

Аномальное обогащение редкоземельными элементами минералов из мантийных ксенолитов в процессе воздействия на них глубинного метасоматоза на примере кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная, Якутия

Воробей С. С.^{ORCID}, Асавин А. М.^{ORCID}

ГЕОХИ РАН, Москва, vorobey.sofya93@mail.ru, aalex06@inbox.ru

Аннотация. Мантийные ксенолиты в кимберлитовых трубках являются одним из наиболее исследованных объектов глубинного мантийного происхождения. Большинство исследователей отмечают, что характерной особенностью этих ксенолитов является следы развития процессов мантийного метасоматоза различных типов. Одновременно с изменением макросостава минералов мантийной ассоциации существенно меняется и геохимия редких элементов в них. Это дает возможность исследовать связь мантийного метасоматоза с аномальным обогащением редкоземельными и литофильными элементами локальных источников щелочных расплавов. Для решения этой проблемы мы попытались оценить степень равновесности в распределении редкоземельных элементов между клинопироксеном и гранатом. Оценка коэффициентов распределения гранат-клинопироксен в центральных и краевых частях кристаллов позволяет рассмотреть процесс в динамике, учесть не только первичное равновесие при частичном плавлении мантии, но и последующее перераспределение за счет метасоматоза и метаморфизма ксенолитов при их доставке на поверхность.

Ключевые слова: кимберлитовые трубки, мантийный метасоматоз, мантийные ксенолиты, коэффициенты распределения, литофильные элементы.

Anomaly enrichment of minerals from mantle xenoliths with rare earth elements in the process of exposure to deep metasomatism on the example of kimberlite pipes Mir and Obnazhennaya, Yakutia

Vorobeiy S. S.^{ORCID}, Asavin A. M.^{ORCID}

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences, Moscow, vorobey.sofya93@mail.ru, aalex06@inbox.ru

Abstract. Mantle xenoliths in kimberlite pipes are one of the most studied objects of deep mantle origin. Most researchers note that a characteristic feature of these xenoliths are traces of the development of processes of mantle metasomatism of various types. Simultaneously with the change in the macrocomposition of minerals in the mantle association, the geochemistry of trace elements in them also changes significantly. This makes it possible to study the connection between mantle metasomatism and anomalous enrichment of local sources of alkaline melts in rare earth and lithophile elements. To solve this problem, we tried to assess the degree of equilibrium in the distribution of rare earth elements between clinopyroxene and garnet. Estimating the distribution coefficients of garnet-clinopyroxene in the central and marginal parts of crystals allows us to consider the process in dynamics, taking into account not only the primary equilibrium during partial melting of the mantle, but also subsequent redistribution due to metasomatism and metamorphism of xenoliths during their delivery to the surface.

Keywords: peridotite mantle xenolith, kimberlite pipe, mantle anomaly, lithophilic elements, coefficient distribution trace elements.

Введение

Обширная коллекция мантийных ксенолитов из кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная позволила получить данные по распределению редкоземельных и редких элементов в минералах из различных петрографических типов пород и с разной степенью изменений. Эта информация позволяет рассмотреть связь между процессами мантийного метасоматоза и обогащения мантийных источников литофильными и редкоземельными элементами (Ionov et al., 1993; Hoal et al., 1994; Griffin et al., 1996; Kelemen et al., 1998; Griffin et al., 1999). Связь мантийного метасоматоза с обогащением редкими элементами и особенно Zr-Nb-Ti рассматривалось в следующих работах (Ionov et al.,

1999; Dawson & Kinny, 2001; Zaccarini et al., 2004). В ряде обобщающих работ по мантийному метасоматозу также подчеркивается тесная связь этого процесса с формированием аномально обогащенных зон в мантии (Hoal et al., 1994; Chalot-Prat & Boullier, 1997; Seitz & Woodland, 2000; O'Reilly & Griffin, 2013). Однако, во всех этих работах мало обращается внимание на динамику процессов метасоматоза и кинетику перераспределения редких элементов между мантийными минералами. Одна из первых работ такого типа это (Shimizu, 1975) в которой изучено распределение редкоземельных элементов между гранатом и клинопироксеном в ксенолитах из кимберлитовых трубок. Следует отметить, что в это время концепция мантийного метасоматоза еще не вошла в парадигму мантийных процессов и поэтому с этой точки зрения данные не рассматривались. К настоящему времени получен большой материал по распределению редких элементов в минералах из нодул различных литохимических типов (Соболев, 1974; Frey et al., 1974; Гаранин и др., 1983; Уханов и др., 1988; Agashev et al., 2013). Опубликован ряд экспериментальных работ по оценке коэффициентов распределения в равновесиях кристалл-расплав (Klein et al., 2000; Kuzyura et al., 2010).

В данной работе мы попытались раскрыть историю и этапы обогащения редкими элементами через оценку равновесности распределения их между гранатом и клинопироксеном. Мы полагаем, что мантийные ксенолиты, которые подвергались воздействию мантийного метасоматоза отражают процессы происходящие в мантии при формировании их обогащенными редкими элементами.

