

УДК 552.313.8:552.323.6

ТРЕНДЫ РЕФЕРТИЛИЗАЦИИ ЛИТОСФЕРЫ В КСЕНОЛИТАХ И КСЕНОКРИСТАХ ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ УДАЧНАЯ (СИБИРСКАЯ ПЛАТФОРМА)

© 2021 г. Н. С. Тычков¹*, А. М. Агашев¹, Академик РАН Н. П. Похиленко¹

Поступило 02.03.2021 г.

После доработки 26.04.2021 г.

Принято к публикации 05.05.2021 г.

В результате комплексного исследования ксенолитов перидотитов трубки Удачная (Якутия) подтверждены наличие обратной зависимости между содержанием Cr_2O_3 в гранате и его объемной долей во вторично-обогащенных перидотитах (ВП) и отсутствие такой зависимости в деплетированных перидотитах (ДП). Зависимость описывается равносторонней гиперболой, что согласуется с актуальными представлениями о происхождении ВП. Также показано, что наблюдается четкая зависимость валового содержания алюминия в породе от количества в ней граната как для ДП, так и для ВП. В то же время зависимость количества Al_2O_3 в породе от содержания Cr_2O_3 в гранате наблюдается только для ВП и отсутствует для деплетированных мантийных пород. Построена модель изменения модалного состава породы при вторичном обогащении (рефертилизации) ВП трубки Удачная: доля граната (Gnt) в породе показывает прямую корреляцию с клинопироксеном (Cpx) ($\text{Gnt} = 0.879 \cdot \text{Cpx} + 0.022$, $R^2 = 0.78$) и обратную с оливином (Ol) ($\text{Gnt} = 0.026/\text{Ol}^{3.141}$, $R^2 = 0.79$). При увеличении количества Gnt и Cpx от минимальных значений доля ортопироксена (Orx) сначала увеличивается до 0.16, а затем имеет тенденцию к уменьшению, начиная примерно с 0.65 Ol, 0.09 Cpx и 0.10 Gnt. Полученная модель позволяет по содержанию Cr_2O_3 в гранате с определенной погрешностью определить место материнской породы в этом ряду обогащения для отдельных зерен граната. На основе данных о составе более 800 зерен ксенокристов гранатов трубки Удачная определена средняя степень рефертилизации литосферной мантии района, выраженная в модалном составе пород: Ol = 0.72, Orx = 0.15, Gnt = 0.07, Cpx = 0.06 (медианы распределений). Описанный механизм обогащения и оценки по составу ксенокристов гранатов показывают, что верлитизация кратонной литосферной мантии может происходить при существенном воздействии силикатного расплава.

Ключевые слова: рефертилизация, верлитизация, литосферная мантия, гранат, перидотиты, модалный состав, Сибирская платформа, кимберлит

DOI: 10.31857/S2686739721080211

Кимберлитовая трубка Удачная (Далдынское кимберлитовое поле, Якутия) – уникальный геологический объект, содержащий отторженцы непрерывного разреза кратонной литосферы от ее корней до верхнего уровня коры. Ксенолиты и ксенокристы глубинных пород, прорванных кимберлитами этой трубки, являются обломками пород литосферной мантии и дают информацию о строении, составе и о процессах, происходивших при формировании кимберлитового тела. В трубке Удачная, как нигде, можно найти множество несерпентинизированных ксенолитов пород раз-

реза кратонной литосферной мантии (КЛМ). Эти факты позволяют рассматривать трубку Удачная как модель для изучения разрезов мантии в районах развития менее информативных кимберлитов. Данная работа посвящена изучению пород наиболее глубинных уровней КЛМ, выносимых кимберлитами трубки Удачная.

Изучение большого количества неизмененных ксенолитов мантийных пород из трубки Удачная с использованием различных минеральных термометров (в том числе устойчивой примеси K_2O в клинопироксенах [1]) показывает, что наиболее глубинные части КЛМ, выносимые на поверхность кимберлитами, состоят из крайне обедненных несовместимыми компонентами пород, состоящих практически полностью из оливина и ортопироксена, вероятно, образовывавшихся при крайне высоких степенях частичного

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

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

плавления. На этих же уровнях глубин распространены те же породы, подвергшиеся впоследствии вторичному обогащению, всегда содержащие вследствие этого клинопироксен и гранат в существенно большем количестве.

Традиционно в классификации перидотитовых пород для разделения типов используются границы содержания в 5% клинопироксена и ортопироксена. При подробном изучении составов основных минералов, слагающих перидотиты, было показано [2, 3], что составы некоторых минералов в перидотитах существенно зависят именно от присутствия других фаз в парагенезисе вне зависимости от их количества. Так, содержание СаО граната в перидотитах остается практически неизменным в присутствии ортопироксена и клинопироксена и начинает смещаться только при исчезновении одной из этих фаз. Это тем более актуально в связи с тем, что при изучении отторженцев КЛМ, выносимых на поверхность, часто приходится иметь дело с отдельными минералами и ориентироваться только на их состав. В связи с этим при изучении мантийных пород (в том числе в данной работе) нам кажется более приемлемым и понятным использование в перидотитовой системе терминов “дунит” для породы, не содержащей пироксенов, “гарцбургит” для породы, содержащей ортопироксен и не содержащей клинопироксен, верлит – для породы только с ортопироксеном и “лерцолит” для породы, содержащей оба пироксена в любом, даже самом малом количестве. Данная терминология в ряде случаев не будет соответствовать используемой в основном в литературе, в том числе и в работах, из которых мы заимствуем часть используемых данных по составу перидотитов [4–6].

