

## МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ УНИКАЛЬНОГО КСЕНОЛИТА В МЕТЕОРИТЕ ЧЕЛЯБИНСК LL5

Берзин С.В., Степанов С.Ю.

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

Метеорит Челябинск упал в Челябинской области 15 февраля 2013 года. Метеорит относится к обыкновенным хондритам LL5. Минеральный состав и строение метеорита Челябинск описаны во многих литературных источниках [Берзин и др., 2013; Коротеев и др., 2013, Богомолов и др., 2013, и др.].

Необычный ксенолит найден нами в крупном полированном шлифе площадью 15.7 см<sup>2</sup>. Ксенолит расположен на границе светло-серого хондрита (т.н. «светлой литологии») и мощного ударного расплавленного прожилка с находящимися внутри него фрагментами черного хондрита (т.н. «черной литологии»). Ксенолит имеет близкую к овальной форму, его размер на срезе составляет 6×10 мм (рис. 1). Задача данной работы – исследовать вещественный состав и реконструировать механизм формирования данного ксенолита.

Исследование проводилось на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 (Oxford Instruments).

В отличие от окружающего хондрита ксенолит содержит исключительно оливинные хондры с колосниковой или «червеобразной» структурой (ВО типа) и практически не содержит металл и сульфиды (рис. 2). Хондры имеют как четкие округлые границы, так и нечеткие угловатые, близкие к идиоморфным зернам оливина. Во внутренней части всех хондр наблюдается кислое плагиоклазовое стекло с микрокристаллами клинопироксена или оливина, очень редко энстатита. Многие хондры деформированные, «смятые», однако характеризуются одинаковым угасанием оливина на всей плоскости среза. Пространство между хондрами очень схоже по строению с самими хондрами и заполнено зернами оливина удлиненной, округлой формы. В ксенолите присутствуют идиоморфные зерна оливина, практически не содержащие внутри стекло. В краевой части ксенолита обнаружен обломок хондры, ограниченный внешней каймой ксенолита. Ксенолит окружен по периметру практически непрерывной энстатитовой каймой мощностью 100–200 мкм, сложенной крупными минеральными

