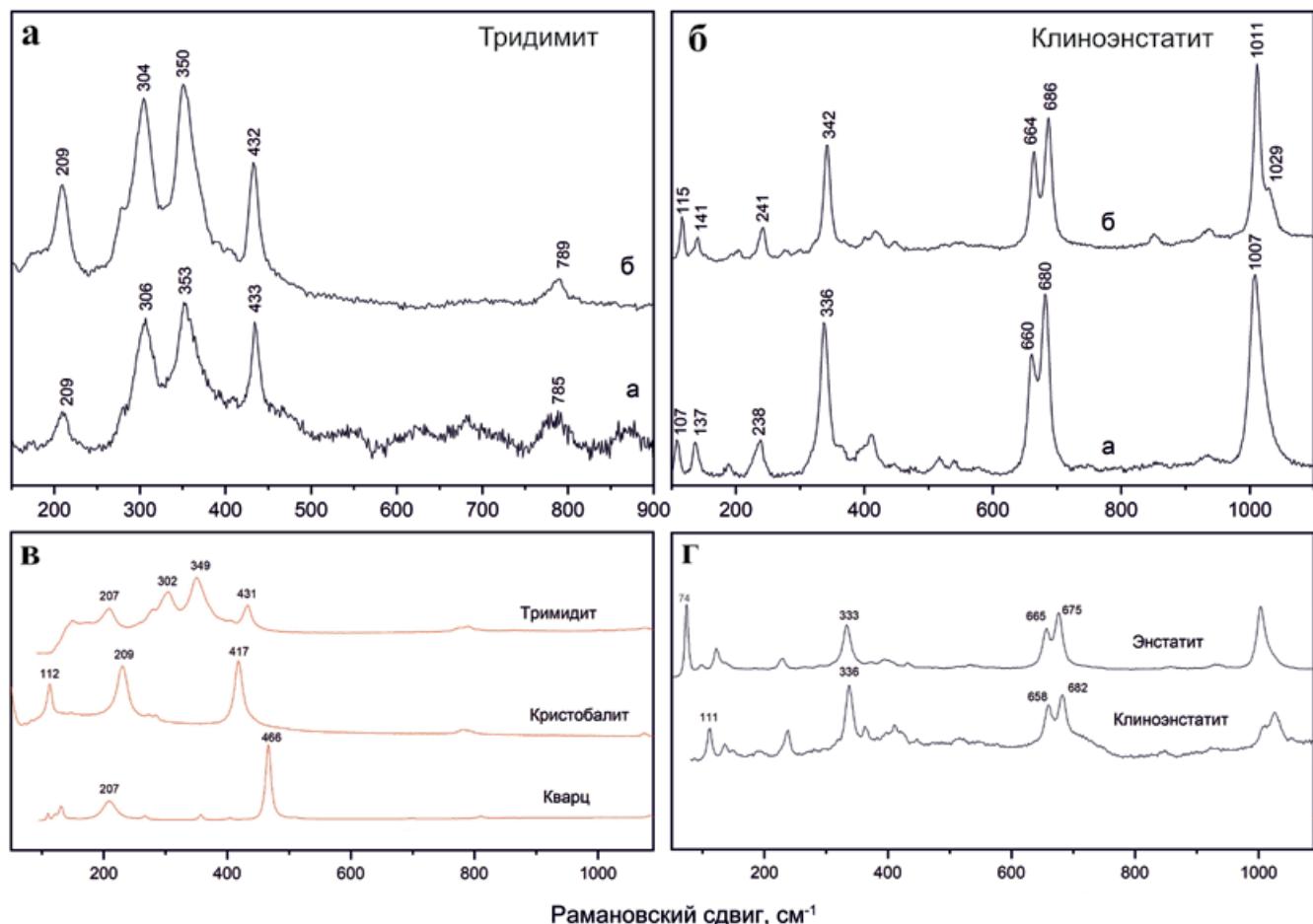


Рис. 8. Рамановские спектры.

а – тридимит (а – спектр 1 из пироксеновой хондры (см. рис. 7б), б – спектр 2 из обособленных включений (см. рис. 7в)); б – клиноэнстатит (а – спектр 3 из пироксеновой хондры (см. рис. 7б), б – спектр 4 из обособленных включений (см. рис. 7в)); в – эталонные спектры полиморфных модификаций SiO_2 (rruff.unfo) (Kimura et al., 2005); г – эталонные спектры энстатита и клиноэнстатита (Lin, 2004). Числа – положения колебательных мод.

Fig. 8. Raman spectra.

а – tridymite (a – spectrum 1 from pyroxene chondrule (fig. 7б), б – spectrum 2 from isolated inclusions (fig. 7в)); б – clinoenstatite (а – spectrum 3 from pyroxene chondrule (fig. 7б), б – spectrum 4 from isolated inclusions (fig. 7в)); в – reference spectra of polymorphic modifications of SiO_2 (rruff.unfo) (Kimura et al., 2005); г – reference spectra of enstatite and clinoenstatite (Lin, 2004). The numbers are the positions of the vibrational modes.

ных хондриях камасит в хондрах имеет большие вариации состава по сравнению с камаситом в матрице, что не позволило использовать показатель PMD для содержания Со в камасите для определения петрографического типа класти.

