

# МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КСЕНОЛИТОВ МАНТИЙНЫХ ЭКЛОГИТОВ И ГРАНАТОВЫХ ПИРОКСЕНИТОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ ТРУБКИ им. В. ГРИБА, АРХАНГЕЛЬСКАЯ ПРОВИНЦИЯ<sup>1</sup>

© 2022 г. Н. М. Лебедева<sup>а</sup>, \*, А. А. Носова<sup>а</sup>, Л. В. Сазонова<sup>а, б</sup>, Ю. О. Ларионова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

<sup>б</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия

\*e-mail: namil@mail.ru

Поступила в редакцию 21.07.2021 г.

После доработки 09.02.2022 г.

Принята к публикации 10.03.2022 г.

Проведено изучение ксенолитов эклогитов и гранатовых пироксенитов из кимберлитов трубки им. В. Гриба в Архангельской провинции. Выявлено, что эклогиты в литосферной мантии под Архангельской провинцией сильно, вплоть до полной потери признаков протолита, модифицированы в ходе метасоматических процессов. Выделены основные этапы преобразования эклогитов: 1) ранний мантийный метасоматоз и 2) переработка кимберлитовым расплавом. В ходе нескольких этапов раннего метасоматоза под действием карбонат-ультрамафических расплавов вместо первичных *Gr1* и *Cpx1* образуются метасоматические клинопироксен и гранат, амфибол, кальцит и флогопит. Воздействие кимберлитового расплава приводило к растворению и перекристаллизации твердофазных включений с образованием расплавных карманов, выполненных серпентином, хлоритом, карбонатом, шпинелью, перовскитом, амфиболом, перекристаллизованными гранатом и клинопироксеном. Транспорт ксенолитов в кимберлитовом расплаве сопровождался их дроблением и интенсивным преобразованием граната и клинопироксена с увеличением содержаний Ti и Cr, вплоть до состава высоко-Сг мегакристов. Гранатовые пироксениты представлены высоко-Са, низко-Мg и низко-Са, высоко-Мg типами. Показано, что высоко-Са и низко-Мg гранатовые пироксениты могут быть коначными продуктами преобразования эклогитовых ксенолитов под воздействием карбонатно-ультраосновных расплавов, тогда как низко-Са и высоко-Мg пироксениты – продукт взаимодействия частичных выплавок из эклогитов с деплетированными перидотитами.

**Ключевые слова:** Архангельская алмазоносная провинция, кимберлит, мантийные ксенолиты, эклогиты, мантийный метасоматоз, мегакристы

**DOI:** 10.31857/S0869590322050041

## ВВЕДЕНИЕ

Мантийные эклогиты в процессе эволюции, от возникновения протолита до выноса к поверхности в виде ксенолитов в кимберлитовом расплаве, могли испытывать несколько этапов метасоматоза, приводящих к трансформации их минерального состава, текстурно-структурных особенностей и геохимии. В качестве основных этапов метасоматоза мантийных эклогитов приняты следующие: 1) метасоматоз надсубдукционными флюидами во время погружения в составе слэба при его десерпентинизации или автометасоматозе (например, Aulbach et al., 2020a, 2020b); 2) метасоматоз ультрамафическими карбонатно-силикатными, кар-

бонатными расплавами во время нахождения в литосферной мантии, до захвата транспортирующим расплавом (например, Smart et al., 2009; Czas et al., 2018); 3) метасоматоз под воздействием транспортирующего расплава (Mikhailenko et al., 2020). Проявления 2 и 3 этапов метасоматоза практически всегда фиксируются в ксенолитах мантийных эклогитов (например, Misra et al., 2004; Spetsius, Taylor, 2002; Smart et al., 2009; Czas et al., 2018).

Природа метасоматического агента, приводящего к преобразованию эклогитов во время их нахождения в литосферной мантии, остается дискуссионной, чаще всего в качестве такого агента рассматривается карбонатно-силикатный расплав, наиболее вероятно кимберлитового состава (Aulbach et al., 2020a; Gréau et al., 2011; De Stefano et al., 2009 и др.). Частым следствием метасомато-

<sup>1</sup> Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi: 10.31857/S0869590322050041 для авторизованных пользователей.

за становится частичное плавление эклогитов (например, Spetsius, Taylor, 2002), причем отделяющийся расплав может выступать в качестве метасоматизирующего агента для вмещающих перидотитов и обеспечивать реакционный обмен между эклогитами и перидотитами, производя высоко-Mg эклогиты или пироксениты (Smart et al., 2009; Smit et al., 2014).

Столь сложные преобразования мантийных эклогитов, очевидно, порождают много дискуссионных вопросов, из которых отметим следующие: 1) в какой мере сохраняются геохимические и изотопные характеристики протолита, испытавшего неоднократно мантийный метасоматоз (например, De Stefano et al., 2009; Shchukina et al., 2019); 2) какой состав имел расплав, воздействующий на эклогиты, и каково происхождение этого расплава (например, Aulbach et al., 2020a, 2020b; De Stefano et al., 2009; Mikhailenko et al., 2020); 3) каково происхождение высоко-Mg эклогитов и гранатовых пироксенитов — являются ли они результатом метасоматоза эклогитов карбонатно-силикатными ультраосновными расплавами (например, Aulbach et al., 2020a, 2020b) или представляют собой продукты взаимодействия частичных выплавок из эклогитов с деплелированными перидотитами (Smart et al., 2009; Smit et al., 2014; Herzberg, 2019), и могут ли представлять собой океаническую литосферную мантию (Smart et al., 2017); 4) где и как в составе литосферной мантии располагаются эклогиты, в которые трансформируется океаническая кора погруженных слэбов?

Ответы на эти вопросы остаются тоже дискуссионными: с одной стороны, гипотеза о происхождении литосферных плит за счет наращивания их субдукционными слэбами является одной из ведущих (Griffin et al., 2003; Horodyskyj et al., 2007), с другой — она сталкивается с рядом проблем, в первую очередь с проблемой сохранности эклогитов с отрицательной плавучестью в литосферной мантии и отсутствием алмазов с эклогитовыми включениями древнее 3.0 млрд лет (например, Luo, Korenaga, 2021; Griffin, O'Reilly, 2007 и ссылки в этих работах). Для некоторых кратонов показано, что распределение эклогитов в литосферной мантии неравномерное — они концентрируются в 30–50 км интервалах, которые рассматриваются как реликтовые слэбы, и вблизи основания литосферной мантии, где могут образовываться за счет метасоматоза мантийных пород астеносферными выплавками (Pobric et al., 2020). Например, гранат из эклогитов позднемеловых кимберлитов 1 группы кратона Каапвааль находится в равновесии с метасоматическим амфиболом на глубине в 90–150 км (Smart et al., 2021).

Для датирования мантийных эклогитов чаще всего используют U-Pb, Pb-Pb, Lu-Hf и Re-Os изотопные системы (Pearson et al., 1995a, 1995b;

Aulbach et al., 2009; Smart et al., 2017). Изучение Sm-Nd и Rb-Sr изотопных систем мантийных эклогитов показало очень большой разброс получаемых изохронных и модельных возрастов и сложность их интерпретации (например, Jacob, 2004; Shu et al., 2018; Shchukina et al., 2019).

На примере изучения мантийных ксенолитов эклогитов и гранатовых пироксенитов из кимберлитовой трубы им. В. Гриба мы рассмотрим процесс взаимодействия кимберлитового расплава с литосферной мантией по мере подъема к поверхности.

Наше исследование петрографии, геохимии и изотопной геохимии 19 разнообразных образцов ксенолитов эклогитов позволило выделить несколько этапов метасоматоза, определить их последовательность, условия проявления и агенты метасоматоза. Мы также показали, что высоко-Ca и низко-Mg гранатовые пироксениты могут быть конечными продуктами преобразования эклогитовых ксенолитов под воздействием карбонатно-ультраосновных расплавов, тогда как низко-Ca и высоко-Mg пироксениты — продукт взаимодействия частичных выплавок из эклогитов с деплелированными перидотитами.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ И КСЕНОЛИТЫ ЭКЛОГИТОВ В КИМБЕРЛИТАХ

Трубка им. В. Гриба расположена в центральной части Архангельской алмазоносной провинции (AAP) (рис. 1), в которой представлены кимберлиты и родственные им породы. Геологическое строение, петрография и геохимические характеристики магматизма AAP и трубы им. В. Гриба ранее были подробно описаны (Саблуков и др., 2000; Конопанова et al., 2007; Носова et al., 2017; Занонова et al., 2015).

### Ксенолиты эклогитов в трубке им. В. Гриба

Предшествующие исследования мантийных эклогитов AAP были направлены на определение условий и времени их формирования, а также на установление возможного протолита. В работе (Саблуков и др., 2000) были выделены магнезиальные и магнезиально-железистые группы эклогитов и эклогитоподобных ксенолитов, изучен химический состав слагающих их минералов. В работе (Shchukina et al., 2019) по клинопироксену из эклогитов в Rb-Sr изохронных координатах построена линия, соответствующая возрасту  $2.84 \pm 1.1$  млрд лет (СКВО = 50). Температура формирования низко-Mg эклогитов (группа В) определена как 770–1025°C в работе (Malkovets et al., 2003) и 1020–1200°C в работе (Shchukina et al., 2019). Температура формирования высоко-Mg эклогитов



**Рис. 1.** Позиция Архангельской алмагнеонской провинции (AAP) и трубки им. В. Гриба в Восточной Фенноскандии. Карта-схема части докембрийской коры Фенноскандии, включающая северо-восточную архейскую часть и юго-западную протерозойскую часть (Bogdanova et al., 2016), показывает проявления кимберлитового, щелочно-ультрамафического и базальтового девонского магматизма. Возраст кимберлитового магматизма AAP по (Ларионова и др., 2016); возраст Кольской щелочной провинции (КШП) по (Арзамасцев, Ву, 2014).

(группа А) составляет 715–870°C (Malkovets et al., 2003) и 940–1190°C (Shchukina et al., 2019). Для гранатов группы В большинство значений  $\delta^{18}\text{O}$  лежит ниже установленных  $\delta^{18}\text{O}$  для перидотитовых гранатов из той же трубки, что связывается с коровым океаническим протолитом этих эклогитов. Изотопный состав кислорода в гранатах группы А попадает в область мантийных значений (Malkovets et al., 2003). В цитируемых работах были подробно изучены состав минералов, происхождение и время образования эклогитов. Образование новых минералов при взаимодействии с кимберлитовым и/или иным расплавом подробно рассмотрены не были.

В настоящей работе мы не будем затрагивать вопросы образования протолита и самих эклогитов, но подробно рассмотрим процессы их изменения, поэтому метаморфические гранат и клинопироксен мы будем рассматривать как условно “первичные” минералы в нашей цепочке преобразований минералов.

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Текстурно-структурное изучение взаимоотношения минералов проводилось на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6480LV на Геологическом факультете МГУ им. Ломоносова и Jeol JSM-5610LV в Институте геологии рудных месторождений (ИГЕМ РАН, г. Москва). Электронно-зондовые исследования проводились в плоскополированных шлифах, предварительно покрытых углеродной пленкой толщиной 25 нм.

Для аналитических измерений применялся энергодисперсионный спектрометр X-MaxN (“Oxford Instruments”, GB) со сверхтонким окном и площадью активной зоны кристалла 50  $\text{мм}^2$ , установленный на базе сканирующего электронного микроскопа JSM-6480LV (“Jeol”, Japan). Карта распределения элементов сделана с помощью программы Aztec в ИГЕМ РАН.

Измерения малых элементов в клинопироксенах и гранатах проводили на масс-спектрометре с ионизацией в индуктивно-связанной плазме X-Series II в сочетании с системой лазерного пробоотбора NWR-213 в лаборатории минерального анализа вещества ИГЕМ РАН.

Содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) и малых элементов в минералах определены методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) на ионном микрозонде Cameca lMS-4f в Ярославском филиале Физико-технологического института РАН (г. Ярославль).

Валовый химический состав ксенолитов определен в отношении малых элементов — методом ионизации в индуктивно-связанной плазме с масс-спектрометрическим окончанием анализа в Институте проблем технологий микроэлектроники и особочистых материалов РАН (г. Черноголовка) по методике, изложенной в (Карандашев и др., 2016).

Rb-Sr и Sm-Nd изотопный состав пород и минералов и изотопный состав кислорода в минералах изучались в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии в ИГЕМ РАН.

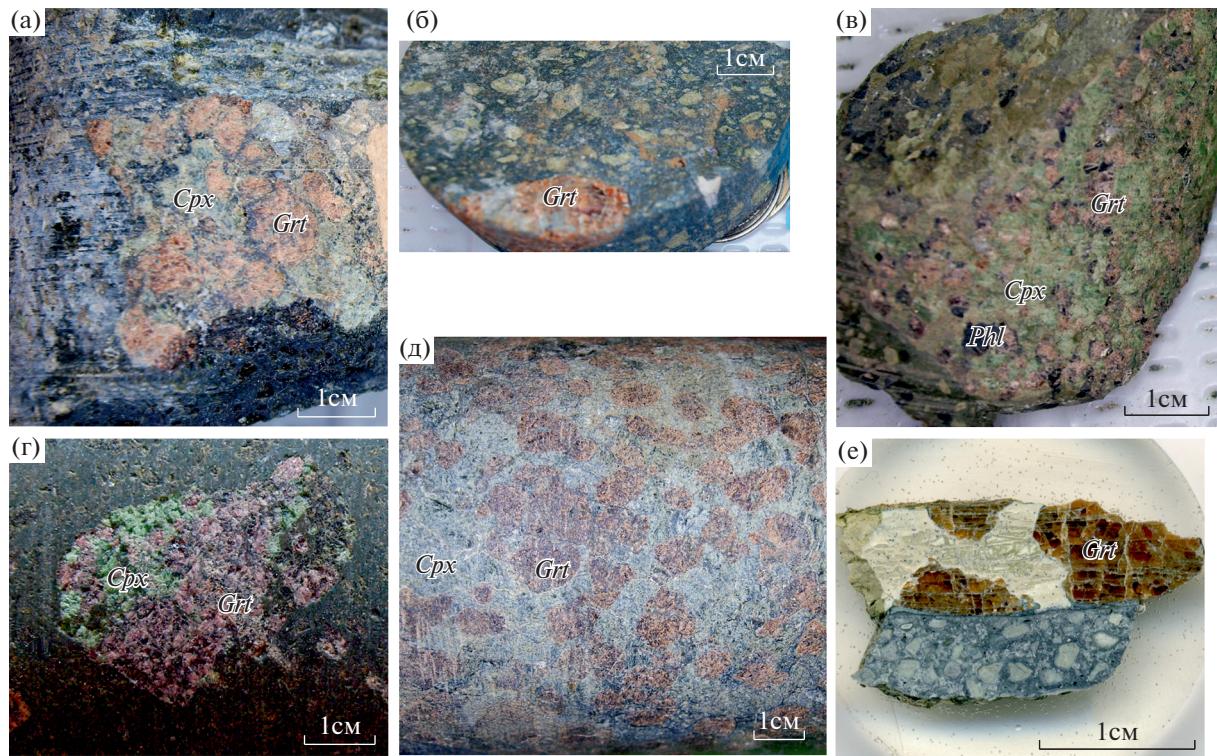


Рис. 2. Фотографии изученных образцов: (а) ксенолит эклогита неправильной формы  $3 \times 5$  см в кимберлите, обр. 764-2; (б) ксенолит граната из эклогита, обр. 412-2; (в) ксенолит эклогита с крупными зернами флогопита по границам граната и в виде отдельных кристаллов, обр. 628-2; (г) обломок эклогита  $2 \times 3$  см с круглыми очертаниями, обр. 798-1; (д) крупный  $10 \times 8$  см ксенолит гранатового клинопироксенита, обр. 903-1; (е) гранатовый клинопироксенит, обр. 334-1.