Геология

Якутская алмазоносная провинция (ЯАП) занимает северо-восточную часть Сибирской платформы. Кимберлитовая алмазоносная *трубка Мир* располагается в Мало-Ботуобинском районе, в долине р. Иирэлээх. Возраст трубки соответствует 362 млн лет по U-Pb методу, датированному по цирконам (Дэвис и др., 1980). В трубке относительно распространены ксенолиты пород верхней мантии, которые образовались в широком интервале РТ-условий: от области стабильности кристаллизации алмаза – это алмазсодержащие ультрабазиты и эклогиты (глубины 150–200 км,) – до верхних горизонтов мантии (к ним относятся шпинелевые и бесшпинелевые ультрабазиты, пироксениты и другие породы (глубины 50–60 км) (Соболев, 1974; Гаранин и др., 1983; Уханов и др., 1988; Beard et al., 1996; Харьков, 1998; Sobolev et al., 1998, 2009). Найдены и изучены многочисленные алмазоносные ксенолиты (Пономоренко и др., 1980; Гаранин и др., 1983; Специус и др., 1990, 2006). Резко преобладающим типом ксенолитов являются лерцолиты, содержащие высокомагнезиальный и относительно низкохромистый гранат; по всему разрезу тела установлено повышенное количество гранатовых пироксенитов, которые отличаются оригинальным строением и составом, к ним относятся гранатовые вебстериты магнезиально-железистого типа (Уханов и др., 1989).

Трубка Обнаженная находится в пределах Куойкского рудного поля, Далдыно-Алакитского района. По U-Pb датировке цирконов, возраст трубки составляет 148 ± 3 млн лет, что относится к позднеюрскому (Дэвис и др., 1980; Харьков и др., 1998; Костровицкий и др., 1991, 2012). Среди комплекса ксенолитов глубинных пород распространены шпинелевые и гранат-шпинелевые лерцолиты, а также гранатовые и шпинелевые пироксениты с широкими вариациями содержания орто- и клинопироксена (Howarth et al., 2014; Sun et al., 2014). Для трубки типичны находки биминеральных, корундовых, кианитовых эклогитов; описаны эклогиты, в которых чередуются прослои хромсодержащих минералов с безхромистыми (Соболев, 1974; Sun et al., 1989; Бобров и др., 2003; Sun et al., 2014).

Установлено, что ксенолиты ультраосновных и основных глубинных пород, в том числе алмазоносных, часто несут следы метасоматических и близповерхностных преобразований различной степени интенсивности, которые указывают на многоэтапную и сложную историю эволюции в мантийных условиях. Эти процессы протекают в мантии еще до захвата ее субстрата кимберлитовым расплавом, затем в кимберлитовой колонне от глубин мантии и до поверхности Земли.

Согласно литературным данным (Griffin et al., 1996, 1999; Walter, 1999; Griffin et al., 2009), литосферная мантия изначально имела реститовое происхождение, по составу она отвечала деплетированным гарцбургит-дунитовым породам. В результате обогащения и просачивания по трещинам флюидов/расплавов (базальтового, карбонатитового и силикатного составов) произошла

рефертилизация (вторичное обогащение) литосферной мантии Сибирского кратона (Harte, 1983; Griffin et al., 1996, 1999; Kelemen et al., 1998, 2007; Zedgenizov et al., 2007; Agashev et al., 2013; и другие).

Содержание редких элементов в минералах считается хорошим геохимическим индикатором при реконструкции различных процессов минералообразования и геодинамических обстановок. Основными метасоматизирующими агентами являются расплавы или флюиды, среди которых по составу выделяются два типа: силикатный и карбонатитовый, отсюда возникает силикатный и карбонатитовые типы метасоматоза. Для силикатного характерно обогащение несовместимыми высоkozарядными элементами, такими как (HFSE – Zr, Hf, Ta, Nb, Y), а также повышенное отношение Ti/Eu и пониженное La_n/Yb_n .

Продукты карбонатитового метасоматоза характеризуются аномально повышенным содержанием Sr и легких редких земель (LREE), а также пониженным HFSE относительно других несовместимых элементов (Ionov et al., 1993; Rudnick et al., 1993; Coltorti et al., 1999, 2000; Wang et al., 2001; Bodinier et al., 2004).

Фреем и Гринном (Frey et al., 1974) была предложена двухстадийная модель образования, согласно которой на начальной стадии происходило частичное плавление мантийного субстрата, сопровождающееся общим истощением субстрата, а затем – метасоматическое обогащение силикатным расплавом/флюидом (Coltorti et al., 1999).

Детальное геохимическое исследование мантийных ксенолитов перидотитового, пироксенитового и эклогитового типов пород позволяют дополнить и расширить информацию о составе и строении литосферной мантии под кимберлитовыми полями трубок Мир и Обнаженная.

Аналитические методы

Определение химического состава минералов из ксенолитов проводилось методом рентгено-спектрального микроанализа в ИЭМ РАН (г. Черноголовка) с применением растрового электронного микроскопа Tescan Vega-II XMU (режим EDS, ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 400 нА). Диаметр электронного пучка составил 157–180 нм (для анализа химического состава) и 60 нм (для получения изображений), оператор Варламов Д. А, а также в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, на микрозонде JEOL JXA-8100 (Япония). Параметры съемки минералов: ток 40–70 нА, ускоряющее напряжение 20 кВ, размер пучка зонда – 2 μm .

Анализы состава минералов на редкие элементы выполнялся методом *масс-спектрометрии с лазерной абляцией* (LA ICP-MS). Измерения проводились:

В аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на масс-спектрометре Finnigan Element-2 с приставкой для лазерной абляции. Прибор состоит из квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой – XSERIES2 ICP-MS компании Thermo Scientific. Диапазон измеряемых масс 2–255 а.е.м. Источник индуктивно-связанной плазмы снабжен генератором максимальной мощностью 1.6 кВт и частотой 27.12 МГц. В качестве активной среды в лазере используется алюмо-иттриевый гранат (YAG) с добавками неодима (около 3 вес. % Nd_2O_3). Диаметр лазерного пучка составлял 60 мкм для U-Pb датирования и 30 мкм для определения редкоэлементного состава гранатов, частота лазера 10 Гц, оператор Денисенко А. А.

