

УДК 552.63+523.681.2

## ПРИРОДА КЛИНОЭНСТАТИТОВОЙ КАЙМЫ В ТУГОПЛАВКИХ БОГАТЫХ ФОРСТЕРИТОМ ВКЛЮЧЕНИЯХ ИЗ УГЛИСТЫХ ХОНДРИТОВ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ (EBSD)

© 2020 г. С. В. Берзин<sup>1,\*</sup>, академик РАН В. А. Коротеев<sup>1</sup>, К. А. Дугушкина<sup>1</sup>, В. В. Шиловских<sup>2</sup>, Д. А. Замятин<sup>1,3</sup>, С. Ю. Степанов<sup>1</sup>

Поступило 08.07.2020 г.

После доработки 10.08.2020 г.

Принято к публикации 12.08.2020 г.

Клиноэнстатитовая кайма присутствует во многих тугоплавких богатых форстеритом включениях, однако специализированные исследования не проводились. Получены первые данные по изучению тугоплавких богатых форстеритом включений методом дифракции отраженных электронов (EBSD). Установлено, что клиноэнстатитовая кайма во включениях форстерита имеет реакционную природу и сформировалась в результате небулярных процессов. Показано, что кайма практически полностью сложена клиноэнстатитом. Выявлено внутреннее блоковое строение зерен форстерита с относительной разориентировкой отдельных блоков до  $10^\circ$  в пределах одного кристалла.

*Ключевые слова:* тугоплавкие богатые форстеритом включения, тугоплавкие включения, клиноэнстатит, дифракция отраженных электронов

DOI: 10.31857/S2686739720110031

Тугоплавкие богатые форстеритом включения (refractory forsterite rich objects) известны в неравновесных углистых ([1–4] и др.), обыкновенных [5, 6] и R-хондритах [7]. Данные включения являются общим компонентом для хондритов разных классов. Богатые форстеритом включения встречаются преимущественно в матрице хондритов, однако также известны в виде включений внутри хондр ([8] и др.). Размер включений варьирует от 10 мкм до 1 мм. Оливин, слагающий данные включения, характеризуется низкой железистостью (содержание фаялитового минала Fa колеблется от 0.05 до 2%), обогащением тугоплавкими литофильными элементами (RLE), в частности СаО 0.5–1.0, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 0.3, TiO<sub>2</sub> до 0.15 мас. %, резким дефицитом MnO и NiO, обогащением <sup>16</sup>O ([7] и др.). Исходя из вышеперечисленных признаков богатые форстеритом включения, наряду с богатыми кальцием и алюминием включениями

(CAIs) и амебоидальными оливиновыми агрегатами (AOAs), относят к категории тугоплавких включений (refractory inclusion) – наиболее ранних минеральных образований протосолнечной небулы. По сравнению с другими тугоплавкими включениями (CAIs и AOAs) богатые форстеритом включения изучены в меньшей степени. Механизмы их формирования и дальнейшего преобразования отчасти остаются дискуссионными. Образование тугоплавких богатых форстеритом включений происходило, согласно одним гипотезам, путем непосредственной конденсации из небулярного газа ([3, 5] и др.). Согласно другим гипотезам, такой форстерит кристаллизовался в каплях расплава, обогащенного RLE, – протохондрах или хондрах начальной генерации, с дальнейшим разрушением последних и высвобождением форстерита ([2, 4, 7, 9] и др.).

