———— МИНЕРАЛОГИЯ ——

УДК 551.14:552.321.6 (571.56)

# МИНЕРАЛОГИЯ ПЕРИДОТИТОВЫХ КСЕНОЛИТОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ КОМСОМОЛЬСКАЯ-МАГНИТНАЯ (ВЕРХНЕМУНСКОЕ ПОЛЕ, СИБИРСКИЙ КРАТОН)

© 2022 г. И. В. Яковлев<sup>1,2,\*</sup>, В. Г. Мальковец<sup>1,2</sup>, А. А. Гибшер<sup>1,2</sup>, А. М. Дымшиц<sup>1,3</sup>, Д. В. Кузьмин<sup>1</sup>, В. А. Даниловская<sup>1</sup>, М. В. Милаушкин<sup>1,2</sup>, академик РАН Н. П. ПОХИЛЕНКО<sup>1</sup>, академик РАН Н. В. Соболев<sup>1</sup>

> Поступило 29.04.2022 г. После доработки 18.05.2022 г. Принято к публикации 19.05.2022 г.

Приводятся новые данные минералогического изучения ксенолитов перидотитов из кимберлитовой трубки Комсомольская-Магнитная, Верхнемунское поле, Сибирский кратон. Исследован минеральный состав 170 ксенолитов перидотитов: дунитов, гарцбургитов и лерцолитов. На основании проведенных исследований установлено, что литосферная мантия под Верхнемунским кимберлитовым полем сложена преимущественно гранат- и хромит-содержащими дунитами, гарцбургитами и, в подчиненном количестве, зернистыми гранатовыми лерцолитами. Высокая пропорция перидотитов с высокомагнезильными оливинами (Fo > 93 мол. %) свидетельствует о высокоистощенной природе перидотитов литосферной мантии. На основании геохимических исследований гранатов установлено, что алмазоносный литосферный "киль" подвергался низкой степени метасоматической переработки преимущественно с участием карбонатитовых флюидов/расплавов. С использованием данных по клинопироксеновой мономинеральной геотермобарометрии установлено, что мощность литосферы в районе Верхнемунского поля, на время кимберлитового магматизма (~360 млн лет) составляла около 220 км, а интервал "алмазного окна" составлял около 95 км (от 125 до 220 км).

*Ключевые слова:* Комсомольская-Магнитная, кимберлит, пироп, мантийный ксенолит, литосферная мантия, Сибирский кратон

DOI: 10.31857/S268673972260062X

## введение

Кимберлитовые магмы выносят на поверхность вещество разных уровней глубинности – от основания литосферы до самых верхних уровней земной коры. Особый интерес представляют ксенолиты глубинных пород, которые предоставляют информацию о составе, строении, эволюции литосферной мантии и термальном режиме на момент внедрения кимберлитов. В пределах Верхнемунского поля известно 16 кимберлитовых трубок и 4 дайки. Внедрение кимберлитов происходило в среднепалеозойскую эпоху ~360– 344 млн лет [1–5]. Кимберлитовые тела Комсо-

мольская-Магнитная, Новинка, Заполярная и Деймос имеют повышенную алмазоносность, достаточную для промышленной отработки. Кимберлиты трубок Верхнемунского поля и их глубинные ксенолиты гораздо слабее изучены по сравнению с кимберлитовыми телами близко расположенных Далдынского и Алакит-Мархинского полей. Кимберлитовая трубка Комсомольская-Магнитная выносит на поверхность большое количество слабоизмененных разнообразных ксенолитов глубинных перидотитов, пригодных для проведения петрологических исследований.

В данной работе мы представляем результаты минералогических исследований ксенолитов перидотитов из трубки Комсомольская-Магнитная и для сравнения гранатов, оливинов, клинопироксенов и хромитов из концентрата тяжелой фракции (КТФ) кимберлитов. Нами было проведено изучение химического состава минеральных ассоциаций 170 перидотитовых ксенолитов. Изученная коллекция ксенолитов включает 81 дунит (из них 5 хромит-пироповых, 26 пироповых и

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> АК "АЛРОСА", Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Институт земной коры Сибирского отделения

Российской академии наук, Иркутск, Россия

<sup>\*</sup>*E*-mail: igor.yakovlev@igm.nsc.ru

22 хромитовых), 75 гарцбургитов (из них 9 хромит-пироповых, 24 пироповых и 11 хромитовых) и 14 лерцолитов (из них 1 хромит-пироповый, 3 пироповых). В трех образцах (два гарцбургита и один лерцолит) присутствует флогопит. Как правило, размер ксенолитов варьирует от 1 до 8 см, однако встречаются образцы более 20 см.