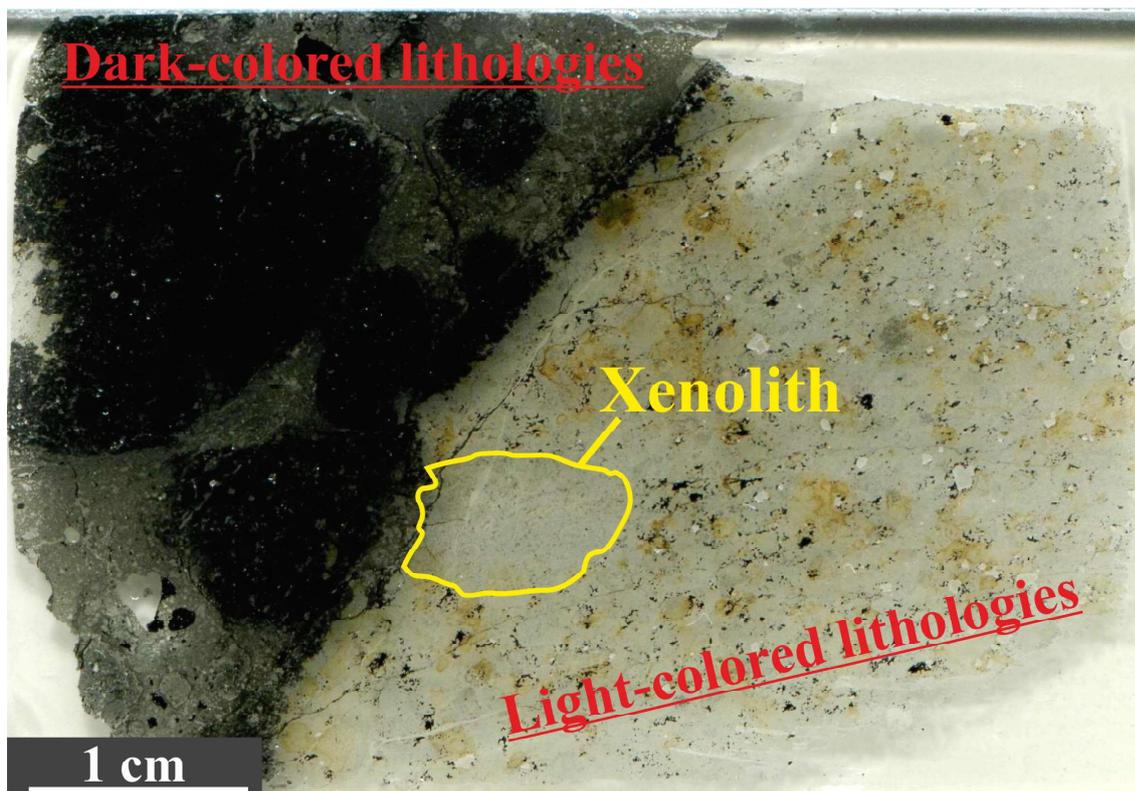


Рис. 1. Ксенолит в полированном шлифе метеорита Челябинск

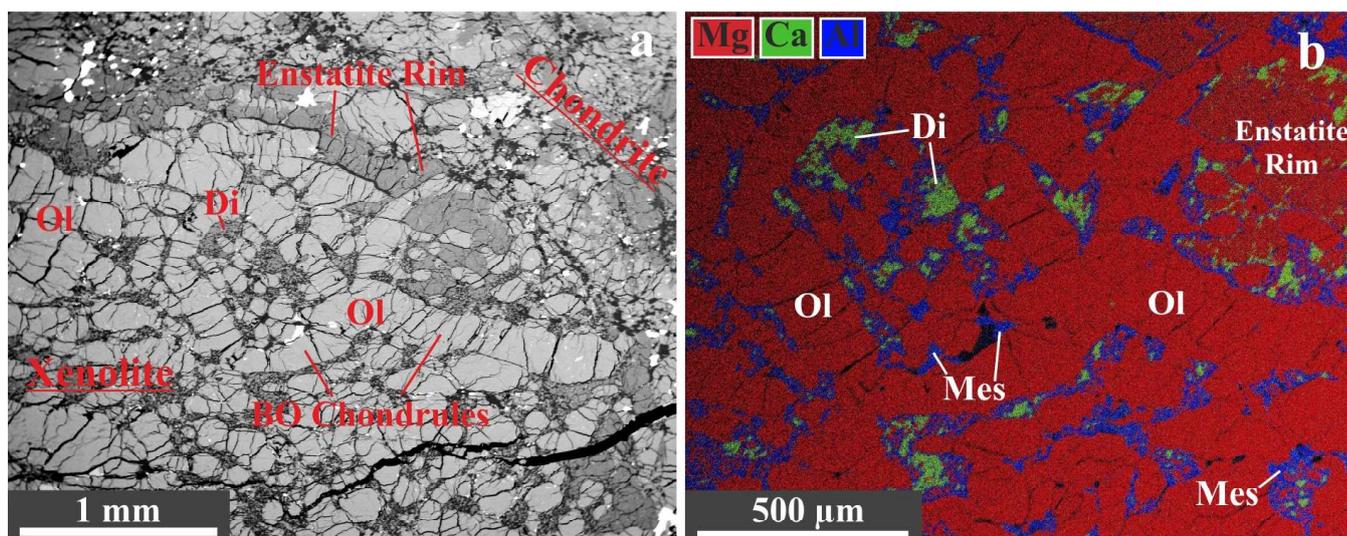


Рис. 2. Строение ксенолита в метеорите Челябинск. Краевая часть с энстатитовой каймой. а – изображение в отраженных электронах (BSE), б – комбинированная элементная карта, Mg – красный, Ca – зеленый, Al – синий

индивидами энстатита, угасающими в скрещенных николях синхронно на участках 3-5 мм.

Относительно формирования вещества ксенолита нами предполагаются 3 возможных механизма:

1. Горячая аккреция расплавленных, частично-расплавленных и застывших хондр одного типа — колосниковых оливиновых хондр (англ. barred olivine или BO). Таким образом, в результате аккреции получился расплав с погруженными в него застывшими и частично застывшими хондрами. В дальнейшем произошло остывание расплава, и в результате пространство между отдельными колосниковыми оливиновыми хондрами стало аналогично по строению внутренним частям хондр. Скорость остывания расплава была аналогичной скорости остывания хондр, в результате чего в хондрах и в межхондровом пространстве наблюдается одинаковая размерность зерен одних и тех же минералов (оливина, клинопироксена, хромита, апатита, троилита). Такое событие теоретически могло произойти в месте массового одновременного зарождения хондр одного типа (BO). Однако, исходя из того, что метеориты, аналогичные по строению данному хондриту, до сих пор не были найдены, вероятно, это чрезвычайно редкое событие. Более того, соударение даже 2-х хондр в расплавленном состоянии в протосолнечной небуле являлось крайне редким событием, а изредка наблюдаемые в хондритах составные хондры, по мнению отдельных исследователей, были вызваны соударениями твердых частиц [Hubbard, 2015].