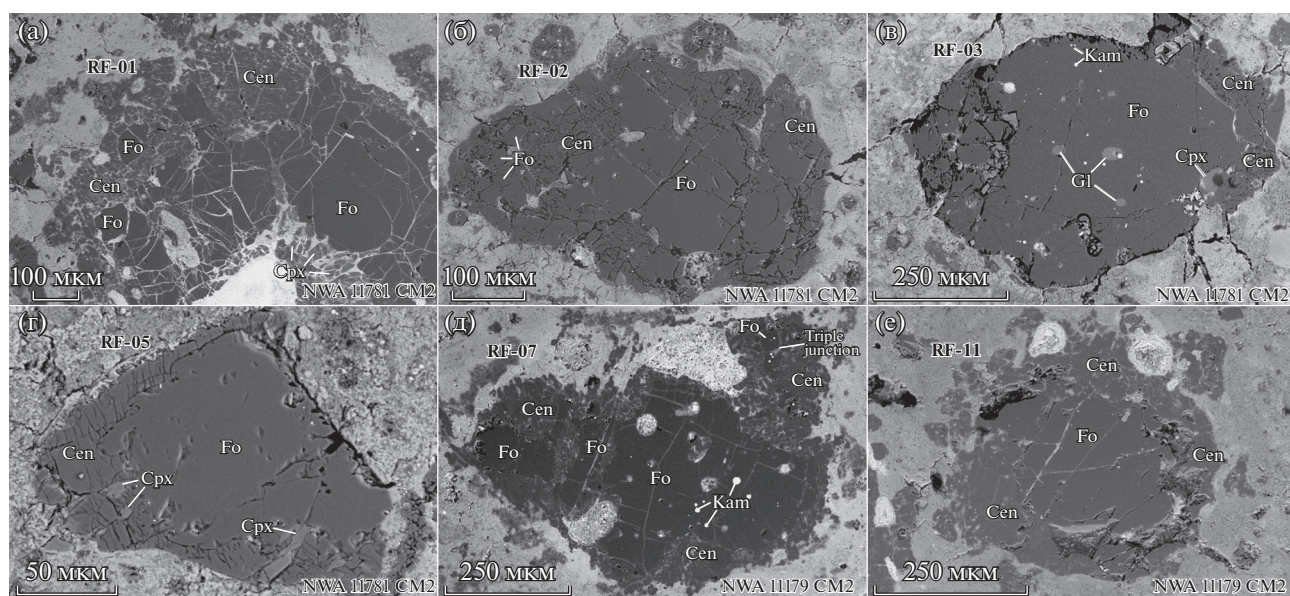
Многие тугоплавкие богатые форстеритом включения окружены каймой крайне низкожелезистого пироксена (энстатита или клиноэнстатита), мощностью до 100 мкм. Кайма традиционно называется реакционной [7], однако специально изучение ее не проводилось. Теоретически возможны два пути формирования пироксеновой каймы: обрастание форстерита новообразованным пироксеном или замещение форстерита пироксеном по периметру. Задача данного исследо-

<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

\*E-mail: sbersin@ya.ru



**Рис. 1.** Тугоплавкие богатые форстеритом включения из углистых хондритов. Изображения в обратно-рассеянных электронах (BSE), Fo – форстерит, Cen – клиноэнстатит, Cpx – клинопироксен, Gl – кислое стекло, Кам – камасит, triple junction – точка тройного сочленения.

вания – установить механизм формирования пироксеновой каймы в тугоплавких богатых форстеритом включениях. Для решения поставленной задачи были выполнены изучение и картирование включений методом дифракции отраженных электронов (EBSD, electron backscatter diffraction).

В ходе работы были изучены 6 тугоплавких богатых форстеритом включений (рис. 1) в трех углистых хондритах: Allende (CV3), Northwest Africa 11179 (CM2) (NWA 11179) и Northwest Africa 11781 (CM2) (NWA 11781) [10]. Локальное изучение ориентации кристаллических решеток проводилось методом дифракции отраженных электронов (EBSD) на сканирующем электронном микроскопе “Hitachi” S-3400N, оснащенный детектором EBSD “Oxford NordLysNano”, (ресурсный центр “Геомодель” НП СПбГУ), и на сканирующем электронном микроскопе “JEOL” JSM-6390LV, оснащенный энергодисперсионным спектрометром “INCA Energy” 450 X-Max80 и детектором EBSD “Oxford NordLysNano” (ЦКП “Геоаналитик”, ИГГ УрО РАН).