Подробное описание использованных методов приведено в Supplementary<sup>2</sup> 1, ESM\_1.pdf.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ксенолиты эклогитов и гранатовых пироксенитов были отобраны авторами из керна скважины № 1, пройденной по трубке им. В. Гриба с глубин от 208 до 903 м. Детальная характеристика образцов приведена в табл. № 1 и представлена на рис. 2, 3, 4.

### Эклогиты

Всего было изучено 12 образцов эклогитов (табл. 1). Ксенолиты размером от 4 до 12 см по длиной оси часто имеют неровные обломочные края (рис. 2). Породы обладают массивной тексту-

рой, гранобластовой, крупно-, иногда мелкозернистой, структурами. Соотношение граната и клинопироксена от 1 : 1 до 2 : 1. Также в первичной ассоциации присутствует небольшое количество рутила и иногда встречаются Fe-Ni-сульфиды (<1 об. %). Ксенолиты часто пронизаны многочисленными трещинами, заполненными различными минералами (рис. 3в, 3ж, 3з).

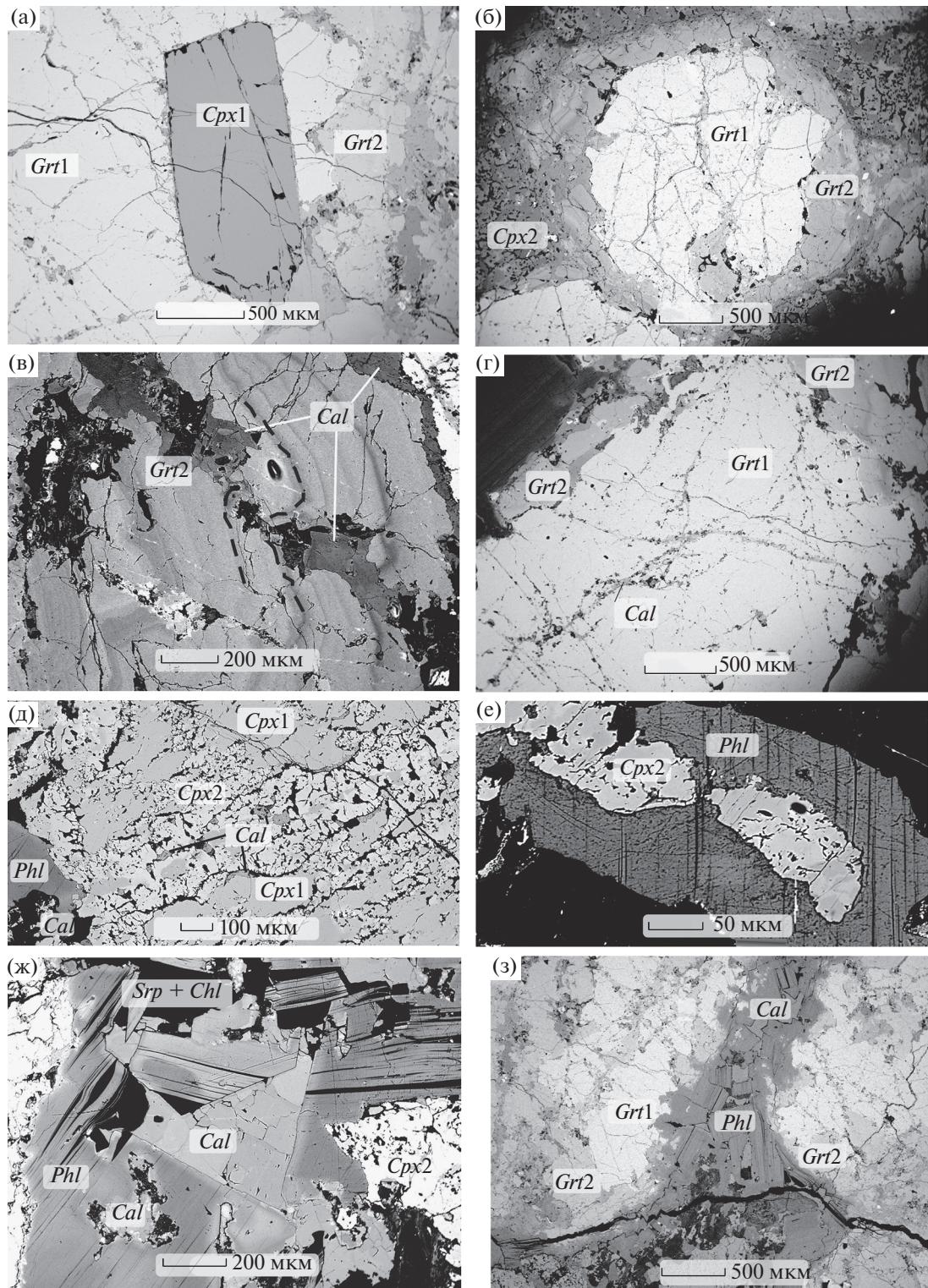
Во всех изученных ксенолитах присутствует метаморфическая первичная ассоциация минералов и ассоциации минералов, образованных в ходе последующих преобразований породы.

### Первичная минеральная ассоциация

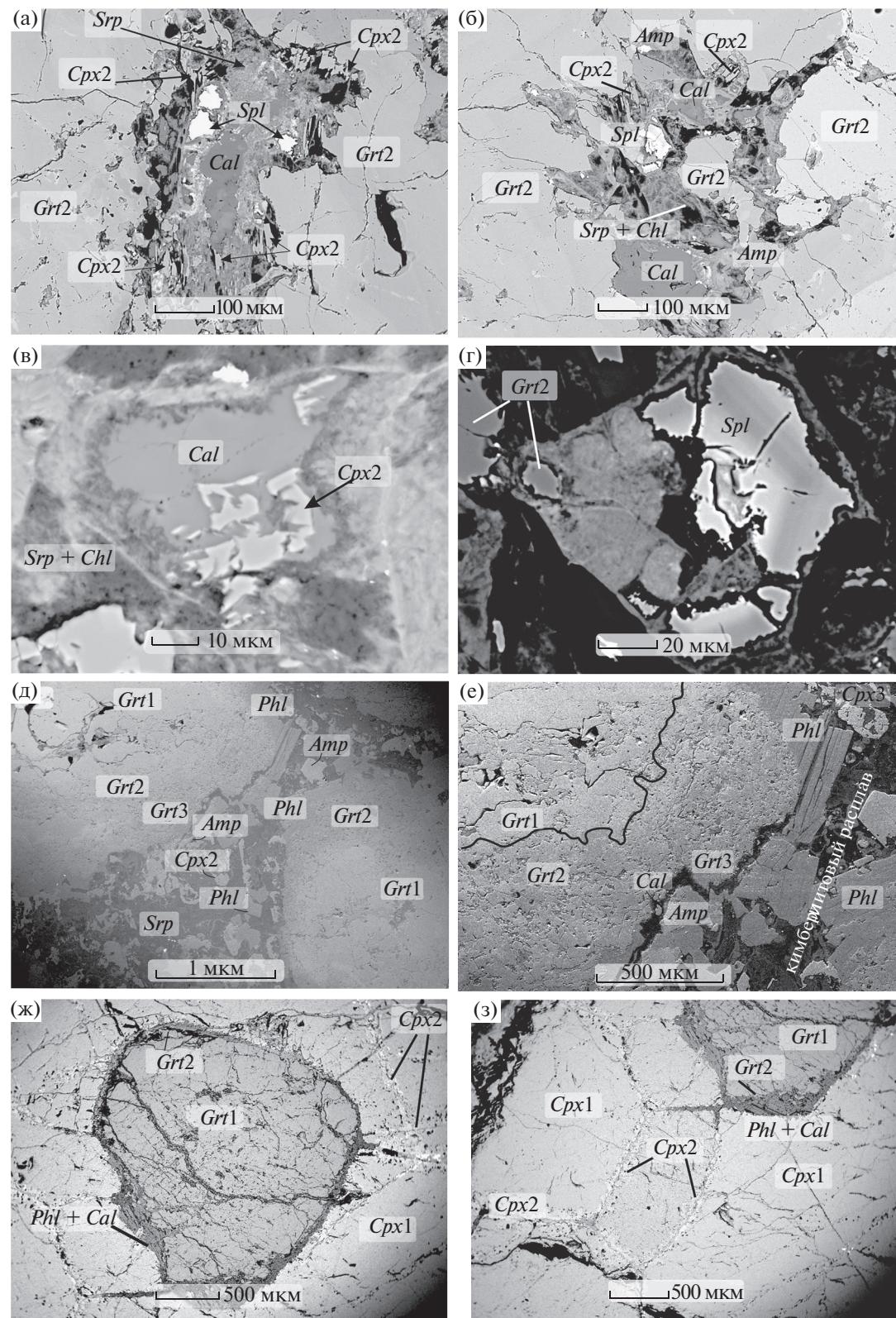
**Гранат.** Размер зерен может изменяться от 3 до 10 мм. Изученные первичные гранаты принадлежат к пироп-альмандиновой серии. Согласно классификации эклогитовых гранатов на группы по (Coleman et al., 1965), больше всего образцов попадает в группу В:  $Prp_{0.29-0.61}Alm_{0.23-0.39}Grs_{0.09-0.35}$ , несколько образцов в группу А:  $Prp_{0.56-0.58}Alm_{0.18-0.19}Grs_{0.23-0.24}$  и в группу С:  $Prp_{0.28-0.30}Alm_{0.47-0.48}Grs_{0.17-0.20}$  (табл. 1; см. Supplementary, ESM\_2.xlsx, ESM\_4.pdf).

Наиболее широкий диапазон характеристик первичного граната группы В:  $Mg\# (MgO/(MgO +$

<sup>2</sup> В Дополнительных материалах к русской и английской онлайн-версиям статьи на сайтах <https://elibrary.ru/> и <http://link.springer.com/> соответственно приведены: ESM\_1.pdf (Supplementary 1) – Описание аналитических методов; ESM\_2.xlsx (Supplementary 2) – Макрокомпонентный состав минералов; ESM\_3.xlsx (Supplementary 3) – Геохимические таблицы: микроэлементный состав минералов и пород в целом; ESM\_4.pdf (Supplementary 4) – Дополнительные рисунки.



**Рис. 3.** Особенности преобразования эклогитов на стадиях раннего мантийного метасоматоза и кимберлитового метасоматоза в промежуточных камерах: (а) клинопироксен ( $Cpx1$ ), включенный в крупное зерно граната, в котором отсутствуют метасоматические преобразования, обр. 764-2; (б) частичное замещение первичного зерна граната ( $Grt1$ ) более поздним метасоматическим гранатом ( $Grt2$ ) и губчатый клинопироксен ( $Cpx2$ ) по краям, обр. 759-4; (в) тонкая волнистая концентрическая зональность в  $Grt2$ . Трешины, заполненные  $Cal$ , секут зональность в  $Grt2$  со смещением, обр. 798-1; (г) замещение исходного  $Grt1$  метасоматическим  $Grt2$  вокруг тончайших трещинок, заполненных  $Cal$ , обр. 764-2; (д) фрагмент зерна клинопироксена, окруженного  $Carb2$ - $Phl$  массой. Исходный  $Cpx1$  замещается микрозернистым губчатым  $Cpx2$ . В порах находится  $Cal$ , обр. 764-2; (е) ассимиляция  $Cpx2$  флогопитом, обр. 764-2; (ж)  $Phl$ - $Cal$ -агрегат с серпентином и хлоритом между двух зерен клинопироксена ( $Cpx2$ ), обр. 764-2; (з)  $Cal$ - $Phl$  прожилок, секущий все  $Grt1$  и  $Grt2$ , обр. 764-2. Символы минералов здесь и на всех последующих рисунках по (Warr, 2021).



$+ \text{FeO}) = 0.44\text{--}0.69$ ,  $\text{Ca\#} (\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{FeO})) = 0.14\text{--}0.35$ ,  $\text{TiO}_2 = 0.14\text{--}0.66$  мас. % и обособленные области группы А:  $\text{Mg\#} = 0.75\text{--}0.76$ ,  $\text{Ca\#} = 0.23\text{--}0.25$ ,  $\text{TiO}_2 = 0.18\text{--}0.26$  мас. % и группы С:  $\text{Mg\#} = 0.36\text{--}0.38$ ,  $\text{Ca\#} = 0.20\text{--}0.22$ ,  $\text{TiO}_2 < 0.23$  мас. % (рис. 5а).

Для первичного граната характерно низкое содержание легких редкоземельных элементов (РЗЭ) и небольшая степень фракционирования тяжелых РЗЭ:  $(\text{Dy}/\text{Yb})_N < 1$  (рис. 6а).

**Клинопироксен.** Первичный клинопироксен представлен небольшими идиоморфными призматическими зернами *Cpx1*, которые включены в крупные кристаллы граната (рис. 3а) или наблюдаются в качестве реликтов в губчатом клинопироксene.

