



GENESIS OF EXTREMELY MAGNESIAN DAUGHTER OLIVINE OF SECONDARY MELT INCLUSIONS FROM OLIVINE MACROCRYSTS IN KIMBERLITE FROM THE UDACHNAYA-EAST PIPE (SIBERIAN CRATON)

A.A. Tarasov ✉, A.V. Golovin 

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of studies of daughter olivine within secondary melt inclusions marking healed cracks in olivine macrocrysts from unserpentinized kimberlite from the Udachnaya-East pipe. Macrocrysts compose four olivine generations: core olivine (Ol_1); olivine marking healed cracks (Ol_2); daughter olivine of melt inclusions (Ol_3); thin outer rims of olivine (Ol_r) around macrocryst cores. The relationship between different olivine generations and variations in its chemical composition indicate that macrocrystal cores (Ol_1) are grains or grain fragments of disintegrated mantle rocks; melt inclusions and Ol_2 were formed due to infiltration of kimberlite melts into the grain cracks. Crystallization of a hybrid melt of inclusions and formation of an extremely magnesian daughter olivine (Ol_3) occurred later, at lower PT conditions. Among the daughter minerals in the melt inclusions, in addition to Ol_3 there were identified alkaline carbonates, sulfates, chlorides, oxides, and sulfides. It has been shown that the daughter olivine of melt inclusions (Ol_3) has high Mg# (97–98) content, high MnO (0.18–0.41 wt. %) and CaO (0.12–0.25 wt. %) concentrations, and low NiO (0.02–0.04 wt. %) contents. The ratios between the daughter minerals of the melt inclusions indicate that the hybrid melt from which extremely magnesian olivine was formed was alkaline carbonate or silicate-carbonate liquid with a low water content. Our study directly showed for the first time that almost pure forsterite is able to be crystallized from evolved kimberlite melts of carbonate or silicate-carbonate composition, which confirms the previously proposed model for the formation of extremely magnesian outer rims of olivine crystals from worldwide kimberlites during crystallization of evolved kimberlite melts of carbonate composition.

KEYWORDS: kimberlites; high-magnesian olivine; melt inclusions; alkaline-carbonatite melts; sulfur activity; Udachnaya-East pipe

FUNDING: This work was supported by the Russian Science Foundation, project 24-27-00287 (<https://rscf.ru/project/24-27-00287/>). Sampling of kimberlites from the Udachnaya-East pipe was performed as part of the state assignment of the Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia), project 122041400157-9.



EDN: XPQGM5

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Alexey A. Tarasov, tarasov.alexey@igm.nsc.ru

Received: July 4, 2024

Revised: July 29, 2024

Accepted: August 14, 2024

FOR CITATION: Tarasov A.A., Golovin A.V., 2024. Genesis of Extremely Magnesian Daughter Olivine of Secondary Melt Inclusions from Olivine Macrocrysts in Kimberlite from the Udachnaya-East Pipe (Siberian Craton). *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (5), 0781. doi:10.5800/GT-2024-15-5-0781

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО МАГНЕЗИАЛЬНОГО ДОЧЕРНЕГО ОЛИВИНА ВО ВТОРИЧНЫХ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ В МАКРОКРИСТАХ ОЛИВИНА ИЗ КИМБЕРЛИТА ТРУБКИ УДАЧНАЯ-ВОСТОЧНАЯ (СИБИРСКИЙ КРАТОН)

А.А. Тарасов, А.В. Головин

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены результаты изучения дочернего оливина из вторичных расплавных включений, маркирующих залеченные трещины в макрокристаллах оливина из несерпентинизированного кимберлита трубки Удачная-Восточная. В макрокристаллах выделено четыре генерации оливина: оливин ядер (Ol_1); оливин, маркирующий залеченные трещины (Ol_2); дочерний оливин расплавных включений (Ol_3); тонкие внешние каймы оливина (Ol_4) вокруг ядер макрокристаллов. Взаимоотношения между различными генерациями оливина и вариации его химического состава свидетельствуют о том, что ядра макрокристаллов (Ol_1) представляют собой зерна или фрагменты зерен дезинтегрированных мантийных пород, а расплавные включения и Ol_2 формировались за счет инфильтрации кимберлитовых расплавов в трещины в этих зернах. Раскристаллизация гибридного расплава включений и формирование экстремально магнезиального дочернего оливина (Ol_3) происходили позже при более низких РТ-параметрах. Среди дочерних минералов в расплавных включениях, помимо Ol_3 , идентифицированы щелочные карбонаты, сульфаты, хлориды, оксиды и сульфиды. Показано, что дочерний оливин из расплавных включений (Ol_3) имеет высокие значения магнезиальности (Mg# 97–98), высокие концентрации MnO (0.18–0.41 мас. %) и CaO (0.12–0.25 мас. %), а также низкие содержания NiO (0.02–0.04 мас. %). Соотношения между дочерними минералами расплавных включений указывают на то, что гибридный расплав, из которого формировался экстремально магнезиальный оливин, представлял собой щелочную карбонатную или силикатно-карбонатную жидкость с низким содержанием воды. В проведенном исследовании впервые напрямую показано, что почти чистый форстерит способен кристаллизоваться из проэволюционировавшего кимберлитового расплава карбонатного или силикатно-карбонатного состава, что подтверждает ранее предложенную модель формирования экстремально магнезиальных внешних кайм кристаллов оливина из различных кимберлитов мира при кристаллизации проэволюционировавших кимберлитовых расплавов карбонатного состава.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кимберлиты; высокомагнезиальный оливин; расплавные включения; щелочно-карбонатные расплавы; активность серы; трубка Удачная-Восточная

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках проекта № 24-27-00287 (<https://rscf.ru/project/24-27-00287/>). Отбор образцов был выполнен по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400157-9).

