

РАЗНОВИДНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЙ И КСЕНОЛИТОВ В ХОНДРИТАХ

Дугушкина К.А., Берзин С.В.

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург,
dugushkina.kseniya@mail.ru*

Наиболее распространённым типом каменных метеоритов являются хондриты – примитивные породы, не прошедшие планетарную дифференциацию, которые сохранили в себе следы процессов, происходивших на допланетной стадии развития Солнечной системы.

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

Хондриты состоят из четырёх основных компонентов: матричного материала, хондр и их обломков, Fe, Ni-металла, тугоплавких включений, а также других различных видов включений и обособлений [Scott and Krot, 2014].

Хондры – округлые образования, преимущественно состоящие из железомagneзиальных силикатов. Типичные размеры хондр в хондритах составляют 0.1–3 мм в диаметре. Встречаются крупные хондры, размер которых превышает 3–5 мм в диаметре, к таким хондрам применяют термины «макрохондры» или «мегахондры» [Weisberg et al., 1988; и др.]. По структурным особенностям хондры классифицируются на порфировые (POP, PO, PP) и непорфировые (BO, RP, CC, G) типы.

Матрица представляет собой практически непрозрачную смесь минеральных зерен размером от нескольких нанометров до нескольких миллиметров, которая заполняет пространство между хондрами и другими компонентами хондритов [Scott et al., 1988].

Включениями в хондритах являются твердые частицы, отличающиеся от хондр матрицы и металлических зерен, и попавшие на родительское тело хондрита в результате аккреции.

Наиболее известным примером включений являются тугоплавкие включения (refractory inclusions) – богатые Ca, Al включения (CAIs) и амёбовидные оливиновые агрегаты (AOAs). Тугоплавкие включения обогащены труднолетучими элементами и рассматриваются как первые твердые конденсаты, образовавшиеся в протосолнечной небуле. Включения встречаются во всех группах хондритовых

метеоритов. Возраст CAIs по данным исследования «долгоживущей» изотопной системы U-Th-Pb составляет 4567.3 ± 0.16 млн лет и соответствует началу короткого периода (около 3 млн лет) формирования хондр [Connelly et al., 2012].

В веществе хондритов встречаются включения крайне низкожелезистого форстерита (Fo_{90-99}). Форстерит характеризуется низкой железистостью ($f0.002-0.02$). Содержит существенную примесь RLE, в частности Ca, Al, Ti (CaO до 1.0%, Al_2O_3 до 0.3%, TiO_2 до 0.15%). При этом отмечается резкий дефицит по содержанию «умеренно летучих» Mn, Fe и Ni. Также отличительной особенностью форстерита является обладание яркой катодолюминесценцией. Многие богатые форстеритом включения окружены каймой крайне низкожелезистого пироксена (энстатита или клиноэнстатита). Нами были изучены 48 богатых форстеритом включений в трёх углистых (NWA 11781, NWA 11179, Allende) и двух обыкновенных (Северный Колчим и Shinejinst) хондритах [Берзин и др., 2020; 2021].

В наиболее неравновесных хондритах содержатся многочисленные образования округлой формы – металл-сульфидные нодули/конкреции [Lin et al., 2002; El Goresy et al., 2017; Jacquet et al., 2018; и др.]. Они состоят в основном из Fe, Ni-металла и троилита, часто находятся в ассоциации с различными сульфидами (например: ольдгамитом CaS , найнинджеритом $(\text{Mg, Fe, Mn})\text{S}$, шрейберзитом $(\text{Fe, Ni})_3\text{P}$, пентландитом $(\text{Fe, Ni})_9\text{S}_8$ и другими). В нодулях были обнаружены многочисленные силикаты: пироксены, полиморфные модификации кремнезема (тридимит и кристобалит), плагиоклаз (или стекло альбитового состава) и пористый аморфный кремнезем [Lehner et al., 2010; и др.]. В нодулях наблюдаются слоистые структуры, которые, вероятно, указывают на последовательность кристаллизации составляющих их минеральных фаз [Lin et al., 2002; и др.].

В веществе хондритов встречаются кремнезёмсодержащие компоненты (SRC), являющиеся редкими объектами в обыкновенных и углистых хондритах. SRCs встречаются в виде хондр и их фрагментов, а также в виде отдельных включений в матрице метеоритов. Минералогия SRCs достаточно разнообразна. В основном объекты состоят

из ортопироксена и фазы SiO_2 [Brigham et al., 1986; Hezel et al., 2006; и др.]. Фаза SiO_2 может быть представлена кристобалитом и тридимитом, реже кварцем. Тридимит и кристобалит могут содержать до 3 мас.% примесей, например: FeO до 1 мас.%, Al_2O_3 до 1.2 мас.%, MgO до 0.7 мас.%. Пироксены представлены преимущественно низкокальциевыми пироксенами от энстатита до ферросилита. Содержания FeO сильно варьируют от 3.2 до 20 мас.%, CaO не превышает 1 мас. %. В хондритах Северный Колчим и Shinejinst были найдены и изучены 14 SRCs [Берзин и др., 2021; Дугушкина и др., 2021].

В метеоритах часто наблюдаются ксенолиты и микроксенолиты – фрагменты метеоритов в матрице более крупных метеоритов, генетически отличающиеся и принадлежащие к другой группе или классу. В случаях, когда внутри метеорита одного класса встречаются обломки этого же класса, но, например другого петрографического типа, такие включения принято именовать как «класты». Ксенолиты с типичным размером <1 мм называются микроксенолитами. Метеориты, которые содержат обломки различных типов хондритов, а также ахондритов, называются брекчиями [Bischoff et al., 2006.]. Их происхождение тесно связано с ударами: ксенолиты были отделены от своих родительских тел в результате ударов, а затем внедрялись в родительские тела метеоритов-хозяев в результате других ударов. Ксенолиты присутствуют почти в каждом классе метеоритов. Так нами были обнаружены и изучены ксенолиты в хондритах Северный Колчим и Челябинск [Берзин и др., 2021; Дугушкина и др., 2022].