Распределение редких элементов

Результаты исследований и аналитические данные приведены на рисунках, поскольку объем табличных данных не может быть по техническим причинам приведены в формате данной статьи. Все материалы также доступны в диссертации (Воробей, 2023) в Приложениях.

Первые работы по распределению TR в гранат-клинопироксеновых нодулях показали плавное изменение Кр TR от легких к тяжелым. Разница в величинах Кр достигает четырех порядков. На рисунке 1 показаны спектры Кр гранат-расплав (Shimizu, 1975) из ксенолитов перидотитов в кимберлитовых трубках. Авторы к первичным равновесиям относят гранулярные (granular) ксенолиты и как измененные рассматриваются вторичные переработанные (sheared) ксенолиты. В последних более высокие Кр Ce (0.2–0.4) в отличие от гранулярных – Кр Ce (0.04) соответственно,

и более высокие Кр тяжелых (Yb) на уровне больше 10–15, но здесь разница с Кр первичных гранулярных не слишком велика (9–12).

При обсуждении какой из видов графиков отвечает первичному распределению следует учитывать обобщение по редкоземельному составу гранатов из ксенолитов (Hoal et al., 1994), где достаточно детально разобрана форма изменения спектров при наложении на первичное мантийное вещество при воздействии метасоматических процессов. Конечно, это не должно сказываться на величинах равновесных Кр (и соответственно, форме графиков Кр TR), но отклонение от равновесности может быть объяснено найденными в работе (Hoal et al., 1994) закономерностям. Из графиков (рис. 1 б) видно, что в реститовых – остаточных гранатах концентрации резко падают, а угол наклона спектра растет. Напротив, при метасоматозе концентрации растут, а форма спектра содержания TR в гранате становится более пологой особенно для тяжелых TR. Исходя, из таких наблюдений отклонения от равновесного Кр в случае наложения процессов мантийного метасоматоза будут приводить к условному росту Кр, причем для ветки спектра легких TR просто к повышению значений без изменения формы, для тяжелых угол наклона напротив сможет сильно измениться.

На рисунке 2 приведены спектры TR полученные нами для изученных перидотитовых ксенолитов. По типу спектров можно выделить вполне спектры без аномалий с высоким наклоном с Кр La около 0.08, и около 20 для Yb. Вторая группа отличается более пологим наклоном спектра, высокими Кр La около 1, низкими Кр Yb около 1–3 и средними, можно сказать и низкими Кр 0.2–0.5. Третья группа образцов отличается аномалией по величине Кр La, и плавным наклоном спектра аналогично первой группы.

Для эклогитовых ксенолитов (рис. 3 б) спектры наиболее близки к третьему типу. В отличие от перидотитов Кр тяжелых TR имеют очень высокие значения до 100. Следовательно, увеличивается Кр легких TR, для La 0.3

Спектры распределения P3Э в гранатах из ксенолитов перидотитового парагенезиса двух кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная показывают обеднение в области ЛР3Э (легких редкоземельных элементов) и обогащение в области ТР3Э (тяжелых редкоземельных элементов) для трубки Мир (рис. 2 а; 3). По уровню обогащения цирконием основная выборка гранатов однообразна. Единичные обогащенные Zr гранаты отмечены в эклогитах трубки Мир и пироксенитах трубки Обнаженная.

Кр системы Grt-Cpx для перидотитового типа из трубки Обнаженная (рис. 2 б) выражены более интенсивно в области распределения ЛР3Э, что может быть признаком явно проявленных процессов метасоматоза, что отличает их от спектров алмазоносной трубки Мир (Carswell, 1973; Griffin et al., 1999; Coltorti et al., 1999; Griffin et al., 2009; Агашев и др., 2010; Щукина и др., 2015; Agashev et al., 2013). Кр TR Grt-Cpx для перидотитовых ксенолитов из алмазоносной трубки Мир близки к спектрам из ксенолитов перидотитов в кимберлитовых трубках по данным Shimizu (1975).

С другой стороны, распределение P3Э из пироксенитового типа пород трубки Мир демонстрируют более интенсивные пики по сравнению со спектрами распределения из перидотитового парагенезиса, что можно считать признаком активного проявления процессов метасоматоза (рис. 3 а).

Спектры из эклогитового типа пород трубки Мир также близки к спектрам из ксенолитов перидотитов кимберлитовых трубках по Shimizu (1975). Кр ТР3Э достаточно высок.

Минералого-петрографические характеристики изученных пород также отмечают более интенсивные проявления процессов глубинного метасоматоза, которые выражены в наложенной вторичной минерализации в пироксенитовом типе пород из алмазоносной трубки Мир и перидотитовом типе из неалмазоносной трубки Обнаженная. Сопоставление минералого-петрографических и геохимических характеристик надежно устанавливает и подтверждают различную степень проявления глубинных метасоматических событий, которые привели к обогащению минералов P3Э на разном этапе в глубинах мантии.

Достаточно необычные спектры наблюдаются для пироксенитового типа, которые почти параллельны оси. Для одной группы значение Кр на уровне 0.3, в другой подгруппе около 1, с максимумом (до 3) для La.