Химический состав минералов определялся методом РСМА на электронно-зондовом микроанализаторе "JEOL" JXА-8100 в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований (Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск). Для проверки степени гомогенности и наличия вариаций в составах оливинов для каждого ксенолита анализировалось по пять зерен. Состав оливинов, гранатов, ортопироксенов, клинопироксенов и хромитов определялся по стандартной методике с ускоряющим напряжением 20 кВ и током зонда 50 нА. Микропримеси в оливине анализировали при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 900 нА по специальной методике, позволяющей достигнуть точности 20-30 г/т (две стандартные ошибки) для Ni, Ca, Mn, Al, Ti, Cr и 0.02 мол. % для форстеритовой составляющей (Fo = [100Mg/(Mg + Fe)]) в оливине [6].

Содержания редких элементов в гранатах определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с использованием прибора Agilent 7700cs с системой лазерной абляции "Photon Machines Excite Excimer" в GEMOC National Key Centre, Macquarie University (г. Сидней, Австралия).

Гранаты. Вариации химического состава пиропов изученных ксенолитов (n = 35) показаны на диаграмме CaO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 1) [7]. Пиропы относятся к гарцбургит-дунитовому (n = 18) (из них 13 относятся к области включений в алмазах) и лерцолитовому парагенезисам (n = 17). Содержание оксидов в пиропах гарцбургит-дунитового парагенезиса варьируют в следующих пределах (мас. %): Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2.88–13.27, CaO 0.69–3.87, TiO<sub>2</sub> 0.02–0.09, а в лерцолитовых: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.29–8.45, CaO 3.33–7.58, TiO<sub>2</sub> 0.02–1.06.

Для сравнения нами также было изучено 577 зерен перидотитовых гранатов ( $Cr_2O_3 > 1$  мас. %) из КТФ. Содержание оксидов в пиропах из КТФ (мас. %):  $Cr_2O_3$  1.01–12.25, CaO 0.43–8.14, TiO\_2 0.02–1.55. Основная масса проанализированных гранатов относится к лерцолитовому парагенезису (~80%), присутствуют гранаты гарцбургит-дунитового парагенезиса (~16%), при этом 7% (из всех грантов) попадают в область характерных для включений граната в алмазе. Гранатов с составами, близкими к верлитовым ~4%. В [7] обосновали, а затем в [8] установили положительную корреляцию между содержанием пиропов гарцбургит-дунитового парагенезиса и алмазоносностью кимберлитов. Умеренное содержание пиропов гарцбургит-дунитового парагенезиса хорошо согласуется со сравнительно невысоким содержанием алмазов в тр. Комсомольская-Магнитная (~0.47 кар/т).

Для сравнения химизма и характера распределения составов гранатов мы использовали гранаты из КТФ из тр. Удачная, расположенной в соседнем близко расположенном Далдынском кимберлитовом поле (рис. 1 б). Характер распределения составов гранатов на диаграмме CaO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> достаточно близок. Содержания гранатов гарцбургит-дунитового парагенезиса в тр. Удачная (24%) также выше, по сравнению с тр. Комсомольская-Магнитная (7%), что хорошо коррелирует с более высокой алмазоносностью тр. Удачная (~1.8 кар/т), по сравнению с тр. Комсомольская-Магнитная (~0.47 кар/т). Пределы вариаций по Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> гранатов гарцбургит-дунитового парагенезиса для тр. Удачная и тр. Комсомольская-Магнитная практически идентичны: 2.5-13.8 и 2.4-13.2 соответственно.

