

УДК 552.31.5+552.321.6

ГЕОХИМИЯ МЕГАКРИСТАЛЛОВ ГРАНАТА ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ МИР (ЯКУТИЯ) И ПРИРОДА ПРОТОКИМБЕРЛИТОВОГО РАСПЛАВА

А. М. Агашев

Представлено академиком РАН Н.П. Похиленко 01.06.2017 г.

Поступило 29.06.2017 г.

Представлены результаты изучения химического состава гранатов мегакристной ассоциации из кимберлитовой трубки Мир. По составу петрогенных элементов изученные мегакристы гранатов можно классифицировать как высокотитанистые и низкохромистые пиропы. Содержания TiO_2 в мегакристах трубки Мир имеют обратную корреляцию с содержаниями MgO и Cr_2O_3 . Проведено моделирование состава гранатов в процессе фракционной кристаллизации. Результаты моделирования показали, что наиболее подходящими по составу расплавами для кристаллизации гранатов мегакристной ассоциации являются магмы пикритового состава. Состав гранатов, кристаллизующихся из кимберлита, не соответствует составу природных гранатов из трубки Мир. Кимберлиты содержат меньше Ti , Zr , Y и тяжёлых РЗЭ, но больше сильно несовместимых элементов, таких как ЛРЗЭ, Th , U , Nb , Ta , Ba , чем модельный состав расплава, необходимый для кристаллизации мегакристных гранатов.

Ключевые слова: гранат, кимберлит, геохимия, литосферная мантия.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524865583-587>

Ассоциация дискретных ксенокристаллов мантийных минералов типична для всех кимберлитов и, в частности, является важной составной частью кимберлитов трубки Мир. Наиболее распространёнными минералами мегакристной ассоциации являются гранат, пикроильменит и оливин. Для гранатов мегакристной ассоциации характерна повышенная примесь TiO_2 , которая зависит как от состава среды, так и от температуры образования. Для ильменита этой ассоциации типичными являются примеси Cr_2O_3 и Al_2O_3 . В большинстве кимберлитовых тел могут также присутствовать мегакристы одного или нескольких минералов ассоциации клинопироксен ± ортопироксен ± флогопит ± циркон. Несмотря на большое количество работ, посвящённых происхождению минералов мегакристной ассоциации в целом и граната в частности, природа материнских расплавов и детали процесса кристаллизации остаются дискуссионным вопросом. На природу материнского расплава существуют две основные точки зрения. Некоторые исследователи [1] предполагают кристаллизацию мегакристаллов не-

посредственно из кимберлитовой магмы. Согласно другой точке зрения предполагается, что ассоциация низкохромистых мегакристаллов является продуктом кристаллизации астеносферной магмы типа базальтов океанических островов при высоких значениях PT -параметров в нижних горизонтах литосферной мантии [2–4]. Такие выводы получены на основании расчётов фракционной кристаллизации [2] по составам редкоземельных элементов (РЗЭ) мегакристаллов, а также по изотопным данным [3, 5]. Изотопные составы кимберлитов и мегакристов близки, поэтому исходная магма для мегакристов и кимберлиты имеют общий астеносферный источник [5]. Химический состав выборки мегакристов граната из кимберлитов Южной Африки отвечает процессу фракционной кристаллизации в закрытой системе [6]. В работе [7], в которой изучена большая выборка гранатов (2300 зёрен) из кимберлитов Южной Африки, отмечается, что процесс может быть более сложным и включать в себя ассимиляцию перидотитовой матрицы и гибридизацию. Магму, из которой кристаллизовались мегакристаллы, также часто называют протокимберлитовой, предполагая, что она может эволюционировать в сторону кимберлитовой в результате взаимодействия с основанием литосферной мантии

*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск*

*E-mail: agashev@igm.nsc.ru

и ассимиляции обогащённых несовместимыми элементами пород [4]. По результатам изучения мантийного материала из кимберлитов трубки Удачная были отмечены сходство составов и вероятная генетическая и пространственная связь мегакристов граната и деформированных перидотитов [4, 5]. Поэтому изучение геохимического и изотопного составов мегакристаллов даёт уникальную возможность оценить состав протокимберлитовой магмы и получить новую информацию о процессах в низах литосферной мантии, в том числе и о петрогенезисе кимберлитов.