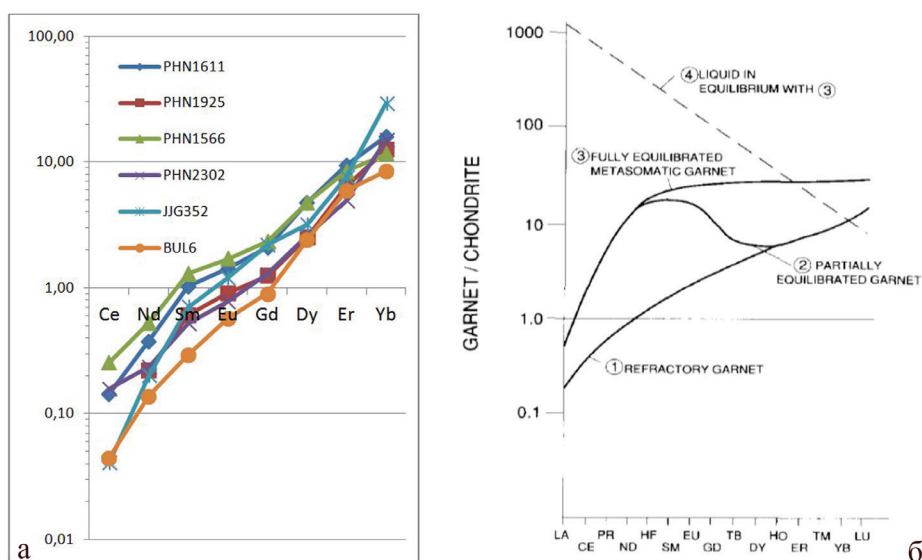


Рис. 1. Кр TR Grt-Cpx Shimizu 1975 ксенолиты мантийные из кимберлитов (а). Модель изменения форм редкоземельного спектра состава граната при метасоматозе (Hoal et al., 1994).

Fig. 1. Kp TR Grt-Cpx Shimizu 1975 mantle xenoliths from kimberlites (a). A model for changing the forms of the rare earth spectrum of garnet composition in metasomatism.

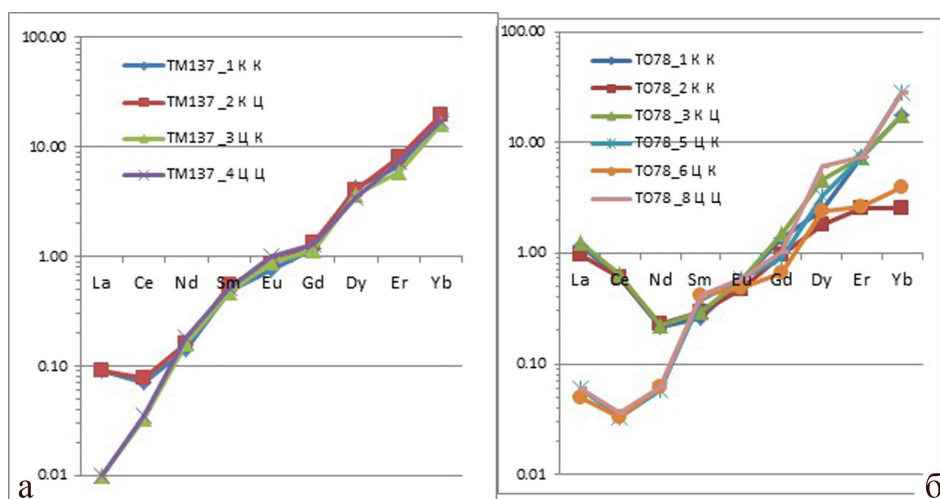


Рис. 2. Кр TR Grt-Cpx для перidotитовых ксенолитов.

а – близкие к равновесным; б – с сильными отклонениями от равновесных. ТМ– трубка Мир, ТО – трубка Обнаженная.

Fig. 2. Kp TR Grt-Cpx for peridotite xenoliths.

а – close to equilibrium; б – with strong deviations from equilibrium. ТМ – pipe Mir, ТО – pipe Obnazhennaya.

Спектры распределения РЗЭ в системе Grt-Cpx для всех типов пород в различной степени демонстрируют признаки глубинного мантийного метасоматоза как для трубки Мир, так и для Обнаженной.

Однако, более детальный анализ спектров на рисунках (2 а и 4 б) для перidotитового и эклогитового типа пород из трубки Мир показывает, что система Grt-Cpx явно находилась в более равновесных РТ-условиях. О чем свидетельствуют гладкие спектры распределения РЗЭ на картинках без резких переходов, а степень интенсивности просачивания глубинного флюида/расплава возможно происходила в одноактном, но в более интенсивном обогащении минералов РЗЭ и воздействии глубинного метасоматоза.