Первичный клинопироксен имеет достаточно широкие вариации состава в различных образцах (мас. %):  $\text{Na}_2\text{O} = 2.1\text{--}5.7$ ,  $\text{MgO} = 10.1\text{--}13.6$  ( $Jd_{6\text{--}28}Di_{44\text{--}71}Hd_{1\text{--}19}$ ). Первичный клинопироксен является омфацитом (Morimoto, 1988) и по классификации (Taylor, Neal, 1989) большая часть образцов попадает в группы В и С (рис. 7а).

Спектры распределения РЗЭ в первичном клинопироксene имеют куполообразный вид, в них наблюдается небольшой пик в районе  $\text{Ce} - \text{Nd}$  (рис. 6б), а затем отрицательный наклон в области тяжелых РЗЭ.

### Метасоматические минеральные ассоциации

Метасоматизирующий расплав проникал внутрь эклогитового ксенолита, заполняя крупные трещины и прожилки нескольких генераций (рис. 3ж, 3з). Вокруг трещин состав гранатов и клинопироксенов отличается от первичной ассоциации и возникают новые минеральные ассоциации: флогопит, амфибол, карбонат, серпентин, шпинель. Петрографические наблюдения позволяют выделить несколько последовательных генераций прожилков: 1) тонкие, слабо извилистые прожилки, выполненные мелкими зернами кальцита (*Cal*), на границе с которыми образуется *Grt2* (рис. 3б, 3г); 2) тонкие трещинки, часто заполненные кальцитом и флогопитом, секут метасоматический *Grt2* (рис. 3в); 3) сеть прожилков с крупнозернистым гранобластовым агрегатом флогопита и кальцита,

иногда в них отмечаются участки, сложенные серпентином, редко зальбандовые части таких прожилков сложены амфиболом (*Amp*) и шпинелью (*Sph*), эти прожилки секут и накладываются на все ранее описанные (рис. 3ж, 3з); 4) кальцитовые (*Cal*) прожилки, секущие все предыдущие прожилки и новообразованные фазы; 5) тонкие прожилки, сложенные баритом и целестином, секут все ранее описанные. В метасоматических гранатах возникают расплавные карманы (рис. 4а, 4б), которые представляют собой мелкие гнезда, включения, межзерновые интерстиции, выполненные высоком- $\text{Mg}$  водными силикатами (серпентином, хлоритом), которые могут содержать кальцит, шпинель, пировскит, амфибол, мелкие иголочки клинопироксена и реликты граната (рис. 4в, 4г).

**Метасоматические гранаты.** Метасоматический гранат (*Grt2*) развивается от краев зерен вдоль трещинок в первичном гранате, иногда полностью замещая его (рис. 3в). В метасоматическом гранате присутствует большое количество микроподключений серпентина, хлорита и более крупные области — расплавные карманы, заполненные серпентином, флогопитом, шпинелью, баритом, иголочками клинопироксена.

Составы *Grt2* более магнезиальные и с содержанием  $\text{CaO} = 3.96\text{--}11.45$  мас. %, меньшим, чем в составах первичных гранатов с большими содержаниями  $\text{TiO}_2 = 0.26\text{--}0.74$  мас. % и  $\text{MgO} = 8.57\text{--}19.88$  мас. % (Supplementary 2, ESM\_2.xlsx). На диаграмме  $\text{Mg\#} - \text{Ca\#}$  (рис. 5а) метасоматические гранаты *Grt2* частично пересекаются с *Grt1* и образуют тренд в область низко- $\text{Ca\#}$  и высоко- $\text{Mg\#}$  составов.

Метасоматический гранат *Grt2* демонстрирует большее значение отношения  $(\text{Sm}/\text{Pr})_N$ , чем в зонах первичных гранатов и более крутой наклон спектра в области тяжелых РЗЭ (Supplementary 3, ESM\_3.xlsx). Для краевых частей зерен характерно обогащение  $\text{La}$  и  $\text{Ce}$ , за счет которого их спектры приобретают вогнутый вид (рис. 6а, 6в).

Вдоль крупных жил (рис. 4д), заполненных серпентином и хлоритом, состав метасоматического граната изменяется и образуется новый гранат (*Grt3*). Также в *Grt3* уменьшается количество каверн и минивключенияй серпентина-хлорита и амфибала (рис. 4е). Около жилы состав граната имеет меньшее значение  $\text{Ca\#} = 0.08\text{--}0.13$  и более

**Рис. 4.** Проявления взаимодействия кимберлитовых расплавов с ксенолитами эклогитов и гранатовых пироксенитов. Эклогиты (а–е): (а–г) расплавные карманы в *Grt2*; (а–б): мелкие зерна реститового граната и клинопироксена, кальцит, шпинель, амфибол находятся в агрегате высоком- $\text{Mg}$  скрытокристаллических водных силикатов, обр. 764-2; (в) скелетный клинопироксен с кальцитом в серпентин-хлоритовой массе включения, обр. 764-2; (г) скелетный клинопироксен в ассоциации с кальцитом и скрытокристаллической *Srp-Chl* массой, обр. 764-2; (г) зональная *Sph*, растущая по реститовому гранату, обр. 764-2; (д) трещина в эклогите, заполненная кимберлитом. В серпентиновом матриксе находятся обломки клинопироксена, флогопита, амфибала, обр. 759-4в; (е) фрагмент фото (д) — зона метасоматического изменения граната, обр. 759-4в. Гранатовые пироксениты (ж, з): прожилки кальцит-флогопитового состава секут исходные *Grt1* и *Cpx1*. Этот же агрегат минералов развивается в межзерновом пространстве. Вдоль кальцит-флогопитовых прожилков и по межзерновым контактам происходит крайне незначительное изменение первичных граната (*Grt2*) и в большей степени клинопироксена (*Cpx2*), обр. 6.

Таблица 1. Краткое описание изученных образцов эклогитов и гранатовых пироксенитов

№ п/п	Номер образца	Группа по составу граната (Coleman et al., 1965)	Некоторые петрографические особенности
Эклогиты			
1	13Гр1-569-2	A	Отдельное зерно граната с поздними флогопит-кальцит-баритовыми включениями
2	11	B	Структура крупнозернистая, широко проявлена концентрическая зональность граната. Большое количество флогопита вдоль границ зерен первичных минералов
3	759-4а	B	Структура крупнозернистая. Клинопироксен сильно изменен
4	759-4в	B	Структура крупнозернистая. Присутствуют многочисленные кальцит-флогопитовые прожилки
5	628-2	B	Структура крупнозернистая. На границе крупных зерен граната развивается флогопит. Есть включения ильменита
6	764-2	B	Структура крупнозернистая. Клинопироксен сильно изменен. Флогопит образует мелкие чешуйки на границе клинопироксена и граната. В гранате присутствуют включения карбоната с флогопитовой каймой, а также расплавные карманы, заполненные серпентином, флогопитом, шпинелью и игольчатым клинопироксеном и гранатом
7	760-7	B	В зернах граната присутствует большое количество включений неправильной формы, размером около 300 мкм, в трещинах, заполненных кальцитом, амфиболом и флогопитом. В части включений присутствует новообразованный клинопироксен. Также в гранате наблюдаются серпентин-кальцит-флогопитовые прожилки
8	724-4	B	Порода сильно изменена, первичные минералы сохранились только в виде реликтов. Флогопит образует крупные зерна на границе клинопироксена и граната. Трещины, заполненные баритом, пересекают первичные и измененные пироксены, а также флогопит
9	739-6	B	Порода сильно изменена. Первичные гранат и клинопироксен сохранились в виде реликтов между серпентиновыми прожилками
10	377-1	B	Гранат образует крупные, изометричные зерна. Изменения граната проявлено по краю зерна и по трещинам. Также встречаются поздние кальцитовые прожилки. Первичный клинопироксен остался только в реликтах, большая часть зерен замещена серпентином и кальцитом
11	798-1	B	Первичный клинопироксен сохранился только в виде небольших реликтовых зон, зона губчатого клинопироксена занимает до 100%. В зернах граната наблюдаются зоны плавления с флогопитом
12	569-6	C	Гранат и клинопироксен рассечены большим количеством трещин, заполненных серпентином
Гранатовые пироксениты			
13	6	Низко-Са	Клинопироксен пронизан трещинами, заполненными кальцитом и флогопитом, на контакте с которыми его состав меняется. Кристаллы граната часто окружены тонкой серпентин-кальцит-флогопитовой каймой
14	734-9	Низко-Са	Клинопироксен разбит сетью трещин, заполненных серпентином. Гранат рассечен сетью трещин, заполненных серпентином, шпинелью, флогопитом и кальцитом, а по краям зерен граната развивается флогопит

Таблица 1. Окончание

№ п/п	Номер образца	Группа по составу граната (Coleman et al., 1965)	Некоторые петрографические особенности
15	903-1	Низко-Са	Через зерна клинопироксена проходят многочисленные трещины шириной до первых десятых долей мм. Трещины заполнены кальцитом, флогопитом, серпентином, встречаются мелкие реликты пироксена
16	221-2	Низко-Са	Ксенолит сильно изменен. Реликты граната и пироксена находятся в серпентиновой основной массе
17	503-3	Высоко-Са	Крупные кристаллы клинопироксена разбиты на отдельные части серпентиновыми прожилками шириной до 200 мкм. По краям граната развивается флогопит с включениями шпинели, также в зернах граната встречаются карманы, заполненные серпентином, флогопитом и измененным гранатом
18	698-5	Высоко-Са	Зерна клинопироксена на 70% замещены серпентином. В гранате встречаются карманы, заполненные серпентином, флогопитом и измененным гранатом. Также встречаются отдельные крупные зерна флогопита
19	208-2	Высоко-Са	По краям трещиноватых кристаллов граната образуется флогопит, по трещинам шириной до 500 мкм развиваются флогопит и серпентин. Клинопироксен практически полностью замещен серпентином
20	334-1	Высоко-Са	Обломок граната с крупным кимберлитовым прожилком. Состав граната на контакте с прожилком изменен

высокое  $Mg\# = 0.76\text{--}0.81$ , чем первичные и метасоматические гранаты  $Grt2$ , содержание  $TiO_2$  в них составляет 0.33–0.80 мас. % и  $Cr_2O_3$  0.37–3.17 мас. %, что сближает их по составу с мегакри-

стами из трубки им. В. Гриба (Supplementary 2, ESM\_2.xlsx). По микроэлементному составу  $Grt3$  близок к метасоматическому  $Grt2$  (Supplementary 3, ESM\_3.xlsx; рис. 6а).

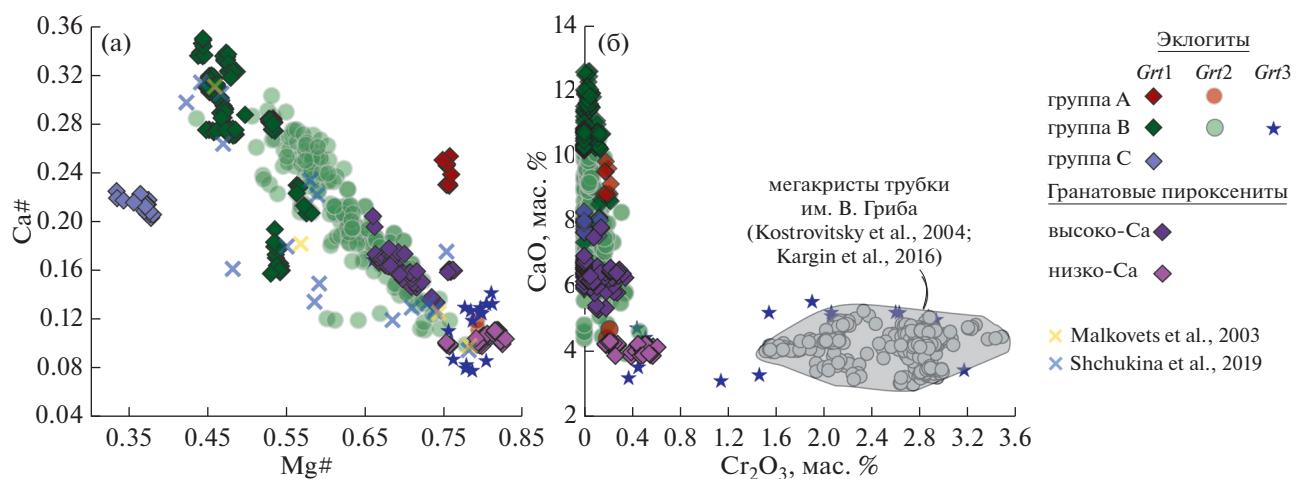
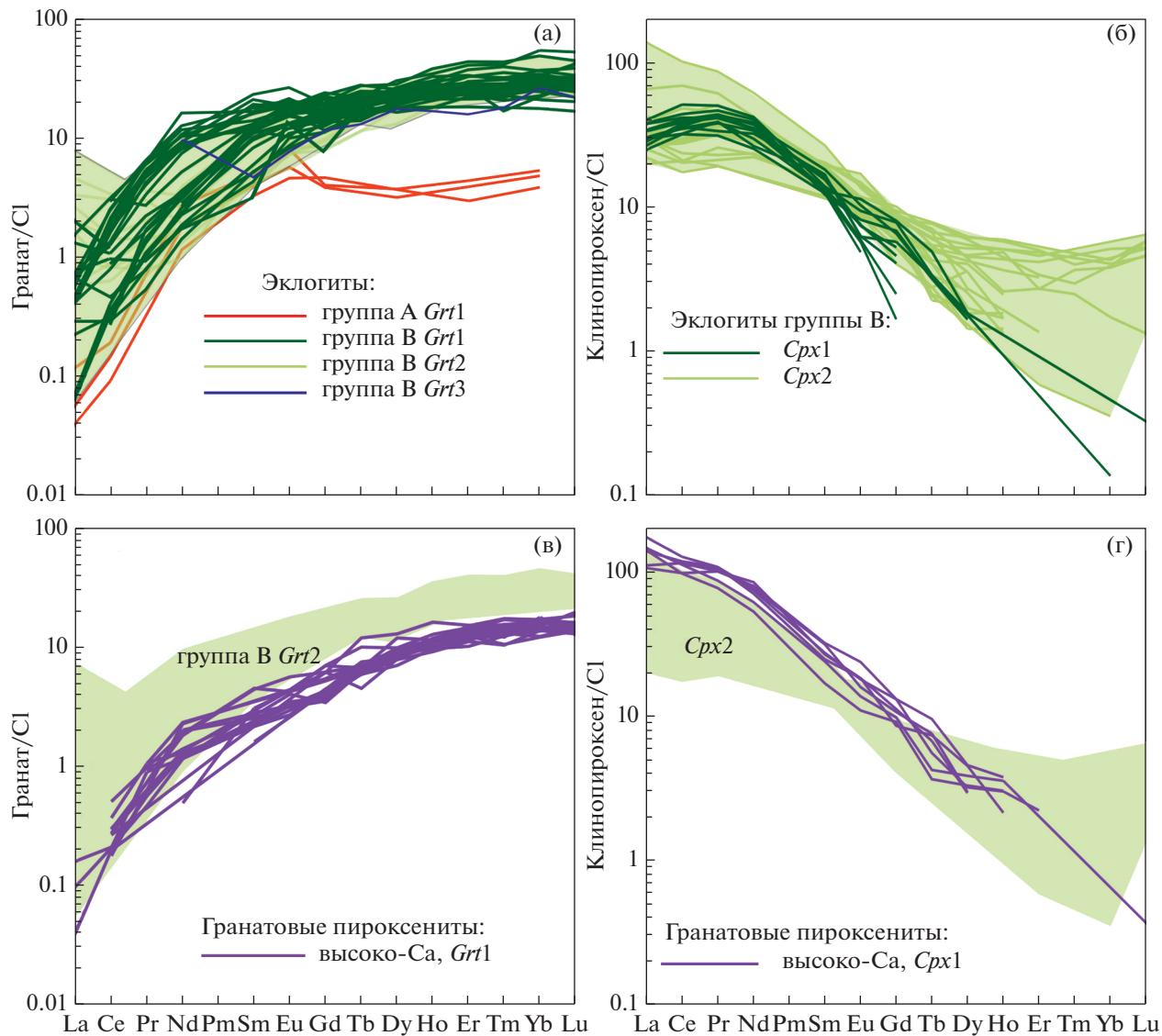