1. ВВЕДЕНИЕ

Термин экстремально магнезиальный оливин был предложен П.Ю. Плечовым [Plechov et al., 2018] для обозначения форстерита, значения магнезиальности ($Mg\# = 100 \cdot MgO / (MgO + FeO)$, мол. %) которого составляют более 96. В настоящее время известны единичные находки оливина такого состава из различных магматических, метасоматических и метаморфических пород [Plechov et al., 2018].

В кимберлитах оливин является главным породообразующим минералом и составляет от 40 до 60 об. % (например [Kamenetsky V.S. et al., 2008; Brett et al., 2009; Soltys et al., 2018; Giuliani, 2018; Abersteiner et al., 2022]). Информация о генерациях оливина из кимберлитов и вариациях его состава важна для разработки общих моделей петрогенезиса этих пород. При этом из-за практически повсеместного распространения вторичных гидротермальных изменений кимберлитов оливин частично или полностью может быть замещен ассоциа-

цией вторичных минералов (серпентин, хлорит и др.). Кроме того, из-за массовой серпентинизации кимберлитов первично-магматические минералы, кристаллизующиеся совместно с оливином, могут быть растворены и/или замещены вторичными гидротермальными фазами.

Ранее было показано, что оливин из кимберлитов имеет широкие вариации значения магнезиальности (от 74 до 99), однако большинство зон кристаллов оливина из кимберлитов имеют магнезиальность от 86 до 94 [Giuliani, 2018, и ссылки в этой работе]. Находки экстремально магнезиального оливина ($Mg\# > 96$) в кимберлитах довольно редки. Форстерит такого состава описан: (1) в тонких внешних зонах зерен оливина из некоторых кимберлитов мира [Fedortchouk, Canil, 2004; Patterson et al., 2009; Pilbeam et al., 2013; Bussweiler et al., 2015; Howarth, Taylor, 2016; Giuliani, 2018; Lim et al., 2018; Casetta et al., 2023] (рис. 1, а); (2) на контакте с монтичеллитом из кимберлита трубки № 1

(Восточно-Европейский кратон, Финляндия) [Abersteiner et al., 2018b] (рис. 1, б); (3) на контакте с серпентином из кимберлитов кластера Кимберли (Южная Африка) [Soltys et al., 2020] (рис. 1, в); (4) в межзерновом пространстве ксенолита ортопироксена из трубки Удачная-Восточная [Abersteiner et al., 2021] (рис. 1, г); (5) в расплавных включениях в энстатите другого ксенолита ортопироксена из трубки Удачная-Восточная [Rezvukhin et al., 2020] (рис. 1, д, е).

Формирование экстремально магниезного оливина в расплавных включениях в энстатите ксенолита

ортопироксена и в интерстициях ксенолита ортопироксена из кимберлитовой трубки Удачная-Восточная объясняют в рамках модели, согласно которой оливин такого состава формируется при реакции между энстатитом и карбонатным кимберлитовым расплавом [Rezvukhin et al., 2020; Abersteiner et al., 2021].

Для объяснения формирования тонких внешних кайм экстремально магниезного оливина в зернах оливина из кимберлитов большинство авторов [Pilbeam et al., 2013; Busweiler et al., 2015; Howarth, Taylor, 2016; Giuliani, 2018; Lim et al., 2018; Casetta et al.,

