

## ВКЛЮЧЕНИЯ ТУГОПЛАВКОГО ФОРСТЕРИТА И ХОНДРЫ ТИПА IA В ОБЫКНОВЕННЫХ И УГЛИСТЫХ ХОНДРИТАХ

Берзин С.В., Дугушкина К.А., Червяковский В.С.

*Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия, sbersin@ya.ru*

Тугоплавкие богатые форстеритом включения (refractory forsterite rich objects) известны в неравновесных углистых [Reid et al., 1970; McSween, 1977; Olsen, Grossman, 1978; Pack et al., 2004, 2005; и др.], обычных [Steele 1986; Pack et al., 2004; Берзин и др., 2019] и R-хондритах [Bischoff, 2000; Pack et al., 2004]. Данные включения являются общим компонентом для хондритов разных классов, встречаются преимущественно в матрице хондритов, однако известны и в виде включений в железо-магнезиальных хондрах [Krot et al., 2018]. Выдвигались гипотезы, согласно которым богатые форстеритом включения образовались путем непосредственной конденсации из небулярного газа [Fuchs et al., 1973; Olsen, Grossman, 1978; Steele, 1986; и др.]. Однако наиболее убедительные подтверждения нашли гипотезы, согласно которым тугоплавкий форстерит кристаллизовался в каплях расплава, обедненного FeO, Mn и обогащенного труднолетучими литофильными элементами (RLE) (Al, Ca, Ti и др.), в т.н. «протохондрах» или хондрах начальной генерации, с дальнейшим разрушением последних и высвобождением форстерита [McSween, 1977; Roedder, 1981; Pack et al., 2004, 2005; и др.]. Подобные «протохондры» с тугоплавким форстеритом описаны в ряде неравновесных углистых и обычных хондритов [Jones, Scott, 1989; Ushikubo et al., 2012; и др.] и классифицируются как тип IA (реже IAB).

Нами изучены 42 тугоплавких богатых форстеритом включения и 5 хондр с тугоплавким форстеритом из 3-х углистых хондритов: Allende (CV3), Northwest Africa 11179 (CM2), Northwest Africa 11781 (CM2) [Дугушкина, Берзин, 2019], и из одного обычного хондрита Северный Колчим (H4) [Берзин и др., 2019].

Изучение включений в метеоритах проводилось в ЦКП «Геоаналитик» (ИГТ УрО РАН) при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-6390LV с энергодисперсионной приставкой 450 X-Max80 и электронно-зондового микроанализатора (EPMA) CAMECA SX100. Определение содержания редких элементов проведено методом лазерной абляции (LA-ICP-MS) на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой NexION 300S с приставкой NWR 213, диаметр кратера 25 мкм. Кро-

ме того, ранее тугоплавкие богатые форстеритом включения были изучены нами методом дифракции отраженных электронов (EBSD) [Берзин и др., 2020]. Было установлено, что клиноэнстатитовая кайма в данных включениях имеет реакционную природу и сформировалась в результате неких небулярных процессов [Берзин и др., 2020].

В результате исследований методом лазерной абляции было установлено, что по повышенному содержанию труднолетучих литофильных элементов (Al, Ca, Ti, V, Sc, Y, Zr) изученные включения тугоплавкого форстерита близки к описанным в литературе включениям тугоплавкого форстерита [Pack et al., 2004] и отличаются от оливина из хондр. Форстерит из обособленных тугоплавких включений по элементному составу соответствует тугоплавкому форстериту из изученных нами хондр ранней генерации. Клиноэнстатит в кайме наследует повышенное содержание труднолетучих литофильных элементов, что лишнее свидетельствует о его формировании за счет замещения зерен тугоплавкого форстерита.

В настоящее время обсуждаются механизмы формирования хондр ранней генерации с тугоплавким форстеритом, в частности высказывается положение об обогащении труднолетучими литофильными элементами (Ca, Ti, Al) путем нагрева и испарении легко и умеренно летучих элементов [Marrocchi et al., 2018; и др.]. После кристаллизации «протохондры» подверглись дезинтеграции с образованием изолированных зерен форстерита. Учитывая, что включения тугоплавкого форстерита крайне редко встречаются в сростании с минералами мезостаза, а стекло сохраняется преимущественно в виде включений внутри оливина, можно сделать вывод, что данная дезинтеграция сопровождалась существенным нагревом выше точки плавления стекла. Учитывая, что сохранившиеся хондры с тугоплавким форстеритом встречаются гораздо реже, чем обособленные богатые форстеритом включения, можно сделать вывод о достаточно массовом масштабе события, приведшего к их разрушению. Клиноэнстатитовая кайма встречается менее чем в половине включений и сильно варьирует по мощности. Поэтому небулярное событие, приведшее к формированию клиноэнстатитовой

каймы, было не столь массовым. Присутствие богатых форстеритом включений в железомagneзиальных хондрах указывает на то, что данные включения являются предшественниками подавляющей части хондр Солнечной системы. Т.е. вышеперечисленные события с богатыми форстеритом включениями проходили на самых ранних этапах развития протосолнечной небулы.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Берзин С.В., Иванов К.С., Бурлаков Е.В. Находка тугоплавких включений в метеорите Северный Колчим (НЗ) // Доклады Академии наук. 2019. Т. 487. № 6. С. 650–652.
2. Берзин С.В., Коротеев В.А., Дугушкина К.А., Шиловских В.В., Замятин Д.А., Степанов С.Ю. Природа клиноэнстатитовой каймы в тугоплавких богатых форстеритом включениях из углистых хондритов: первые результаты исследования методом дифракции отраженных электронов (EBSD) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 495. № 1. С. 15–18.
3. 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.
4. Bischoff A. Mineralogical characterization of primitive, type-3 lithologies in Rumuruti chondrites // Meteoritics & Planetary Science. 2000. V. 35. P. 699–706.
5. Fuchs L.H., Olsen E., Jensen K.J. Mineralogy, mineral chemistry and composition of the Murchison (CM2) meteorite // Contrib. Earth Sci. 1973. V. 10. P. 1–39.
6. Jones R.H., Scott E.R.D. Petrology and thermal history of type IA chondrules in the Semarkona (LL3.0) chondrite // 19th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar Planet. Inst. 1989. P. 523–536.
7. 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.
8. Marrocchi Y., Villeneuve J., Batanova V., Piani L., Jacquet E. Oxygen isotopic diversity of chondrule precursors and the nebular origin of chondrules // Earth and Planetary Science Letters. 2018. V. 496. P. 132–141.
9. 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.
10. 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.
11. Pack A., Palme H., Shelley J.M.G. Origin of chondritic forsterite grains // Geochim. Cosmoch. Acta. 2005. V. 69. P. 3159–3182.
12. 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. P. 1135–1157.
13. 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.
14. Roedder E. Significance of Ca-Al-rich silicate melt inclusions in olivine crystals from the Murchison type II carbonaceous chondrite // Bulletin de mineralogy. 1981. V. 104. P. 339–353.
15. Steele I.M. Compositions and textures of relic forsterite in carbonaceous and unequilibrated ordinary chondrites // Geochim. Cosmoch. Acta. 1986. V. 50. P. 1379–1395.
16. Ushikubo T., Kimura M., Kita N.T., Valley J.W. Primordial oxygen isotope reservoirs of the solar nebula recorded in chondrules in Acfer 094 carbonaceous chondrite // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 90. P. 242–264.