Рис. 5. (а) Диаграмма  $Mg\# = (Mg/(Mg + Fe_{total}))$ — $Ca\# = Ca/(Ca + Fe_{total} + Mn + Mg)$ , которая позволяет выделить три группы (высоко-Са, низко-Мg и высоко-Мg) среди изученных разновидностей граната из эклогитов и гранатовых пироксенитов.

(б) Диаграмма  $Cr_2O_3$ — $CaO$ , на которой видно, что зерна граната ( $Grt3$ ) из эклогитов и низко-Са пироксенитов ( $Grt1$ ,  $Grt2$ ) близки по составу к мегакристалам из трубки им. В. Гриба (Kargin et al., 2016). Литературные данные по гранатам эклогитов трубки им. В. Гриба из работ (Malkovets et al., 2003; Shchukina et al., 2019).



**Рис. 6.** Характер распределения РЗЭ в гранатах и клинопироксенах различных петрографических позиций. (а) гранаты эклогитов: *Grt1* группы А, *Grt1*, *Grt2*, *Grt3* группы В высокого-Са эклогитов; (б) клинопироксены эклогитов: *Cpx1*, *Cpx2* группы В эклогитов; (в) гранаты гранатовых пироксенитов: *Grt1* в сравнении с метасоматическими *Grt2* из эклогитов группы В; (г) клинопироксены гранатовых пироксенитов: *Cpx1* в сравнении с полем метасоматических *Cpx2* группы В. Нормировано по (Sun, McDonough, 1989).

**Метасоматические клинопироксены.** Метасоматический клинопироксен *Cpx2* развивается в виде прожилков и по краям зерен первичного клинопироксена. Он образует микро- и мелко-зернистый агрегат с высокой пористостью губчатого (sponge) облика. В порах находится кальцит. Подобные преобразования исходного клинопироксена описаны во многих работах, посвященных изучению мантийных ксенолитов эклогитов и перидотитов (Kutolin, Frolova, 1970; Carswell, 1975; Reid et al., 1975; Taylor, Neal, 1989; Beard et al., 2000; Misra et al., 2004). Также метасоматический клинопироксен встречается в виде тонких иголочек в расплавных карманах. По сравнению с первич-

ным клинопироксено мегасоматический клинопироксен имеет меньшее содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  0.2–4.4 мас. % и большее  $\text{CaO}$  14.8–24.1 мас. %.

Метасоматический клинопироксен демонстрирует большее обогащение легкими РЗЭ, чем первичный клинопироксен и более сильное фракционирование тяжелых РЗЭ (рис. 6б).

**Слюды.** Большая часть зерен слюды из эклогитов принадлежит флогопит–аннитовому ряду:  $\text{Mg} \#$  64–92,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  12.1–20.7 мас. %,  $\text{BaO}$  0.1–0.3 мас. %. Вариации состава отвечают вариациям состава граната-хозяина и его петрографическому положению. Флогопит, встречающийся в расплавных карма-

нах в гранате, характеризуется меньшей магнезиальностью и большими содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{BaO}$ , чем флогопит других петрографических позиций (Supplementary 2, ESM\_2.xlsx). Флогопит, обрастающий высоко-Сг гранат (*Grt3*) вдоль крупных трещин, имеет состав, близкий к таковому флогопита из расплавных карманов. В отдельных зернах слюды вдоль трещин происходит изменение состава и увеличивается содержание  $\text{BaO}$  (до 1.2 мас. %), по сравнению с центральными частями зерен.

**Амфиболы.** Амфиболы встречаются только в некоторых эклогитах группы В. Амфиболы относятся к OH-, F-, Cl-группе, Ca-подгруппе, согласно классификации (Hawthorne et al., 2012), и большинство является паргаситами. Зерна однородные по составу (Supplementary 2, ESM\_2.xlsx). В зависимости от состава граната-хозяина, состав амфибала изменяется: наименее Mg# (45–53) амфиболы встречаются в расплавных карманах гранатов группы С. В эклогитах группы В амфиболы в прожилках с флогопитом и кальцитом имеют Mg# 55–81. Содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  не меняется – 1.55–3.89 мас. % (Supplementary 4, ESM\_4.pdf).

В амфиболах, которые находятся в крупных жилах в ксенолитах, заполненных серпентином и хлоритом, содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  достигает 0.7 мас. % (Supplementary 2, ESM\_2.xlsx).

**Кальцит.** Включения кальцита в первичном гранате наиболее обогащены  $\text{SrO}$  (0.09–0.29 мас. %), но имеют меньшую концентрацию  $\text{Zr}$  (59–86 мкг/г) и сумма РЗЭ<sub>(La–Lu)</sub> составляет 12–16, в сравнении с более поздним кальцитом из прожилок с флогопитом, *Grt2*:  $\text{SrO} = 0.05–0.06$  мас. %,  $\text{Zr} = 160–170$  мкг/г и сумма РЗЭ<sub>(La–Lu)</sub> = 29–35 (Supplementary 4, ESM\_4.pdf).

### Гранатовые пироксениты

Изучено семь образцов гранатовых пироксенитов (табл. 1). Гранатовые пироксениты имеют крупнозернистые гранобластовые структуры, массивные, иногда слабо ориентированные текстуры (рис. 2д). Первичная генерация представлена клинопироксеном, гранатом в соотношении от 1 : 1 до 1 : 3 и Fe-Ni-сульфидами (<1%). Зерна клинопироксена обычно окружной или удлиненной неправильной формы, иногда хорошо ограниченные. Они часто замещены серпентином по трещинам. Гранат образует бесцветные изометричные или немного вытянутые идиобласти размером от 1 мм до 1.5 см, преобладают зерна размером 3–4 мм. Все зерна разбиты сеткой трещин.

### Первичная минеральная ассоциация

**Гранат.** В гранатовых пироксенитах первичный гранат *Grt1* имеет изометричные, округленные, полигональные очертания, иногда зерна граната

уплощенные и имеют одинаковую ориентировку длинных осей (рис. 2д). Гранаты из пироксенитов попадают в соответствующую высоко-Mg# область, где подразделяются на высоко-Са с менее высокой Mg# и низко-Са с более высокой Mg# (рис. 5а). Последние характеризуются повышенными содержаниями  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , достигающими 0.6 мас. % и частично перекрываются по составу с *Grt3*.

По содержанию редкоземельных элементов гранаты из пироксенитов имеют схожие спектры распределения с гранатами из ксенолитов эклогитов (рис. 6в). По количеству легких редкоземельных элементов они сопоставимы с метасоматическим *Grt2* из эклогитов группы В и гранатом группы А, а по содержанию тяжелых РЗЭ они деплетированы по сравнению с *Grt2* группы В.

**Клинопироксен.** Первичные зерна клинопироксена *Cpx1* имеют полигонально-изометричные очертания, размером от первых мм до 10 мм. Клинопироксены подразделяются на две группы по содержанию  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$  (Supplementary 2, ESM\_2.xlsx). С более высоким содержанием  $\text{MgO}$  15.2–18.1 мас. % ( $\text{Na}_2\text{O}$  0.6–2.3 мас. %,  $\text{CaO}$  20.4–22.2 мас. %,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  0.2–0.3 мас. %) и с более низким содержанием  $\text{MgO}$  14.9–16.8 мас. % ( $\text{Na}_2\text{O}$  1.1–2.4 мас. %,  $\text{CaO}$  20.4–24.6 мас. %,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  0.1–0.5 мас. %). В координатах  $\text{Na}_2\text{O}$ – $\text{MgO}$  (мас. %) и  $\text{Na}_2\text{O}$ – $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (мас. %) клинопироксены перекрываются с *Cpx3* из эклогитовых ксенолитов (рис. 7а, 7б).

В клинопироксенах из пироксенитов тяжелые РЗЭ сильно фракционированы  $(\text{Dy}/\text{Yb})_N < 0.5$ . В большинстве клинопироксенов из гранатовых пироксенитов содержание легких РЗЭ выше, чем в метасоматических клинопироксенах группы В, и куполовидный вид профиля не наблюдается (рис. 6г).

### Метасоматические минеральные ассоциации

Первичные гранат и клинопироксен секутся сетью крупных прожилков кальцит-флогопитового состава. Этот же агрегат минералов развивается в межзерновом пространстве первичных минералов. Вдоль карбонат-флогопитовых прожилков и по межзерновым контактам происходит крайне незначительное изменение первичных граната с образованием *Grt2* и в большей степени клинопироксена с образованием *Cpx2* (рис. 4ж, 4з). Изменений с нарастанием новообразованного концентрически-зонального граната в расплавных карманах не наблюдается. Появление губчатого агрегата клинопироксена встречается крайне редко.

Флогопиты из гранатовых пироксенитов также достаточно однородные по составу: Mg# 87–95,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  12.3–15.1 мас. %,  $\text{BaO}$  0.1–0.3 мас. %. В краевой части зерен флогопита в гранатовых пироксенитах существенно увеличиваются содержания

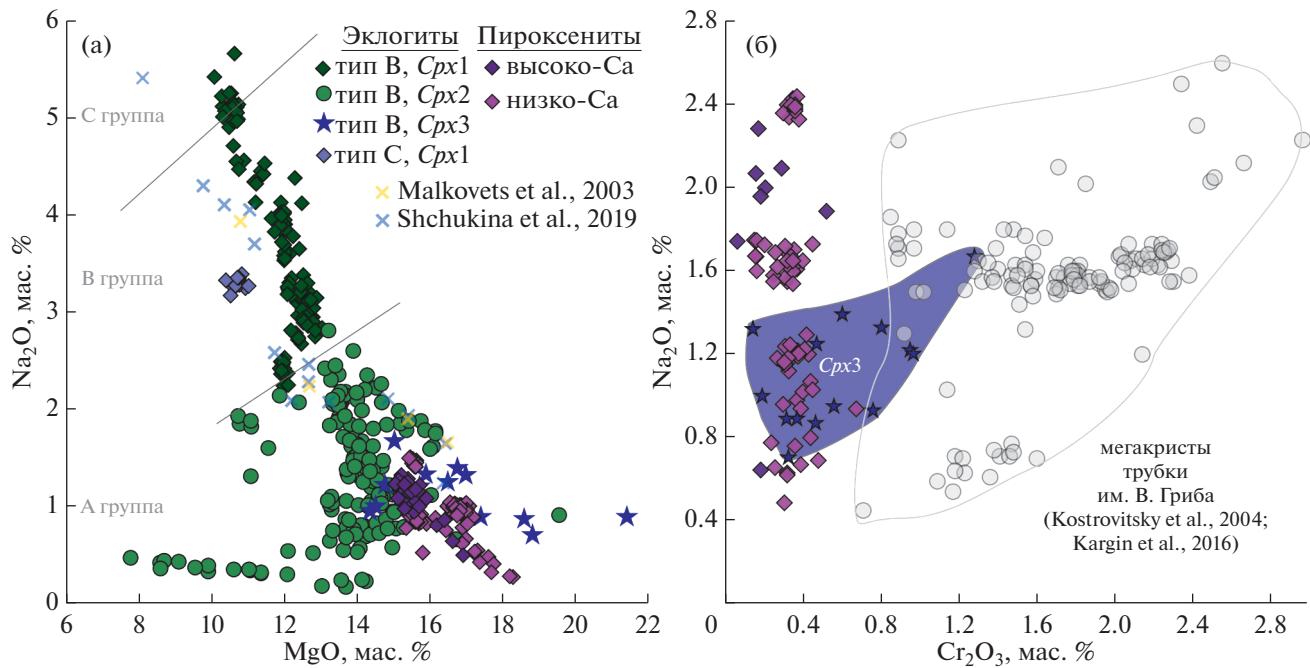


Рис. 7. (а) Классификационная диаграмма  $\text{MgO}$ – $\text{Na}_2\text{O}$  для изученных клинопироксенов по классификации (Taylor, Neal, 1989). Фиксируется постепенное уменьшение  $Jd$ -компоненты к краю зерен.  
(б) Диаграмма  $\text{Na}_2\text{O}$ – $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в пироксенах ( $\text{Cpx}3$ ) из эклогитов, содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  приближается к таковому мегакристов трубки им. В. Гриба (Kostrovitsky et al., 2004; Kargin et al., 2016).