Таким образом, класт в метеорите был классифицирован как H3.9 хондрит. Он в большей степени затронут высокотемпературным метаморфизмом, чем вмещающий его хондрик. Вероятнее всего, класт сформировался на том же или родственном родительском теле H-хондриков, но на большей глубине, откуда был выбит в результате ударного события.

В оливине и пироксене в хондрах наблюдаются трещины. В оливине местами присутствует вол-

нообразное угасание зерен (больше чем на 2°), планарные структуры не встречаются, ударный расплав отсутствует. Степень ударных преобразований класти определена как S2 (Stöffler et al., 1991, 2019). Таким образом, класт в большей степени подвержен импактным преобразованиям по сравнению с вмещающим его хондриком. В класте, находящемся в центральной части обломка, степень земного выветривания составляет W2 (Wlotzka, 1993).

Поскольку найденный в метеорите класт отличается от вмещающего его хондрика только по петрографическому типу (степени метаморфизма), но при этом также относится к группе H-хондриков, то для него не применим термин “ксенолит”. Со-

гласно устоявшейся терминологии ксенолитами принято называть обломки, имеющие генетические отличия от материала вмещающего его метеорита или метеоритной брекции, т. е. происходящие от другого типа родительских тел (Bischoff et al., 2006; и др.).

Учитывая присутствие в Северном Колчиме класти, не отличающегося от него по составу, но другого по степени метаморфизма (петрологическому типу), данный метеорит может быть также дополнительно классифицирован как геномиктовая брекция (Genomict breccia) (Bischoff et al., 2006). Брекции данного типа были описаны в метеоритах Mafra L3-4 (Lange et al., 1979), Noblesville H4-6 (Lipschutz et al., 1992), Camel Donga 040 CV3 аномальный (Zolensky et al., 2004), Cold Bokkeveld (Zolensky et al., 1997).

Включения тугоплавкого форстерита

Тугоплавкие богатые форстеритом включения (refractory forsterite-rich objects) являются общим компонентом для хондритов разных классов. Они известны в неравновесных углистых (Reid et al., 1970; McSween, 1977; Olsen, Grossman, 1978; Pack et al., 2005; и др.), обыкновенных (Steele, 1986; Берзин и др., 2019) и R-хондритах (Bischoff, 2000; Pack et al., 2004). Богатые форстеритом включения встречаются преимущественно в матрице, однако также известны в виде включений внутри хондр (Pack et al., 2004; Borisov et al., 2008; Gucsik et al., 2013; Krot et al., 2018; и др.). Включения в основном имеют неправильную обломочную форму, встречаются также округлые включения. Размер варьирует от 10 мкм до 1 мм. Форстерит характеризуется низкой железистостью (Fa – 0.05–2.00), обогащением тугоплавкими лиофильными элементами (RLE), в частности CaO до 1.0%, Al₂O₃ до 0.3%, TiO₂ до 0.15%, резким дефицитом MnO и NiO, обогащением ¹⁶O (Leshin et al., 1997; Pack et al., 2004; и др.). Включения обладают свойством катодолюминесценции (Steele et al., 1985; Pack et al., 2004; Gucsik et al., 2013). Тугоплавкие богатые форстеритом объекты могут содержать включения стекла, шпинели и металла (Pack et al., 2004, 2005; Дугушкина, Берзин, 2019; и др.).

Исходя из перечисленных признаков, богатые форстеритом включения наряду с богатыми кальцием и алюминием включениями (CAIs) и амебоидальными оливиновыми агрегатами (AOAs) относят к наиболее ранним минеральным образованиям протосолнечной небулы. По сравнению с другими тугоплавкими включениями (CAIs и AOAs), богатые форстеритом включения характеризуются меньшей степенью изученности.

Механизмы их формирования и дальнейшего преобразования отчасти остаются дискуссионными. Предложены две теории происхождения тугоплавких богатых форстеритом включений. Согласно одним гипотезам, они образовались путем непосредственной конденсации из небулярного газа (Fuchs et al., 1973; Olsen, Grossman, 1978; Steele, 1986; и др.). В соответствии с другими представлениями, такой форстерит кристаллизовался в каплях расплава, обедненного FeO и обогащенного RLE, так называемых “протохондрах” или хондрах начальной генерации, с дальнейшим разрушением последних и высвобождением форстерита (McSween, 1977; Roedder, 1981; Pack et al., 2004, 2005; и др.).

Изученные нами богатые форстеритом тугоплавкие включения в метеорите Северный Колчим имеют сходство с ранее описанными. В форстерите не встречены включения металла, троилита или шпинели, описанные в тугоплавких богатых форстеритом включениях из других метеоритов в работах (Pack et al., 2004, 2005; Дугушкина, Берзин, 2019). Зональность, наблюдаемая в форстерите по Fe, является типичной для оливина из тугоплавких богатых форстеритом включений (Pack et al., 2004, 2005; и др.).

Энстатит в срастании с форстеритом по составу сходен с энстатитовой каймой в тугоплавких богатых форстеритом включениях, найденных и описанных нами в углистых хондритах (Дугушкина, Берзин, 2019; и др.).

Немаловажной особенностью фрагментов богатых форстеритом включений в метеорите Северный Колчим является то, что они представлены преимущественно остроугольными обломками. Относительно целые объекты встречаются крайне редко. Очевидно, это связано с их относительно частыми соударениями в протосолнечной небуле.