Информацию о составе ультрадеплетированных пород низов литосферы мы берем из [6], где они описаны как гарцбургиты и дуниты, но в контексте соотношения и состава фаз являются в большинстве своем лерцолитами с малым количеством клинопироксена. Здесь для краткости будем называть эти породы ультрадеплетированными перидотитами (УДП). Приводимые для сравнения деплетированные породы литосферной мантии (в основном лерцолиты с содержанием клинопироксена >5%), не несущие следов деформации или вторичного обогащения [4], обозначены в работе как деплетированные перидотиты (ДП).

Основным предметом исследования в данной работе являются так называемые высокотемпературные (>1100°C) деформированные лерцолиты. По существующим представлениям они образуются при обогащении УДП в результате воздействия расплавов астеносферного происхождения (не содержащих Cr и обогащенных несовместимыми компонентами, такими как Fe и Ti) на фоне тектонических процессов, отраженных в харак-

терной текстуре этих пород [7]. Для данной работы ключевой характеристикой данных пород является именно их обогащенность по сравнению с ультрадеплетированными породами КЛМ, причем приобретенная в результате вторичных процессов обогащения, поэтому будем здесь называть их вторично-обогащенные перидотиты (ВП).

Известно, что существует общая обратная зависимость объемной доли граната в мантийных породах и содержания в гранате Cr_2O_3 [8]. Авторами выполнено комплексное исследование ксенолитов перидотитов трубки Удачная [1, 5, 9]. Достаточное количество кондиционных данных, а также обобщенные данные других исследователей [4, 5] позволили подтвердить и подробно рассмотреть указанную взаимосвязь хромистости граната от его объемной доли в ВП трубки Удачная, а также показать отсутствие таковой в низкотемпературных деплетированных перидотитах [10].

В работе [10] нами было показано, что зависимость описывается равноугольной гиперболой $y = a/x$, где x – содержание Cr_2O_3 в гранате (мас. %), y – объемная доля граната в породе, a – общее количество хрома в гранате. Зависимость описывается гиперболой, поскольку при вторичном обогащении количество хрома в породе не изменяется (рис. 1). Очевидно, что, если бы породы изначально характеризовались широким диапазоном содержания хрома, описанная зависимость должна была бы отсутствовать, поскольку даже при едином составе воздействующего расплава точки составов пород с различным первоначальным количеством хрома двигались бы при обогащении по существенно различным кривым изначально. Высказанное в работе [10] утверждение о том, что практически весь хром в ВП содержится в гранате, требует дополнительного рассмотрения. В действительности, вклад в общее содержание хрома минералов за исключением граната может быть достаточно существенным. Хромит в ВП практически не обнаруживается [1], поскольку уже на первых стадиях процесса рефertilизации переходит в гранат с понижением хромистости системы [11]. На рис. 2 показаны доли содержания Cr, которые вносят минералы в исследованных образцах ВП относительно степени обогащения пород, представленной в виде объемной доли граната в породе.

В исследованных ВП оливин содержит до 0.06 (в среднем 0.02) мас. % хрома породы с тенденцией к понижению с общим обогащением породы, ортопироксен – до 0.21 (в среднем 0.06) также с тенденцией к понижению при обогащении, клинопироксен – до 0.28 (в среднем 0.13) мас. % с тенденцией возрастания при обогащении. Гранат в среднем содержит 0.78 мас. % хрома породы (стандартное отклонение 0.07). Существенной зависимости доли хрома в гранате от обогащения

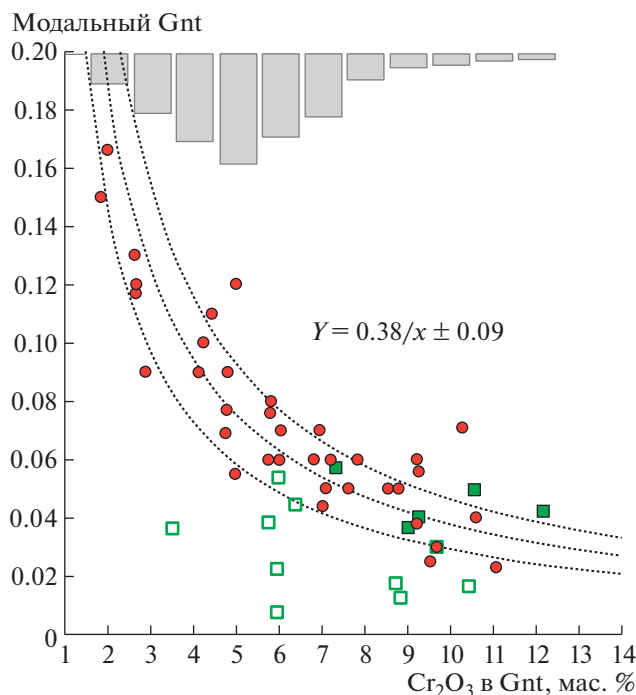


Рис. 1. Зависимость объемного количества граната (Gnt) от его хромистости в ксенолитах и ксенокристаллах трубки Удачная. Ксенолиты ВП — красные кружки (наши данные, а также данные [4]). Мелким пунктиром показана кривая $y = 0.38/x$ и стандартное отклонение, равное 0.09, моделирующие зависимость для ВП. Зелеными квадратами показаны УДП (данные [6]), заполненные квадраты — вынесенные с глубины, соответствующей давлению более 5 ГПа. Сверху в виде гистограммы показано распределение содержания Cr_2O_3 в ксенокристаллах гранатов из ВП (328 зерен) трубки Удачная.