Была изучена коллекция дискретных зёрен граната размером от 5 до 10 мм из кимберлита трубки Мир. Гранаты имеют округлую либо обломочную форму, в последнем случае являясь фрагментами более крупных кристаллов. По цветовым характеристикам гранаты находятся в диапазоне от тёмно-коричневых до оранжево-жёлтых. Такие цвета характерны для гранатов мегакристов, эклогитов, пироксенитов и отчасти деформированных перидотитов. Пять из двадцати изученных зёрен по химическому составу относятся к эклогитовому парагенезису и далее в сообщении не рассматриваются.

По составу петрогенных элементов изученные мегакристы гранатов соответствуют высокотитанистым-низкохромистым пиропам. Результаты микрозондовых анализов не выявили какой-либо значимой и систематической зональности в составе гранатов от центра к краю. Содержания TiO_2 варьируются в пределах 0,4–1,0 мас.%, Cr_2O_3 — в пределах 0,6–3,6 мас.%. На диаграмме Cr_2O_3 – CaO по [8] составы гранатов локализованы в низкохромистой области лерцолитового тренда, что характерно для гранатов мегакристной ассоциации (рис. 1). Содержания

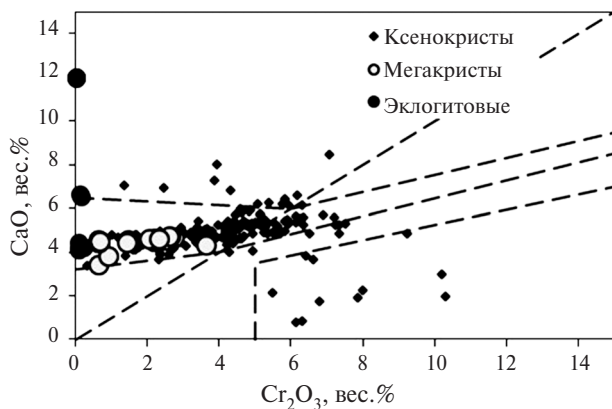


Рис. 1. Распределение CaO – Cr_2O_3 для гранатов из кимберлитов трубки Мир.

зрения $MgO=18,9$ – $21,3$ мас.%, магнезиальность ($Mg\# = Mg/(Mg+Fe) \cdot 100$) варьируется от 75 до 82,7.

Содержания TiO_2 в мегакристах гранатов из трубки Мир имеют обратную корреляцию с содержаниями MgO и Cr_2O_3 (рис. 2). Составы мегакристов гранатов из трубки Monastery [7] соответствуют тому же тренду при меньших вариациях содержаний TiO_2 и Cr_2O_3 и образуют субпараллельный нашим данным тренд на графике TiO_2 – MgO .

Все изученные гранаты имеют нормальную форму распределения нормированных на состав хондрита [9] РЗЭ с ровным плато в области тяжёлых и средних РЗЭ и резким падением в районе лёгких РЗЭ (рис. 3). Содержания РЗЭ в сегменте Sm–Lu составляют около 10 хондритовых единиц для средних РЗЭ и немного выше для тяжёлых РЗЭ. Форма распределения нормированных на состав ПМ (Примитивной Мантии) несовместимых элементов в мегакристах граната трубки Мир практически одинакова во всех образцах на сегменте графика Nd–Lu, но имеет большой разброс значений по наиболее несовместимым элементам (Ba–Sr), рис. 3. В формах распределений несовместимых элементов всех гранатов чётко выражены отрицательные Ba, Sr, La