Отдельный интерес вызывают обнаруженные нами хондры, состоящие из тугоплавкого форстерита, аналогичного богатым форстеритом включениям. В таких хондрах высококальциевое стекло в мезостазисе по составу близко к включениям стекла во включениях тугоплавкого форстерита в других хондритах по данным (Pack et al., 2004, 2005; Дугушкина, Берзин, 2019). По всей видимости, данные хондры являются родительскими по отношению к богатым форстеритом включениям. Нахodka данных хондр подтверждает высказываемые ранее гипотезы формирования богатых форстеритом включений из “протохондр” (McSween, 1977; Roedder, 1981; Pack et al., 2004, 2005; и др.). Ранее подобные “протохондры” не были описаны в литературе. Тугоплавкий форстерит ранее отмечен в хондрах только в виде обломочных включений (предшественников хондр) (Pack et al., 2004; Krot et al., 2018). Валовый состав данных хондр, полученный методом ЭДС (см. табл. 7), позволяет оценить состав исходных капель расплава, формирование которых предшествовало образованию преобладающего большинства железомагнезиальных хондр. Однако далее логично встает вопрос об источни-

ке вещества для образования “протохондр” с тугоплавким форстеритом. На наш взгляд, это могли быть амебоидальные оливиновые агрегаты (AOAs), их обломки или срастания AOAs и CAIs в различных пропорциях. Это объяснило бы обогащение RLE и $\delta^{16}\text{O}$. Однако необходимо принимать во внимание, что находки AOAs и CAIs в обычновенных хондриях, пожалуй, еще более редки, чем находки богатых форстеритом включений. В изученных нами “протохондрах” с тугоплавким форстеритом не выявлены какие-либо твердые минеральные включения предшественников данных хондр.

Обогащенные Al хондры

Обогащенные Al хондры являются редкими компонентами хондриев, однако находки были описаны в большинстве групп хондриев: обычновенных (Bischoff, Keil, 1984; Russell et al., 2000; Krot, Keil, 2002; MacPherson, Huss, 2005), углистых (Sheng et al., 1991; Krot et al., 2002, 2006; Akaki et al., 2007; Zhang et al., 2014, 2019) и R-хондриях (Rout, Bischoff, 2008; Rout et al., 2010). Они имеют относительно высокое содержание Al_2O_3 (>10 мас. %). Характеризуются сходством текстур с текстурами железомагнезиальных хондр, но, помимо оливина и низкокальциевого пироксена, могут содержать плагиоклаз, богатый Al и Ti клинопироксен, богатую Al шпинель и часто богатое Al стекло. Обогащенные Al хондры значительно более тугоплавки, чем железомагнезиальные хондры, и некоторые из них демонстрируют композиционное сходство с богатыми кальцием и алюминием включениями (CAIs) (Scott, Krot, 2014).

Изученные нами обогащенные Al хондры по минеральному и валовому химическому составу близки к аналогичным обогащенным Al хондрам из обычновенных и углистых хондриев (Krot, Keil, 2002; MacPherson, Huss, 2005; Krot et al., 2006; и др.). Хондра AlCh-01 по валовому составу соответствует CAIs Типа B (MacPherson, Huss, 2005), скорее всего, является переплавленным CAI. Вторая хондра (AlCh-02) очень сильно обогащена алюминием, ее, предположительно, можно отнести к хондрам, образовавшимся при переплавке стекла (MacPherson, Huss, 2005; Chondrules, 2018). Повышенное содержание Na_2O (от 5.8 до 8.2 мас. %, см. табл. 7) может указывать на образование при совместном плавлении обогащенного Na вещества и вещества, богатого тугоплавкими элементами (Ebert, Bischoff, 2016, и ссылки в списке литературы).

Включения тридимита

Полиморфные модификации SiO_2 (кварц, тридимит, кристобалит) и кварцевое стекло встречаются в хондрах и матрице энстатитовых хондриев

(Kimura et al., 2005; Weisberg, Kimura, 2012; и др.). Находки хондр, содержащих фазу SiO_2 и включения SiO_2 в ассоциации с пироксеном и оливином, в обычновенных хондриях были описаны (Brigham et al., 1986).

Хондра с тридимитом и клиноэнститом (см. рис. 7а, б), найденная нами в матрице метеорита Северный Колчим, вероятно, имеет происхождение из резервуара энстатитовых хондриев. Тридимит является высокотемпературной низкобарической модификацией кремнезема. Скорее всего, он сформировался при кристаллизации хондры и не подвергался фазовым переходам в процессе метаморфизма в недрах родительского тела.

Включения тридимита, найденные в матрице хондрия вблизи зерен клиноэнстита (см. рис. 7в, г), по всей видимости, имеют аналогичное происхождение из области формирования энстатитовых хондриев. Нахождение в непосредственной близости обломочных зерен низкожелезистого клиноэнстита и тридимита может указывать на их генетическую связь. Можно предположить, что это обломки аналогичной пироксеновой хондры из резервуара энстатитовых хондриев.

ВЫВОДЫ

1. Классификация метеорита Северный Колчим может быть уточнена как H3.4. Степень ударных преобразований S1. Степень земного выветривания W3. Кроме того, данный метеорит может быть также дополнительно классифицирован как геномиктовая брекчия (Genomict breccia) (Bischoff et al., 2006).

2. В метеорите Северный Колчим изучен класт размером 6×6 мм, сложенный хондрием H3.9. Он имеет более высокую степень ударных преобразований S2. Вероятнее всего, класт сформировался на том же или родственном родительском теле H-хондриев, но на большей глубине, откуда был выбит в результате ударного события.