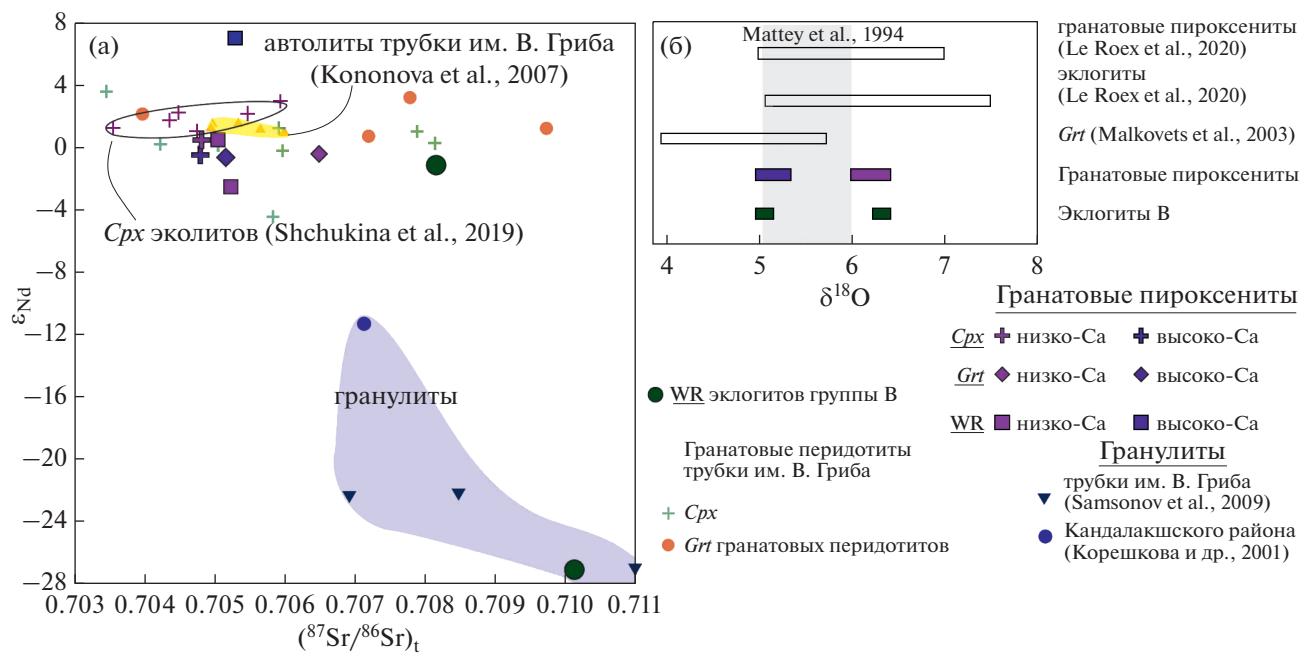


Рис. 8. (а)  $\epsilon_{\text{Nd}}$ – $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  измеренные для клинопироксена и граната из гранатовых пироксенитов и валовых анализов пород гранатовых пироксенитов и эклогитов группы В. Ошибки  $2\sigma$  меньше, чем размер символа. Сравнение с автолитами кимберлита тр. им. В. Гриба, клинопироксенами из эклогитов трубки им. В. Гриба (Shchukina et al., 2019) и минералами гранатовых перидотитов и мегакристами граната (Lebedeva et al., 2020b), и ксенолитами гранулитов из трубки им. В. Гриба (Samsonov et al., 2009) и лампрофировых даек в районе г. Кандалакша (Корешкова и др., 2001).  
(б) Изотопный состав кислорода в эклогитах и гранатовых клинопироксенитах. Данные  $\delta^{18}\text{O}$  для граната из эклогитов группы А и В трубки им. В. Гриба по (Malkovets et al., 2003) и гранатовых пироксенитов и эклогитов из кимберлитов вдоль границы кратона Каапвааль по (Le Roex et al., 2020).

Таблица 2. Rb-Sr, Sm-Nd и  $\delta^{18}\text{O}$  минералов и валовых проб эклогитов и гранатовых пироксенитов

Номер образца	Порода	Rb, мкг/г	Sr, мкг/г	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$	Sm, мкг/г	Nd, мкг/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Nd}}$	$T_{\text{Nd}}(\text{DM})$	$\delta^{18}\text{O}$
6	Гранатовый пироксенит, низко-Са	WR	6.10	282	0.063	$0.705628 \pm 9$	0.70529	1.80	13.7	0.080	$0.512708 \pm 18$	7.0	0.45
6		Grt	1.67	6.20	0.780	$0.709332 \pm 16$	0.70516	0.56	1.07	0.317	$0.512900 \pm 26$	-0.7	6.1
6		Cpx	0.08	345	0.001	$0.704797 \pm 8$	0.70479	2.48	20.3	0.074	$0.512310 \pm 6$	-0.5	0.87
903-1	Гранатовый пироксенит, высоко-Са	WR	13.56	206	0.190	$0.706247 \pm 6$	0.70523	2.42	22.2	0.066	$0.512186 \pm 7$	-2.5	0.95
503-3		WR	21.95	122	0.520	$0.707828 \pm 9$	0.70504	2.16	9.23	0.141	$0.512528 \pm 6$	0.5	1.22
503-3		Grt	0.15	1.31	0.334	$0.708227 \pm 27$	0.70649	0.94	0.88	0.648	$0.513728 \pm 49$	-0.4	5.2
503-3		Cpx	0.11	292	0.001	$0.704815 \pm 10$	0.70481	3.18	16.0	0.120	$0.512473 \pm 6$	0.5	1.02
698-6		Grt											5.2
759-4в	Эклогит группы В	WR	2.85	208	0.040	$0.710046 \pm 6$	0.70983	2.28	11.2	0.123	$0.511076 \pm 6$	-27	3.41
		Grt											5.1
759-4а	Эклогит	WR	16.52	522	0.092	$0.708633 \pm 12$	0.70814	1.21	4.17	0.175	$0.512528 \pm 5$	-1.1	2.30
		Grt											6.3
739-6		Cpx											6.3

\*  $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$  рассчитан относительно деплелированной мантии с параметрами из (White et al., 2015).

BaO (до 3.02 мас. %) и Na<sub>2</sub>O (до 2.3 мас. %) (Supplementary 4, ESM\_4.pdf).

#### Изотопный состав Sr, Nd и кислорода

Изотопный состав Sr эклогитов характеризуется высокими значениями изотопного  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  отношения: 0.70863 и 0.71013. Изотопный состав Nd в двух изученных ксенолитах эклогитов очень сильно различается:  $\varepsilon_{\text{Nd}} = -1.0$  и  $\varepsilon_{\text{Nd}} = -27$  (рис. 8а). Изотопный состав кислорода был определен в гранате и клинопироксene из высоко- и низко-Са пироксенитов (рис. 8б). Результаты представлены в табл. 2.

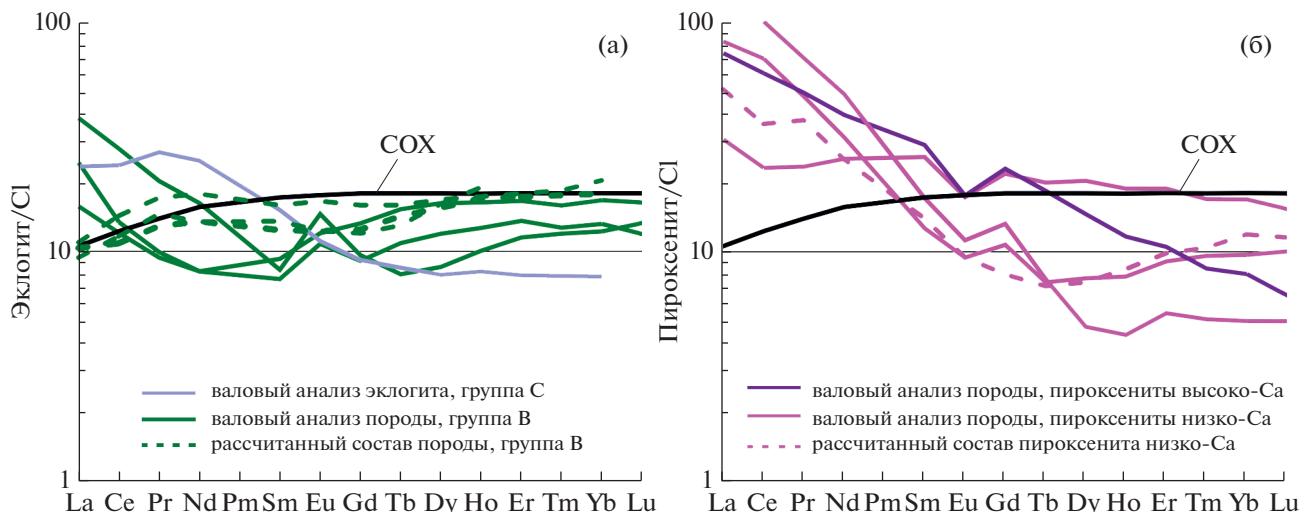
Анализ изотопного состава Sr в валовых пробах гранатовых пироксенитов ( $n = 3$ ) показал, что значения отношения  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ , в отличие от эклогитов, находятся в очень узком диапазоне – 0.70504–0.70529, а величина  $\varepsilon_{\text{Nd}}$  значительно варьирует от -2.5 в высоко-Са пироксените до +7.0 в низко-Са гранатовом пироксените (рис. 8а).

Sr-Nd изотопный состав в минералах из высоко- и низко-Са гранатовых пироксенитов близок между собой. В гранатах из гранатовых пироксенитов значения  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  составляют: 0.70516 и 0.70649, величина  $\varepsilon_{\text{Nd}}$  близка к хондритовой (-0.3...-0.5). В клинопироксенах из гранатовых пироксенитов изотопный состав стронция в среднем соответствует  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t = 0.7048$  (табл. 2), значения  $\varepsilon_{\text{Nd}}$  находятся в узком диапазоне (-0.4...+0.6).

Изотопный состав кислорода в гранатах в двух образцах гранатовых пироксенитов идентичен и соответствует мантийным значениям  $\delta^{18}\text{O} = 5.2\text{\textperthousand}$ , а в низко-Са гранатовом пироксените отклоняется от мантийных значений и составляет  $\delta^{18}\text{O} = 6.1\text{\textperthousand}$  (рис. 8б). Значения  $\delta^{18}\text{O}$  клинопироксена равновесны с гранатом: 5.1‰ в высоко-Са образце и 6.3‰ в низко-Са гранатовом пироксените. Изученные клинопироксены и гранаты из гранатовых пироксенитов по Sr и Nd характеристикам перекрываются со значениями, полученными нами ранее (Lebedeva et al., 2020b) для мегакристов из кимберлитов трубы им. В. Гриба и с клинопироксенами из гранатовых перидотитов.

#### Валовый состав пород

Небольшие размеры большинства эклогитовых ксенолитов, отобранных для исследования, делали невозможным выполнение химического анализа породы в целом, и такой представительный анализ был выполнен только для нескольких образцов (Supplementary 3, ESM\_3.xlsx). С целью минимизировать влияние кимберлитового расплава на геохимию несовместимых элементов в эклогитовых ксенолитах валовый состав породы реконструируется по данным геохимии минералов. Мы использовали этот подход для изучения ксенолитов, а также сравнили расчетные составы эклогитового протолита и валовый химический состав метасоматизированной породы, где это было возможно. Состав протолита эклогитов из



**Рис. 9.** Сравнение нормированных на хондрит (Sun, McDonough, 1989) спектров для валовых анализов пород: (а) эклогитов и (б) гранатовых пироксенитов, полученных прямым измерением и рассчитанных из состава граната и клинопироксена с составом базальта COX (Sun, McDonough, 1989).

ксенолитов был рассчитан путем объединения химических составов граната *Grt1* и клинопироксена *Cpx1*, в соответствии с их модальными пропорциями. Модальное содержание граната и клинопироксена в ксенолитах эклогитов обычно колеблется между 70 : 30 и 40 : 60, в гранатовых пироксенитах соотношение примерно 30:70. Некоторые вариации истинного модального содержания (до 30%) оказывают слабое влияние на реконструированные концентрации микроэлементов и лишь умеренно влияют на расчетные составы пород. Содержания основных элементов породы и концентрации микроэлементов приведены в Supplementary 3, ESM\_3.xlsx. Расчетный профиль редкоземельных элементов для эклогитов группы В имеет сглаженный, плоский вид. Для спектров, полученных по валовому составу породы, наблюдается сильное обогащение легкими РЗЭ. Анализ валового состава обр. 628-2 дает положительную Еу-аномалию, происхождение которой неясно. В расчетных составах других образцов выраженной Еу-аномалии не наблюдается. Для эклогита группы С в расчетном профиле РЗЭ отмечается пик в области Рг–Nd и затем резкое уменьшение количества РЗЭ, тяжелые редкие земли значительно сильнее фракционированы, чем в эклогитах группы В (рис. 9а). Еу-аномалия отсутствует. Для спектров распределения РЗЭ, полученных по валовому составу породы, наблюдается сильное обогащение легкими РЗЭ, что может быть вызвано последующим вкладом карбонатного флюида, поскольку породы пронизаны большим количеством карбонатно-силикатных прожилков.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Метасоматические преобразования эклогитов

Текстуры изученных эклогитов, несмотря на широко проявленные последующие изменения, указывают на то, что первичная ассоциация минералов представлена гранатом и клинопироксеном с небольшим количеством сульфидов и рутила.

Текстурные и структурные особенности эклогитов, характеризующихся обилием структур замещения, зональных и реакционных структур, прожилковых текстур, указывают на несколько этапов метасоматоза (табл. 3). Это подтверждается как изменением состава минералов, наследуемых от протолита (гранат, клинопироксен), так и появлением новых фаз (амфибола, флогопита, карбоната). Индикаторами основных метасоматических процессов выступает: (i) обрастание первичного граната зональным *Grt2*; (ii) развитие по первичному клинопироксену губчатого (пористого) *Cpx2* с включениями кальцита в порах; (iii) формирование зерен флогопита вдоль границ зерен граната и перекристаллизация метасоматического клинопироксена (пропадают поры, заполненные кальцитом); (iv) плавление твердофазных включений в *Grt2* – появление расплавных карманов со скелетными кристаллами клинопироксена и граната, флогопита, шпинели и кальцита; (v) флогопит-кальцитовые прожилки, пересекающие метасоматический *Grt2*; (vi) замещение граната и клинопироксена высоко-Сг гранатом и клинопироксеном, формирование Са-амфиболов при взаимодействии ксенолита с вмещающим кимберлитовым расплавом; (vii); хлоритизация метасоматической ассоциации, преобразование серпентина в хлорит.