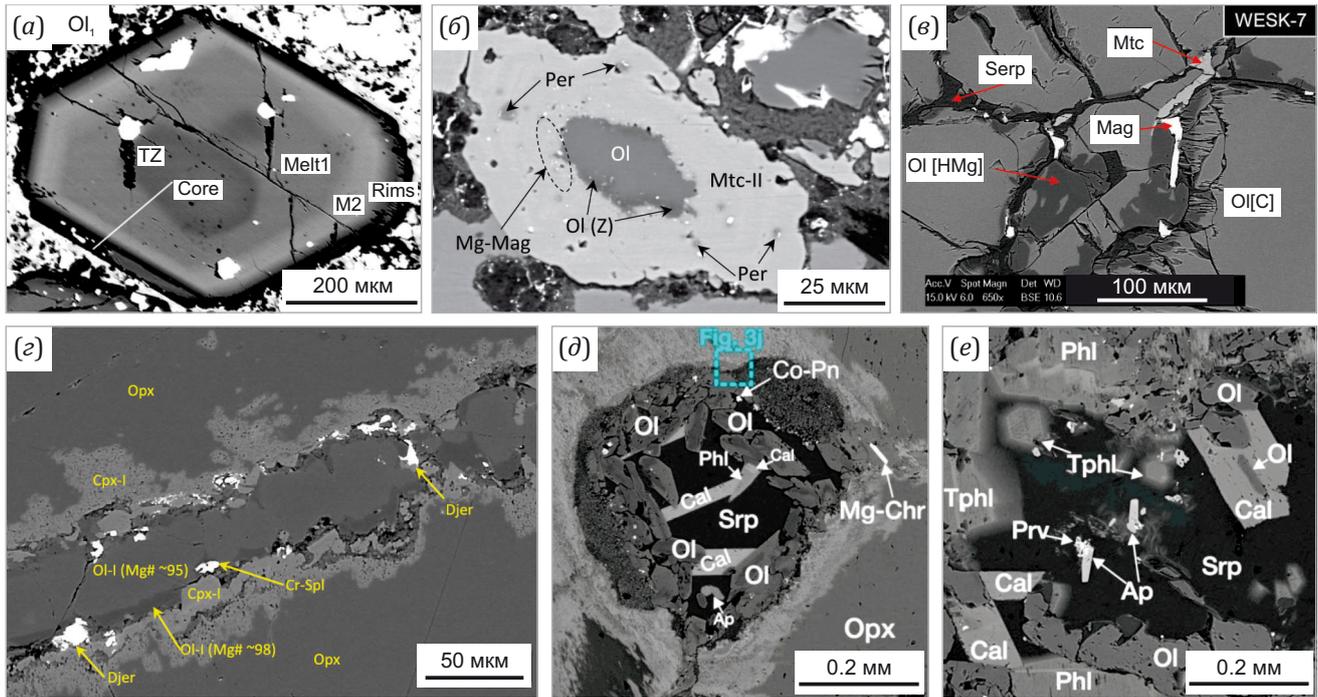


Рис. 1. BSE-изображения экстремально магниезного оливина из различных кимберлитов мира. (а) – внешняя кайма экстремально магниезного оливина (Rims) в фенокристе оливина из силла Бенфонтейн [Howarth, Taylor, 2016]; другие зоны этого кристалла: Core – ядро, TZ – переходная зона, Melt1 и M2 – зоны магматической кристаллизации; (б) – экстремально магниезный оливин (Ol(Z)) на границе оливина более ранней генерации (Ol) и замещающего его монтичеллита (Mtc-II) в ассоциации с периклазом (Per) и магниезным магнетитом (Mg-Mag) из кимберлита трубки № 1 (Восточно-Европейский кратон, Финляндия) [Abersteiner et al., 2018a]; (в) – экстремально магниезный оливин (Ol[HMg]) на контакте оливина более ранней генерации (Ol[C]) с серпентином (Serp) из кимберлитов кластера Кимберли (Южная Африка) в ассоциации с монтичеллитом (Mtc) и магнетитом (Mag) [Soltys et al., 2020]; (г) – экстремально магниезный (Ol-I) оливин в ассоциации с джерфишеритом (Djer), клинопироксеном (Cpx-I) и хромшпинелью (Cr-Spl) между зернами ортопироксена (Opx) ксенолита ортопироксена из трубки Удачная-Восточная [Abersteiner et al., 2021]; (д, е) – экстремально магниезный оливин within melt inclusions в энстатите другого ксенолита ортопироксена из трубки Удачная-Восточная, Srp – серпентин, Ap – апатит, Cal – кальцит, Tphl – тетраферрифлогопит, Prv – перовскит, Mg-Chr – магнизохромит, Co-Pn – кобальтпентландит [Rezvukhin et al., 2020].

Fig. 1. BSE-images of extremely magnesian olivine from worldwide kimberlites. (a) – rims of extremely magnesian olivine in olivine phenocryst from Benfontein sill [Howarth, Taylor, 2016]; other zones of this crystal: core, TZ – transition zone, Melt1 and M2 – magmatic crystallization zones; (б) – extremely magnesian olivine (Ol(Z)) at the boundary of an earlier-generation olivine (Ol) and its replacement with monticellite (Mtc-II) in association with periclase (Per) and Mg-magnetite (Mg-Mag) from kimberlite pipe №1 (East European Craton, Finland) [Abersteiner et al., 2018a]; (в) – extremely magnesian olivine (Ol[HMg]) on the contact of earlier-generation olivine (Ol[C]) with serpentine (Serp) from kimberlites of the Kimberley cluster (South Africa) in association with monticellite (Mtc) and magnetite (Mag) [Soltys et al., 2020]; (г) – extremely magnesian olivine (Ol-I) in association with djerfisherite (Djer), clinopyroxene (Cpx) and chromium spinel (Cr-Spl) in the intergranular space of orthopyroxene grains (Opx) of orthopyroxenite xenolith from the Udachnaya-East pipe [Abersteiner et al., 2021]; (д, е) – extremely magnesian olivine within melt inclusions in the enstatite of other orthopyroxenite xenolith from the Udachnaya-East pipe, Srp – serpentine, Ap – apatite, Cal – calcite, Tphl – tetraferriphlogopite, Prv – perovskite, Mg-Chr – magnesiochromite, Co-Pn – cobaltpentlandite [Rezvukhin et al., 2020].

2023] придерживаются модели [Pilbeam et al., 2013]. Согласно этой модели, каймы такого состава формируются при взаимодействии (переуравновешивании) более ранних генераций оливина с проэволюционировавшим кимберлитовым расплавом или непосредственно при кристаллизации из такого расплава. Показано, что для формирования экстремально магниезильного оливина проэволюционировавший кимберлитовый расплав должен характеризоваться высокими отношениями Mg/Fe и высокими значениями фугитивности кислорода [Pilbeam et al., 2013; Bussweiler et al., 2015; Howarth, Taylor, 2016]. Масс-балансовые расчеты и численное моделирование процессов кристаллизации кимберлитовых магм показывают, что такие проэволюционировавшие расплавы могут представлять собой карбонатные жидкости, которые формируются за счет кристаллизации из кимберлитовой магмы более ранних генераций оливина, шпинелидов и ильменита [Pilbeam et al., 2013; Bussweiler et al., 2015; Howarth, Taylor, 2016]. Однако одной из важнейших проблем моделей эволюции составов кимберлитовых магм, основанных на масс-балансовых расчетах, являются неизвестные вариации составов примитивных и проэволюционировавших кимберлитовых расплавов. Некоторые авторы, например, на основании ассоциации экстремально магниезильного оливина с серпентином предполагают, что такие поздние проэволюционировавшие кимберлитовые расплавы имеют высокие концентрации воды и что экстремально магниезильный оливин формируется в парагенезисе с серпентином [Soltys et al., 2020].