Изученные включения имеют преимущественно неправильную обломочную форму. Размер варьирует от 0.3 до 1 мм. Включения состоят из одного или нескольких зерен оливина. В трех включениях (RF-07 в метеорите NWA 11179, рис. 1 д) установлены точки тройного сочленения между зернами оливина. Зерна форстерита содержат идиоморфные включения шпинели и округлые включения металла (камасит) и кислого стекла (RF-01,

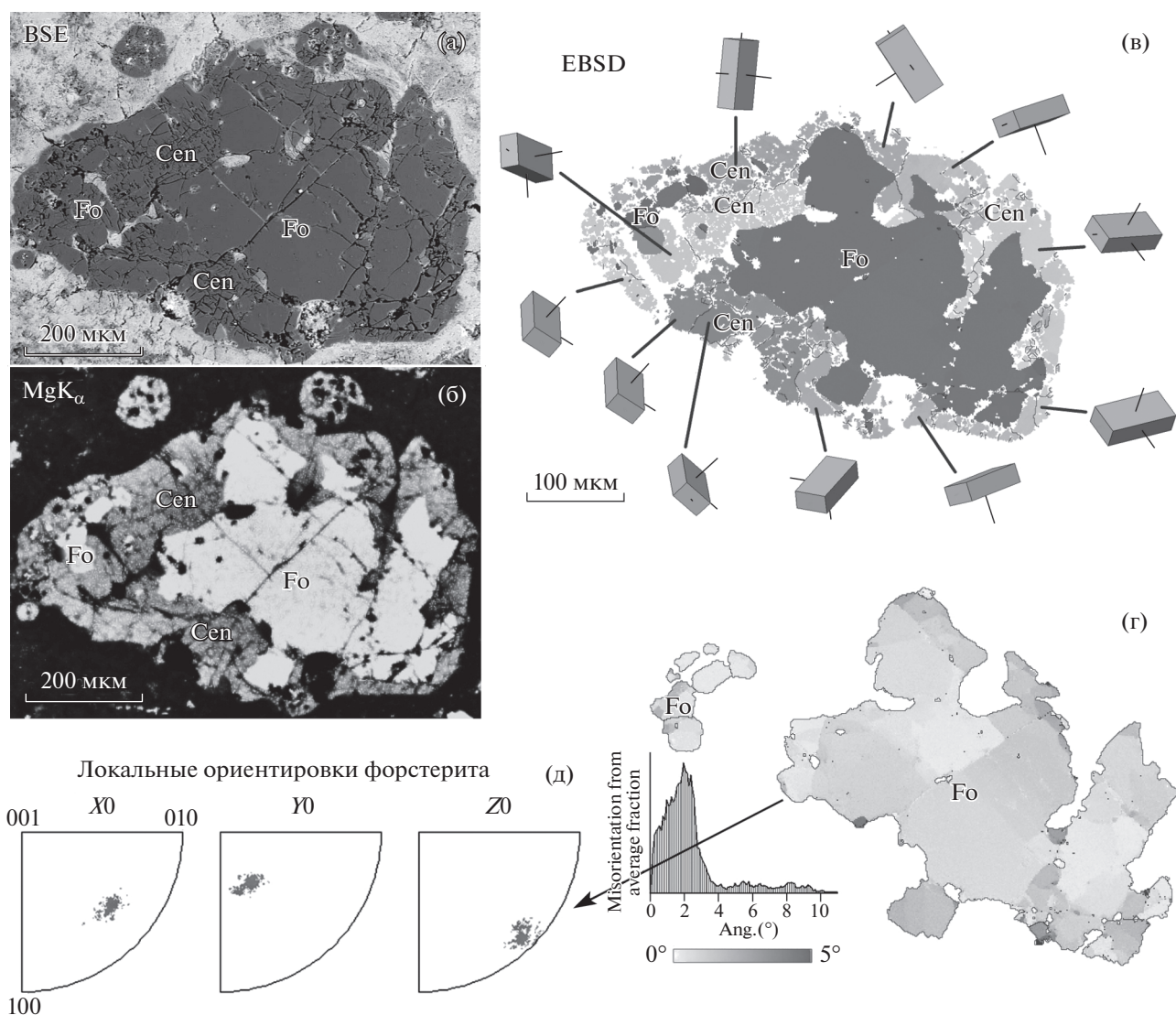
RF-02, RF-03 в метеорите NWA 11781, RF-07 в метеорите NWA 11179, рис. 1 а–в, д).