### ГЕОХИМИЯ ГРАНАТОВ

Для выявления характера наложенных метасоматических процессов было проведено исследование геохимических характеристик гранатов из перидотитов (n = 35) и КТФ (n = 420). На диаграмме хондрит-нормализованных спектров распределения REE исследованные гранаты отчетливо разделяются по содержанию MREE и HREE на две группы. К группе 1 (~70% пиропов) относятся гранаты со спектрами распределения редкоземельных элементов, типичными для гранатов из фертильной мантии. К группе 2 (~30% пиропов) относятся гранаты с S-образными спектрами, которые характерны для минеральных включений перидотитовых гранатов в алмазах [9] (рис. 2). Для гранатов первой группы характерны высокие содержания MREE и HREE и обеднение LREE с La/Yb < 1. На диаграмме CaO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> гранаты первой группы попадают в поле лерцолитового парагенезиса (рис. 1 а). Среди гранатов группы 2 по отношению La/Dy можно выделить 2 подгруппы: 2а - с La/Dy ~ 1 (~75% пиропов 2 группы) и 26 с La/Dy > 1 (~25% пиропов 2 группы). На диаграмме CaO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> гранаты второй группы также занимают обособленное положение (рис. 1 а). Гранаты группы 26 (La/Dy > 1) попадают в поле гарцбургит-дунитового парагенезиса с содержаниями Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от 8.5 до 13 мас. % (рис. 1a). Гранаты группы 2a (La/Dy ~ 1) на диаграмме CaO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> занимают промежуточное положение между гранатами дунит-гарцбургитового и лерцолитового парагенезисами (рис. 1 а). Содержания TiO<sub>2</sub> (мас. %) в гранатах лерцолитового парагенезиса выше, чем в гранатах гарцбургит-



**Рис. 1.** Особенности химического состава перидотитовых гранатов из трубок Комсомольская-Магнитная (из ксенолитов и КТФ) и Удачная (КТФ). Пояснения к группам 1, 2а и 26 см. в тексте.

дунитового парагенезиса: группа 1 – 0.12–1.06 ( $\bar{x} = 0.65$ , медиана = 0.78), группа 2а – 0.02–0.68 ( $\bar{x} = 0.1$ , медиана = 0.02) и группа 2б – 0.02–0.09 ( $\bar{x} = 0.04$ , медиана = 0.04). Предполагается, что образование S-образных спектров REE в гарцбургит-дунитовых гранатах связано с метасоматическим воздействием карбонатитовых расплавов/флюидов, обогащенных LREE и обедненных Ti, HFSE, MREE и HREE [9].

Оливины. Исследование химического состава оливинов из перидотитовых ксенолитов показало, что содержание Fo в оливинах варьирует от 82.20 до 94.04 (здесь и далее в мол. %), при этом содержание Fo в большинстве (64%) исследуемых зерен превышает 92 и 30% зерен имеют содержание Fo > 93. Среднее содержание Fo в оливинах составляет 91.83, а медианное значение 92.53. Для каждого перидотитового ксенолита было исследовано по 5 зерен оливина. Состав оливинов для каждого отдельного ксенолита в значимой степени не различался.

По содержанию Fo в оливине выделяются две группы перидотитовых ксенолитов: с Fo от 88.39 до 90.70, характерными для высокотемпературных катаклазированных (деформированных) перидотитов (44 образца, ~25%), которые широко распространены в тр. Удачная [10], и группа с высокомагнезиальными составами с содержанием Fo от 91.20 до 94.12 (127 образцов, ~75%), близкие по составу к оливинам из мегакристаллических гарцбургит-дунитов с субкальциевым хромистым гранатом и включениям оливинов в алмазах [11, 12].

Содержание элементов-примесей в высокомагнезиальных оливинах варьирует в следующих пределах (в мас. %): NiO 0.332–0.425 (среднее содержание  $\bar{x} = 0.368$ , медиана = 0,371), CaO 0.005– 0.033 ( $\bar{x} = 0.018$ , медиана = 0.019), MnO 0.08–0.111 ( $\bar{x} = 0.095$ , медиана = 0.094), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.01–0.06 ( $\bar{x} =$ = 0.03, медиана = 0.03), TiO<sub>2</sub> 0.005–0.04 ( $\bar{x} = 0.013$ , медиана = 0.005), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.003–0.025 ( $\bar{x} = 0.012$ , медиана = 0.008), Na<sub>2</sub>O 0.005–0.071 ( $\bar{x} = 0.02$ , медиана = 0.016).