породы не наблюдается, хотя в четырех наиболее обогащенных образцах она понижена и составляет 0.71, в результате чего точки этих образцов несколько сдвигаются на показанной на рис. 1 гиперболической зависимости в сторону меньшего содержания хрома в гранате.

Таким образом, хотя в гранате в среднем содержится около 80% всего хрома, это содержание достаточно постоянно и не зависит от степени обогащения, что позволяет реализоваться описанному механизму распределению хрома в ВП. Более того, существование показанной на рис. 1 зависимости, показывающее близкое содержание хрома в гранатах ВП, несмотря на то, что содержание хрома в прочих минералах может ее существенно нарушать, свидетельствует о том, что подвергшиеся обогащению УДП низов литосферы имели достаточно узкий диапазон хромистости. Ксенолиты этих пород из трубки Удачная описаны в ряде работ [6, 12]. Это лерцолиты с минимальным количеством клинопироксена и граната (менее 5%), гарцбургиты и дуниты. Послед-

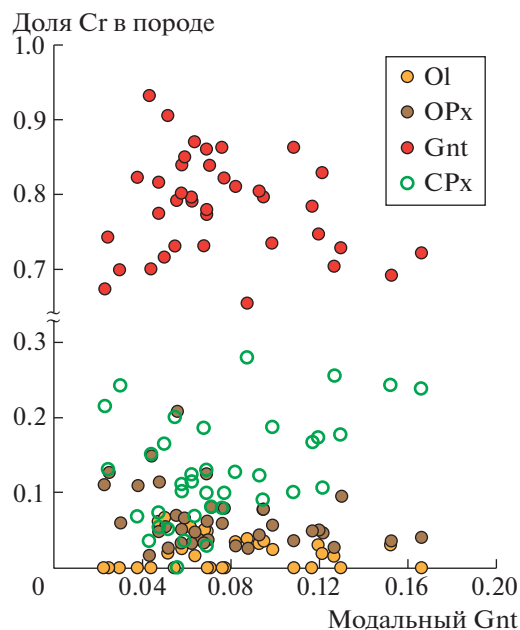


Рис. 2. Доли различных минералов в общем содержании хрома в исследованных ВП.

ние, по данным [12], составляют около 80% пород нижних частей КЛМ. Эти породы характеризуются широким диапазоном содержания Cr_2O_3 в породе — от 0.05 до 0.63 мас. % (в среднем 0.33, ст. откл. 0.16 по данным 24 образцов [6]).

На рис. 3 в виде гистограмм показаны распределения содержания хрома в исследованных ВП и УДП из тр. Удачная. Видно, что составы УДП распадаются на две группы с пиками около 0.2 и 0.45 и границей около 0.35 мас. % Cr_2O_3 , в то время как ВП характеризуются плотным распределением значений и одним пиком около 0.45 мас. % Cr_2O_3 . ВП трубки Удачная являются наиболее глубинными породами КЛМ, выносимыми на поверхность. Глубина их образования соответствует давлениям, превышающим 5 ГПа [4, 13]. В то же время все рассматриваемые УДП (для которых возможно определение давления), образовавшиеся при давлениях более 5 ГПа, также относятся к более хромистой группе (содержат Cr_2O_3 более 0.35 мас. %). Данные наблюдения позволяют сделать вывод о том, что в процесс вторичного обогащения при образовании ВП трубки Удачная вовлекались УДП с наибольшим содержанием Cr_2O_3 (более 0.32 мас. %), располагавшиеся на наибольших глубинах, соответствующих давлениям более 5 ГПа. На рис. 1 можно видеть, что точки составов наиболее глубинных УДП располагаются в начале тренда обогащения и в его пределах в отличие от менее глубинных и менее хромистых пород. Наши данные по составу ВП, объединенные с литературными данными [6], содержат 2 образца, выбивающихся из общего

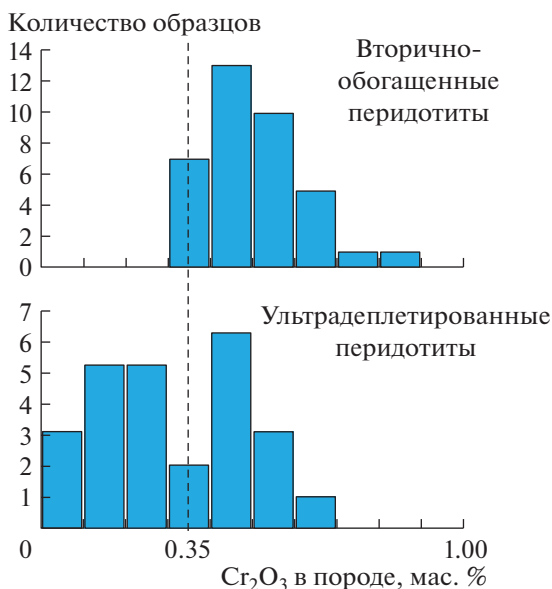


Рис. 3. Распределения содержания хрома в исследованных ВП и УДП из трубки Удачная. Каждое деление по горизонтальной оси составляет 0.1 мас. % Cr_2O_3 в породе.