Наиболее показательное тугоплавкое богатое форстеритом включение RF-02 в метеорите NWA 11781 состоит из одного крупного и нескольких более мелких зерен оливина (рис. 2). В результате EBSD-картирования установлено, что наиболее крупное зерно имеет блоковое строение, с относительной разориентировкой отдельных блоков в пределах кристалла более чем на  $3^\circ$  (рис. 2 г). Подобное блоковое строение наблюдается и в других тугоплавких богатых форстеритом включениях с разориентировкой отдельных блоков до  $10^\circ$ .

Клиноэнстатитовая кайма наблюдается практически в половине тугоплавких богатых форстеритом включений. Она полностью или частично окружает зерна форстерита. Мощность каймы варьирует от первых микрометров до 100–200 мкм. Во включении RF-02 в метеорите NWA 11781 (рис. 2а–2в) клиноэнстатитовая кайма также развивается по границе между зернами форстерита.

В результате анализа данных EBSD-картирования установлено, что кайма 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.

Граница оливина и клиноэнстатитовой каймы более неровная, чем внешние конуры включе-



**Рис. 2.** Строение клиноэнстатитовой (Cen) каймы в тугоплавком богатом форстеритом (Fo) включения (RF-02) в метеорите NWA 11781 (CM2) по данным СЭМ и EBSD. а – изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE); б – элементная карта распределения MgK $\alpha$ ; в – карта локальных ориентировок кристаллической решетки клиноэнстатита и форстерита по данным EBSD; г – карта локальных ориентировок кристаллической решетки форстерита по данным EBSD с максимальной разориентировкой внутри кристалла до 3° и обратные полюсные фигуры для наиболее крупного зерна форстерита.

ний, и местами глубоко вдается внутрь зерен форстерита (рис. 2 а, б). Таким образом, граница, вероятнее всего, является коррозионной, образующейся при замещении ранних минеральных агрегатов поздними. Клиноэнстатитовая кайма состоит из отдельных зерен клиноэнстатита размером 30–150 мкм. Зона геометрического отбора в клиноэнстатитовой кайме на границе с форстеритом отсутствует. Границы между зернами клиноэнстатита криволинейные, плавно изгибающиеся, и, по всей видимости, являются индукционными зонами совместного роста. Структура энстатитовой каймы гранонематобластовая, аналогичная структуре мономинеральных метамор-

фических или метасоматических пород (мрамор, кварцит и т.п.).

Коррозионная граница с форстеритом, отсутствие зоны геометрического отбора и гранонематобластовая структура клиноэнстатитовой каймы свидетельствуют о ее формировании за счет замещения форстерита. То есть кайма имеет реакционную природу. Углистые хондриты группы CM не имеют следов высокотемпературного метаморфизма в недрах родительского тела. Таким образом, формирование реакционной каймы произошло на доаккреционной стадии в протосолнечной небуле. Учитывая, что тугоплавкие богатые форстеритом включения являются предше-

ственниками хондр [8], можно предположить, что включения тугоплавкого форстерита могли претерпеть тепловое или иное воздействие во время повторяющихся процессов формирования хондр. Клиноэнстатитовая кайма присутствует у существенной доли, но не у всех тугоплавких богатых форстеритом включений. Это говорит о том, что воздействию подверглись не все включения, хотя явление и носило достаточно массовый характер.