Содержание элементов-примесей в более железистых оливинах варьирует в следующих пределах (в мас. %): NiO 0.146–0.405 (среднее содержа-



**Рис. 2.** Спектры распределения РЗЭ в перидотитовых гранатах из ксенолитов и концентрата тяжелой фракции трубки Комсомольская-Магнитная. Пояснения к группам 1, 2а и 26 см. в тексте.

ние  $\overline{x} = 0.328$ , медиана = 0,345), CaO 0.005-0.076 ( $\overline{x} = 0.043$ , медиана = 0.041), MnO 0.098-0.176 ( $\overline{x} = 0.116$ , медиана = 0.113), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.01-0.08 ( $\overline{x} = 0.02$ , медиана = 0.02), TiO<sub>2</sub> 0.005-0.04 ( $\overline{x} = 0.028$ , медиана = 0.027), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.006-0.061 ( $\overline{x} = 0.019$ , медиана = 0.015), Na<sub>2</sub>O 0.005-0.067 ( $\overline{x} = 0.023$ , медиана = 0.021).

Для сравнения нами были исследованы 264 зерна оливина из КТФ из трубки Комсомольская-Магнитная. Содержание элементов примесей в оливинах из КТФ практически идентично оливинам из перидотитовых ксенолитов (рис. 3). Среди оливинов из КТФ также выделяются две группы – с содержанием Fo от 86.2 и до 91 и высокомагнезиальная с содержанием Fo от 91 и до 94.2. Необходимо отметить, что при отборе ксенолитов для исследований зачастую имеет место "смещение выборки" за счет приоритетного отбора образцов для исследований – преимущественно за счет отбора образцов с гранатом и клинопироксеном для проведения геохимических и изотопных исследований. Идентичность химического состава оливинов из ксенолитов и из КТФ свидетельствует об отсутствии смещения выборки среди изученной в данной работе коллекции ксенолитов. На рис. 3 для сопоставления нанесены составы оливинов из включений в алмазах различных регионов мира, а также из перидотитовых ксенолитов тр. Удачная [10]. По сравнению с оливинами из перидотитов тр. Удачная, в перидотитах тр. Комсомольская-Магнитная отмечается группа составов с высокой магнезиальностью (Го 89.7-94.2) и высокими содержаниями Cr (250-547 г/т). Как видно из графиков, оливины из тр. Комсомольская-Магнитная имеют в составе больше хрома и алюминия, а также высокомагнезиальные оливины (Fo от 92 до 94) более обогащены титаном.

Содержание Cr в оливинах из включений в алмазах, как правило, в разы выше, чем в оливинах из ксенолитов [12], несмотря на данные о положительной корреляции содержания Cr в оливине с температурой равновесия [13]. Повышенное содержание Cr в оливинах из включений в алмазах, наиболее вероятно, связано с резко восстановительной средой во время образования алмаза и вхождением в структуру оливина в виде двухвалентного катиона Cr<sup>2+</sup> [15]. Однако это можно также частично объяснить и наличием в оливине субмикроскопических включений хромита [15]. Для высокомагнезиальных оливинов тр. Комсомольская-Магнитная отмечаются повышенные содержания Cr для большей части зерен, что не характерно для оливинов трубки Удачная. Среднее содержание Ті в оливинах из ксенолитов перидотитов и КТФ из тр. Комсомольская-Магнитная значительно выше, чем в оливинах, характерных для включений в алмазах из тр. Удачная.

Хромшпинелиды. В рамках данной работы нами был изучен химический состав хромшпинелилов из 20 ксенолитов и 212 зерен из КТФ. Хромиты из тр. Комсомольская-Магнитная характеризуются повышенными содержаниями TiO<sub>2</sub>; в 45% изученных хромитов содержания ТіО<sub>2</sub> превышают 0.8 мас. %. В соответствии с классификационной диаграммой [14] 15% изученных хромшпинелидов попадают в поле включений в алмазах. Состав хромшпинелидов, из перидотитовых ксенолитов варьирует в следующих пределах (n = 20; мас. %): Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 55.0–65.0.; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5.52–11.9; MgO 11.3–12.9; FeO 15.4–19.8, TiO<sub>2</sub> 0.2–3.18. Хромшпинелиды из КТФ характеризуются более широкими вариациями входящих в их состав элементов (n = 212; мас. %): Сг<sub>2</sub>О<sub>3</sub> 22.3–65.8; Аl<sub>2</sub>О<sub>3</sub> 1.46–48.5; MgO 7.28–19.8; FeO 10.3–37.6, TiO<sub>2</sub> 0.2–4.4.