распределения и характеризующихся существенно большим содержанием хрома в породе, чем приведенная выборка по УДП, составляющим 0.73 и 0.87 мас. % Cr_2O_3 . Порода с такими характеристиками не обнаружено среди представленных ксенолитов УДП. Их относительная малочисленность (2 из 38 образцов) и содержание хрома, почти вдвое превышающее среднее значение УДП, подвергшихся обогащению, могут свидетельствовать о существенно отличающихся особенностях генезиса исходных пород.

По литературным данным, гранаты из ВП других регионов демонстрируют аналогичный характер зависимости содержания хрома от количества граната, но при различном положении кривой — различном первоначальном содержании хрома в породах: $a = 0.36$ для трубки Jerico (Северная Америка), 0.23 для трубки Bluefontain (Южная Африка) и 0.17 для перидотитов Богемского массива (ссылки на источники данных в работе [10]). Используя данное соображение, можно оценить среднюю исходную хромистость, а также широту ее диапазона, для первоначально деплементированных пород, подвергшихся рефertilизации, в различных объектах, не имея прямых данных об этих породах.

Данные о составе и строении литосферы могут быть получены путем изучения не только ксенолитов, но и ксенокристов мантийных пород, которые существенно более широко представлены в кимберлитах и также представляют собой продукты разрушения пород литосферной мантии.

Ксенокристы пиропов, относящиеся к ВП, можно отделить от других гранатов по составу, используя схемы разделения гранатов из кимберлитов [9, 14–17]. От гранатов деплементированных мантийных пород они отделяются по повышенной примеси TiO_2 [16], а от высокотитанистых гранатов мегакристовой ассоциации по соотношению Cr_2O_3 – TiO_2 [15]. Используя зависимость, приведенную на рис. 1, имея содержание Cr_2O_3 в каждом зерне, можно рассчитать количество новообразованного граната в породе, к которой принадлежал гранат. Имея достаточно большое количество ксенокристов гранатов из ВП, можно таким образом оценить среднее количество новообразованного граната, т.е. среднюю степень вторичного обогащения ультрадеплементированных корней литосферы, опробуемой данной кимберлитовой трубкой.

Делая подобные оценки, необходимо учитывать достаточно большую погрешность, связанную с определенной размытостью представленной зависимости Cr_2O_3 в гранате ВП от количества граната. При высоких значениях Cr_2O_3 одно стандартное отклонение, т.е. почти 70% образцов, будет находиться в пределах разницы $\pm 1\%$ (относительная ошибка $\pm 24\%$) граната в породе, а при низких значениях — в пределах $\pm 3\%$ (относительная ошибка $\pm 23\%$). При использовании большого количества данных и оценке среднего значения данная зависимость будет давать достаточно точные усредненные результаты, однако при оценке отдельных образцов или небольшого их количества необходимо учитывать возможное существенное отклонение от среднего по зависимости.

На основе изучения 865 зерен ксенокристов граната из трубки Удачная по указанным выше критериям было выделено 328 зерен, относящихся к ВП. Распределение содержания хрома в них близко к нормальному с пиком в районе 4.5, средним содержанием 4.58 и стандартным отклонением 1.99 мас. % Cr_2O_3 (см. гистограмму на рис. 1, сверху). 4.5 мас. % Cr_2O_3 в гранате соответствует объемной доле граната в породе, равной 0.084. Для того, чтобы получить среднее количество (объем) ВП в литосфере на основе среднего состава ксенокристов граната из этих пород, необходимо учитывать то, что породы с большим количеством граната дают пропорционально больший вклад ксенокристов граната соответствующего состава в исследуемую выборку. На рис. 4 показана гистограмма распределения ВП с различным количеством граната в литосфере под трубкой Удачная. Медиана (50-й процентиль) распределения равна 7.3% граната в породе. 15-й и 85-й процентиля соответственно равны 5.1 и 11.2 объемных процентов граната. Соответственно к этому интервалу относится 70% ВП под трубкой Удачная.

Для сравнения на рис. 4 также нанесена гистограмма распределения количества граната в 24

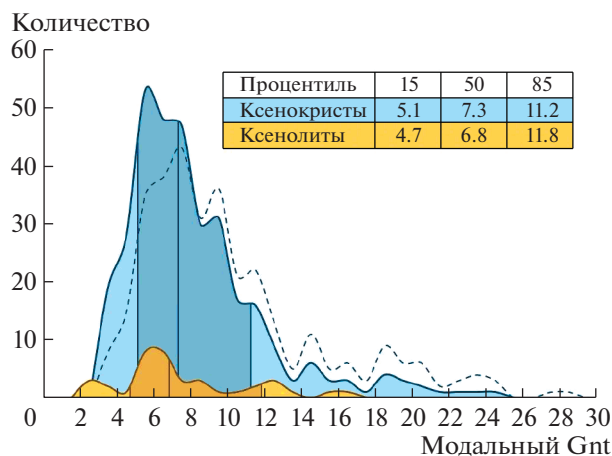


Рис. 4. Гистограммы распределения плотности количества новообразованного граната во ВП под трубкой Удачная. Голубым показана гистограмма по 328 ксенокристам граната из ВП (пунктиром показана нескорректированная гистограмма — без учета большого вклада в выборку пород с большим количеством граната), оранжевым показана гистограмма по 38 ксенолитам ВП. Вертикальными линиями показаны процентиля 15, 50 (медиана) и 85 (в таблице на рисунке показаны их значения), в областях более темного тона содержится 70% образцов выборок.