Таким образом, нами получены первые данные по изучению тугоплавких богатых форстеритом включений методом дифракции отраженных электронов EBSD. Установлено, что клиноэнстатитовая кайма в богатых форстеритом включениях имеет реакционную природу и сформировалась в результате взаимодействия с небулярным веществом. Подобное взаимодействие носило широко распространенный, но не всеобъемлющий характер, и может быть связано с процессами формирования хондр. Показано, что кайма практически полностью состоит из клиноэнстатита. Выявлено внутреннее блоковое строение зерен форстерита с разориентировкой блоков до  $10^\circ$ .

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19–35–90059.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reid A.M., Bass M.N., Fujita H., Kerridge J.F., Frederiksson K. Olivine and Pyroxene in the Orgueil Meteorite // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1970. V. 34. P. 1253–1255.
2. McSween H.Y.Jr. On the Nature and Origin of Isolated Olivine Grains in Carbonaceous Chondrites // *Geochim. Cosmoch. Acta*. 1977. V. 41. P. 411–418.
3. Olsen E., Grossman L. On the Origin of Isolated Olivine Grains in Type 2 Carbonaceous Chondrites // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1978. V. 41. P. 111–127.
4. Pack A., Palme H., Shelley J.M.G. Origin of Chondritic Forsterite Grains // *Geochim. Cosmoch. Acta*. 2005. V. 69. № 12. P. 3159–3182.
5. Steele I.M. Compositions and Textures of Relic Forsterite in Carbonaceous and Unequilibrated Ordinary Chondrites // *Geochim. Cosmoch. Acta*. 1986. V. 50. P. 1379–1395.
6. Берзин С.В., Иванов К.С., Бурлаков Е.В. Находка тугоплавких включений в метеорите Северный Колчим (НЗ) // *ДАН*. 2019. Т. 487. № 6. С. 650–652.
7. Pack A., Yurimoto H., Palme H. Petrographic and Oxygen-isotopic Study of Refractory Forsterites from R-chondrite Dar al Gani 013 (R3.5–6), Unequilibrated Ordinary and Carbonaceous Chondrites // *Geochim. Cosmoch. Acta*. 2004. V. 68. № 5. P. 1135–1157.
8. Krot A.N., Nagashima K., Libourel G., Miller K.E. Multiple Mechanisms of Transient Heating Events in the Protoplanetary Disk. *Chondrules. Records of Protoplanetary Disk Processes*. Cambridge University Press, 2018. P. 11–56.
9. Roedder E. Significance of Ca-Al-rich Silicate Melt Inclusions in Olivine Crystals from the Murchison Type II Carbonaceous Chondrite // *Bull. Mineral.* 1981. V. 104. P. 339–353.
10. Дугушкина К.А., Берзин С.В. Новый углистый хондрит CM2 из Северо-Западной Африки (Northwest Africa 11781) // *Литосфера*. 2019. Т. 19. № 4. С. 580–587.

## THE NATURE OF THE CLINOENSTATITE RIM IN THE REFRACTORY FORSTERITE RICH OBJECTS IN CARBONACEOUS CHONDRITES: THE FIRST RESULTS OF ELECTRON BACKSCATTER DIFFRACTION (EBSD)

S. V. Berzin<sup>a, #</sup>, Academician of the RAS V. A. Koroteev<sup>a</sup>, K. A. Dugushkina<sup>a</sup>,  
V. V. Shilovskikh<sup>b</sup>, D. A. Zamyatin<sup>a, c</sup>, and S. Yu. Stepanov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

<sup>b</sup> Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>c</sup> B.N. Eltsyn Urals Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>#</sup> E-mail: sbersin@ya.ru

Clinoenstatite rim is present in many refractory forsterite rich objects. However, specialized studies of clinoenstatite rim have not been carried out. The first data were obtained on the study of refractory forsterite rich objects by electron backscatter diffraction (EBSD). Clinoenstatite rim in refractory forsterite rich objects has a reactionary nature and was formed as a result of nebular processes. The rim is composed almost completely of clinoenstatite. Refractory forsterite grains have block internal structure with maximum disorientation angle  $10^\circ$  within a single crystal.

*Keywords:* refractory forsterite rich objects, refractory inclusions, clinoenstatite, electron backscatter diffraction