Клинопироксены. Химический состав клинопироксена был изучен для 16 перидотитовых ксенолитов тр. Комсомольская-Магнитная (95 зерен, по 6–7 зерен для каждого ксенолита; составы клинопироксенов внутри одного ксенолита не отличаются в пределах ошибки измерения), а также 382 зерна клинопироксена из КТФ.

Содержание основных и примесных элементов в клинопироксенах из перидотитовых ксенолитов (в мас. %): MgO 15.5–20.5, CaO 15.7–22.03, MnO 0.07–0.12, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.36–3.59, TiO<sub>2</sub> 0.05–0.53, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.83–3.38, Na<sub>2</sub>O 1.04–3.2. Содержание основных и примесных элементов в пироксенах из КТФ (в мас. %): MgO 12.4–21.2, CaO 13.9–23.5, MnO 0.04–0.13, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.36–4.19, TiO<sub>2</sub> 0.01–0.65, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.47–5.56, Na<sub>2</sub>O 0.47–3.95.

Следуя классификационным диаграммам [16] 95% исследованных зерен клинопироксена относятся к гранатовым и гранат-шпинелевым перидотитам. Из этих 95% около 2% имеют аномально высокие содержания  $Na_2O$  (3–3.88 мас. %). Оставшиеся 5% клинопироксенов по классификации [16] относятся к мегакристовой ассоциации. Интересно отметить полное отсутствие шпинелевых безгранатовых перидотитов и клинопироксенов, относящихся к эклогитовому парагенезису.

С применением клинопироксенового минерального геотермобарометра [17, 18] была рассчитана палеогеотерма на среднепалеозойское время [19]. Значение теплового потока составило 34.5 мВ/м<sup>2</sup>, а мощность литосферной мантии ~220 км, что хорошо согласуется как с исследованиями по тр. Новинка, также относящейся к Верхнемунскому кимберлитовому полю (34.1 мВ/м<sup>2</sup> и ~225 км) [18, 19], так и с исследованиями по тр. Удачная [19].



**Рис. 3.** Соотношение элементов-примесей и форстеритового минала (Fo) в оливинах из ксенолитов (1) и концентрата тяжелой фракции (2) трубки Комсомольская-Магнитная. Полями ограничены составы оливинов из трубки Удачная: (3) включения в алмазах [11, 13, 15] и (4) ксенолиты перидотитов [11, 15].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенных минералогических исследований представительной коллекции перидотитов из тр. Комсомольская-Магнитная свидетельствуют о наличии блока высокодеплетированных пород в литосферной мантии под Верхнемунским кимберлитовым полем. Свыше 30%

исследованных оливинов имеют содержание Fo > 93 и повышенные содержания Cr (250-547 г/т).

На основании ранее реконструированного термического градиента под тр. Комсомольская-Магнитная установлено, что мощность литосферной мантии на момент образования трубки составляла ~225–230 км, а мощность "алмазного окна" около 110–120 км [19]. Большая мощность

ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ том 506 № 1 2022

"алмазного окна" указывает на высокую потенциальную алмазоносность тр. Комсомольская-Магнитная, однако алмазоносность кимберлитов тр. Комсомольская-Магнитная значительно уступает близко расположенной тр. Удачная.