В представленном исследовании приводятся результаты изучения экстремально магниезильного дочернего оливина из вторичных расплавных включений в макрокристаллах оливина из уникального несерпентинизированного кимберлита трубки Удачная-Восточная. Показано, что оливин такого состава сформировался при кристаллизации из щелочного карбонатного или силикатно-карбонатного расплава. Проведенные исследования подтверждают модель формирования экстремально магниезильного оливина в каймах зерен оливина из различных кимберлитов мира за счет кристаллизации проэволюционировавших кимберлитовых расплавов карбонатных составов и указывают на то, что такие расплавы могли иметь щелочную натровую спецификацию.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Материалом для исследования послужил образец когерентного несерпентинизированного кимберлита K24/04A из трубки Удачная-Восточная. Этот тип кимберлитов является уникальным, так как не испытал каких-либо вторичных гидротермальных изменений. Оливин из кимберлита этого типа, как и первично-магматическая минеральная ассоциация, полностью сохранен. Детальное описание минерального и химического состава этого образца и сравнение его с серпентинизированными породами трубки Удачная-Во-

сточная приведены в работах [Kamenetsky V.S. et al., 2012, 2014; Abersteiner et al., 2018a].

Из образца были изготовлены аншлифы. Во избежание растворения и гидратации безводных легкорасстворимых фаз кимберлитов подготовка образцов производилась без использования воды, для полировки и шлифовки использовались алмазные пасты, остатки которых удалялись с помощью очищенного бензина (нефраса).

Все аналитические работы проведены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Изображения в обратнорассеянных электронах (BSE) и карты распределения элементов получены с помощью электронного микроскопа Tescan MIRA3 LMU с энергодисперсионной системой микроанализа Aztec Energy X-Max 50+УВ-24-04 (А).

Химические составы оливина различных генераций получены методом рентгеноспектрального микроанализа на микроанализаторе Jeol JXA-8100. Параметры съемки: ускоряющее напряжение – 20 кВ, сила тока зонда – 300 нА. Для Si, Mg, Fe и Mn время набора сигнала на пике – 30 с, время набора сигнала на фоне – 15 с с каждой стороны. Для Ca, Cr и Ni время накопления сигнала на пике составляло 60 с, на фоне – 30 с с каждой стороны.

Спектры комбинационного рассеяния (КР) дочерних минералов расплавных включений и оливина-хозяина были получены с помощью спектрометра Horiba Jobin Yvon LabRAM HR800 с 532-нм Nd:YAG лазером. Для съемки использовался 100X объектив, оптическая щель шириной 50 мкм и дифракционная решетка 1800 штрихов на миллиметр. Спектры КР калибровались по известной линии чистого кремния (520.6 см^{-1}). Спектры КР накапливались в диапазоне от 10 до 1200 см^{-1} , спектральное разрешение составляло менее 0.5 см^{-1} . Для точного определения положения линий на спектрах КР полученные спектры КР аппроксимировались суммой лоренцевых контуров с использованием метода наименьших квадратов для нелинейных функций.

Моделирование диффузии элементов между оливинами различного состава производилось с помощью программного кода, написанного на языке Wolfram Mathematica 13, основанного на решении уравнений диффузии Фика [Ganguly, 2002]. Коэффициенты диффузии Mg^{2+} и Fe^{2+} в оливине рассчитывались по модели [Jaoul et al., 1995].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Макрокристы оливина размером от 0.5 до 10 мм из когерентного несерпентинизированного кимберлита трубки Удачная-Восточная имеют угловатую или полукруглую форму; полностью ограненных кристаллов среди изученных зерен не установлено (рис. 2). Исследованные макрокристы имеют сложное строение. Ядра макрокристов (оливин первой генерации, Ol_1) слагают более 90 % объема зерен. Зональность по главным компонентам в ядрах не установлена. Магниезильность Ol_1