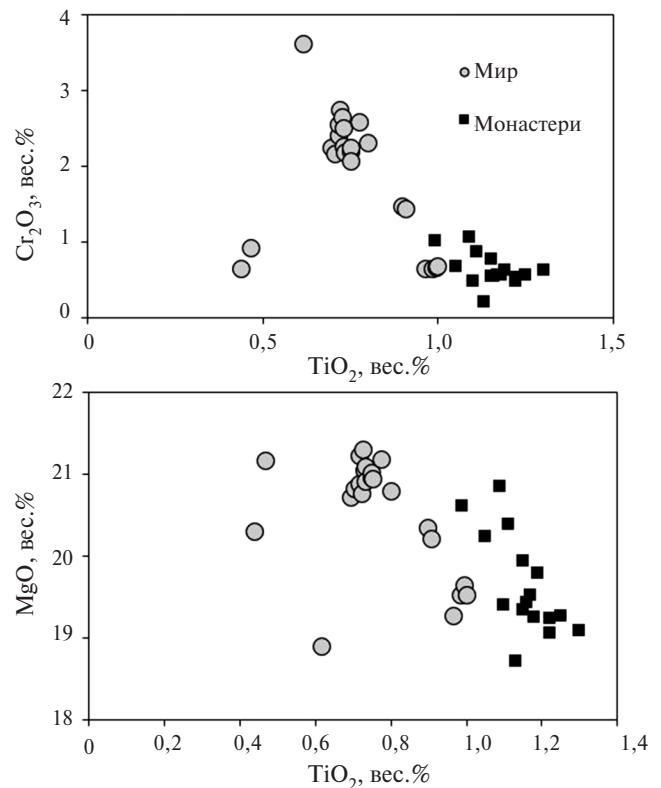


Рис. 2. Вариации содержаний TiO_2 , MgO и Cr_2O_3 в мегакристах граната из кимберлитов трубок Мир (Якутия) и Monastery (Южная Африка).

и положительные Zr, Hf аномалии. Небольшие минимумы наблюдаются в содержаниях Sm и Y. В выборке гранатов из трубки Мир наблюдается положительная корреляция содержаний Ti, Zr, Y, Sc и тяжёлых РЗЭ. Далее подробно рассматривается природа этих корреляций.

Для моделирования состава гранатов использован подход, применённый в работе [10], основанный на ковариации содержаний элементов в процессе фракционной кристаллизации. В выборках гранатов мегакристной ассоциации всегда наблюдается положительная корреляция между Ti, Zr, Y и тяжёлыми РЗЭ [6, 7, 10], что говорит о том, что последние ведут себя как несовместимые элементы при кристаллизации астеносферных расплавов в литосферной мантии. Для того чтобы воспроизвести положительную корреляцию между этими элементами, общий коэффициент распределения (Kd) по Y между минералами и расплавом для кристаллизующейся минеральной ассоциации должен быть не более 1, а предпочтительно около 0,5 [10]. В противном случае будет наблюдаться отрицательная корреляция между Y, тяжёлыми РЗЭ и Zr. Большинство приведённых в литературе Kd (Y) минерал/расплав для граната [10] слишком высоки (2–8) и неприменимы для моделирования фракционной кристаллизации граната в литосферной мантии. Поэтому для моделирования фракционной кристаллизации граната в литосферной мантии выбран набор Kd, полученных в результате экспериментов при высоких давлениях в 7 ГПа [11]. Модальный состав кристаллизующейся минеральной ассоциации принят как 30% граната и 30% клинопироксена и 40% оливина + ортопироксен без разделения, так как оба эти минерала практически не содержат несовместимых элементов.

Несмотря на то, что ильменит является одним из самых распространённых минералов мегакристной ассоциации, он не использован в расчётах, так как его кристаллизация приведёт к быстрому падению содержаний TiO_2 в расплаве. Результатом этого будет отрицательная корреляция Ti с Y и Zr, что не наблюдается в природных гранатах. Возможно, ильменит образуется на поздних стадиях процесса, когда гранат уже перестаёт кристаллизоваться. В качестве первичных расплавов при расчётах были опробованы различные типы основных и ультраосновных пород, имеющих астеносферный источник: внутриплитные континентальные и океанические базальты, а также кимберлиты.

Результаты моделирования показали, что наиболее подходящими по составу расплавами для кристаллизации гранатов мегакристной ассоциации являются магмы пикритового состава. В частности, хорошая воспроизводимость природных составов наблюдается при моделировании кристаллизации пикритов типа НІМУ из комплекса океанических базальтов острова Святой Елены [12], а также пикритов острова Кергелен [13]. Из континентальных магм подходящий состав имеют меймечиты Котуйской провинции, но за исключением наиболее богатых Zr и Y разновидностей (рис. 4). Результаты расчётов фракционной кристаллизации пикритов хорошо согласуются с природными данными как по корреляции содержаний Y, Zr и Ti в гранатах, так и по форме распределений несовместимых элементов (рис. 4).