3. Были установлены тугоплавкие богатые форстеритом включения (англ. *refractory forsterite rich objects*). Находки данных включений в обычновенных хондриях крайне редки. Показано их сходство с богатыми форстеритом включениями, ранее описанными в углистых хондриях. Характерной особенностью богатых форстеритом включений является то, что они представлены по большей части остроугольными обломками, что, вероятно, обусловлено их относительно частыми соударениями.

4. В метеорите Северный Колчим были изучены порфировые оливиновые хондры, состоящие из тугоплавкого форстерита и высококальциевого стекла в мезостазисе, которые, возможно, являются родительскими для тугоплавких богатых форстеритом включений.

5. В метеорите установлена пироксеновая хондра с тридимитом. Последние, вероятнее всего, яв-

ляются ксеногенными и происходят из области формирования энстатитовых хондритов. Низкокальциевый пироксен из данной хондры определен методом рамановской спектроскопии как клиноэнстатит. В матрице встречены сгруппированные обломочные зерна тридимита и клиноэнстатита, вероятнее всего являющиеся обломками аналогичной пироксеновой хондры.

6. Северном Колчиме найдены две обогащенные Al-хондры. Судя по валовому составу, одна хондра является переплавленным CAI типа B, а другая – сформировалась при плавлении вещества, обогащенного натрием.

7. В метеорите установлен гипергенный вивианит.

Благодарности

Авторы благодарны аналитикам лаборатории ФХМИ Института геологии и геохимии УрО РАН канд. геол.-мин. наук Л.В. Леоновой, А.В. Михеевой, С.В. Лепехе, И.А. Готтман и И.А. Даниленко за помощь в проведении микрозондовых анализов и наблюдений на электронном микроскопе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берзин С.В. (2018а) О находке тугоплавких богатых форстеритом включений в метеорите Северный Колчим (H3). *Минералы: строение, свойства, методы исследования*, (9), 24-25.
- Берзин С.В., Иванов К.С., Бурлаков Е.В. (2019) Находка тугоплавких включений в метеорите Северный Колчим (H3). *Докл. АН*, **487**(6), 650-652.
- Дугушкина К.А., Берзин С.В. (2019) Новый углистый хондрит CM2 из Северо-Западной Африки (North-west Africa 11781). *Литосфера*, **19**(4), 580-587. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-580-587
- Ерохин Ю.В., Берзин С.В., Хиллер В.В., Иванов К.С. (2016) Пентландит из обыкновенных хондритов Урала. *Литосфера*, (3), 139-146.
- Ерохин Ю.В., Коротеев В.А., Хиллер В.В., Иванов К.С., Захаров А.В. (2019) Вещественный состав метеорита Северный Колчим. *Вестн. Перм. ун-та. Геология*, **18**(3), 194-204.
- Ерохин Ю.В., Коротеев В.А., Хиллер В.В., Иванов К.С., Клейменов Д.А. (2018) Метеорит Северный Колчим: новые данные по минералогии. *Докл. АН*, **482**(2), 186-189.
- Иванов О.К. (1969) Хондрит Северный Колчим. *Метеоритика*, (29), 48-56.
- Логинов В.Н. (2004) Метеориты Урала. Екатеринбург: Урал. гос. ун-т., 80 с.
- Назаров М.А., Барсукова Л.Д., Харитонова В.Я., Ульянов А.А., Шевалеевский И.Д. (1983) Минералогия, петрография и химический состав метеорита Северный Колчим. *Метеоритика*, (42), 40-48.
- Щапова Ю.В., Вотяков С.Л., Замятин Д.А., Червяковская М.В., Панкрушина Е.А. (2020) Минералы-концентраты d- и f-элементов: локальные спектроскопические и ЛА-ИСП-МС исследования состава, структуры и свойств, геохронологические приложения. Под ред. С.Л. Вотякова. Новосибирск: СО РАН, 424 с.
- Юдин И.А. (1970) К минералогии метеорита Северный Колчим. *Тр. ИГГ УФАН СССР*, (86), 157-161.
- Afiaitalab F., Wasson J.T. (1980) Composition of the metal phases in ordinary chondrites: implications regarding classification and metamorphism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**(3), 431-446.
- Akaki T., Nakamura K., Noguchi R., Tsuchiyama A. (2007) Multiple formation of chondrules in the early solar system: Chronology of a compound Al-rich chondrule. *Astrophys. J.*, (656), 29-32.
- Berzin S.V. (2018) Refractory forsterite-rich objects in the meteorite Severny Kolchim (H3). *Meteor. Planet. Sci.*, **53**(S1). 81st Annual Meeting of the Meteoritical Society No. 6019.
- Bischoff A. (2000) Mineralogical characterization of primitive, type-3 lithologies in Rumuruti chondrites. *Meteor. Planet. Sci.*, **35**, 699-706.
- Bischoff A., Keil K. (1984) Al-rich objects in ordinary chondrites: Related origin of carbonaceous and ordinary chondrites and their constituents. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 693-709.
- Bischoff A., Scott E.R.D., Metzler K., Goodrich C.A. (2006) Nature and origins of meteoritic breccias. *Meteorites and the Early Solar System II*. Tucson, University of Arizona Press, 679-710.
- Borisov A., Pack A., Kropf A., Palme H. (2008) Partitioning of Na between olivine and melt: An experimental study with application to the formation of meteoritic Na₂O-rich chondrule glass and refractory forsterite grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**, 5558-5573.
- Brigham C.A., Yabuki H., Ouyang Z., Murrell M.T., El Goresy A., Burnett D.S. (1986) Silica-bearing chondrules and clasts in ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 1655-1666.
- Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes (2018). (Eds S. Russell, H. Connolly Jr., A. Krot). Cambridge, Cambridge University Press, 450 p. doi:10.1017/9781108284073
- Dodd R.T., Schmus W.R.V., Koffman D.M. (1967) A survey of the unequilibrated ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**(6), 921-934.
- Ebert S., Bischoff A. (2016) Genetic relationship between Na-rich chondrules and Ca, Al-rich inclusions? Formation of Na-rich chondrules by melting of refractory and volatile precursors in the Solar Nebula. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **177**, 182-204.
- Fuchs L.H., Olsen E., Jensen K.J. (1973) Mineralogy, mineral chemistry and composition of the Murchison (CM2) meteorite. *Contrib. Earth Sci.*, (10), 1-39.
- Gucsi A., Endo T., Nishido H., Ninagawa K., Kayama M., Berczi S., Nagy S., Abraham P., Kimura Y., Miura H., Gyollai I., Simonia I., Rozsa P., Posta J., Apai D., Mihalyi K., Nagy M., Ott U. (2013) Cathodoluminescence microscopy and spectroscopy of forsterite from Kaba meteorite: An application to the study of hydrothermal alteration of parent body. *Meteor. Planet. Sci.*, **48**(12), 2577-2596.
- Huss G.R., Rubin A.E., Grossman J.N. (2006) Thermal metamorphism in chondrites. *Meteorites and the Early Solar System II*. Tucson, University of Arizona Press, 567-586.
- Kimura M., Weisberg M.K., Lin Y., Suzuki A., Ohtani E., Okazaki R. (2005) Thermal history of enstatite chondrites from silica polymorphs. *Meteor. Planet. Sci.*, (40), 855-868.