Таблица 3. Типы преобразований эклогитов и гранатовых пироксенитов

Тип метасоматоза	Минеральная ассоциация	Формы проявления	Процесс
Эклогиты			
—	<i>Cpx1 + Grt1, Rt</i> , сульфиды	Гранобластовая структура	Метаморфизм протолита
Карбонатно-ультрамафический метасоматоз	<i>Grt2, Cpx2, Cal, ± Phl</i>	Каймы, вплоть до полного замещения первичных минералов, тонкие прожилки	Реакционное замещение первичных минералов под воздействием карбонатно-ультрамафических расплавов
Кимберлитовый метасоматоз ксенолитов в промежуточных камерах с частичным плавлением	Скелетные <i>Cpx</i> и <i>Grt, Cal, Phl, Spl, Amp, Prv</i> , серпентин, хлорит	Расплавные карманы – полиминеральные включения, сеть прожилков	Растворение и перекристаллизация твердофазных включений, частичное плавление минерала-хозяина под воздействием кимберлитового расплава в промежуточных камерах
Кимберлитовый метасоматоз	<i>Grt3, Cpx3</i> , обломки более ранних фаз	Зоны перекристаллизации и диффузионного замещения в более ранних гранатах и клинопироксенах	Перекристаллизация и диффузионное уравновешивание с кимберлитовым расплавом
Гранатовые пироксениты			
Метасоматоз эклогитов карбонатно-ультрамафическими расплавами для высоко-Са и низко-Mg пироксенитов; метасоматоз мантийных перidotитов выплавками из эклогитов для низко-Са и высоко-Mg пироксенитов	<i>Grt1, Cpx1</i>	Гранобластовая, иногда с элементами линейной ориентировки зерен	Метасоматоз и метаморфизм протолита
Кимберлитовый метасоматоз	<i>Cpx2, Phl + Cal</i>	Тонкие каймы губчатого <i>Cpx2</i> , тонкие прожилки <i>Phl + Cal</i>	Взаимодействие с кимберлитовым расплавом

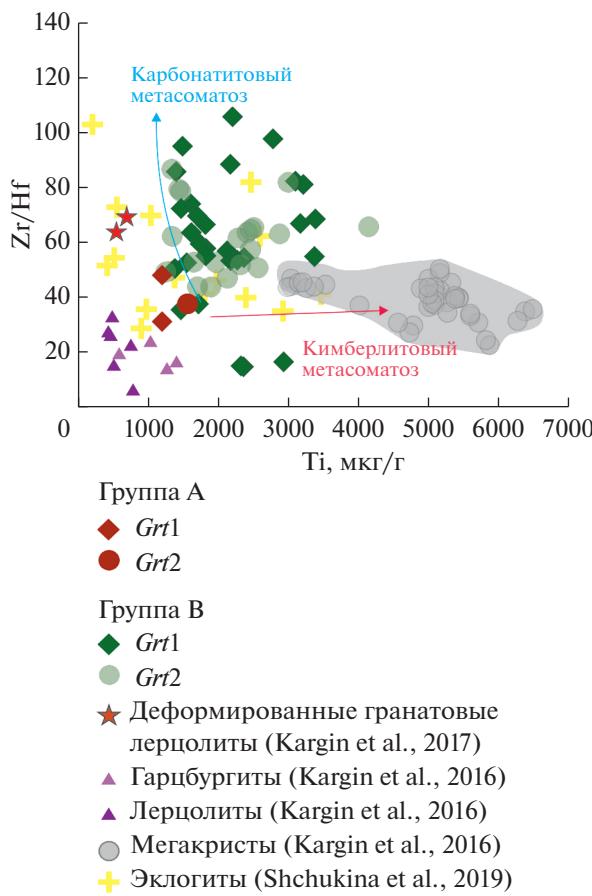
На основании текстурно-структурных соотношений и особенностей состава минералов мы предполагаем, что метасоматические преобразования эклогитов происходили как до захвата кимберлитовым расплавом во время их пребывания в мантии в качестве пород, сквозь которые проходил канал кимберлитового расплава, так и после захвата под воздействием транспортирующего кимберлитового расплава. Преобразования на глубинном этапе происходили при высоких температурах и, вероятно, в присутствии карбонатного флюида, что подтверждается наличием карбонатных включений. В ряде случаев это приводило к частичному плавлению эклогитов. Геохимические характеристики минералов также указывают на поздние преобразования, например, для гранатов характерно высокое Zr/Hf соотношение, что может служить индикатором того, что метасоматоз про-

ходил в несколько этапов (Czas et al., 2018). Ниже мы более подробно рассмотрим эти процессы.

#### Преобразование эклогитов карбонатно-ультрамафическим расплавом

Наиболее ранние преобразования эклогитов, выраженные формированием зонального *Grt2* и губчатого *Cpx2*, происходили под воздействием мантийного флюида. Образование губчатых клинопироксенов является одним из самых распространенных признаков метасоматического преобразования ксенолитов (Taylor, Neal, 1989; Misra et al., 2004; Kiseeva et al., 2017; Kargin et al., 2017).

Присутствие в порах кальцита подтверждает, что эта губчатая структура была сформирована по клинопироксену под воздействием существенно карбонатного флюида, без распада метасомати-



**Рис. 10.** Zr/Hf–Ti (мкг/г) для центральных и краевых частей гранатов в сравнении с гранатами деформированных гранатовых лерцолитов, равновесных карбонатно-силикатному расплаву (Kargin et al., 2017), гранаты из лерцолитов и гарцбургитов и мегакристы граната (Kargin et al., 2016) из трубы им. В. Гриба и гранатов из крупнозернистых эклогитов трубы им. В. Гриба (Shchukina et al., 2019).

ческих минералов, образовавшихся в ходе предыдущих процессов плавления и кристаллизации (Kiseeva et al., 2017; Shatskiy et al., 2022). В более поздних трещинах, пересекающих губчатый клинопироксен, кальцит всегда встречается с силикатными фазами.

Для оценки состава метасоматизирующего расплава мы сравнили концентрацию Ti (мкг/г) и значения Zr/Hf в гранате эклогитов (рис. 10). Содержание Ti в гранатах из высоко-Са ксенолитах эклогитов группы В выше, чем в гранатах группы А (рис. 10). У большинства изученных гранатов в пределах одного образца содержание титана от центральных частей зерен к краевым зонам увеличивается. Значения Zr/Hf отношения в центральных частях зерен, соответствующих Grt1, имеют очень широкие вариации (рис. 10). Составы Grt2 разделяются на два тренда в распределении Ti–Zr/Hf: первый выражен увеличением значений

Zr/Hf при постоянном содержании Ti, второй тренд выражен ростом содержания Ti при слабом увеличении величины Zr/Hf (рис. 10). Первый тренд соответствует метасоматозу под воздействием карбонатного расплава, второй ближе к кимберлитовому тренду и, скорее всего, отражает метасоматоз кимберлитовым расплавом (Griffin et al., 1999). Составы гранатов Grt2 из эклогитов, приуроченные ко второму тренду, сдвинуты по направлению к мегакристам граната из трубы им. В. Гриба, которые находятся в равновесии с кимберлитовым расплавом (Kargin et al., 2016).

Сравнивая изученные кальциты из жилки и из включения в гранате с кальцитом из кимберлитов, можно отметить, что кальцит из основной массы африканских кимберлитов (Giuliani et al., 2017) имеет более высокое содержание стронция (Supplementary 4, ESM\_4.pdf). В кальците из жилки концентрация Zr составляет 160–170 мкг/г, а во включении – 59–86 мкг/г, скорее всего, это связано с тем, что включение формировалось после образования флогопита (Supplementary 3, ESM\_3.xlsx). Кальцит из жилы с флогопитом имеет более низкое содержание SrO (<0.06 мас. %), но более высокие концентрации La, Y, ΣРЭ и показывает прямую корреляцию между La и Ce и между РЭ и Y (Supplementary 4, ESM\_4.pdf), подобную той, которая описана для карбонатов основной массы из кимберлита Булфонтейн, что связывают с совместной кристаллизацией кальцита с перовскитом и апатитом (Giuliani et al., 2017). Изученные нами кальциты близки по содержаниям BaO и SrO ко вторичным карбонатам из миндалин из кимберлитовой дайки месторождения де Бирс.

Мы полагаем, что процесс раннего преобразования эклогитов под воздействием карбонатно-ультрамафических расплавов происходил при давлении выше 3 ГПа в области глубин, где паргасит не устойчив (Niida, Green, 1998; Mandler, Grove, 2016). Эта оценка соотносится с выводом о том, что область интенсивного метасоматоза эклогитов карбонатно-ультрамафическими расплавами расположена в литосферной мантии на глубинах ~60–150 км (Aulbach et al., 2020a).

Наличие двух трендов в изменении микроэлементного состава граната Grt2 (рис. 10) указывает на взаимодействие эклогитов с ультрамафитовыми расплавами с разной долей карбонатного компонента.

#### Гранатовые пироксениты

По химическому составу граната и клинопироксена изученные образцы гранатовых клинопироксенитов были разделены на две группы: высоко-Са, низко-Mg и низко-Са, высоко-Mg (см. выше). Спектры РЭ гранатовых пироксенитов сильно обогащены легкими РЭ; в спектрах, полученных

при анализе валового состава пород, наблюдается отрицательная Eu-аномалия, которая отсутствует в рассчитанном составе породы (рис. 9б). Содержания тяжелых РЗЭ гораздо ниже, чем в океанических базальтах (Sun, McDonough, 1989). Соответственно, гранатовые пироксениты показывают гораздо большую степень проработки ультрамагнитическим карбонатсодержащим расплавом, обогащенным сильно несовместимыми элементами и летучими (Aulbach et al., 2020a). Изотопный состав кислорода минералов гранатовых пироксенитов попадает в базальтовую область  $\delta^{18}\text{O} > 5.5$  (Mattey et al., 1994; Korolev et al., 2021).

Минералы высоко-Са, низко-Mg пироксенитов лежат на общем тренде преобразования эклогитовых ксенолитов и частично пересекаются с трендом *Gr2* (рис. 5а), вероятно, они являются конечными продуктами преобразования эклогитовых ксенолитов под воздействием карбонатно-ультраосновных расплавов.

Минералы низко-Са, высоко-Mg гранатовых пироксенитов по составу резко отличаются от высоко-Са и низко-Mg гранатовых пироксенитов и эклогитов (рис. 5, 6, 7). Более высокое содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (до 0.6 мас. %) в гранате из гранатовых пироксенитов, по сравнению с эклогитами с более низким содержанием  $\text{MgO}$ , указывает на равновесие с окружающими перидотитами (рис. 5б). Эти породы могут представлять собой продукт взаимодействия частичных выплавок из эклогитов с деплетированными перидотитами (Smart et al., 2009; Smit et al., 2014; Herzberg, 2019; Korolev et al., 2021) и могут представлять океаническую литосферную мантию (Smart et al., 2017). Взаимодействие между расплавом, полученным за счет частичного плавления эклогита, и перидотитом было изучено ранее в экспериментальных исследованиях в широком диапазоне давлений (Yaxley, Green, 1998; Rapp et al., 1999; Mallik, Dasgupta, 2012; Shatskiy et al., 2022). Сходство продуктов реакции и схожие тренды изменения состава с наблюдаемыми в наших образцах (рис. 5, 6) подтверждают гипотезу, согласно которой пироксениты с высоким содержанием  $\text{MgO}$  являются продуктами реакции между высококремнистыми расплавами, появившимися в ходе частичного плавления эклогитов, и мантийными перидотитами.

#### *Плавление твердофазных включений в гранате и формирование расплавных карманов*

Включения в расплавных карманах были описаны в минералах из ксенолитов эклогитов и перидотитов из кимберлитов во многих работах (Bussweiler, 2019; Kiseeva et al., 2017; Lebedeva et al., 2020a). Появление расплавных карманов связывают с несколькими причинами: декомпрессионным плавлением более ранней фазы в составеproto-

лита (Pivin et al., 2009), воздействием внешних расплавов/флюидов (Gréau et al., 2011), плавлением минерала-хозяина (Perchuk et al., 2008) и растворением твердофазных включений с частичным плавлением минерала-хозяина (Lebedeva et al., 2020a). Вероятно, расплавные карманы появлялись в участках зерен *Gr2* с большим количеством трещин, где имело место высокое соотношение расплав/порода (Gréau et al., 2011). Под воздействием флюида/расплава происходило растворение твердофазных включений и частичное плавление окружающего их граната *Gr2* при снижении давления, что подтверждается: (i) наличием реликтов *Gr2*, края которых оплавленные, и по внешнему краю развивается гранат *Gr3* с более высокой магнезиальностью (рис. 4б); (ii) присутствием эпидотовой каймы по границе зерен граната (Lebedeva et al., 2020a).

Закалка расплава происходила мгновенно. Большая часть включений заполнена агрегатом скрытокристаллического серпентина и хлорита (рис. 4а, 4б, 4в), в котором находятся скелетные кристаллы клинопироксена (рис. 4в).

Паргасит в таких расплавных карманах является более поздним минералом, так как он развивается только на контакте их с вмещающим гранатом и встречается не во всех карманах (рис. 4б). Образование амфибала происходило на глубине, соответствующей давлению менее 3 ГПа (Niida, Green, 1999). Барит и целестин образуются, скорее всего, уже после образования расплавных карманов и часто развиваются по скрытокристаллической серпентиновой основной массе.

#### *Преобразование минералов ксенолитов эклогитов в мегакристы*

Найдка в эклогитовых ксенолитах зерен граната, уравновешенных с кимберлитовым расплавом, позволяет рассмотреть процесс формирования мегакристов, которые в большом количестве встречаются в кимберлитовой трубке им. В. Гриба (Kargin et al., 2016, 2017) и других кимберлитовых трубках мира.