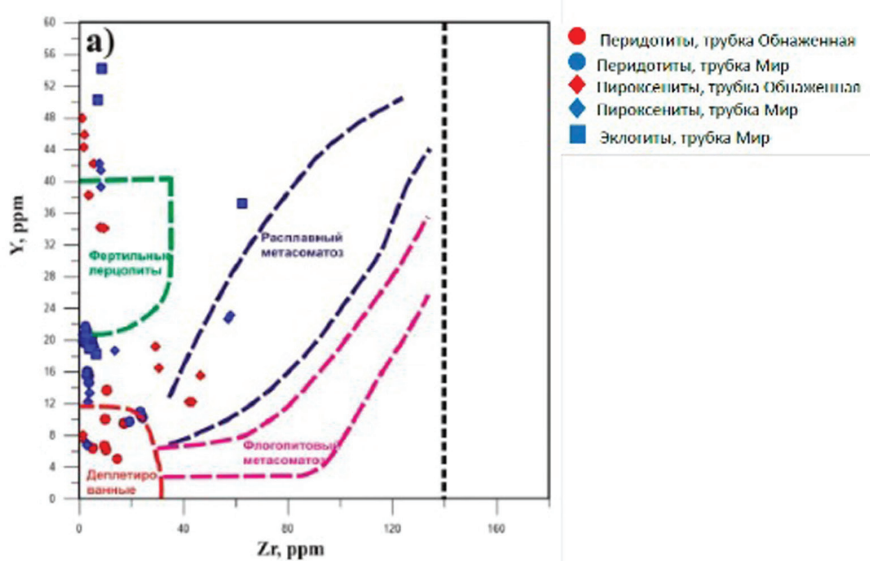


Рис. 3. Диаграммы в координатах Y (ppm) – Zr (ppm) (Griffin, Ryan et al., 1999 а) для гранатов. Красные кружки – перидотитовый парагенезис, трубка Обнаженная, красные ромбики – пироксенитовый парагенезис, трубка Обнаженная; синие кружки – перидотитовый парагенезис, трубка Мир, синие ромбики – пироксенитовый парагенезис, трубка Мир, синие квадратики – эклогитовый парагенезис, трубка Мир.

Fig. 3. Diagrams in Y (ppm) – Zr (ppm) coordinates (Griffin, Ryan et al., 1999 а) for garnets. Red circles – peridotite paragenesis, pipe Obnazhennaya, red rhombus – pyroxenite paragenesis, pipe Obnazhennaya; blue circles – peridotite paragenesis, pipe Mir, blue rhombus – pyroxenite paragenesis, pipe Mir, blue squares – eclogite paragenesis, pipe Mir.

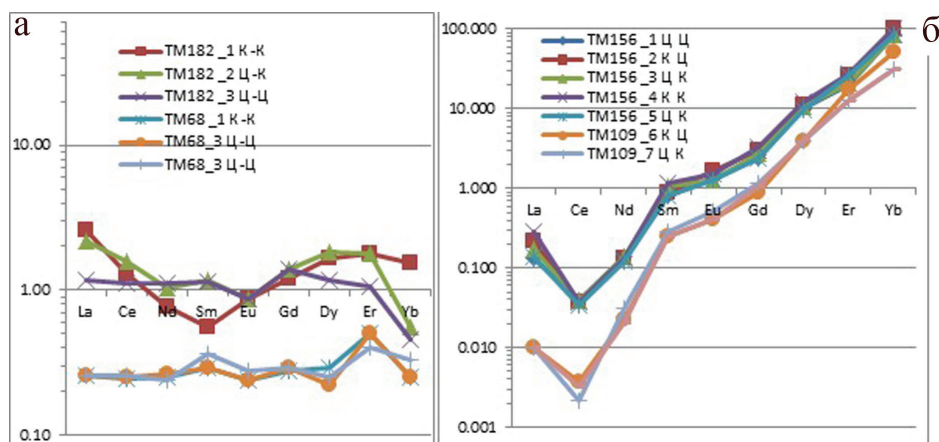


Рис. 4. Кр TR Grt-Cpx для (а) пироксенитовых ксенолитов и (б) для эклогитовых ксенолитов. ТМ – трубка Мир.

Можно сделать вывод, что минеральные фазы находились в более равновесных РТ-условиях, либо успели перераспределиться в результате медленного просачивания флюидов/расплавов в минералы из мантийных ксенолитов, что позволило достичь более равновесных значений Кр.

В ксенолитах перидотитового типа неалмазонасной трубки Обнаженная и в пироксенитовом типе пород трубки Мир (рис. 2 б и 4 а) отмечается интенсивное обеднение минералов редкоземельными компонентами. Причиной может быть как резкие изменения РТ-условий, в результате которого может быть воздействие разных типов метасоматоза и на различных глубинах, что хорошо выражается в смене наклона спектров распределений РЗЭ и появлению аномалий для некоторых элементов.