- Krot A.N., Hutcheon I.D., Keil K. (2002) Plagioclase-rich chondrules in the reduced CV chondrites: Evidence for complex formation history and genetic links between calcium-aluminum-rich inclusions and ferromagnesian chondrules. *Meteor. Planet. Sci.*, **37**, 155-182.
- Krot A.N., Keil K. (2002) Anorthite-rich chondrules in CR and CH carbonaceous chondrites: Genetic link between calcium-aluminum-rich inclusions and ferromagnesian chondrules. *Meteor. Planet. Sci.*, **37**, 91-111.
- Krot A.N., Nagashima K., Libourel G., Miller K.E. (2018) Multiple mechanisms of transient heating events in the protoplanetary disk. Evidence from precursors of chondrules and igneous Ca, Al-rich inclusions. *Chondrules. Records of Protoplanetary Disk Processes*. Cambridge, Cambridge University Press, 11-56.
- Krot A.N., Petaev M.I., Keil K. (2006) Mineralogy and petrology of Al-rich objects and amoeboid olivine aggregates in the CH carbonaceous chondrite North West Africa 739. *Chemie der Erde*, **66**, 57-76.
- Lange D.E., Keil K., Gomes C.B. (1979) The Mafra meteorite and its lithic clasts: A genomic L-group chondrite breccia (abstract). *Meteoritics*, **14**, 472-473.
- Leshin L.A., Rubin A.E., McKeegan K.D. (1997) The oxygen isotopic composition of olivine and pyroxene from CI chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**(4), 835-845.
- Lin C.C. (2004) Pressure-induced polymorphism in enstatite ($MgSiO_3$) at room temperature: clinoenstatite and orthoenstatite. *Phys. Chem. Solids*, **65**, 913-921.
- Lipschutz M.E., Wolf S.F., Gartenhaus S., Lindstrom M.M., Mittlefehldt D.W., Zolensky M.E., Wacker J.F., Bechtel P.H., Sears D.W.G., Dodd R.T. (1992) Noblesville meteorite breccia: recovery and initial characterization. *XXIII Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, Lunar and Planetary Institute, 785-786.
- Macpherson G.J., Huss G.R. (2005) Petrogenesis of Al-rich chondrules: Evidence from bulk compositions and phase equilibria. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(12), 3099-3127.
- McSween H.Y.Jr. (1977) On the nature and origin of isolated olivine grains in carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **(41)**, 411-418.
- Meteoritical Bulletin, No. 36-48 (1970). *Meteoritics*, **(5)**, 85-109.
- Olsen E., Grossman L. (1978) On the origin of isolated olivine grains in Type 3 carbonaceous chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **41**, 111-127.
- Pack A., Palme H., Shelley J.M.G. (2005) Origin of chondritic forsterite grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 3159-3182.
- Pack A., Yurimoto H., Palme H. (2004) Petrographic and oxygen-isotopic study of refractory forsterites from R-chondrite Dar al Gani 013 (R3.5-6), unequilibrated ordinary and carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**(5), 1135-1157.
- Reid A.M., Bass M.N., Fujita H., Kerridge J.F., Fredericksen K. (1970) Olivine and pyroxene in the Orgueil meteorite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **34**, 1253-1255.
- Roedder E. (1981) Significance of Ca-Al-rich silicate melt inclusions in olivine crystals from the Murchison type II carbonaceous chondrite. *Bull. Minéralogie*, **104**, 339-353.
- Rout S.S., Keil K., Bischoff A. (2010) Bulk chemical compositions of Al-rich objects from Rumuruti (R) chondrites: Implications for their origin. *Chemie der Erde*, **70**, 35-53.
- Rout S.S., Bischoff A. (2008) Ca, Al-rich inclusions in Rumuruti (R) chondrites. *Meteor. Planet. Sci.*, **43**(9), 1439-1464.
- Russell S.S., MacPherson G.J., Leshin L.A., McKeegan K.D. (2000) ^{16}O enrichments in aluminum-rich chondrules from ordinary chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **184**, 57-74.
- Scott E.R.D., Krot A.N. (2014) Chondrites and Their Components. *Treatise on geochemistry*. 2nd ed. V. 1. Meteorites and cosmochemical processes. L., Elsevier Ltd., 65-137.
- Sears D.W.G., Grossman J.N., Melcher C.L., Ross L.M., Mills A.A. (1980) Measuring the metamorphic history of unequilibrated ordinary chondrites. *Nature*, **287**, 791-795.
- Sheng Y.J., Hutcheon I.D., Wasserburg G.J. (1991) Origin of plagioclase-olivine inclusions in carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 581-599.
- Steele I.M. (1986) Compositions and textures of relic forsterite in carbonaceous and unequilibrated ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 1379-1395.
- Steele I.M., Smith J.V., Skirius C. (1985) Cathodoluminescence zoning and minor elements in forsterites from the Murchison (CM2) carbonaceous chondrite. *Nature*, **313**, 294-297.
- Stöffler D., Hamann C., Metzler K. Addendum to "Stöffler D., Hamann C., and Metzler K. (2019) Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. *Meteoritics & Planetary Science* 53, 5-49, 2018". *Meteor. Planet. Sci.*, **54**(4), 946-949.
- Stöffler D., Keil K., Scott E.R.D. (1991) Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 3845-3867.
- Wasson J.T., Kallmeyen G.W. (1988) Composition of Chondrites. *Philos. Transact. Royal Soc. Lond.*, **325**(1587), 535-544.
- Weisberg M.K., Kimura M. (2012) The unequilibrated enstatite chondrites. *Chemie der Erde*, **72**, 101-115.
- Wlotzka F.A. (1993) Weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, **28**(3), 460-460.
- Zhang A.-C., Itoh S., Sakamoto N., Wang R.-C., Yurimoto H. (2014) Origins of Al-rich chondrules: Clues from a compound Al-rich chondrule in the Dar al Gani 978 carbonaceous chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **130**, 78-92.
- Zhang M., Lin Y., Tang G., Liu Y., Leya I. (2019) Origin of Al-rich chondrules in CV chondrites: Incorporation of diverse refractory components into the ferromagnesian chondrule forming region. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **272**, 198-217.
- Zolensky M.E., Mittlefehldt D.W., Lipschutz M.E., Wang M.-S., Clayton R.N., Mayeda T.K., Grady M.M., Pillinger C., Barber D. (1997) CM chondrites exhibit the complete petrologic range from type 2 to 1. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**, 5099-5115.
- Zolensky M.E., Tonui E.K., Bevan A.W.R., Le L., Clayton R.N., Mayeda T.K., Norman M. (2004) Camel Donga 040: A CV chondrite genomic breccia with unequilibrated and metamorphosed material. *Antarct. Meteor. Res.*, **28**, 95-96.