2. Исходя из того, что ксенолит имеет относительно небольшой размер 6×10 мм, сопоставимый с размером хондр в некоторых типах хондритов, и имеет овальную форму, возможно, его можно рас-

сматривать как крупную хондру, содержащую внутри себя другие ранее застывшие хондры. В метеоритах многократно описаны хондры, содержащие в себе более мелкие хондры ранних генераций, и это рассматривается как свидетельство повторяемости процессов хондробразования [Krot et al., 2018]. В таком случае механизм формирования близок к механизму, предложенному в первом пункте: остывание крупной капли расплава, содержащей в себе уже застывшие хондры ранних генераций. Однако, по сравнению с описанными в литературе случаями наш ксенолит (предположительно крупная хондра) имеет значительно больший размер. Тем не менее, этот механизм рассматривается нами как наиболее вероятный.

3. Полностью магматический механизм формирования вещества ксенолита с находящимися внутри него хондрами. Как известно, внутреннее строение хондр характеризуется типично магматической гипидиоморфозернистой структурой. При этом сами хондры в углистых хондритах 1-2 петрологического типа располагаются в хлорит-серпентин-гидрослюдистой матрице, в неравновесных обыкновенных и углистых хондритах 3-го петрологического типа - в обломочной силикатной матрице, в равновесных обыкновенных, энстатитовых и R хондритах 4-6 петрологического типов – в перекристаллизованной силикатной матрице с бластическими структурами. Внутри изученного ксенолита пространство между хондрами имеет явно магматическую структуру, содержит идиоморфный оливин и пироксены, погруженные в кислое плагиоклазовое стекло. Кроме того, как упоминалось выше, хондры и межхондровое пространство имеют схожий минеральный и валовый химический состав, а также сложены зернами

одной размерности. Некоторые ВО хондры имеют не округлую, а угловатую таблитчатую форму и больше напоминают полые коробочные кристаллы оливина. Вполне возможно, что их образование происходило изначально за счет кристаллизации из расплава, или же они имели изначально округлую форму, но при попадании в расплав по их внешним границам произошел рост оливина с образованием почти идиоморфных кристаллов. Несмотря на то, что для большинства хондритов гипотеза формирования хондр внутри расплава не нашла подтверждений, в изученном ксенолите мы допускаем формирование или, что вероятнее, преобразование хондр в расплаве.

Энстатитовая кайма образовалась, вероятно, в результате взаимодействия ксенолита с небулярным газом до его аккреции на родительское тело метеорита Челябинск. Энстатит в кайме отличается по составу от валового состава ксенолита, что свидетельствует о том, что это не просто продукт плавления вещества ксенолита по периферии, а результат реакционного взаимодействия с окружающей его средой (небулярным газом).

Таким образом, нами изучен уникальный ксенолит, найденный нами в метеорите Челябинск. Рассмотрены возможные механизмы его формирования.

*Авторы благодарны анонимным рецензентам и главному редактору журнала Meteoritics & Planetary Science Dr. A.J. Timothy Jull за конструктивные замечания и обсуждение полученных результатов. Авторы признательны С.В. Колесниченко за предоставленные образцы метеорита Челябинск. Исследования проводятся при поддержке РФФИ, грант № 17-05-00297.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. Особенности минерального и геохимического состава метеорита «Челябинск» // Литосфера. 2013. № 3. С. 89-105.
2. Богомолов Е.С., Скублов С.Г., Марин Ю.Б., Степанов С.Ю., Антонов А.В., Галанкина О.Л. Sm–Nd возраст и геохимия минералов метеорита Челябинск // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452. №5. С. 548–553.
3. Коротеев В.А., Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. Состав и строение метеорита «Челябинск» // Доклады Академии наук. 2013. Т. 451. № 4. С. 446–450.
4. Hubbard A. Compound chondrules fused cold // Icarus. 2015. Vol. 254. P. 56–61.
5. Krot A.N., Nagashima K, Lbourel G., Miller K.E. Multiple Mechanisms of Transient Heating Events in the Protoplanetary Disk Evidence from Precursors of Chondrules and Igneous Ca, Al-Rich Inclusions // Chondrules. 2018. P. 11-56.