исследуемых ксенолитах ВП. Видно, что и пик распределения, и отметки процентилей близки к распределению по ксенокристам, что свидетельствует о применимости метода. Пунктиром показана нескорректированная гистограмма по ксенокристам — без учета большого вклада в выборку пород с большим количеством граната. Положение ее пиков относительно двух других гистограмм свидетельствует, что указанная поправка при расчетах существенно влияет на результат. Гистограмма, полученная по ксенокристам, — намного более информативна, поскольку использует почти на порядок больше исходных данных, чем гистограмма по ксенолитам. Характер ксенокристовой гистограммы не соответствует нормальному закону распределения и предварительно может быть соотнесен с логнормальным распределением или распределением Вейбула.

Проведенные исследования ксенолитов ВП тр. Удачная позволили не только описать зависимость содержания Cr_2O_3 в гранате от его объемной доли в породе, но и рассчитать зависимости объемных долей различных минералов в породе друг от друга. На рис. 5 приведены графики этих

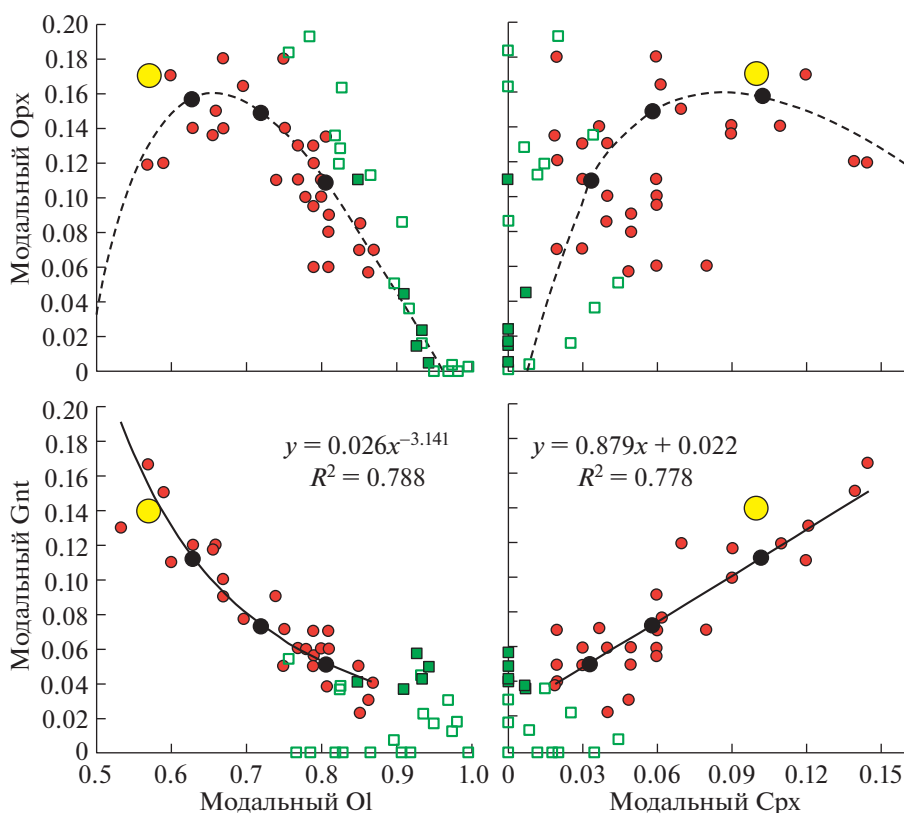


Рис. 5. Тренды обогащения в деформированных перидотитах трубки Удачная (красные кружки). Жирными линиями показаны тренды, описывающие зависимости для граната (Gnt) с оливином (Ol) и граната с клинопироксеном (Crx). На рисунках показаны уравнения кривых и коэффициенты детерминации (R^2). Пунктиром показаны кривые, рассчитанные для ортопироксена (Orx) исходя из этих двух уравнений. Зеленые квадраты — УДП из трубки Удачная (по [6]), закрашенные квадраты образовались при давлении более 5 ГПа. Желтый круг — состав примитивной мантии (по [18]). Черные кружки — процентиля 15, 50 (медиана) и 85 — гистограммы распределения модального граната в ВП под трубкой Удачная по ксенокристам из кимберлита (см. рис. 4).

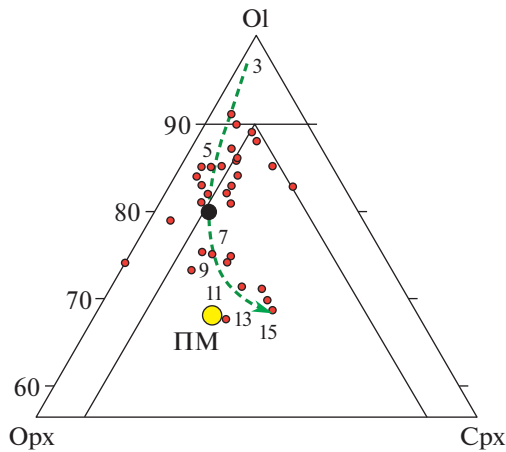


Рис. 6. Составы исследованных ВП и рассчитанный тренд их обогащения на стандартном треугольнике состава ультраосновных пород. Цифрами показаны процентные количества граната вдоль тренда обогащения. Желтый круг — состав примитивной мантии (ПМ) по [18]. Черный круг — медиана модального состава ВП в мантии под трубкой Удачная.