REFERENCES

- Afiaitalab F., Wasson J.T. (1980) Composition of the metal phases in ordinary chondrites: implications regarding classification and metamorphism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**(3), 431-446.
- Akaki T., Nakamura K., Noguchi R., Tsuchiyama A. (2007) Multiple formation of chondrules in the early solar system: Chronology of a compound Al-rich chondrule. *As-*

- trophys. J.*, **656**, 29-32.
- Berzin S.V. (2018a) Features of the refractory forsterite-rich objects in the unequilibrated ordinary chondrite Severny Kolchim (H3). *Mineraly: stroenie, svoistva, metody issledovaniya*, (9), 24-25. (In Russian)
- Berzin S.V. (2018b) Refractory forsterite-rich objects in the meteorite Severny Kolchim (H3). *Meteor. Planet. Sci.*, **53**(S1). 81st Annual Meeting of the Meteoritical Society No. 6019.
- Berzin S.V., Ivanov K.S., Burlakov E.V. (2019) Finding of refractory inclusions in the Severny Kolchim meteorite (H3). *Dokl. Akad. Nauk*, **487**(2), 908-910. (In Russian)
- Bischoff A. (2000) Mineralogical characterization of primitive, type-3 lithologies in Rumuruti chondrites. *Meteoritics Planet. Sci.*, **35**, 699-706.
- Bischoff A., Keil K. (1984) Al-rich objects in ordinary chondrites: Related origin of carbonaceous and ordinary chondrites and their constituents. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 693-709.
- Bischoff A., Scott E.R.D., Metzler K., Goodrich C.A. (2006) Nature and origins of meteoritic breccias. *Meteorites and the Early Solar System II*. Tucson, University of Arizona Press, 679-710.
- Borisov A., Pack A., Kropf A., Palme H. (2008) Partitioning of Na between olivine and melt: An experimental study with application to the formation of meteoritic Na₂O-rich chondrule glass and refractory forsterite grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**, 5558-5573.
- Brigham C.A., Yabuki H., Ouyang Z., Murrell M.T., El Goresy A., Burnett D.S. (1986) Silica-bearing chondrules and clasts in ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 1655-1666.
- Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes (2018). (Ed. by S. Russell, H. Connolly Jr., A. Krot). Cambridge, Cambridge University Press, 450 p. doi:10.1017/9781108284073
- Dodd R.T., Schmus W.R.V., Koffman D.M. (1967). A survey of the unequilibrated ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**(6), 921-934.
- Dugushkina K.A., Berzin S.V. (2019) New carbonaceous chondrite Northwest Africa 11781 (CM2). *Litosfera*, **19**(4), 580-587. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-580-587 (In Russian)
- Ebert S., Bischoff A. (2016) Genetic relationship between Na-rich chondrules and Ca, Al-rich inclusions? Formation of Na-rich chondrules by melting of refractory and volatile precursors in the Solar Nebula. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **177**, 182-204.
- Erokhin Y.V., Berzin S.V., Khiller V.V., Ivanov K.S. (2016) Pentlandite from ordinary chondrites of the Urals. *Litosfera*, (3), 139-146. (In Russian)
- Erokhin Y.V., Koroteev V.A., Khiller V.V., Ivanov K.S., Kleimenov D.A. (2018) The Severny Kolchim meteorite: new data on mineralogy. *Dokl. Akad. Nauk*, **482**(1), 1189-1192. (In Russian)
- Erokhin Y.V., Koroteev V.A., Khiller V.V., Ivanov K.S., Zakharov A.V. (2019) Material composition of the Severnyi Kolchim meteorite. *Vestn. Perm. un-ta. Geologiya*, **18**(3), 194-204. (In Russian)
- Fuchs L.H., Olsen E., Jensen K.J. (1973) Mineralogy, mineral chemistry and composition of the Murchison (CM2) meteorite. *Contrib. Earth Sci.*, (10), 1-39.