В расчётах кристаллизации кимберлитовых расплавов использовались Kd из работы [14] и состав кимберлитов тр. Мир. Кимберлиты имеют широкий спектр содержаний несовместимых элементов, но

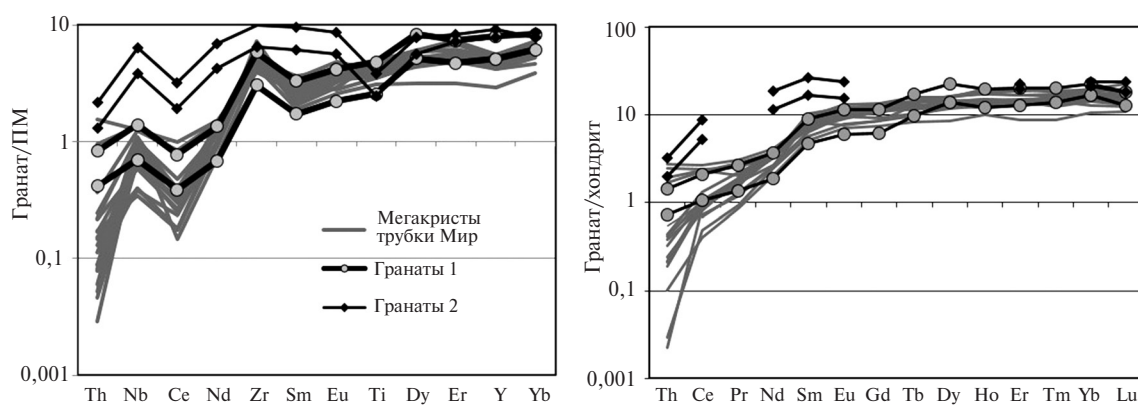


Рис. 3. Нормированные на состав хондрита и примитивной мантии [9] распределения редких и редкоземельных элементов в мегакристах граната из трубки Мир в сравнении с составами гранатов, полученными при моделировании фракционной кристаллизации. Гранаты 1 — из расплава пикритового состава, гранаты 2 — из расплава кимберлитового состава трубки Мир.

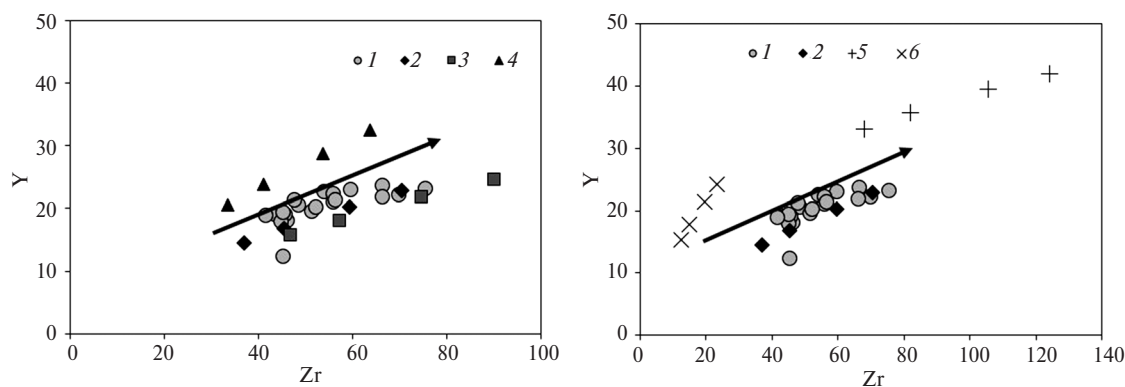


Рис. 4. Диаграмма содержаний Y–Zr в мегакристах граната из кимберлитов трубки Мир в сравнении с составами гранатов, полученными в расчётах фракционной кристаллизации. 1 — мегакристы трубки Мир; 2–6 Модельные составы гранатов из следующих типов расплавов: 2 — пикриты о. Кергелен, 3 — меймечиты, 4 — пикриты типа NIMU о. Святой Елены, 5 — кимберлит трубки Мир, Kd из [14], 6 — кимберлит тр. Мир, Kd из [11]. Расчётные составы соответствуют степеням фракционной кристаллизации 1, 20, 40 и 50% в порядке возрастания содержаний Y и Zr.

в целом они содержат меньше Ti, Zr, Y и тяжёлых РЗЭ, и больше сильно несовместимых элементов, таких как ЛРЗЭ, Th, U, Nb, Ta, Ba, чем пикриты и модельный состав для кристаллизации мегакристных гранатов. Результаты расчётов показали, что состав гранатов, кристаллизующихся из кимберлита, не соответствует составу природных гранатов из трубки Мир (рис 3, 4). Следует отметить, что кимберлиты имеют низкие содержания Al_2O_3 , что недостаточно для кристаллизации значительного количества граната, учитывая и тот факт, что степень фракционной кристаллизации достигает 60%. Также следует иметь в виду, что начальный кимберлитовый расплав имеет скорее карбонатитовый состав [15], что также свидетельствует против кристаллизации гранатов из кимберлита.