Низкое относительное содержание гранатов алмазоносного гарцбургит-дунитового парагенезиса (7%) с S-образными спектрами распределения REE, наряду с низкой алмазоносностью кимберлитов трубки Комсомольская-Магнитная, с нашей точки зрения, свидетельствует об умеренной степени метасоматической переработки карбонатитовыми расплавами литосферного алмазоносного "киля". Низкое содержание ТіО<sub>2</sub> и ярко выраженные S-образные спектры распределения хондрит-нормализованных REE в гранатах гарцбургит-дунитового парагенезиса свидетельствуют о низкой степени наложенного метасоматического преобразования гарцбургит-дунитов силикатными расплавами, который приводит к растворению алмазов. На основании вышеизложенного мы предполагаем, что низкая алмазоносность связана с малой интенсивностью метасоматоза, который приводил к формированию алмазов и, как следствие, к маломощным алмазоносным жилам в литосферной мантии [20]. Тем не менее высокое процентное содержание хромитов с повышенным содержанием ТіО<sub>2</sub> однозначно свидетельствует о метасоматическом воздействии силикатных расплавов на перидотиты литосферной мантии. Вероятно, метасоматическая модификация перидотитов карбонатитовыми расплавами/флюидами и силикатными расплавами происходила на разных уровнях глубинности.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Минералогические и геохимические исследования проведены при поддержке гранта РФФИ № 20-35-90097. Высокоточные минералогические исследования оливинов и полевые работы проводились при поддержке гранта РФФИ № 18-17-00249. Исследования клинопироксенов проводились при поддержке гранта РНФ 18-77-10062.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Дэвис Г.Л., Соболев Н.В., Харькив А.Д. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутии, полученные U–Pb методом по цирконам // Доклады АН СССР. 1980. Т. 254. № 1. С. 175–179.
- 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.
- Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В., Поляничко В.В., Мальковец В.Г., Соболев Н.В. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазо-

носной провинции // ДАН. 2004. Т. 399. № 1. С. 1142—1145.

- 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.
- Sun J., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Liu C.Z., Skuzovatov S.Y., Wu F.Y. Mantle Sources of Kimberlites through Time: A U–Pb and Lu-Hf Isotope Study of Zircon Megacrysts from the Siberian Diamond Fields // Chemical Geology. 2018. V. 479. P. 228–240.
- Sobolev A.V., Hofmann A.W., Kuzmin D.V., et al. The Amount of Recycled Crust in Sources of Mantle-derived Melts // Science. 2007. V. 316. P. 412–417.
- 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.
- 8. Sobolev N.V., Lavrent'ev Y.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V., Chrome-rich Garnets from the Kimberlites of Yakutia and their Paragenesis // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1973. V. 40. P. 39–52.
- 9. Pearson D.G., Shirey S.B., Carlson R.W., Boyd F.R., Pokhilenko N.P., Shimizu N. Re-Os, Sm- Nd, and Rb-Sr Isotope Evidence for Thick Archaean Lithospheric Mantle beneath the Siberian Craton Modified by Multistage Metasomatism // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. V. 59. № 5. P. 959–977.
- Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Malygina E.V., Kuzmin D.V., Sobolev A.V. Petrogenetic Significance of Minor Elements in Olivines from Diamonds and Peridotite Xenoliths from Kimberlites of Yakutia // Lithos. 2009. V. 112. P. 701– 713.
- Похиленко Л.Н., Мальковец В.Г., Кузьмин Д.В., Похиленко Н.П. Новые данные по минералогии мегакристаллических пироповых перидотитов из кимберлитовой трубки Удачная, Сибирский кратон, Якутская алмазоносная провинция // ДАН. 2014. Т. 454. № 5. С. 583–589.
- Мальковец В.Г., Зедгенизов Д.А., Соболев Н.В., Кузьмин Д.В., Гибшер А.А., Щукина Е.В., Головин Н.Н., Веричев Е.М., Похиленко Н.П. Содержание элементов-примесей в оливинах из алмазов и ксенолитов перидотитов кимберлитовой трубки им. В. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция) // ДАН. 2011. Т. 436. № 4. С. 515–519.
- 13. *De Hoog J.C., Gall L., Cornell D.H.* Trace-element Geochemistry of Mantle Olivine and Application to Mantle Petrogenesis and Geothermobarometry // Chemical Geology. 2010. V. 270. № 1–4. P. 196–215.
- Sobolev N.V. Deep Seated Inclusions in Kimberlites and the Problem of the Composition of the Upper Mantle / American Geophysical Union, 1977. Washington DC. 279 pp.
- Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Malygina E.V., Kuzmin D.V., Sobolev A.V. Petrogenetic Significance of Minor Elements in Olivines from Diamonds and Peridotite Xenoliths from Kimberlites of Yakutia // Lithos. 2009. V. 112S. P. 701– 713.