зависимостей. Данные по ксенолитам ВП трубки Удачная приведены в табл. 1.

В ВП трубки Удачная объемные доли граната (Gnt) и оливина (Ol) соотносятся в обратной за-

Таблица 1. Характеристики вторично-обогащенных перидотитов трубки Удачная

Модальный состав				в гранате		в породе	
OL	OPX	CPX	GNT	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ *	Cr ₂ O ₃ **
0.803	0.092	0.055	0.050	15.69	8.81	0.92	0.44
0.805	0.061	0.064	0.069	16.50	6.05	1.26	0.42
0.605	0.166	0.121	0.108	19.00	4.43	2.50	0.48
0.588	0.120	0.139	0.152	21.00	1.84	3.69	0.28
0.865	0.068	0.024	0.043	14.40	10.60	0.74	0.46
0.670	0.139	0.092	0.099	19.60	4.25	2.15	0.42
0.766	0.113	0.064	0.058	18.50	5.76	1.34	0.33
0.781	0.100	0.056	0.063	16.88	7.85	1.21	0.49
0.800	0.115	0.026	0.059	17.00	6.84	1.15	0.40
0.755	0.177	0.021	0.048	14.90	8.56	0.82	0.41
0.668	0.177	0.061	0.095	18.50	4.82	1.76	0.46
0.751	0.049	0.113	0.087	20.30	2.90	2.19	0.25
0.636	0.136	0.108	0.120	20.50	2.69	2.88	0.32
0.794	0.105	0.044	0.058	15.69	9.22	1.02	0.53
0.654	0.150	0.074	0.121	19.20	5.01	2.53	0.61
0.659	0.096	0.118	0.127	21.20	2.62	2.95	0.33
0.849	0.074	0.030	0.047	17.00	7.09	0.98	0.34
0.740	0.108	0.059	0.093	19.40	4.14	1.69	0.38
0.787	0.126	0.035	0.052	16.54	7.64	0.89	0.40
0.764	0.130	0.042	0.064	17.30	7.22	1.10	0.46
0.646	0.133	0.139	0.082	17.60	5.81	1.85	0.48
0.809	0.076	0.053	0.062	18.10	6.02	1.15	0.38
0.789	0.060	0.083	0.068	15.80	6.96	1.35	0.47

Примечание. * измеренные содержания, ** содержания, рассчитанные по модальному составу и составу минералов.

висимости и описываются степенным уравнением $Gnt = 0.026/Ol^{3.141}$, $R^2 = 0.79$. Доля граната и клинопироксена (Срх) имеют прямую линейную зависимость и описываются уравнением $Gnt = 0.879 \cdot Срх + 0.022$, $R^2 = 0.78$. При расчете общей модели изменения количества минералов в породе при обогащении за основу бралось количество граната. Количество оливина и клинопироксена по уравнениям соответственно: $Ol = (0.026/Gnt)^{1/3.141}$ и $Срх = (Gnt - 0.022)/0.879$. Наблюдаемые соотношения ортопироксена (Орх) и оливина, а также ортопироксена и клинопироксена (на рис. 5 сверху) менее четкие, поэтому ортопироксен рассчитывался как доля за вычетом долей остальных минералов. На графиках этих пар минералов пунктиром показаны кривые зависимостей, рассчитанные по данной модели. Для пары Орх-ОI расчетные кривые хорошо соответствуют наблюдаемым данным, для пары Орх-Срх — более размыто. Интересно, что при увеличении количества Gnt и Срх от минимальных значений доля Орх сначала увеличивается до 0.16, а затем имеет тенденцию к уменьшению, начиная примерно с 0.65 Ol, 0.09 Срх и 0.10 Gnt. Этот же изгиб тренда виден и на рис. 6, на котором показаны точки составов, исследованных ВП, и рассчитанный тренд изменения состава пород на стандартном треугольнике состава ультраосновных пород. Цифрами на рисунке показаны процентные количества граната по тренду обогащения. Обратите внимание, что рассчитанная кривая обогащения, как и наблюдаемый тренд составов, проходит от дунитов почти до состава, характерного для примитивной мантии.

Вследствие того, что в среднем в гранатах ВП трубки Удачная, как, вероятно, и других объектов, содержится около 94% Al₂O₃ породы, наблюдается четкая зависимость валового содержания алюминия в породе от количества в ней граната как для деплетированных пород, так и для вторично-обогащенных (рис. 7 справа). В то же время зависимость количества Al₂O₃ в породе от содержания Cr₂O₃ в гранате наблюдается только для ВП, практически отсутствует для ДП и полностью отсутствует (рис. 7 слева) для УДП трубки Удачная.

