

# НАНОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА: НОВЫЕ ФАКТЫ И НОВЫЕ ВОПРОСЫ

*N. R. Khisina<sup>1</sup>, R. Wirth<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> – *Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, г. Москва, [khisina@geokhi.ru](mailto:khisina@geokhi.ru)*

<sup>2</sup> – *GeoForschungZentrum Potsdam, Germany*

Изучение космического вещества методом просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) позволяет получить информацию о различных формах нанонеоднородности, которая отражает условия образования исследуемых объектов. Приводятся результаты исследования лунного оливина и сферических частиц микрометеоритов. Образцы исследованы на просвечивающем электронном микроскопе с использованием техники микродифракции электронов (SAED), высокого разрешения (HRTEM), светлопольных (BF) и темнопольных (DF) изображений и аналитической просвечивающей электронной микроскопии (АТЕМ). Препарирование микросферул проводилось методом FIB.

**Ламелярные шпинель-диопсидовые симплектиты в лунном оливине.** Оптические наблюдения показали, что некоторые зерна оливина из мономинеральной фракции реголита «Луна-16» содержат ламели толщиной 0.5–1.0 мкм, ориентированные параллельно кристаллографической плоскости (100) оливина. Анализы, полученные методами EMPA и SEM, свидетельствуют о высоких концентрациях Cr и Ca в ламелях. Методом ТЕМ выявлено, что ламели образованы срастаниями хромита и диопсида и представляют, таким образом, шпинель-пироксеновый симплектит. Чередующиеся пластинки хромита и диопсида имеют толщину ~ 40 нм и ~ 130 нм соответственно и ориентированы перпендикулярно границе раздела ламели и оливина; ориентационные соотношения между хромитом, диопсидом и вмещающим оливином  $(100)_{Ol} // (111)_{Sp} // (100)_{Crx}$ ;  $[001]_{Ol} // [011]_{Sp} // [010]_{Crx}$ . Валовый минеральный состав ламелей соответствует  $FeCr_2O_4 + 2CaMgSi_2O_6$ . Согласно литературным данным, ламелярные симплектиты встречаются достаточно редко; данная форма симплектитов наблюдалась в оливинах некоторых земных пород и марсианского метеорита. Детальное исследование ламелярных шпинель-диопсидовых симплектитов в лунных оливинах до сих пор не проводилось. Полученные результаты свидетельствуют о том, что (1) симплектитовые ламели образованы путем твердофазового превращения; (2) образование симплектита сопровождалось субсолидным окислением хрома  $Cr^{2+} \rightarrow Cr^{3+}$  и реакцией катионного обмена  $2Mg = Cr + Ca$ ; (3) хромит и диопсид являются, по всей вероятности, продуктами разложения некоторой фазы-предшественницы, состав которой на основании валовой химии ламелей может быть аппроксимирован как  $Ca_2Mg_2Fe(Cr^{3+})_2Si_4O_{16}$ .

Предложена модель, объясняющая образование фазы-предшественницы в результате процесса депротонизации и окисления оливина с переходом точечных дефектов типа  $\{\square_{Fe}, 2H^-\}$  в точечные дефекты типа  $\{\square_{Fe}, 2Cr^{3+}\}$ , где  $\square_{Fe}$  – вакансия. Данная модель легко применима к образованию ламелярных симплектитов в земных оливинах, поскольку последние обычно содержат до  $n \cdot 10^1$ – $n \cdot 10^2$  ppm  $H_2O$  и в них присутствуют как точечные дефекты типа  $\{\square_{Fe}, 2H^-\}$ , так и ориентированные параллельно (100) ламели гидрооливина  $[Mg\square_{Fe}H_2SiO_4] \cdot n[(Mg,Fe)_2SiO_4]$ . Недавно аналогичная модель, рассматривающая дегидрогенизацию и окисление оливина, была предложена для объяснения механизма образования оксидных включений в оливине из гранатового перидотита. Однако насколько гипотеза об образовании шпинель-пироксеновых симплектитов путем депротонизации и окисления может быть применима к лунным оливинам, если общепринятым является представление об отсутствии на Луне  $H_2O$ ? В этой связи, аргументом в пользу предложенной модели могут являться недавно опубликованные

данные по исследованию лунных вулканических стекол методом SIMS, обнаружившие  $H_2O$  и свидетельствующие о возможном присутствии  $H_2O$  в лунной коре и мантии. Если предложенная модель образования симплектитов верна, тогда нахождение ламелярных хромит-диопсидовых симплектитов в лунном оливине может рассматриваться как дополнительное свидетельство присутствия  $H_2O$  в лунных породах.

**Нано- и микроструктурные особенности микросферул минерального вещества космического происхождения.** Сферические частицы микрометеоритов NZ08-bn4-25.7 и NZ08-bn4-25.9 размером 300 микрон и 100 микрон соответственно извлечены из ледникового покрова архипелага Новая Земля. Обе микросферулы имеют одинаковую пространственно упорядоченную микротекстуру, образованную эквиразмерными (1х2микрона) идиоморфными кристаллами оливина, равномерно распределенными в стекле плагиоклазового или пироксенового состава. Между центральными и периферийными частями микросферул отсутствуют явные микроструктурные различия. Кристаллы высокомагнезиального оливина характеризуются обычным для оливина габитусом с удлинением вдоль направления [010] и имеют одинаковую ориентировку друг относительно друга, образуя в стекле необычную текстуру типа «кирпичной кладки». Относительная доля кристаллов оливина в стекле составляет ~ 90 %. В интерстициальном стекле микрометеорита NZ08-bn4-25.7 присутствуют отдельные идиоморфные кристаллы магнетита размером 0.2–1.0 микрон. Интерстициальное стекло микрометеорита NZ08-bn4-25.9 насыщено пузырьками газа. Наличие газовых пузырьков и их концентрация на границе оливин-стекло свидетельствует о том, что кристаллизация оливина сопровождалась газовой выделением в материнском расплаве. В свою очередь, это явление может иметь космическую природу, поскольку именно в условиях невесомости выделение газа из расплава путем дегазации затруднено и осуществляется путем образования пены.

Установленные микротектурные особенности типичны для гомогенной изотермической кристаллизации из переохлажденного расплава. Согласно теории гомогенной кристаллизации, переохлажденный расплав имеет кластерно-упорядоченную структуру, а нуклеация происходит вне диффузионных слоев образующихся зародышей до тех пор, пока не начинают взаимодействовать друг с другом диффузионные слои соседних зародышей; частота нуклеации (т.е. плотность зародышеобразования) зависит от степени пересыщения. Этим определяется упорядоченно-ориентированный характер образующейся микротекстуры. Изотермические условия процесса гомогенной кристаллизации могут поддерживаться за счет выделения скрытой теплоты кристаллизации при отсутствии теплообмена с внешней средой. Такие условия реализуются при затвердевании капли расплава в условиях невесомости в космосе, но маловероятны при закалке и затвердевании космической микрочастицы, испытывающей плавление при входе в земную атмосферу. Ранее предполагалось, что космические микросферулы возникают в результате плавления при высокоскоростном входе микрометеороидов в атмосферу Земли; известно также образование микросферул в процессе абляции. Полученные данные не согласуются с этими представлениями и позволяют предполагать образование микросферул во внеземных условиях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Отделения наук о Земле Российской Академии наук (грант ОНЗ-5) и Российского Фонда фундаментальных исследований (грант 09-05-00444-а).*