Вдоль трещин в ксенолите, заполненных кимберлитовым расплавом, происходит перекристаллизация эклогитового граната, прослеживаемая на расстояние около 150 мкм вглубь зерен граната. В этой зоне происходит увеличение содержаний  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  и магнезиальности по направлению к трещине (рис. 11). Состав граната *Gr3* и клинопироксена *Cpx3* в этой зоне приближается к составу мегакристов из кимберлитов (рис. 5б, 7б). Хотя микротекстурный состав граната *Gr3* не отличается от состава *Gr2* (рис. 6а; Supplementary 3, ESM\_3.xlsx). Преобразование эклогитов при воздействии кимберлитового расплава и изменение состава граната от эклогитового к близкому составу мегакристов позволяет обсуждать возможность нового взгляда на

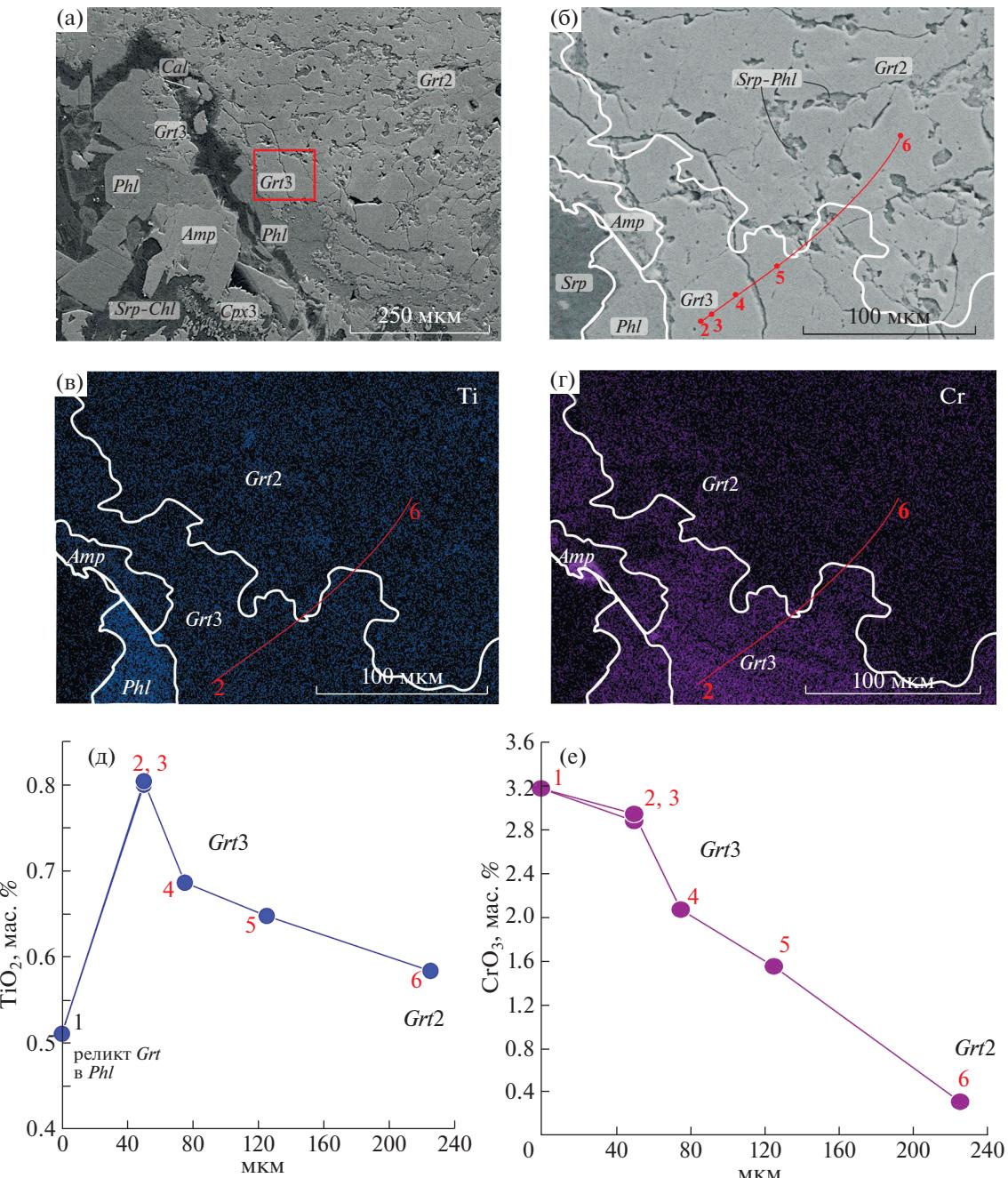


Рис. 11. Электронное изображение в обратно-рассеянных электронах (а) и (б) и карты распределения (в)  $\text{TiO}_2$  и (г)  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в зернах граната ( $\text{Grt2}$  и  $\text{Grt3}$ ), амфиболе ( $\text{Amp}$ ) и флогопите ( $\text{Phl}$ ), нарастающих на гранатах вдоль серпентиновой трещины; (д) и (е) количественное изменение содержаний  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  от края зерна граната ( $\text{Grt3}$ ) к более ранней метасоматической зоне ( $\text{Grt2}$ ). Красная линия соединяет точки анализов с номерами.

образование мегакристов граната. Мегакристы могли образоваться при взаимодействии кимберлитового расплава с мантийными породами не только перидотитового, но и эклогитового состава.

#### Время формирования и преобразования эклогитов

Изученные образцы испытали воздействие кимберлитового расплава, и можно было предпо-

лагать, что все полученные изотопные возрасты будут соответствовать времени становления кимберлитовой трубки им. В. Гриба. Однако в ряде работ было показано, что Rb-Sr и Sm-Nd изотопные системы в минералах эклогитов могут сохранить свидетельства более ранних событий (Shu et al., 2018; Shchukina et al., 2019). Наклон линии регрессии, рассчитанной по всем минералам из гранатовых пироксенитов в Sm—Nd координатах, соот-

ветствует возрасту  $370 \pm 50$  млн лет, СКВО = 70 (Supplementary 4, ESM\_4.pdf), что близко к возрасту кимберлитов трубы им. В. Гриба (Ларионова и др., 2016) и хорошо согласуется с данными, опубликованными в работе (Shchukina et al., 2019).

По начальному изотопному отношению Sr (табл. 2) изученные клинопироксены гранатовых пироксенитов близки к пироксенам зернистых эклогитов, описанным в (Shchukina et al., 2019), но значение Rb/Sr отношения в изученных минералах резко меньше, чем в клинопироксенах, которые дают изохрону с архейским возрастом, полученную в (Shchukina et al., 2019).

Эклогиты имеют низкорадиогенный изотопный состав неодима, указывающий на длительное пребывание в коре (рис. 8а). Модельный Nd возраст ксенолитов составляет 2.2 и 3.4 млрд лет. Эти возрасты не могут быть напрямую сопоставлены с основными субдукционными событиями в геологической эволюции Карельского кратона, в литосферной мантии которого зафиксированы два основных субдукционных события: архейская (~2.8 млрд лет) и палеопротерозойская (~1.9 млрд лет) субдукции (Samsonov et al., 2009). Тем не менее можно отметить их косвенное указание на возможную палеархейскую субдукцию.

Модельный Nd возраст образцов гранатовых пироксенитов (табл. 2) значительно моложе, чем архейский возраст эклогитов, установленный в работе (Shchukina et al., 2019). Образец низко-Са и высоко-Mg гранатового пироксенита по Nd-модельному возрасту близок ко времени внедрения кимберлита, два образца высоко-Са и низко-Mg гранатовых пироксенитов дают более древние значения: 0.9 и 1.2 млрд лет. Такая разница в модельных возрастах подтверждает различия в происхождении двух групп гранатовых пироксенитов. В первом случае низко-Mg пироксениты были сформированы в ходе интенсивной проработки кимберлитовым расплавом окружающих мантийных перидотитов непосредственно перед формированием кимберлитовой трубы им. В. Гриба. Возраст низко-Mg гранатовых пироксенитов может показывать более ранние этапы взаимодействия эклогитовых доменов мантии с карбонатно-ультрамафическими расплавами; так, возраст 1.2 млрд лет (Lebedeva et al., 2020b) соотноситься с предполагаемым масштабным эпизодом мантийного метасоматоза в литосфере ААП.

## ВЫВОДЫ

Эклогиты и гранатовые пироксениты, представленные в ксенолитах из кимберлита трубы им. В. Гриба, отличаются большой вариативностью минерального, химического и Sr-Nd-O изотопного состава. Вне зависимости от состава все они демонстрируют высокую степень преобразова-

ний по отношению к исходному метаморфическому протолиту. Протолит мог быть сформирован в ходе палеоархейской субдукции, косвенным указанием на это является Nd-модельный возраст эклогитов.

Текстурно-структурные и минералого-геохимические особенности эклогитов позволяют выделить три основных этапа метасоматических преобразований. Первый этап имел место во время нахождения эклогитов в мантии, до захвата кимберлитом, и происходил под воздействием карбонатно-ультрамафических расплавов. В ходе этого этапа ревакционное замещение первичных граната и клинопироксена приводило к развитию по ним новообразованных кайм граната с более высокой магнезиальностью и губчатого клинопироксена. Этот процесс мог протекать до полного исчезновения первичных минералов и замещения их новообразованными теми же фазами — гранатом и клинопироксеном, но уже другого состава. Второй этап представляет захват и взаимодействие с транспортирующим кимберлитовым расплавом. На этом этапе происходит растрескивание ксенолитов, заполнение трещин кимберлитовым расплавом и растворение, перекристаллизация твердофазных включений в гранате, частичное плавление минерала-хозяина под воздействием кимберлитового расплава в промежуточных камерах, где мы видим образование расплавных карманов. Продолжающееся взаимодействие с кимберлитовым расплавом может приводить к развитию зоны перекристаллизации и диффузионного замещения в более ранних гранатах и клинопироксенах, которые обогащаются Sr и Ti и приближаются к составам мегакристов.

Гранатовые пироксениты представлены высоко-Са, низко-Mg и низко-Са, высоко-Mg разностями. В обеих разностях флогопит-карбонатный метасоматоз не приводит к существенному изменению состава граната и клинопироксена. Высоко-Са пироксениты рассматриваются как конечный продукт преобразования эклогитовых ксенолитов, достигших равновесия с карбонатно-ультрамафическим расплавом. Этот процесс мог происходить в более ранние этапы воздействия на литосферную мантию ААП щелочно-ультраосновных расплавов, возможно около 0.9–1.2 млрд лет.

Составы минералов из низко-Са и высоко-Mg гранатовых пироксенитов не следуют общему тренду перехода от эклогитов к пироксенитам; эти пироксениты могли образоваться за счет взаимодействия высококремнистых выплавок из эклогитов с мантийными перидотитами незадолго до внедрения кимберлитов.

**Благодарности.** Авторы благодарят И.С. Сагайдака и других сотрудников ТФГИ по СЗ ФО, г. Архангельск, руководство ОАО “Севералмаз” и лично А.С. Галкина, И.С. Зезина, А.Н. Гудина за разрешение и содействие в отборе образцов ким-

берлитов, а также Е.О. Дубинину за измерения изотопного состава кислорода в минералах и Н.Н. Коротаеву за помощь в исследовании минералов с помощью СЭМ. Авторы искренне признательны А.В. Каргину (ИГЕМ РАН) и рецензентам Д.М. Михайленко (ИГМ СО РАН) и М.Г. Копыловой (Университет Британской Колумбии) за критические замечания, способствовавшие существенному улучшению статьи.