Полученные данные позволяют сделать выводы о составе и природе материнских расплавов для мегакристной ассоциации гранатов трубки Мир в рамках двухстадийной модели петрогенезиса кимберлитов, предложенной автором в работах [4, 5, 15]. Наиболее вероятными первичными расплавами для ассоциации мегакристов являются астеносферные расплавы пикритового состава с содержаниями Y и Zr в интервалах 15–20 ppm и 180–220 ppm соответственно. Результатом внедрения астеносферных расплавов стало формирование обогащённого несовместимыми элементами резервуара в основании литосферной мантии, гетерогенного по составу в масштабе первых километров. Это включало силикатный метасоматоз перidotитового субстрата, фракционную кристаллизацию мегакристов с удалением их из системы и формирование остаточных магм, обогащённых летучими и несовместимыми элементами. Подвижные остаточные расплавы про-

никали в перidotитовую матрицу и формировали преимущественно карбонатитовый метасоматический ореол вокруг очагов внедрения астеносферных расплавов. В дальнейшем прогрев обогащённого резервуара до температуры чуть выше солидуса карбонатизированного перidotита инициировало плавление собственно кимберлитов.

Источники финансирования. Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 15–05–07758) по государственному заданию ИГМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moore A., Belousova E. // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2005. V. 149. P. 462–481.
2. Jones R.A. Mantle Xenoliths. Chichester: Wiley. 1987. P. 711–724.
3. Davies G.R., Spriggs A.J., Nixon P.J. // J. Petrology. 2001. V. 42. P. 159–172.
4. Agashev A.M., Ionov D.A., Pokhilenko N.P., Golovin A.V., Cherepanova Yu., Sharygin I.S. // Lithos. 2013. V. 160. P. 201–215.
5. Агашев А.М., Похиленко Н.П., Мальковец В.Г., Соболев Н.В. // ДАН. 2006. Т. 407. № 6. С. 806–809.
6. Merry M., le Roex A. // Southern African J. Geology. 2007. V. 110. P. 597–610.
7. Bell D.R. and Moore R.O. // South African J. Geology. 2004. V.107. P. 59–80.
8. Sobolev N.V., Lavrent'ev Y.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V. // Contrib. to Mineral. and Petrol. 1973. V. 40. P. 39–52.
9. McDonough W.F., Sun S.-S. // Chemical Geology. 1995. V. 120. P. 223–253.

10. *Shchukina E.V., Agashev A.M., Pokhilenko N.P.* // *Geosci. Frontiers*. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2016.08.005>
11. *Tuff J., Gibson S.* // *Contrib. to Mineral. and Petrol.* 2007. V. 153. P. 369–387.
12. *Willbold M., Stracke A.* // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2006. V. 7. № 4. <http://dx.doi.org/10.1029/2005GC001005> (G3)
13. *Weis D., Frey F.A., Schlich R., Schaming M., Montigny R., Damasceno D., Mattielli N., Nicolaysen K.P., Scoates J.S.* // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2002. V. 3. № 6. P. 1–27.
14. *Keshav S., Corgne A., Gudfinnsson G.H., Bizmis M., McDonough W.F., Fei Y.* // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2005. V. 69. № 11. P. 2829–2845.
15. *Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Takazawa E., McDonald J.A., Vavilov M.A., Watanabe I., Sobolev N.V.* // *Chem. Geology*. 2008. V. 255 № 3/4. P. 317–328.

GEOCHEMISTRY OF GARNET MEGACRYSTS FROM THE MIR KIMBERLITE PIPE (YAKUTIA) AND THE NATURE OF PROTHOKIMBERLITE MELT

A. M. Agashev

*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS N.P. Pokhilenko June 01, 2017

Received June 01, 2017

The paper presents the results of major and trace elements composition study of garnet megacrysts from Mir kimberlite pipe. On the major elements composition those garnets classified as low Cr and high Ti pyropes. Concentrations of TiO₂ show a negative correlation with MgO и Cr₂O₃ contents in megacrysts composition. Fractional crystallization modeling indicates that the most appropriate melt to reproduce the garnet trace elements signatures is the melt of picritic composition. Composition of garnets crystallized from kimberlite melt do not correspond to observed natural garnets composition. Kimberlites contain less of Ti, Zr, Y and heavy REE (rare earth elements) but more of very incompatible elements such as light REE, Th, U, Nb, Ba then the model melt composition that necessary for garnet crystallization.

Keywords: garnet, kimberlite, geochemistry, lithospheric mantle.