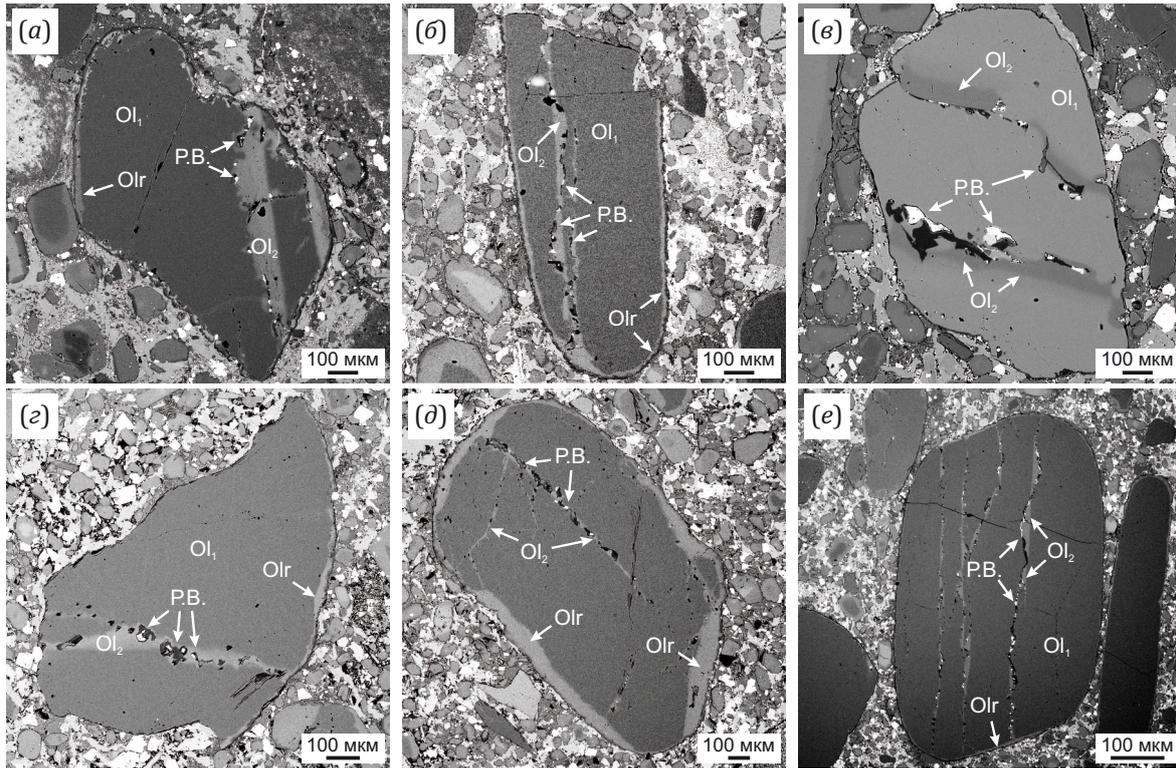


Рис. 2. BSE-изображения макрокристов оливина с вторичными расплавленными включениями (P.B.) из уникального когерентного несерпентинизированного кимберлита трубки Удачная-Восточная. Вторичные расплавленные включения и оливин второй генерации (Ol₂) маркируют залеченные трещины в ядрах макрокристов (Ol₁). Ol₁ формирует тонкие каймы вокруг ядер макрокристов.

Fig. 2. BSE images of olivine macrocrysts with secondary melt inclusions (P.B.) in the unique coherent unsertentized kimberlite from the Udachnaya-East pipe. Secondary melt inclusions (P.B.) and second-generation olivine (Ol₂) mark healed cracks in olivine macrocrysts cores. Ol₁ forms rims around the macrocryst cores.

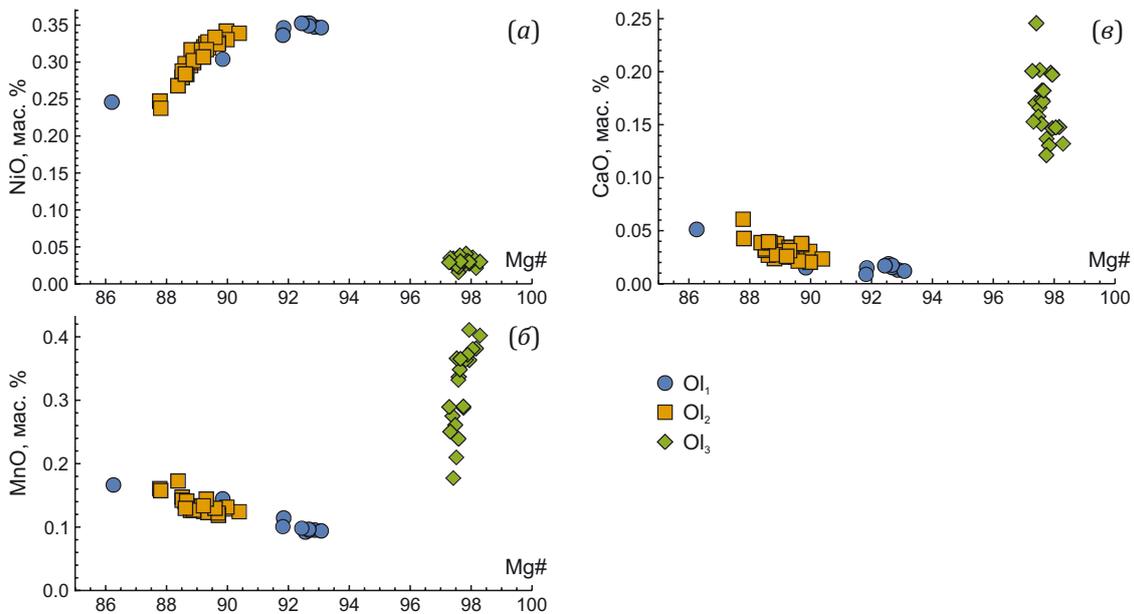


Рис. 3. Вариации состава оливина различных генераций.

Ol₁ – оливин ядер макрокристов (оливин-хозяин); Ol₂ – оливин второй генерации, маркирующий залеченные трещины с расплавленными включениями; Ol₃ – экстремально магниезильный дочерний оливин расплавленных включений.

Fig. 3. Variations in composition of different-generation olivine.

Ol₁ – macrocrysts core olivine (host olivine); Ol₂ – olivine of the second generation, marking healed cracks with melt inclusions; Ol₃ – extreme-Mg daughter olivine of melt inclusions.

составляет 86.2–93.1 (среднее 90.9), содержание примесей – NiO 0.25–0.35 мас. % (среднее 0.33 мас. %), MnO 0.09–0.18 мас. % (среднее 0.12 мас. %), CaO 0.01–0.05 мас. % (среднее 0.02 мас. %) (Прил. 1, табл. 1.1; рис. 3).

Оливин второй генерации (Ol₂) маркирует залеченные трещины в ядрах макрокристов (Ol₁) (см. рис. 2; рис. 4). Ol₂ характеризуется магнизиальностью 86.4–90.4 (среднее 89.0) с вариациями содержания NiO 0.24–0.34 мас. % (среднее 0.31 мас. %), MnO 0.12–0.17 мас. % (среднее 0.14 мас. %), CaO 0.02–0.06 мас. % (среднее 0.03 мас. %) (Прил. 1, табл. 1.1; см. рис. 3). Между магнизиальностью ядер макрокристов оливина и оливина, маркирующего залеченные трещины в этих ядрах, существует прямая корреляция (рис. 5). При этом в макрокристах, ядра которых характеризуются Mg# < 89, оливин второй генерации более магнизиальный, чем оливин первой генерации (см. рис. 2, г, 4, б; рис. 5), а в макрокристах, магнизиальность ядер которых более 89, оливин второй генерации более железистый, чем оливин первой генерации (см. рис. 2, 4, а, в–е; рис. 5).