**Источники финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90037.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арзамасцев А.А., Фу-Ян Ву.* U-Pb геохронология и изотопная (Sr, Nd) систематика минералов щелочно-ультраосновных массивов Кольской провинции // Петрология. 2014. Т. 22. № 5. С. 496–496.
- Карандашев В.К., Хвостиков В.А., Носенко С.Ю., Бурмий Ж.П.* Использование высокообогащенных стабильных изотопов в массовом анализе образцов горных пород, грунтов, почв и донных отложений методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 7. С. 6–15.
- Корешкова М.Ю., Левский Л.К., Иваников В.В.* Петрология нижнекоровых ксенолитов из даек и трубок взрыва Кандалакшского грабена // Петрология. 2001. Т. 9. № 1. С. 89.
- Ларионова Ю.О., Сазонова Л.В., Лебедева Н.М. и др.* Возраст кимберлитов Архангельской провинции: Rb-Sr,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  изотопно-геохронологические и минералогические данные для флогопита // Петрология. 2016. Т. 24. № 4. С. 607–639.  
<https://doi.org/10.7868/S0869590316040026>
- Саблюков С.М., Саблюкова Л.И., Шавырина М.В.* Мантийные ксенолиты из кимберлитовых месторождений округлых алмазов Зимнебережного района, Архангельская алмазоносная провинция // Петрология. 2000. Т. 8. № 5. С. 518–548.
- Aulbach S., Creaser R.A., Pearson N.J. et al.* Sulfide and whole rock Re-Os systematics of eclogite and pyroxenite xenoliths from the Slave Craton, Canada // Earth Planet. Sci. Lett. 2009. V. 283. P. 48–58.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.03.023>
- Aulbach S., Viljoen K.S., Gerdes A.* Diamondiferous and barren eclogites and pyroxenites from the western Kaapvaal craton record subduction processes and mantle metasomatism, respectively // Lithos. 2020a.  
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105588>
- Aulbach S., Massuyseau M., Garber J.M. et al.* Ultramafic carbonated melt- and auto-metasomatism in mantle eclogites: Compositional effects and geophysical consequences // Geochim. Geophys. Geosystems. 2020b.  
<https://doi.org/10.1029/2019GC008774>
- Beard A.D., Downes H., Hegner E., Sablukov S.M.* Geochemistry and mineralogy of kimberlites from the Arkhangelsk Region, NW Russia: Evidence for transitional kimberlite magma types // Lithos. 2000. V. 51. № 1–2. P. 47–73.
- Bogdanova S.V., Gorbatschev R.* EUROPE|East European Craton // Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, 2016. P. 1–18.
- Bussweiler Y.* Polymimetic inclusions in Megacrysts as proxies for Kimberlite melt evolution – a review // Minerals. 2019. V. 9. № 9. P. 530.
- Carswell D.A.* Primary and secondary phlogopites and clinopyroxenes in garnet lherzolite xenoliths // Physics and Chemistry of the Earth. Pergamon Press Ltd. 1975. P. 417–429.
- Coleman R.G., Lee D.E., Beatty L.B., Brannock W.W.* Eclogites and Eclogites: Their differences and similarities // Geol. Soc. Amer. Bull. 1965. V. 76. P. 483–508.
- Czas J., Stachel T., Pearson D.G. et al.* Diamond brecciation and annealing accompanying major metasomatism in eclogite xenoliths from the Sask Craton, Canada // Mineral. Petrol. 2018. V. 112. P. 311–323.
- De Stefano A., Kopylova M.G., Cartigny P., Afanasiev V.* Diamonds and eclogites of the Jericho kimberlite (Northern Canada) // Contrib. Mineral. Petrol. 2009. V. 158. P. 295–315.
- Giuliani A., Soltys A., Phillips D. et al.* The final stages of kimberlite petrogenesis: Petrography, mineral chemistry, melt inclusions and Sr-C-O isotope geochemistry of the // Chemical Geol. 2017. V. 455. P. 342–456.
- Gréau Y., Huang J.X., Griffin W.L. et al.* Type I eclogites from Roberts Victor kimberlites: Products of extensive mantle metasomatism // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. P. 6927–6954.  
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.08.035>
- Griffin W.L., Shee S.R., Ryan C.G. et al.* Harzburgite to lherzolite and back again: Metasomatic processes in ultramafic xenoliths from the Wesselton // Contrib. Mineral. Petrol. 1999. V. 134. P. 232–250.
- Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Abe N. et al.* The origin and evolution of Archean lithospheric mantle // Precamb. Res. 2003. V. 127. P. 19–41.
- Griffin W.L., O'Reilly S.Y.* Cratonic lithospheric mantle: Is anything subducted? // Episodes. 2007. V. 30. P. 43–53.
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E. et al.* Ima report: Nomenclature of the amphibole supergroup // Amer. Mineral. 2012. V. 97. № 11–12. P. 2031–2048.
- Herzberg C.* Origin of high-Mg bimimetic eclogite xenoliths in kimberlite: A comment on a paper by Aulbach and Arndt // Earth Planet. Sci. Lett. 2019. V. 510. P. 231–233.
- Horodyskyj U.N., Lee C.T.A., Ducea M.N.* Similarities between Archean high MgO eclogites and Phanerozoic arc-eclogite cumulates and the role of arcs in Archean continent formation // Earth Planet. Sci. Lett. 2007. V. 256. № 3–4. P. 510–520.
- Jacob D.E.* Nature and origin of eclogite xenoliths from kimberlites // Lithos. 2004. V. 77. P. 295–316.  
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.038>
- Kargin A.V., Sazonova L.V., Nosova A.A., Tretyachenko V.V.* Composition of garnet and clinopyroxene in peridotite xenoliths from the Grib kimberlite pipe, Arkhangelsk diamond province, Russia: Evidence for mantle metasomatism associated with kimberlite melts // Lithos. 2016. V. 262. P. 442–455.
- Kargin A.V., Sazonova L.V., Nosova A.A. et al.* Cr-rich clinopyroxene megacrysts from the Grib kimberlite, Arkhangelsk province, Russia: Relation to clinopyroxene–phlogopite

- xenoliths and evidence for mantle metasomatism by kimberlite melts // *Lithos*. 2017. V. 292–293. P. 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.03.001>
- Kiseeva E.S., Kamenetsky V.S., Yaxley G.M., Shee S.R.* Mantle melting versus mantle metasomatism – “The chicken or the egg” dilemma // *Chemical Geol.* 2017. V. 455. P. 120–130.
- Kononova V.A., Golubeva Y.Y., Bogatikov O.A., Kargin A.V.* Diamond resource potential of kimberlites from the Zimny Bereg field, Arkhangelsk oblast // *Geol. Ore Deposits*. 2007. V. 49. P. 421–441.
- Korolev N., Nikitina L.P., Goncharov A. et al.* Three types of mantle eclogite from two layers of oceanic crust: A key case of metasomatically-aided transformation of low-to-high-magnesian eclogite // *J. Petrol.* 2021. V. 62. P. 1–38. <https://doi.org/10.1093/petrology/egab070>
- Kostrovitsky S.I., Malkovets V.G., Verichev E.M. et al.* Megacrysts from the Grib kimberlite pipe (Arkhangelsk province, Russia) // *Lithos*. 2004. V. 77. № 1–4. P. 511–523.
- Kutolin V.A., Frolova V.M.* Petrology of ultrabasic inclusions from basalts of Minusa and Transbaikalian regions (Siberia, USSR) // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1970. V. 29. № 2. P. 163–179.
- Lebedeva N.M., Nosova A.A., Kargin A.V., Sazonova L.V.* Multi-stage evolution of kimberlite melt as inferred from inclusions in garnet megacrysts in the Grib kimberlite (Arkhangelsk region, Russia) // *Mineral. Petrol.* 2020a. V. 114. P. 273–288. <https://doi.org/10.1007/s00710-020-00704-0>
- Lebedeva N.M., Nosova A.A., Kargin A.V. et al.* Sr-Nd-O isotopic evidence of variable sources of mantle metasomatism in the subcratonic lithospheric mantle beneath the Grib kimberlite, northwestern Russia // *Lithos*. 2020b. V. 376–377. 105779. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105779>
- Le Roex A., Tinguely C., Gregoire M.* Eclogite and garnet pyroxenite xenoliths from kimberlites emplaced along the southern margin of the Kaapvaal Craton, Southern Africa: Mantle or lower crustal fragments? // *J. Petrol.* 2020. V. 61. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa040>
- Luo Y., Korenaga J.* Efficiency of eclogite removal from continental lithosphere and its implications for cratonic diamonds // *Geology*. 2021. V. 49. P. 438–441. <https://doi.org/10.1130/G48204.1>
- Malkovets V., Taylor L., Griffin W. et al.* Eclogites from the Grib kimberlite pipe, Arkhangelsk, Russia // 8th International Kimberlite Conference, Canada. Abstract. 2003. 5 p.
- Mallik A., Dasgupta R.* Reaction between MORB-eclogite derived melts and fertile peridotite and generation of ocean island basalts // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2012. V. 329–330. P. 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.02.007>
- Mandler B.E., Grove T.L.* Controls on the stability and composition of amphibole in the Earth’s mantle // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2016. V. 171. № 8. P. 1–20.
- Mattey D., Lowry D., Macpherson C.* Oxygen isotope compositions of mantle peridotite // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1994. V. 128. P. 231–241.
- Morimoto N.* Nomenclature of pyroxenes // *Mineral. Petrol.* 1988. V. 39. № 1. P. 55–76.
- Mikhailenko D., Golovin A., Korsakov A. et al.* Metasomatic evolution of coesite-bearing diamondiferous eclogite from the udachnaya kimberlite // *Minerals*. 2020. V. 10. <https://doi.org/10.3390/min10040383>
- Misra K.C., Anand M., Taylor L.A., Sobolev N.V.* Multi-stage metasomatism of diamondiferous eclogite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia, Siberia // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2004. V. 146. № 6. P. 696–714.
- Niida K., Green D.H.* Stability and chemical composition of pargasitic amphibole in MORB pyrolite under upper mantle conditions // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1999. V. 135. № 1. P. 18–40.
- Nosova A.A., Dubinina E.O., Sazonova L.V. et al.* Geochemistry and oxygen isotopic composition of olivine in kimberlites from the Arkhangelsk province: Contribution of mantle metasomatism // *Petrology*. 2017. V. 25. P. 150–180. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9_12)
- Pobric V., Korolev N., Kopylova M.* Eclogites of the North Atlantic Craton: Insights from the Chidliak eclogite xenoliths (S. Baffin Island, Canada) // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2020. V. 175. P. 1–25.
- Pearson D.G., Snyder G.A., Shirey S.B. et al.* Archaean Re-Os age for Siberian eclogites and constraints on Archaean tectonics // *Nature*. 1995a. T. 374. № 6524. C. 711–713.
- Pearson D.G., Shirey S.B., Carlson R.W. et al.* Re-Os, Sm-Nd and Rb-Sr isotope evidence for thick archaean lithospheric mantle beneath the siberian craton modified by multistage metasomatism // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995b. T. 59. № 5. C. 959–977.
- Perchuk A.L., Yapaskurt V.O., Davydova V.V.* Melt inclusions in eclogite garnet: Experimental study of natural processes // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. V. 49. № 5. P. 310–312.
- Pivin M., Féménias O., Demaiffe D.* Metasomatic mantle origin for Mbuji-Mayi and Kundelungu garnet and clinopyroxene megacrysts (Democratic Republic of Congo) // *Lithos*. 2009. V. 112. P. 951–960. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.050>
- Rapp R.P., Shimizu N., Norman M.D., Applegate G.S.* Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa // *Chemical Geol.* 1999. V. 160. № 4. P. 335–356.
- Reid A.M., Donaldson C.H., Dawson J.B. et al.* The Igwisi Hills extrusive “kimberlites” // *Physics and Chemistry of the Earth*. 1975. P. 199–218.
- Samsonov A.V., Nosova A.A., Tretyachenko V.V., Larchenko V.A.* Collisional sutures in the early precambrian crust as a factor responsible for localization of diamondiferous kimberlites in the northern east European Platform // *Doklady Earth Sci.* 2009. V. 425. P. 226–230. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09020111>
- Sazonova L.V., Nosova A.A., Kargin A.V. et al.* Olivine from the Pionerskaya and V. Grib kimberlite pipes, Arkhangelsk diamond province, Russia: Types, composition, and origin // *Petrology*. 2015. V. 23. P. 227–258.
- Shatskiy A., Bekhtenova A., Podborodnikov I.V. et al.* Solidus of carbonated phlogopite eclogite at 3–6 GPa: Implications for mantle metasomatism and ultra-high pressure metamorphism // *Gondwana Res.* 2022. V. 103. P. 188–204.
- Shchukina E.V., Agashev A.M., Soloshenko N.G. et al.* Origin of V. Grib pipe eclogites (Arkhangelsk region, NW Russia):

- Geochemistry, Sm-Nd and Rb-Sr isotopes and relation to regional Precambrian tectonics // *Mineral. Petrol.* 2019. <https://doi.org/10.1007/s00710-019-00679-7>
- Shu Q., Brey G.P., Pearson D.G.* Eclogites and garnet pyroxenites from Kimberley, Kaapvaal craton, South Africa: Their diverse origins and complex metasomatic signatures // *Mineral. Petrol.* 2018. V. 112. P. 43–56.
- Smart K.A., Tappe S., Woodland A.B. et al.* Metasomatized eclogite xenoliths from the central Kaapvaal craton as probes of a seismic mid-lithospheric discontinuity // *Chemical Geol.* 2021. V. 578. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120286>
- Smart K.A., Heaman L.M., Chacko T. et al.* The origin of high-MgO diamond eclogites from the jericho kimberlite, Canada // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 284. P. 527–537.
- Smart K.A., Tappe S., Simonetti A. et al.* Tectonic significance and redox state of Paleoproterozoic eclogite and pyroxenite components in the Slave cratonic mantle lithosphere, Voyageur kimberlite Arctic Canada // *Chem. Geol.* 2017. V. 455. P. 98–119. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.10.014>
- Smit K.V., Stachel T., Creaser R.A. et al.* Origin of eclogite and pyroxenite xenoliths from the Victor kimberlite, Canada, and implications for Superior craton formation // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2014. V. 125. P. 308–337. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.019>
- Spetsius Z.V., Taylor L.A.* Partial melting in mantle eclogite xenoliths: Connections with diamond paragenesis // *Int. Geol. Rev.* 2002. V. 44. P. 973–987.
- Sun S.-S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes // *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 1989. V. 42. P. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Taylor L.A., Neal C.R.* Eclogites with oceanic crustal and mantle signatures from the Bellsbank kimberlite, South Africa, part I: Mineralogy, petrography, and whole rock chemistry // *J. Geology*. 1989. V. 97. P. 551–567.
- Warr L.N.* IMA–CNMNC approved mineral symbols // *Mineral. Mag.* 2021. V. 85. 3. P. 291–320.
- White W.M.* Isotope geochemistry. Blackwell: John Wiley & Sons, 2015. 496 p. ISBN: 978-0-470-65670-9
- Yaxley G.M., Green D.H.* Reactions between eclogite and peridotite: Mantle refertilisation by subduction of oceanic crust // *Swiss J. Geosci. Suppl.* 1998. V. 78. P. 243–255.

## Metasomatised Xenoliths of Mantle Eclogites and Garnet Pyroxenites from the V. Grib Kimberlite, Arkhangelsk Province

N. M. Lebedeva<sup>1</sup>, A. A. Nosova<sup>1</sup>, L. V. Sazonova<sup>1, 2</sup>, and Y. O. Larionova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

We investigated mantle eclogite and garnet pyroxenite xenoliths from the V. Grib kimberlite located in the Arkhangelsk province. Eclogites of the lithospheric mantle were strongly modified by metasomatic processes. The process of metasomatic alteration had been studied in detail, and we suggested that metasomatic events have occurred as: 1) early mantle metasomatism and 2) reaction with kimberlite melt. During the early mantle metasomatism primary clinopyroxene and garnet were replaced by newly formed metasomatic clinopyroxene, garnet, amphibole, calcite and phlogopite under the action of carbonate-ultramafic melts. The impact of kimberlite melt to eclogite xenoliths led to dissolution and recrystallisation of solid phase inclusions hosted in eclogite minerals and replaced them by melt pockets containing serpentine, chlorite, carbonate, spinel, perovskite, amphibole, recrystallised garnet and clinopyroxene. The xenoliths upward transport toward the surface was accompanied by their crushing and metasomatism. Some of xenoliths incorporated into kimberlite melt were dissolved, some ones were metasomatized with increasing Ti and Cr contents of garnet and clinopyroxene, towards the composition of high-Cr megacrysts. Garnet pyroxenites are represented by high-Ca, low-Mg and low-Ca, high-Mg types. It is shown that high-Ca and low-Mg garnet pyroxenites can be the final products of the eclogite xenoliths metasomatism. Low-Ca, high-Mg pyroxenites are due to interaction of produced by eclogite melt with depleted peridotites.

**Keywords:** Arkhangelsk diamond province, kimberlite, mantle xenoliths, eclogite, mantle metasomatism, megacryst