Исследование более 800 зерен ксенокристов граната из кимберлитов трубки Удачная и применение разработанных методик позволили на большом фактическом материале обосновать степень обогащения корней литосферы района, выраженной в среднем соотношении долей породообразующих минералов, составляющих: Ol = 0.72, Орх = 0.15, Gnt = 0.07, Срх = 0.06 (медианы распределений). Если по полученным зависимостям оценить модальный состав наиболее обогащенных ВП, соответствующих ксенокристам ВП трубки Удачная с содержанием Cr₂O₃ около 1–2 мас. %, получим около 49% Ol, 26% Срх и 25% Gnt,

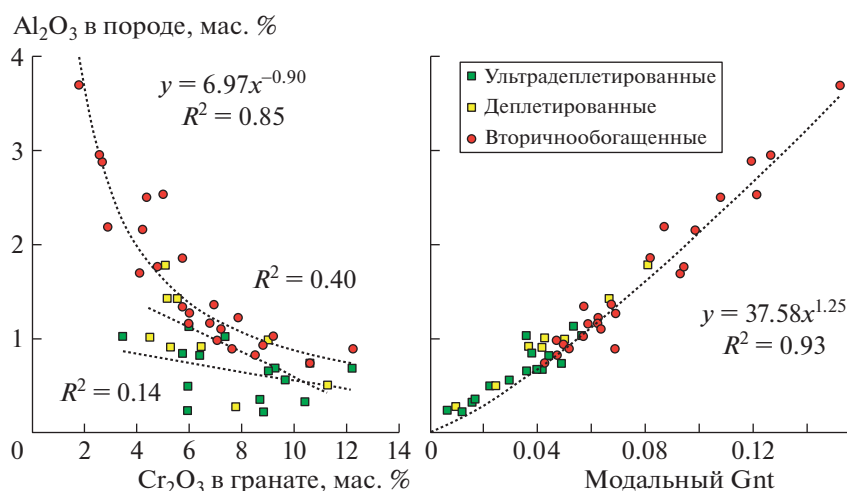


Рис. 7. Зависимость Al_2O_3 в породе от содержания Cr_2O_3 в гранате и от количества граната в породе для перидотитов различного происхождения (УДП по [6], ДП по [4, 19], ВП — наши данные и [4, 19]). Кривые описывают зависимости по ВП.

т.е. гранатовый верлит. Таким образом, к верлитизации может приводить воздействие не только существенно карбонатных расплавов [20], но и исключительно силикатных при большой степени воздействия. Этот процесс уже был описан [17] на основе контрастной зональности в гранатах в метасоматизированных перидотитах трубки Удачная.

Предложенная модель позволяет восстановить с известной точностью модальный состав сильно серпентинезированных и даже полностью измененных ксенолитов ВП, в которых из всех минералов сохранился только гранат. По таким ксенолитам, встречающимся в кимберлитах достаточно часто, можно во всяком случае определить объемную долю граната в породе и его состав, необходимые для построения основной зависимости. Далее по составу ксенокристов граната, почти всегда содержащихся в кимберлите, — и средний состав ВП литосферы данного района.

В работе [10] нами также предложен метод аналогичной оценки средней степени обогащения корней КЛМ на основе данных только по составу ксенокристов гранатов ВП. Метод основывается на допущениях о том, что и в других регионах, аналогично Далдынскому кимберлитовому полю, УДП, подвергшиеся вторичному обогащению, имеют узкий диапазон содержания хрома, а также на том, что минимальное содержание граната в ВП в различных объектах примерно постоянно и соответствует около 3%. Последнее соображение, подтвержденное несколькими примерами [10], позволяет оценить среднее общее содержание хрома в гранате ВП (положение гиперболы) по максимальному содержанию Cr_2O_3 в выборке ксенокристов. Данный метод мог бы быть востребован, поскольку неизменные ксенолиты ВП встречаются в кимберлитах крайне редко.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензентов за конструктивные и полезные замечания к работе.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Аналитические работы проводились в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН, а также в рамках проектов РФФИ № 18-05-01143 и 20-05-00662. Аналитические исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-17-00249.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соболев Н.В.* Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.
2. *Соболев Н.В.* Парагенетические типы гранатов. Москва: Наука, 1964. 218 с.
3. *Соболев В.С., Соболев Н.В.* Ксенолиты в кимберлитах северной Якутии и вопросы строения мантии Земли // ДАН СССР. 1964. Т. 158. № 1.
4. *Ionov D., Douce L.S., Ashchepkov I.V.* Composition of the Lithospheric Mantle in the Siberian Craton: New Constraints from Fresh Peridotites in the Udachnaya-East Kimberlite // J. Petrol. 2010. № 51 (11). P. 2177–2210.
5. *Agashev A.M., Ionov D.A., Pokhilenko N.P., Golovin A.V., Cherepanova Yu., 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. № 160–161. P. 201–215.
6. *Ionov D.A., Liu Z., Li J., Golovin A.V., Korsakov A.V., Xu Y.* The Age and Origin of Cratonic Lithospheric Mantle: Archean Dunites vs. Paleoproterozoic Harzburgites from the Udachnaya Kimberlite, Siberian Craton // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2020. № 281. P. 67–90.