- 16. Ramsay R.R., Tompkins L. The Geology, Heavy Mineral Concentrate Mineralogy, and Diamond Propectivity of the Boa Esperanca and Cana Verde pipes, Corrego D'anta, Minas Gerais, Brasil / In Proceedings of the Geology, Heavy Mineral Concentrate Mineralogy, and Diamond Propectivity of the Boa Esperanca and Cana Verde Pipes, Corrego D'anta, Minas Gerais, Brasil. 1 January 1994. P. 329–345.
- Nimis P., Taylor W. Single Clinopyroxene Thermobarometry for Garnet Peridotites. Part I. Calibration and Testing of a Cr-in-Cpx Barometer and an Enstatite-in-Cpx Thermometer // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2000. V. 139. P. 541–554.
- 18. Ziberna L., Nimis P., Kuzmin D., Malkovets V.G. Error Sources in Single-clinopyroxene Thermobarometry

and a Mantle Geotherm for the Novinka Kimberlite, Yakutia // American Mineralogist. 2016. V. 101. P. 2222–2232.

- Dymshits A.M., Sharygin I.S., Malkovets V. G., Yakovlev I.V., Gibsher A.A., Alifirova T.A., Vorobei S.S., Potapov S.V., Garanin V.K. Thermal State, Thickness, and Composition of the Lithospheric Mantle beneath the Upper Muna Kimberlite Field (Siberian Craton) Constrained by Clinopyroxene Xenocrysts and Comparison with Daldyn and Mirny Fields // Minerals. 2020. V. 10. P. 549.
- 20. *Malkovets V.G., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Wood B.J.* Diamond, Subcalcic Garnet, and Mantle Metasomatism: Kimberlite Sampling Patterns Define the Link // Geology. 2007. V. 35. № 4. P. 339–342.

# MINERALOGY OF PERIDOTITE XENOLITHS FROM THE KOMSOMOL'SKAYA-MAGNITNAYA KIMBERLITE PIPE (UPPER MUNA FIELD, SIBERIAN CRATON)

I. V. Yakovlev<sup>*a,b,#*</sup>, V. G. Malkovets<sup>*a,b*</sup>, A. A. Gibsher<sup>*a,b*</sup>, A. M. Dymshits<sup>*a,c*</sup>, D. V. Kuzmin<sup>*a*</sup>, V. A. Danilovskaya<sup>*a*</sup>, M. V. Milaushkin<sup>*a,b*</sup>, Academician of the RAS N. P. Pokhilenko<sup>*a*</sup>, and Academician of the RAS N. V. Sobolev<sup>*a*</sup>

<sup>a</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>b</sup> PJSC "ALROSA", Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation

<sup>c</sup> Institute of the Earth's crust, Irkutsk, Russian Federation

*<sup>#</sup>E-mail: igor.yakovlev@igm.nsc.ru* 

The paper presents new data on the mineralogical study of peridotite xenoliths from the Komsomolskaya-Magnitnaya kimberlite pipe, Upper Muna field, Siberian craton. The mineral composition of 170 xenoliths of peridotites: dunites, harzburgites and lherzolites was investigated. Based on the studies carried out, it has been established that the lithospheric mantle under the Verkhnemunskiy kimberlite field is composed mainly of garnet and chromite-bearing dunites, harzburgites and, in subordinate amounts, granular garnet lherzolites. The high proportion of peridotites with high-Mg olivines (Fo > 93 mol. %) indicates the highly depleted nature of the lithospheric mantle peridotites. Based on geochemical studies of garnets, it has been established that the diamondiferous lithospheric "keel" underwent a low degree of metasomatic modification, mainly with the participation of carbonatite fluids/melts. Using data on clinopyroxene monomineral geothermobarometry, it was found that the thickness of the lithosphere in the area of the Upper Muna field at the time of kimberlite eruption (~360 Ma) was about 220 km, and the interval of the "diamond window" was about 95 km (from 125 to 220 km).

*Keywords:* Komsomol'skaya-Magnitnaya, kimberlite, pyrope, mantle xenolith, lithospheric mantle, Siberian craton