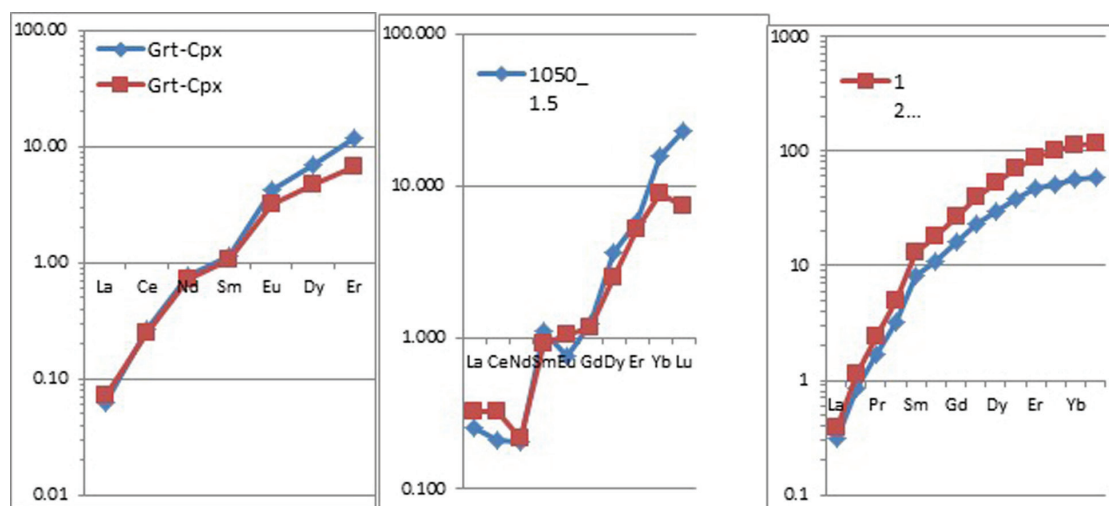
Обсуждение результатов

Равновесие с расплавом мантийных минералов позволяет оценить их по составу текущий состав мантийного источника, а также температурный режим плавления. При достижении равновесия с расплавами оценочные коэффициенты распределения редких элементов будут отвечать равновесным значениям близким по величине полученным в экспериментальных опытах. Если наблюдаемое распределение не отвечает равновесному можно предполагать, что данная минеральная ассоциация испытала помимо частичного плавления воздействие дополнительных процессов – мантийного метасоматоза, гидротермальных изменений или других процессов, меняющих редкоземельный состав зоны плавления мантийных источников. Соотношения наблюдаемых и равновесных Кр может указать на процессы обогащения или обеднения мантии связанных именно с этими вторичными процессами. Полученные данные позволяют нам провести такой анализ.

Наиболее перспективным для оценки равновесности в парах Grt-Cpx является цирконий. Значения Кр для него оценены в большом количестве работ, он хорошо определяется методом LA ICP-MS и его значения видимо слабо зависят от температур равновесия. Это позволяет расценивать величину Кр Zr, как хороший репер для решения нашей задачи – оценки равновесности минерального парагенезиса в отношении редких элементов.

На рисунках 5 приведены спектры равновесных величин Кр Grt-Cpx редкоземельных элементов полученные для различных составов расплава. В основном, это высокотемпературные эксперименты соответствующие условиям плавления мантийного субстрата. На рисунках приведены контрастные по составу эксперименты, сильно отличающиеся по Р-Т условиям равновесия. Несмотря на это, форма спектров достаточно похожа.

Разница между Кр лёгких и тяжелых редкоземельных элементов составляет три порядка. Обычно Кр тяжелых составляет первые единицы до 10, но в исключительных случаях (Kuzyura et al., 2010) при плавлении с участием карбонатизированных расплавов достигают 100. При этом для La, Ce Кр остается ниже единицы на уровне 0.0n. Наиболее высокие Кр для этих элементов получены в опытах с кислыми расплавами при низких температурах 1000–1050 (Klein et al., 2000). При этом в опытах по распределению циркония стабильно дает значения Кр значения больше 1 до 10–15. Спектры редкоземельных элементов плавные, отсутствуют аномалии для церия и европия. Незначительная аномалия по Eu отмечена в опытах с кислыми расплавами.



Gaetani et al., 2003, c 1200 1.6

Klein et al., 2000, 1100 1.5

Kuzyura et al., 2010, 1265, 7GPa
 карбонатизированная мантия

Рис. 5. Коэффициенты распределения редкоземельных элементов в равновесиях гранат-клинопироксен (Кр Grt-Cpx TR) полученные в экспериментах при высоких Р-Т условиях.

Fig. 5. Equilibrium distribution coefficients of rare earth elements in garnet-clinopyroxene equilibria (Kr Grt-Cpx TR) published in results of experiments with high P-T condition.

Выводы

1. Исследовано распределение редкоземельных и литофильных элементов между клинопироксеном и гранатом из мантийных ксенолитов кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная. Помимо плавных спектров TR и равновесных значений K_r Zr (около 10) большое количество спектров имеют аномальные значения La Ce Zr тяжелых TR. Для пироксенитов из трубки Мир отмечены субгоризонтальные спектры Kp TR. Для эклогитов аномально большие величины Kp тяжелых TR (на уровне 100). Все это не может быть объяснено простым процессом равновесного плавления, тут явно было воздействие мантийного метасоматоза, что привело к обогащению различными РЗЭ минералов.
2. Сопоставление с экспериментальными данными Kp показывает, что высокие значения в эклогитах могут объясняться процессом карбонатного метасоматоза. При этом сохраняется плавный спектр Kp для TR, за исключением Ce аномалии, что видимо отражает окислительный характер обстановки.
3. Спектры для пироксенитового типа пород показывают, что метасоматоз в них приводит к неравновесности в распределении TR. Это означает, что процессы формирования были многостадийными, интенсивными и почти полностью переработали исходный субстрат. При этом наиболее вероятны низкотемпературные высокощелочные флюиды/расплавы, на что указывает отсутствие Ce и Eu аномалий.
4. Перидотитовые породы в большинстве своем отражают равновесное распределение. Однако в ряде образцов трубки Обнаженная аномальные значения Ce, La, HTR, Zr указывают на проявление метасоматоза. Процессы метасоматоза вероятно коррелируются с исчезновением алмазосной ассоциации, что может послужить хорошим поисковым критерием.

