

## Структуры распада в мэйджоритовых гранатах из кимберлитовой трубки Мир (Якутия)

Е. А. Сироткина, А. В. Бобров, В. К. Гаранин, А. В. Бовкун, Б. Б. Шкурский, Д. В. Корост  
Московский государственный университет им М.В.Ломоносова, геологический факультет  
[katty.ea@mail.ru](mailto:katty.ea@mail.ru)

*Ключевые слова:* мэйджоритовый гранат, структуры распада, верхняя мантия, рентгеновская томография

**Ссылка:** Сироткина, Е. А., А. В. Бобров, В. К. Гаранин, А. В. Бовкун, Б. Б. Шкурский, Д. В. Корост (2011), Структуры распада в мэйджоритовых гранатах из кимберлитовой трубки Мир (Якутия), *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6088, doi:10.2205/2011NZ000218.

Мэйджоритовые гранаты были впервые обнаружены в виде включений в алмазах из кимберлитовой трубки Монастери в Южной Африке [Moore, Gurney, 1985], и эта находка показала, что алмазы могут содержать вещество астеносферы и переходной зоны. Впоследствии такие гранаты были диагностированы в алмазах [Stachel, 2001], мантийных ксенолитах [Haggerty, Sautter, 1990; Sautter et al., 1991] и породах метаморфических комплексов [Van Roermund, Drury, 1998] всего мира, включая Якутию, Канаду, Бразилию, Китай и Гималаи. Для них характерно повышенное содержание кремния, связанное с вхождением в структуру мэйджоритового компонента ( $Mg_4Si_4O_{12}$ ). В ходе подъема пород в верхние горизонты Земли в мэйджоритовом гранате нередко возникают структуры распада (ламели) пироксена. Условия первичной кристаллизации мэйджоритовых гранатов реконструируются на основе подсчета концентрации пироксеновых вростков и определения их состава.

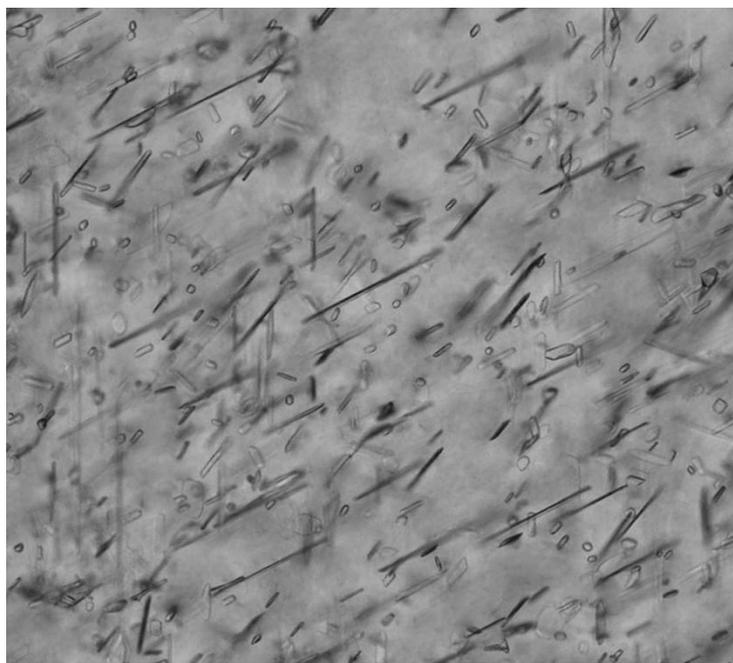
В качестве объекта исследования в настоящей работе были выбраны три желвака граната (обр. 317, 559, 563) размером  $> 5$  мм с многочисленными ориентированными вростками пироксена и оливина из кимберлитовой трубки Мир (Якутия). Из гранатов были изготовлены плоскопараллельные пластинки толщиной 0.5–0.8 мм, в которых методом оптической микроскопии в проходящем свете были выявлены взаимоотношения и определены размеры минералов в структурах распада. Для установления ориентировок вростков и определения углов между плоскостями, содержащими структуры распада, был применен федоровский метод. Определение состава фаз проводилось на электронном микроскопе Jeol JSM-6480LV, оснащенный энергодисперсионным микроанализатором INCA в лаборатории локальных методов исследования вещества геологического факультета МГУ. Для точного определения процентного содержания вростков пироксена и оливина в объеме граната нами был впервые применен метод рентгеновской томографии. Исследование проводилось на сканере Skyscan1172 на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ при напряжении 59 кВ и силе тока 167 мкА. Полученные картины рентгеновской плотности были обработаны в программах CT-An и CTvol с целью получения объемных изображений и количественных оценок.