Вокруг ядер макрокристов идентифицированы неравномерно развитые каймы оливина (Ol₁). В части макрокристов каймы практически отсутствуют (см. рис. 2, в, г), вокруг других ядер их толщина может достигать 100 мкм (см. рис. 2, д). Макрокристы с наиболее разви-

тыми каймами частично огранены (см. рис. 2, д). Залеченные трещины, маркированные оливином второй генерации, не пересекают каймы (см. рис. 2, а, б, г–е).

В макрокристах оливина идентифицированы расплавные включения. Цепочки расплавных включений, как и Ol₂, маркируют залеченные трещины в ядрах макрокристов. Таким образом, расплавные включения являются вторичными по отношению к Ol₁. Форма расплавных включений варьируется от изометричной (см. рис. 4, г; рис. 6, б) до удлиненной (см. рис. 4, в, д, е; рис. 7, 8) и червеобразной (см. рис. 4, б; 6, а). Размер вскрытой поверхности расплавных включений может достигать 200 мкм по большей оси. Расплавные включения полностью раскристаллизованы. Включения содержат от 5 до 20 индивидуальных дочерних фаз, размер которых варьируется от 1 до 50 мкм. Среди дочерних фаз методами КР-спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии установлены следующие минералы: ньерерит (Na,K)₂Ca(CO₃)₂, шортит Na₂Ca₂(CO₃)₃, беркеит Na₄(SO₄)(CO₃), неидентифицированный Ca-Na-K-S-содержащий карбонат, афтиталит K₃Na(SO₄)₂, апатит Ca₅(PO₄)₃(F,Cl,OH), сильвин KCl, галит NaCl, джерфишерит K₆(Fe,Cu,Ni)₂₅S₂₆Cl, шпинелиды ряда магнетит – магнезиоферрит (Fe,Mg)Fe₂O₄, монтичеллит CaMgSiO₄ и оливин третьей генерации (Ol₃) (см.

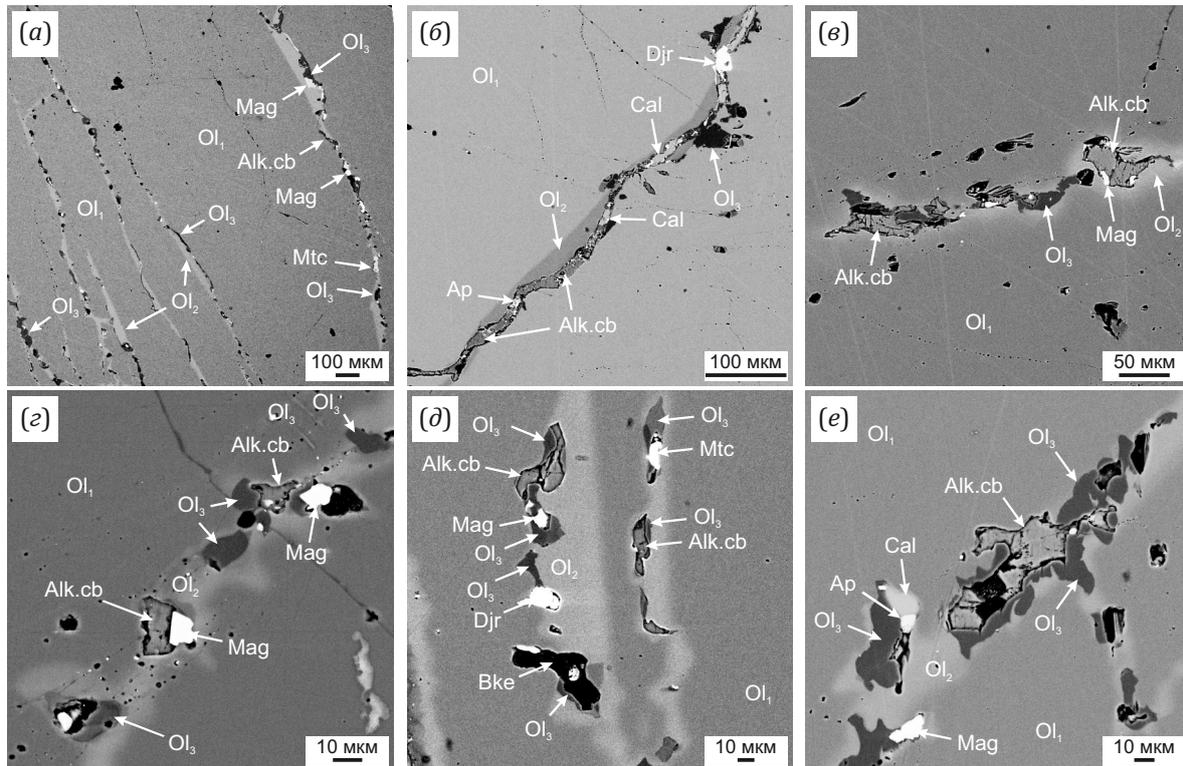


Рис. 4. Экстремально магнизиальный дочерний оливин (Ol₃) во вторичных расплавных включениях, BSE-изображения. Ol₁ – оливин ядер макрокристов, Ol₂ – оливин второй генерации, маркирующий залеченные трещины с расплавными включениями, Mtc – монтичеллит, Bke – беркеит, Alk.cb – неидентифицированный щелочной карбонат, Mag – магнетит, Djr – джерфишерит.