Литература

5. Агашев А. М., Похиленко Н. П., Черепанова Ю. В., Головин А. В. Геохимическая эволюция пород основания литосферной мантии по результатам изучения ксенолитов деформированных перидотитов из кимберлитов трубки Удачная // ДАН. 2010. Т. 432. № 4. С. 510–513.
6. Бобров А. В., Гаранин В. К., Никифорова А. Ю. Мантийные породы кимберлитовой трубки Обнаженной. Ст. 2. Условия образования и эволюция минеральных парагенезисов / МОИП. 2003. Т. 78. № 4. С. 78–85.
7. Воробей С. С. Метасоматические ассоциации минералов пород кратонной литосферной мантии на примере ксенолитов трубок Мир и Обнаженная, Якутия / Дисс. к.г.м.н. Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. 2023. 198 с.
8. Гаранин В. К., Кудрявцева Г. П., Серенко В. П., Сошнина Л. Т. Минералогия ильменитовых гипербазитов кимберлитовой трубки Мир // Известия АН СССР. Сер. Геология. 1983. № 2. С. 84–95.
9. Дэвис Г. Л., Соболев Н. В., Харьков А. Д. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутии, полученные по соотношению изотопов свинца и урана в цирконах // ДАН. 1980. Т. 254. № 1. С. 175–179.
10. Костровицкий С. И., Адмакин Л. А. Находка ксенолита древесины в кимберлитовой трубке Обнаженная // Геология и геофизика. 1991. № 11. С. 82–84.
11. Костровицкий С. И., Соловьева Л. В., Горнова М. А., Алымова Н. В., Яковлев Д. А., Игнатьев А. В., Веливецкая Т. А., Суворова Л. Ф. Изотопный состав в минералах мантийных парагенезисов из кимберлитов Якутии // ДАН. 2012. Т. 444. № 1. С. 61–66.
12. Пономаренко А. И., Специус З. В., Соболев Н. В. Новый тип алмазосных пород – гранатовые пироксениты // ДАН СССР. 1980. Т. 251. № 2. С. 438–441.
13. Соболев Н. В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск. Изд-во: Наука, 1974. 264 с.
14. Специус З. В., Серенко В. П. Состав континентальной верхней мантии и низов коры под Сибирской платформой. Междувед. геофиз. ком. при президиуме АН СССР. М. Изд-во: Наука, 1990. 272 с.
15. Специус З. В., Иванов А. С., Митюхин С. И. Ксенолиты и мегакристы с алмазами из кимберлитовой трубки Нюрбинская (Накыньское поле, Якутия) // ДАН. 2006. Т. 408. № 6. С. 810–814.
16. Уханов А. В., Рябчиков И. Д., Харьков А. Д. Литосферная мантия Якутской кимберлитовой провинции. М. Изд-во: Наука, 1988. 286 с.
17. Харьков А. Д., Вишневский А. А. Особенности келифитизации граната из ксенолитов глубинных пород в кимберлитах. Зап. Всеросс. мин. общества. 1989. Т. 4.

18. Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Коренные месторождения алмазов мира. М. Изд-во: Недра, 1998.
19. Щукина Е. В., Агашев А. М., Костровицкий С. И., Похиленко Н. П. Метасоматические изменения литосферной мантии в районе кимберлитовой трубы им. В. Гриба, Архангельская алмазоносная провинция // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 12. С. 2153–2172.
20. Agashev A. M.; Ionov D. A.; Pokhilenko N. P.; Golovin A. V.; Cherepanova Y.; Sharygin I. S. Metasomatism in lithospheric mantle roots: Constraints from whole-rock and mineral chemical composition of deformed peridotite xenoliths from kimberlite pipe Udachnaya // *Lithos*. 2013. V. 160–161. P. 201–215.
21. Beard L. B., Fraracci K. N., Taylor L. A., Snyder G. A., Clayton R. A., Mayeda T. K., Sobolev N. V. Petrography and geochemistry of eclogites from the Mi kimberlite, Yakutia, Russia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1996. V. 125. P. 293–310.
22. Bodinier J. L., Menzies M. A., Shimizu N., Frey F. A., McPherson E. Silicate, hydrous and carbonate metasomatism at Lherz, France: contemporaneous derivatives of silicate melt/harzburgite reaction // *Journal of Petrology*. 2004. V. 45. P. 299–320.
23. Carswell D. A. Primary and secondary phlogopites and clinopyroxenes in garnet lherzolite xenoliths, Cape Town, South Africa // *International Conference on Kimberlites (extended abstracts)*. 1973. P. 417–429.
24. Chalot-Prat F., Boullier A.-M. Metasomatism in the subcontinental mantle beneath the Eastern Carpathians (Romania): new evidence from trace element geochemistry // *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1997. V. 129 (4). P. 284–307.
25. Coltorti M., Bonadiman C., Hinton R. W., Siena F., Upton B. G. J. Carbonatite metasomatism of the oceanic upper mantle: evidence from clinopyroxenes and glasses in ultramafic xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean // *Journal of Petrology*. 1999. V. 40. No 1. P. 133–165.
26. Coltorti M., Beccaluva L., Bonadiman C., Salvini L. Glasses in mantle xenoliths as geochemical indicators of metasomatic agents // *Earth and Planetary Science Letters*. 2000. V. 183. No 1–2. P. 303–320.
27. Dawson J., Hill P. & Kinny P. Mineral chemistry of a zircon-bearing, composite, veined and metasomatised upper-mantle peridotite xenolith from kimberlite // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2001. V. 140 (6). P. 720–733.
28. Frey F. A., Green D. H. The mineralogy, geochemistry and origin of lherzolite inclusions in Victorian basanites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1974. V. 38. P. 1023–1059.
29. Griffin W. L., Smith D., Ryan C. G., O'Reilly S. Y., Win T. T. Trace-element zoning in mantle minerals: metasomatism and thermal events in the upper mantle // *The Canadian Mineralogist*. 1996. V. 34. No. 6. P. 1179–1193.
30. Griffin W. L., S. R. Shee, C. G. Ryan, T. T. Win and Wyatt. B. A. Harzburgite to lherzolite and back again: Metasomatic processes in ultramafic xenoliths from the Wesselton kimberlite, Kimberley, South Africa // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1999. V. 134. P. 232–250.
31. Griffin W. L., O'Reilly S. Y. Cratonic lithospheric mantle: is anything subducted. *Episodes*. 2007. V. 30. P. 43–53.
32. Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Afonso J. C., Bregg G. C. The composition and evolution of lithospheric mantle: a Re-evaluation and its tectonic implications // *Journal of Petrology*. 2009. V. 50. No. 7. P. 1185–1204.
33. Griffin W. L., Ryan C. G., Kaminsky F. V., O'Reilly S. Y., Natapov L. M., Win T. T., Kinny P. D., Ilupin I. P. The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton // *Tectonophysics*. 1999 a. V. 310. No 1–4. P. 1–35.
34. Harte B. Mantle peridotites and processes: the kimberlite sample // *Continental Basalts and Their Xenoliths* Hawkesworth C. J., Norry, M. J. – Nantwich: Shiva. 1983. P. 49–61.
35. Hoal K. E. O., Hoal B. G., Erlank A. J. & Shimizu N. Metasomatism of the mantle lithosphere recorded by rare earth elements in garnets // *Earth and Planetary Science Letters*. 1994. V. 126(4). P. 303–313.
36. Howarth G. H., Barry P. H., Pernet-Fisher J. F., Baziotis I. P., Pokhilenko N. P., Pokhilenko L. N., Bodnar R. J., Taylor L. A., Agashev A. M. Superplume metasomatism: Evidence from Siberian mantle xenoliths // *Lithos*. 2014. V. 184–185. P. 209–224.
37. Ionov D. A., Ashchepkov I. V., Stosch H.-G., Witt-Eickschen G., Seck H. A. Garnet peridotite xenolith from the Vitim volcanic field, Baikal region: the nature of the garnet-spinel peridotite transition zone in the continental mantle // *Journal of Petrology*. 1993. V. 34. P. 1141–1175.
38. Ionov D. A., Gregoire M., Prikhod'ko V. S. Feldspar-Ti-oxide metasomatism in off-cratonic continental and oceanic upper mantle // *Earth and Planetary Science Letters*. 1999. V. 165 (1). P. 37–44.
39. Kelemen P. B., Hart S. R., Bernstein S. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction // *Earth and Planetary Science Letters*. 1998. V. 164. P. 397–406.