- Gucik A., Endo T., Nishido H., Ninagawa K., Kayama M., Berczi S., Nagy S., Abraham P., Kimura Y., Miura H., Gyollai I., Simonia I., Rozsa P., Posta J., Apai D., Mihalyi K., Nagy M., Ott U. (2013) Cathodoluminescence microscopy and spectroscopy of forsterite from Kaba meteorite: An application to the study of hydrothermal alteration of parent body. *Meteor. Planet. Sci.*, **48**(12), 2577-2596.
- Huss G.R., Rubin A.E., Grossman J.N. (2006) Thermal metamorphism in chondrites. *Meteorites and the Early Solar System II*. Tucson, University of Arizona Press, 567-586.
- Ivanov O.K. (1969) Chondrite Severnyi Kolchim. *Meteoritika*, **29**, 48-56. (In Russian)
- Kimura M., Weisberg M.K., Lin Y., Suzuki A., Ohtani E., Okazaki R. (2005) Thermal history of enstatite chondrites from silica polymorphs. *Meteor. Planet. Sci.*, (40), 855-868.
- Krot A.N., Hutcheon I.D., Keil K. (2002) Plagioclase-rich chondrules in the reduced CV chondrites: Evidence for complex formation history and genetic links between calcium-aluminum-rich inclusions and ferromagnesian chondrules. *Meteor. Planet. Sci.*, **37**, 155-182.
- Krot A.N., Keil K. (2002) Anorthite-rich chondrules in CR and CH carbonaceous chondrites: Genetic link between calcium-aluminum-rich inclusions and ferromagnesian chondrules. *Meteor. Planet. Sci.*, **37**, 91-111.
- Krot A.N., Nagashima K., Libourel G., Miller K.E. (2018) Multiple mechanisms of transient heating events in the protoplanetary disk. Evidence from precursors of chondrules and igneous Ca, Al-rich inclusions. *Chondrules. Records of Protoplanetary Disk Processes*. Cambridge, Cambridge University Press, 11-56.
- Krot A.N., Petaev M.I., Keil K. (2006) Mineralogy and petrology of Al-rich objects and amoeboid olivine aggregates in the CH carbonaceous chondrite North West Africa 739. *Chemie der Erde*, **66**, 57-76.
- Lange D.E., Keil K., Gomes C.B. (1979) The Mafra meteorite and its lithic clasts: A genomic L-group chondrite breccia (abstract). *Meteoritics*, **14**, 472-473.
- Leshin L.A., Rubin A.E., McKeegan K.D. (1997) The oxygen isotopic composition of olivine and pyroxene from CI chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**(4), 835-845.
- Lin C.C. (2004) Pressure-induced polymorphism in enstatite (MgSiO₃) at room temperature: clinoenstatite and orthoenstatite. *Phys. Chem. Solids*, **65**, 913-921.
- Lipschutz M.E., Wolf S.F., Gartenhaus S., Lindstrom M.M., Mittlefehldt D.W., Zolensky M.E., Wacker J.F., Benoit P.H., Sears D.W.G., Dodd R.T. (1992) Noblesville meteorite breccia: recovery and initial characterization. *XXIII Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, Lunar and Planetary Institute, 785-786.
- Loginov V.N. (2004) Meteorites of The Urals. Ekaterinburg, Ural State University Publ., 80 p. (In Russian)
- Macpherson G.J., Huss G.R. (2005) Petrogenesis of Al-rich chondrules: Evidence from bulk compositions and phase equilibria. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(12), 3099-3127.
- McSween H.Y.Jr. (1977) On the nature and origin of isolated olivine grains in carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, (41), 411-418.
- Meteoritical Bulletin, No. 36-48 (1970). *Meteoritics*, (5), 85-109.
- Nazarov M.A., Barsukova L.D., Kharitonova V.Ya., Ul'yanov A.A., Shevarevsky I.D. (1983) Mineralogy, petrography and chemical composition of the Severnyi Kolchim meteorite. *Meteoritika*, **42**, 40-48. (In Russian)