Изученные гранаты из трубки Мир имеют розовый цвет с оранжевым оттенком и содержат большое количество игл моноклинного пироксена и оливина, распределенных в объеме граната равномерно. Толщина игл составляет десятые до 100 мкм, а длина варьирует от  $4 \cdot 10^{-3}$  до 0.5 см. Игольчатые включения строго ориентированы в структуре граната по четырем направлениям (рис.1). Углы между парами пересекающихся игл, измеренные на федоровском столике, составляют  $70-71^\circ$ , что соответствует углам между осями третьего порядка в кубической структуре граната. Иглы имеют полигональное сечение, иногда уплощены. Уплощение игл, табличек соответствует плоскостям ромбододекаэдра (двугранный угол между пересекающимися табличками равен  $60^\circ$ ). Закономерная ориентировка включений и их характерная форма позволяют сделать вывод, что эти иглы представляют собой структуры распада в мэйджоритовом гранате. Количественно в обр. 317 и 559 клинопироксен значительно преобладает над оливином, а в обр.563 ламели представлены только пироксеном.

С помощью микронзондового анализа были получены составы граната, клинопироксена и оливина (табл. 1). Гранаты всех трех образцов характеризуются существенно пироповым (75–80 мол.%) составом, практически постоянным в различных участках гранатов. Минералы характеризуются умеренными содержаниями кальция (4.5–5.8 мас.% CaO) и сравнительно

## СИРОТКИНА И ДР.: СТРУКТУРЫ РАСПАДА В МЭЙДЖОРИТОВЫХ ГРАНАТАХ

невысокими содержаниями хрома (до 0.59 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), что соответствует гранату лерцолитового парагенезиса [Гаранин и др., 1991]. Содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  в гранатах крайне низки (0.06–0.07 мас.%). *Клинопироксены* по составу отвечают диопсидам с незначительными примесями геденбергитового и жадеитового компонентов. Магнезиальность ламелей пироксена в пределах одного образца практически не меняется. Она составляет от 89.96 до 94.41 мол.%. В пироксенах отмечается примесь NiO в диапазоне 0.2–0.3 мас.%, а содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 0.11–0.16 мас.%. Состав *оливинов* из образцов 317 и 559 соответствует форстериту с магнезиальностью 95.3 мол.% в обоих образцах. Оливины характеризуются повышенным содержанием никеля от 1.6 мас. % (обр. 559) до 2.79 мас.% (обр.317) NiO. Отметим, что столь высокие содержания никеля в оливине крайне редки.



0,5 мм

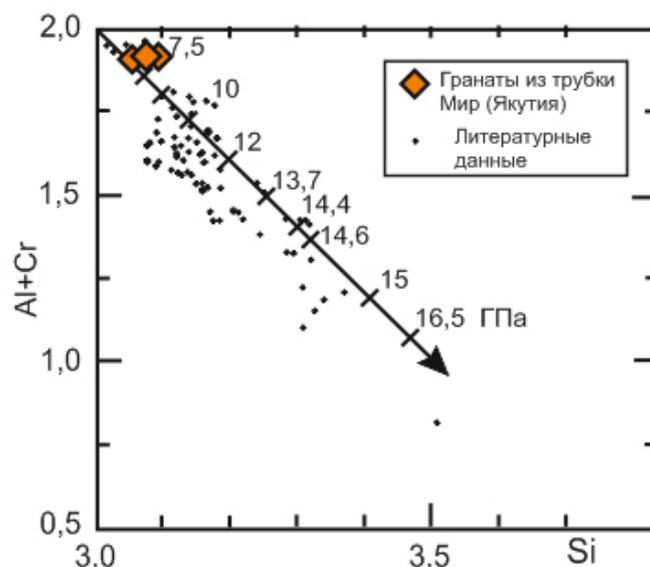
**Рис.1.** Структуры распада в мейджоритовом гранате (обр. 559). Изображения в проходящем свете

Для реконструкции исходного состава мейджоритового граната было проведено определение процентного содержания включений пироксена и оливина в объеме граната с помощью программы ST-An. Для выделения востков минералов на наборе фотографий плоских срезов мейджоритового граната была использована гистограмма, отображающая распределение яркости. В ходе детального 3D анализа обр. 317 было установлено, что в объеме граната на долю ламелей пироксена приходится 9.5 об.%, а оливина – 0.5 об.%. Отметим, что полученные соотношения характеризуют минимальные объемные содержания пироксена и оливина в силу использования максимально «строгого» режим снятия фона, а также невозможности учета наиболее мелких ламелей. Рассчитанные первичные составы граната показывают, что содержания кремния превышают 3 ф.е. Si (таблица). Судя по диаграмме (рис. 2), образование таких гранатов происходило при давлениях не менее 7.5 ГПа, а впоследствии снижение давления привело к образованию структур распада в них. При этом экстремально высокие концентрации никеля в оливине и примесь никеля в пироксене указывают на присутствие никеля в исходном мейджоритовом гранате и высокотемпературную кристаллизацию (~1500°C) данного минерала [Canil, 1999].