40. Klein M., Stosch H.-G., Seck H. A., Shimizu N. Experimental partitioning of high field strength and rare earth elements between clinopyroxene and garnet in andesitic to tonalitic systems // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000. V. 64 (1). P. 99–115.
41. Kuzyura A. V., Wall F., Jeffries T. & Litvin Y. A. Partitioning of trace elements between garnet, clinopyroxene and diamond-forming carbonate-silicate melt at 7 GPa // *Mineralogical Magazine*. 2010. V. 74(2). P. 227–239.
42. O'Reilly S. Y. and Griffin W. L. *Mantle Metasomatism // Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock, Lecture Notes in Earth System Sciences. Springer-Verlag Berlin Heidelberg / D. E. Harlov and H. Austrheim*. 2013. Chapt. 12. P. 471–533.
43. Rudnick R. L., McDonough W. F., Chappell B. W. Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle: petrographic and geochemical characteristics // *Earth and Planetary Science Letters*. 1993. V. 114. P. 463–475.
44. Seitz H. M. and Woodland A. B. The distribution of lithium in peridotitic and pyroxenitic mantle lithologies – an indicator of magmatic and metasomatic processes // *Chemical Geology*. 2000. V. 166 (1–2). P. 47–64.
45. Shimizu N. Rare earth elements in garnets and clinopyroxenes from garnet lherzolite nodules in kimberlites // *Earth and Planetary Science Letters*. 1975. V. 25. No. 1. P. 26–32.
46. Sobolev N. V., Taylor L. A., Zuev V. M., Bezborodov S. M., Snyder G. A., Sobolev V. N., Yefimova E.S. The specific features of eclogitic paragenesis of diamonds from Mir and Udachnaya kimberlite pipes (Yakutia) // *Geologiya and Geophysics*. 1998. V. 39. No. 12. P. 1653–1663.
47. Sobolev A. V., Krivolutsкая N. A., Kuzmin D. V. Petrology of the Parental Melts and Mantle Sources of Siberian Trap Magmatism // *Petrologiya*. 2009. V. 17. No. 3. P. 276–310.
48. Sun S.-S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implications for mantle composition and processes // Saunders AD, Norry MJ (eds). *Magmatism in the ocean basins*. Geol. Soc. Sp. Pub. 1989. V. 42. P. 313–345.
49. Sun J., Liu C. Z., Tappe S., Kostrovitsky S. I., Wu F.Y., Yakovlev D., Yang Y. H., Yang J. H. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: Insights from in situ U–Pb and Sr–Nd perovskite isotope analysis // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. V. 404. P. 283–295.
50. Zedgenizov D. A., Ragozin A. L. Chloride-carbonate fluid in diamonds from the eclogite xenolith // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 415. No 6. P. 961–964.
51. Walter M. J. Melting residues of fertile peridotite and the origin of cratonic Lithosphere // Fei, Y., Bertka, M., Mysen, B.O. (eds.). *Mantle Petrology: Field Observations and High-Pressure Experimentation* The Geochemical Society, Spec. Publ. Houston: TX. 1999. P. 225–240.
52. Wang W. Y., Gasparik T. Metasomatic clinopyroxene inclusions in diamonds from the Liaoning province, China // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. V. 65. No 4. P. 611–620.
53. Zaccarini F., Pushkarev E. V., Fershtater G. B., Garuti G. Composition and mineralogy of PGE-rich chromitites in the Nurali lherzolite-gabbro complex, Southern Urals, Russia // *Canadian Mineralogist*. 2004. V. 42(2). P. 545–562.