- Olsen E., Grossman L. (1978) On the origin of isolated olivine grains in Type 3 carbonaceous chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **41**, 111-127.
- Pack A., Palme H., Shelley J.M.G. (2005) Origin of chondritic forsterite grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 3159-3182.
- Pack A., Yurimoto H., Palme H. (2004) Petrographic and oxygen-isotopic study of refractory forsterites from R-chondrite Dar al Gani 013 (R3.5-6), unequilibrated ordinary and carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**(5), 1135-1157.
- Reid A.M., Bass M.N., Fujita H., Kerridge J.F., Frederiksson K. (1970) Olivine and pyroxene in the Orgueil meteorite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **34**, 1253-1255.
- Roedder E. (1981) Significance of Ca-Al-rich silicate melt inclusions in olivine crystals from the Murchison type II carbonaceous chondrite. *Bull. Minéralogie*, **104**, 339-353.
- Rout S.S., Keil K., Bischoff A. (2010) Bulk chemical compositions of Al-rich objects from Rumuruti (R) chondrites: Implications for their origin. *Chemie der Erde*, **70**, 35-53.
- Rout S.S., Bischoff A. (2008) Ca, Al-rich inclusions in Rumuruti (R) chondrites. *Meteor. Planet. Sci.*, **43**(9), 1439-1464.
- Russell S.S., MacPherson G.J., Leshin L.A., McKeegan K.D. (2000) ^{16}O enrichments in aluminum-rich chondrules from ordinary chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **184**, 57-74.
- Scott E.R.D., Krot A.N. (2014) Chondrites and Their Components. *Treatise on geochemistry*. 2nd ed. V. 1. Meteorites and cosmochemical processes. L., Elsevier Ltd., 65-137.
- Sears D.W.G., Grossman J.N., Melcher C.L., Ross L.M., Mills A.A. (1980) Measuring the metamorphic history of unequilibrated ordinary chondrites. *Nature*, **287**, 791-795.
- Shchapova Yu.V., Votyakov S.L., Zamyatin D.A., Chervyakovskaya M.V., Pankrushina E.A. (2020) Mineral concentrators of d- and f-elements: local spectroscopic and LA-ICP-MS studies of the composition, structure and properties, geochronological applications. Novosibirsk, SB RAS Publ., 424 p. (In Russian)
- Sheng Y.J., Hutcheon I.D., Wasserburg G.J. (1991) Origin of plagioclase-olivine inclusions in carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 581-599.
- Steele I.M., Smith J.V., Skirius C. (1985) Cathodoluminescence zoning and minor elements in forsterites from the Murchison (CM2) carbonaceous chondrite. *Nature*, **313**, 294-297.
- Steele I.M. (1986) Compositions and textures of relic forsterite in carbonaceous and unequilibrated ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 1379-1395.
- Stöffler D., Hamann C., Metzler K. Addendum to "Stöffler D., Hamann C., and Metzler K. (2019) Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. Meteoritics & Planetary Science 53, 5-49, 2018". *Meteor. Planet. Sci.*, **54**(4), 946-949.
- Stöffler D., Keil K., Scott E.R.D. (1991) Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 3845-3867.
- Wasson J.T., Kallemeyn G.W. (1988) Composition of Chondrites. *Philos. Transact. Royal Soc. Lond.*, **325**(1587), 535-544.
- Weisberg M.K., Kimura M. (2012) The unequilibrated enstatite chondrites. *Chemie der Erde*, **72**, 101-115.
- Wlotzka F.A. (1993) Weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, **28**(3), 460-460.
- Yudin I.A. (1970) To the Mineralogy of the Severny Koltchim meteorite. *Tr. IGG UFAN SSSR*, **86**, 157-161. (In Russian)
- Zhang A.-C., Itoh S., Sakamoto N., Wang R.-C., Yurimoto H. (2014) Origins of Al-rich chondrules: Clues from a compound Al-rich chondrule in the Dar al Gani 978 carbonaceous chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **130**, 78-92.
- Zhang M., Lin Y., Tang G., Liu Y., Leya I. (2019) Origin of Al-rich chondrules in CV chondrites: Incorporation of diverse refractory components into the ferromagnesian chondrule forming region. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **272**, 198-217.
- Zolensky M.E., Mittlefehldt D.W., Lipschutz M.E., Wang M.-S., Clayton R.N., Mayeda T.K., Grady M.M., Pillinger C., Barber D. (1997) CM chondrites exhibit the complete petrologic range from type 2 to 1. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**, 5099-5115.
- Zolensky M.E., Tonui E.K., Bevan A.W.R., Le L., Clayton R.N., Mayeda T.K., Norman M. (2004) Camel Donga 040: A CV chondrite genomict breccia with unequilibrated and metamorphosed material. *Antarct. Meteor. Res.*, **28**, 95-96.