В хондритах нередко встречаются крупные магматические включения (large igneous inclusions). Для них характерно низкое содержание металлов и сульфидов, магматическая структура и большие размеры (до 4 см в поперечнике) по сравнению с хондрами [Ruzicka et al., 2019].

В ударно-измененных обыкновенных хондритах встречаются хромит-плагиоклазовые скопления [Rubin, 2003; и др.]. Хромит наблюдается в виде зерен от идиоморфной до округлой формы, размер зерен варьирует от 0.5 до 10 мкм. Содержание FeO и MgO в хромите из скоплений варьирует в пределах 24–31 и 2–7 мас.% соответственно. В некоторых зернах хромита может наблюдаться обогащение TiO_2 до 7.0 мас.% [Rubin, 2003]. Силикатная часть скоплений представлена плагиоклазом или стеклом плагиоклазового состава. Данные скопления являются надежным индикатором ударных изменений в обыкновенных хондритах [Rubin, 2003].

Авторы благодарят за поддержку Министерство науки и высшего образования РФ в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030».

ЛИТЕРАТУРА

1. Берзин С.В., Дугушкина К.А., Червяковская М.В., Червяковский В.С., Панкрушина Е.А., Бурлаков Е.В. Уточнение классификации и характеристика включения в метеорите Северный Колчим (НЗ.4) // Литосфера. 2021. Т. 21. № 3. С. 409–430.
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., Панкрушина Е.А., Пастухович А.Ю., Гроховский В.И., Чебыкин Н.С., Дэмбэрэл С. Богатые SiO_2 компоненты (SRC) в метеорите Shinejinst (H4): результаты исследований методами рамановской спектроскопии и дифракции отраженных электронов (EBSD) // Минералы: строение, свойства, методы исследования. 2021. № 12. С. 40–42.
4. Дугушкина К.А., Берзин С.В., Степанов С.Ю. Ксенолит в метеорите Челябинск (LL5): минералогия, строение и механизм формирования // XIII Всероссийская школа молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия»: Сборник материалов. Черноголовка: ИЭМ РАН, 2022. С. 23–24.
5. Bischoff A., Scott E.R.D., Metzler K., Goodrich C.A. Nature and origins of meteoritic breccias. In: Meteorites and the Early Solar System II. University of Arizona Press, 2006. P. 679–712.
6. Brigham C.A., Murrell M.T., Yabuki H., Ouyang Z., El Goresy A. Silica-bearing chondrules and clasts in ordinary chondrites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1986. V. 50. P. 1655–1666.
7. Connolly J.N., Bizzarro M., Krot A.N., Nordlunds A., Wielandt D., Ivanova M.A. The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk // Science. 2012. V. 338(6107). P. 651–655.
8. El Goresy A., Lin Y., Miyahara M., Gannoun A., Boyet M., Ohtani E., Gillet P., Trierloff M., Simionovici A., Feng L., and Lemelle L. Origin of EL3 chondrites: Evidence for variable C/O ratios during their course of formation – A state of the art scru-

- tiny // *Meteoritics & Planetary Science*. 2017. V. 52. P. 781–806.
9. Hezel D.C., Palme H., Nasdala L., Brenker F.E. Origin of SiO₂-rich components in ordinary chondrites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. V. 70. P. 1548–1564.
10. Jacquet E., Piani L., Weisberg M.K. Chondrules in enstatite chondrites. In: *Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes*. Chapter 7. 2018. V. 22. P. 175–195.
11. Lehner S.W., Buseck P.R., and McDonough W.F. Origin of kamacite, schreibersite, and perryite in metalsulfide nodules of the enstatite chondrite Sahara 97072 (EH3) // *Meteoritics & Planetary Science*. 2010. V. 45. P. 289–303.
12. Lin Y. and El Goresy A. A comparative study of opaque phases in Qingzhen (EH3) and MacAlpine Hills 88136 (EL3): Representatives of EH and EL parent bodies // *Meteoritics & Planetary Science*. 2002. V. 37. P. 577–599.
13. Rubin A.E. Chromite-plagioclase assemblages as a new shock indicator: implications for the shock and thermal histories of ordinary chondrites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2003. V. 67. P. 2695–2709.
14. Ruzicka A., Greenwood R.C., Armstrong K., Schepker K.L., Franchi I.A. Petrology and oxygen isotopic composition of large igneous inclusions in ordinary chondrites: Early solar system igneous processes and oxygen reservoirs // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019. V. 266. P. 497–528.
15. Scott E.R.D., Barber D.J., Alexander C.M.O'D., Hutchison R., Peck J.A. Primitive material surviving in chondrites: Matrix. In: *Meteorites and the Early Solar System*. University of Arizona Press, 1988. P. 718–745.
16. Scott E.R.D. and Krot A.N. Chondrites and Their Components. In: *Meteorites, comets and planets. Treatise on Geochemistry*, vol. 1. Oxford: Elsevier, 2014. P. 66–137.
17. Weisberg M.K., Prinz M., and Nehru C.E. Macrochondrules in ordinary chondrites: Constraints on chondrule forming processes // *Meteoritics*. 1988. V. 23. P. 309–310.