Fig. 4. Extreme-Mg daughter olivine (Ol₃) of secondary melt inclusions, BSE images. Ol₁ – macrocryst core olivine, Ol₂ – second-generation olivine that marks healed cracks with melt inclusions, Mtc – monticellite, Bke – burkeite, Alk.cb – unidentified alkaline carbonate, Mag – magnetite, Djr – djerfisherite.

рис. 4, 6, 7; рис. 8). Газовые пузырьки во включениях не идентифицированы. Анализ BSE-изображений показывает, что содержание карбонатов (щелочных карбонатов 25–30 об. %, кальцита 15–20 об. %, беркеита <5 об. %) в расплавных включениях сопоставимо с содержанием силикатов (экстремально магниезного оливина 45–50 об. %, монтичеллита <5 об. %).

трация кремнезема в расплаве, из которого кристаллизовался экстремально магниезный оливин, рассчитана из содержаний оливина и монтичеллита в расплавных включениях (45–50 и <5 об. % соответственно) и концентрации кремнезема в этих силикатах (42 и 38 мас. % соответственно) и составляет 19–23 мас. % SiO₂ в расплаве. Таким образом, расплав включений, из

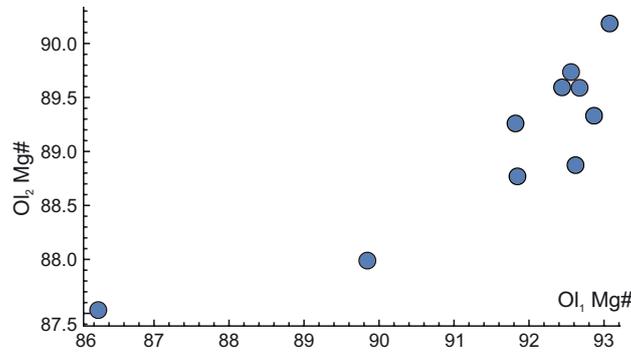


Рис. 5. Прямая корреляция между магниезностью оливина ядер макрокристов (Ol₁ Mg#) и магниезностью оливина, маркирующего залеченные трещины в этих ядрах макрокристов (Ol₂ Mg#).

Fig. 5. Direct correlations between Mg# of macrocryst core olivine (Ol₁ Mg#) and olivine marking healed cracks in macrocryst cores (Ol₂ Mg#).

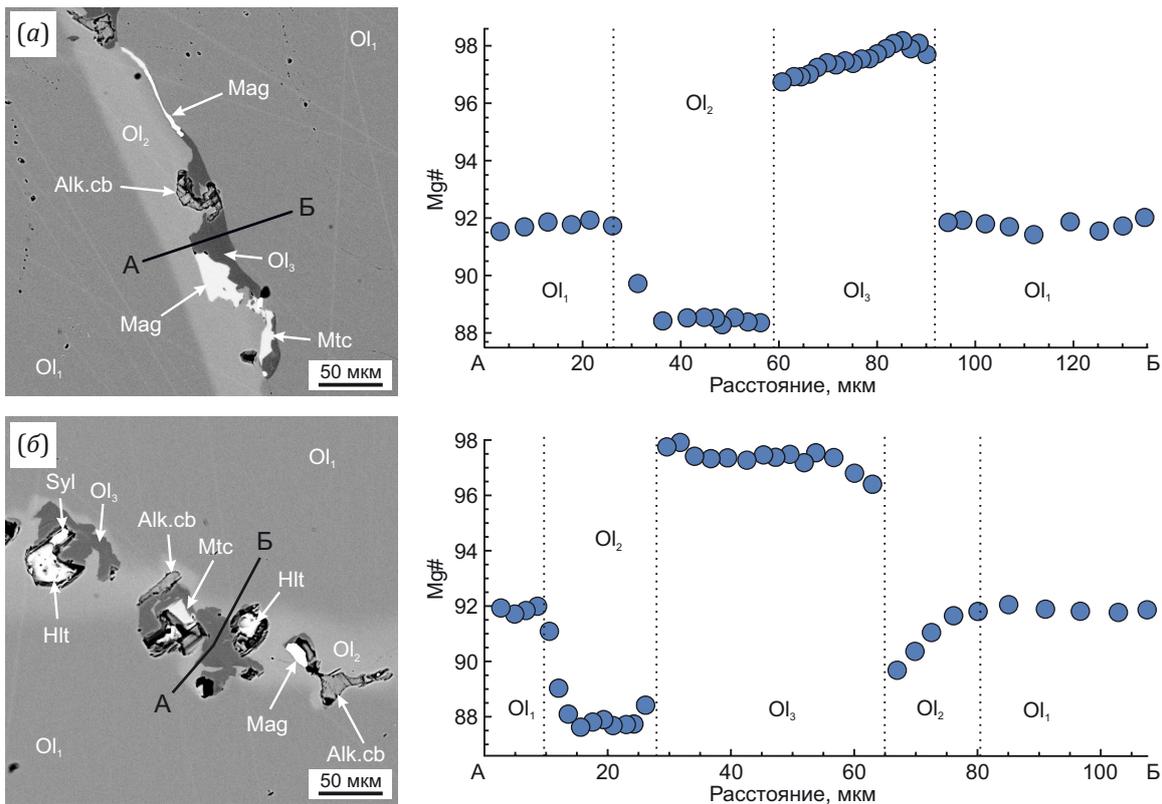


Рис. 6. Профили по линиям А – В через залеченные трещины, маркированные оливином второй генерации (Ol₂) и вторичными расплавными включениями в ядрах макрокристов оливина (Ol₁). Ol₃ – экстремально магниезный дочерний оливин расплавных включений, Mtc – монтичеллит, Alk.cb – неидентифицированный щелочной карбонат, Mag – магнетит, Hlt – галит, Syl – сylvин.