**Таблица 1.** Составы желваков граната, вrostков клинопироксена и оливина из кимберлитовой трубки Мир

	Обр.317				Обр.559				Обр.563		
	Grt	Cpx	Ol	Grt*	Grt	Cpx	Ol	Grt*	Grt	Cpx	Grt*
SiO <sub>2</sub>	42.23	54.64	41.40	42.53	42.29	54.32	40.85	42.58	42.66	54.68	43.15
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.09	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.009	0.00	0.04	0.002
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.30	1.01	0.12	22.29	23.35	1.80	0.18	22.37	23.61	1.87	2274
FeO	5.68	1.07	4.42	5.47	5.48	1.09	4.54	5.27	5.45	1.09	5.27
MnO	0.21	0.00	0.00	0.20	0.18	0.00	0.00	0.17	0.24	0.03	0.23
MgO	21.34	17.90	51.20	21.12	22.33	17.26	51.57	22.04	2221	17.20	22.01
CaO	5.72	24.51	0.05	6.44	4.55	23.35	0.00	5.28	4.96	23.46	5.70
Na <sub>2</sub> O	0.06	0.47	0.00	0.08	0.06	0.93	0.00	0.09	007	1.01	0.11
K <sub>2</sub> O	0.00	0.02	0.00	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.00	0.29	2.79	0.013	0.00	0.21	1.64	0.01	0.00	0.20	0.008
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.59	0.11	0.00	0.57	0.43	0.16	0.00	0.42	0.39	0.15	0.38
Сумма	99.18	100.14	99.98	98.77	98.68	99.15	98.79	98.26	99.59	99.77	99.60
	Grt	Cpx	Ol	Grt*	Grt	Cpx	Ol	Grt*	Grt	Cpx	Grt*
Si	2.993	1.978	1.001	3.018	2.997	1.979	0.996	3.022	2.998	1.980	3.037
Ti	0.001	0.002	0.000	0.001	0.0005	0.000	0.000	0.0005	0.000	0.001	0.000
Al	1.946	0.043	0.003	1.862	1.950	0.077	0.005	1.869	1.955	0.079	1.883
Fe	0.336	0.032	0.089	0.324	0.324	0.033	0.092	0.313	0.320	0.033	0.310
Mn	0.013	0.00	0.000	0.012	0.011	0.000	0.000	0.011	0.014	0.001	0.014
Mg	2.253	0.965	1.846	2.232	2.358	0.937	1.874	2.329	2.325	0.928	2.306
Ca	0.434	0.950	0.001	0.491	0.345	0.911	0.000	0.403	0.373	0.910	0.431
Na	0.008	0.033	0.000	0.011	0.009	0.066	0.000	0.014	0.009	0.071	0.015
K	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.004	0.054	0.001	0.000	0.003	0.032	0.001	0.000	0.003	0.000
Cr	0.034	0.003	0.000	0.032	0.024	0.005	0.000	0.024	0.022	0.004	0.021
Сумма	8.019	4.013	2.996	7.985	8.020	4.012	3.000	7.984	8.018	4.012	8.018

*Примечание.* Приведенные анализы получены путем усреднения данных по 8–10 точкам. Grt — гранат; Cpx — моноклинный пироксен; Ol — оливин; Grt\* — мэйджоритовый гранат, состав, которого рассчитан исходя из соотношений 95. 5% Grt + 4% Cpx + 0.5% Ol.



**Рис.2.** Диаграмма состава мэйджоритовых гранатов в зависимости от давлений их образования, по [Stachel, 2001]

## СИРОТКИНА И ДР.: СТРУКТУРЫ РАСПАДА В МЭЙДЖОРИТОВЫХ ГРАНАТАХ

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты 09-05-00027 и 11-05-00401), а также грантов Президента Российской Федерации по государственной поддержке молодых российских ученых-докторов наук (МД-534.2011.5) и ведущих научных школ (НШ-3634.2010.5).

### Литература

Гаранин, В. К., Г. П. Кудрявцева, А. С. Марфунин, О. А. Михайличенко (1991), *Включения в алмазе и алмазоносные породы*, М.: Изд-во МГУ, 240 с.

Canil, D. (1999), The Ni-in-garnet geothermometer: calibration at natural abundances, *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol. 136., pp. 240–246.

Haggerty, S. E., V. Sautter (1990), Ultradeep (>300 km) ultramafic, upper mantle xenoliths, *Science*. 248, pp. 993–996.

Haggerty, S.E., V. Sautter, S. Field (1991), Ultradeep (>300 km) ultramafic xenoliths: petrological evidence from the transition zone, *Science*. 252, 827–830.

Stachel, T. (2001), Diamonds from the asthenosphere and the transition zone, *Eur. J. Mineral.* V. 13. P. 883–892.

Van Roermund, H.L.M., M. R. Drury (1998), Ultra-high pressure ( $P > 6$  GPa) garnet peridotites in Western Norway: exhumation of mantle rocks from >185 km depth, *Terra Nova*, 10, 295–301.