7. Burgess S.R., Harte B. Tracing Lithosphere Evolution through the Analysis of Heterogeneous G9/G10 Garnets in Peridotite Xenoliths, I: Major Element Chemistry / Proc. Intern. VII Kimberlite Conf. Cape Town: Elsevier, 1998. № 1. P. 66–80.
8. Fiala J. Pyrope of Some Garnet Peridotites of the Czech Massif // Krystalinikum. 1965. № 3. P. 55–74.
9. Тычков Н.С., Похиленко Н.П., Кулигин С.С., Малыгина Е.В. Особенности состава и происхождения пиропов аномального состава из лерцолитов (свидетельства эволюции литосферной мантии Сибирской платформы) // Геология и геофизика. 2008. № 49 (4). С. 302–318.
10. Тычков Н.С., Агашев А.М., Похиленко Н.П., Бажан И.С. Оценка степени метасоматического обогащения корней литосферы по химическому составу гранатов из кимберлитов Сибирской платформы // ДАН. 2011. Т. 439. № 6. С. 807–810.
11. Webb S.A.C., Wood B.J. Spinel-pyroxene-garnet Relationship and their Dependence on Cr/Al Ratio // Contrib. Mineral. Petrol. 1986. № 92. P. 471–480.
12. Похиленко Н.П., Соболев Н.В., Бойд Ф.Р., Пирсон Д.Г., Шимизу Н. Мегакристаллические пироповые перидотиты в литосфере Сибирской платформы: минералогия, геохимические особенности и проблема происхождения // Геология и геофизика. 1993. № 34 (1). С. 71–84.
13. Тычков Н.С., Агашев А.М., Малыгина Е.В., Николенко Е.И., Похиленко Н.П. Термальные возмущения в литосферной мантии на примере Р-Т-условий равновесия ксенолитов из трубки Удачная // ДАН. 2014. Т. 454. № 3. С. 328–330.
14. Соболев Н.В., Лаврентьев Ю.Г., Поспелова Л.Н., Соболев Е.В. Хромовые пиропы из алмазов Якутии // Доклады АН СССР. 1969. Т. 189. № 1. С. 162–165.
15. Schulze D.J. A Classification Scheme for Mantle-derived Garnets in Kimberlite: A Tool for Investigating the Mantle and Exploring for Diamonds // Lithos. 2003. № 71. P. 195–213.
16. 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. V. 310. P. 1–35.
17. Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Kuligin S.S., Shimizu N. Peculiarities of Distribution of Pyroxenite Paragenesis Garnet in Yakutian Kimberlites and Some Aspects of the Siberian Craton Lithospheric Mantle / Proc. VII Intern. Kimberlite Conf. Cape Town: Elsevier, 1999. № 2. P. 689–698.
18. McDonough W.F. Constrains of the Composition of the Continental Lithospheric Mantle // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. № 101. P. 1–18.
19. Boyd F.R., Pokhilenko N.P., Pearson D.G., Mertzman S.A., Sobolev N.V., Finger L.W. Composition of the Siberian Cratonic Mantle: Evidence from Udachnaya Peridotite Xenoliths // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1997. V. 128. P. 228–246.
20. Thibault Y., Edgar A.D., Lloyd F.E. Experimental investigation of melts from a carbonated phlogopite lherzolite – implications for metasomatism in the continental lithospheric mantle // Amer. Miner. 1992. V. 77. P. 784–794.

LITHOSPHERIC REFERTILIZATION TRENDS IN XENOLITHS AND XENOCRYSTS FROM THE UDACHNAYA KIMBERLITE (SIBERIAN CRATON)

N. S. Tychkov^{a, #}, A. M. Agashev^a, and Academician of the RAS N. P. Pokhilenko^a

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

[#] E-mail: tych@igm.nsc.ru

Comprehensive studies of peridotitic xenoliths from the Udachnaya kimberlite (Yakutian diamond province, Siberian craton) confirm that garnet shows inverse correlation of its volumetric percentage with its Cr₂O₃ contents in refertilized peridotites, but no such correlation is observed in depleted peridotites. The correlation relationship plots as an isosceles hyperbola, which is consistent with the existing knowledge of origin of refertilized peridotite. The bulk content of aluminum is proportional to the garnet percentage both in depleted and refertilized peridotites, but Al₂O₃ in the rock correlates with Cr₂O₃ in garnet only in the refertilized varieties, while the two parameters are independent in depleted mantle rocks. According to the modeling of refertilization-related composition changes in the Udachnaya peridotites, garnet percentages are directly proportional to the amount of clinopyroxene ($Gnt = 0.879 \cdot Cpx + 0.022$, $R^2 = 0.78$) and inversely proportional to that of olivine ($Gnt = 0.026 / Ol^{3.141}$, $R^2 = 0.79$). As the shares of Gnt and Cpx increase from minimum values, orthopyroxene first increases (to 0.16) and then decreases since 0.65 Ol, 0.09 Cpx, and 0.10 Gnt. This model can constrain the place of the parent rock in the refertilization series knowing Cr₂O₃ contents in separate garnet grains. The average refertilization degree of lithospheric mantle in the region estimated from the compositions of more than 800 garnet xenocrysts in the Udachnaya kimberlite is expressed in the rock modal composition as: Ol = 0.72, Opx = 0.15, Gnt = 0.07, and Cpx = 0.06 (median values). The described enrichment mechanism and compositional estimates based on garnet xenocrysts show that the lithospheric mantle may undergo wehrlitization under a significant influence of a silicate melt.

Keywords: refertilization, wehrlitization, lithospheric mantle, garnet, peridotite, modal composition, Siberian craton, kimberlite