Fig. 6. Profiles along A – B lines through healed cracks marked by second-generation olivine (Ol₂) and secondary melt inclusions in the olivine (Ol₁) macrocryst cores. Ol₃ – extreme-Mg daughter olivine of melt inclusions, Mtc – monticellite, Alk.cb – unidentified alkaline carbonate, Mag – magnetite, Hlt – halite, Syl – sylvite.

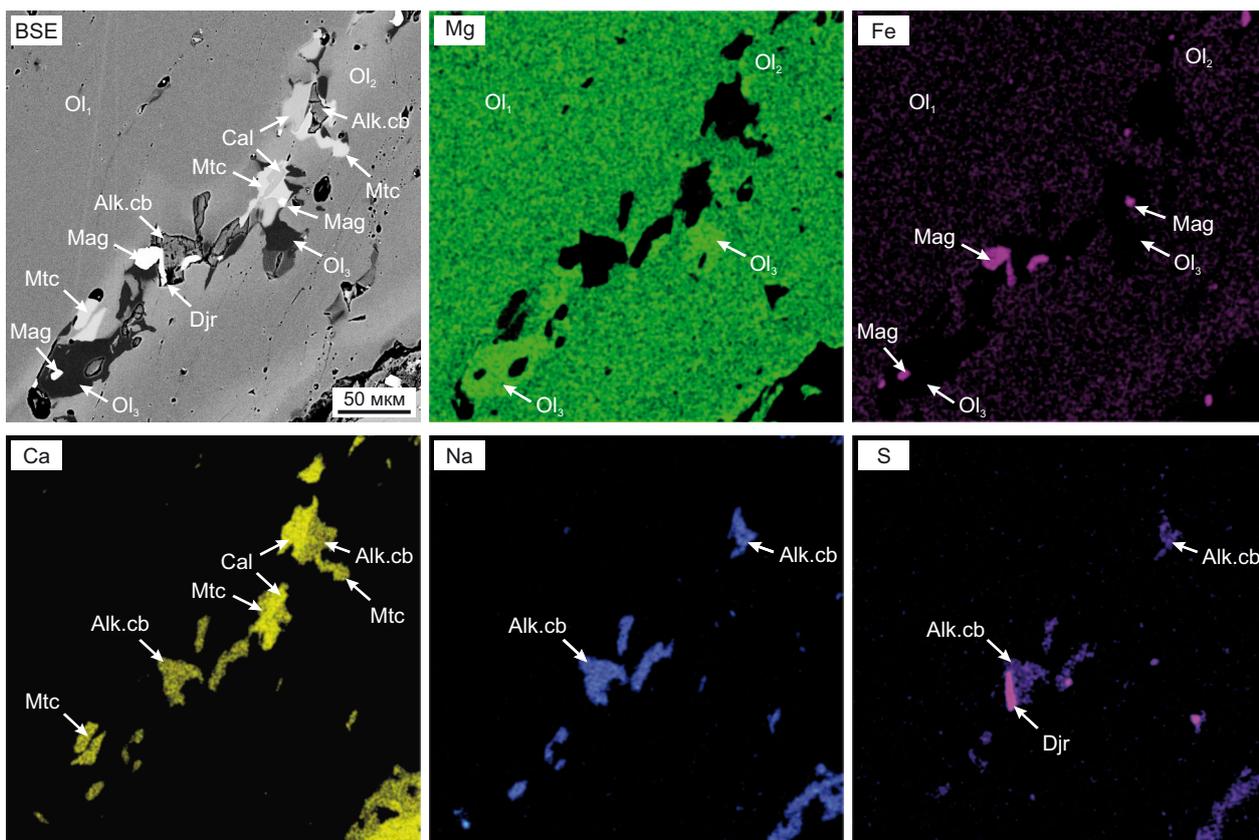


Рис. 7. BSE-изображение и карты распределения элементов во вторичном расплавленном включении в макрокристе оливина из кимберлита трубки Удачная-Восточная.

Ol₁ – оливин ядер макрокристов (оливин-хозяин), Ol₂ – оливин второй генерации, маркирующий залеченные трещины, Ol₃ – экстремально магниезильный дочерний оливин, Mtc – монтичеллит, Cal – кальцит, Alk.cb – неидентифицированный щелочной карбонат, Mag – магнетит, Djr – джерфишерит.

Fig. 7. BSE image and maps of element distribution in the secondary melt inclusion in olivine macrocrysts in kimberlite from the Udachnaya-East pipe.

Ol₁ – macrocryst core olivine (host olivine), Ol₂ – second-generation olivine, marking healed cracks, Ol₃ – extreme-Mg daughter olivine, Mtc – monticellite, Cal – calcite, Alk.cb – unidentified alkaline carbonate, Mag – magnetite, Djr – djerfisherite.

которого кристаллизовался Ol₃, имел промежуточный состав между карбонатным (<20 мас. % SiO₂) и силикатно-карбонатным (>20 мас. % SiO₂) [Le Maitre, 2002]. Во включениях не идентифицированы какие-либо фазы, содержащие воду, что свидетельствует о низкой концентрации воды в расплаве включений.

Дочерний оливин третьей генерации всегда присутствует только на стенках расплавленных включений. Химический состав оливина третьей генерации характеризуется высокими значениями магниезильности (97.3–98.3, среднее 97.7), низкими содержаниями NiO (0.02–0.04 мас. %, среднее 0.03 мас. %), широкими вариациями концентраций MnO (0.18–0.41 мас. %, среднее 0.32 мас. %) и CaO (0.12–0.25 мас. %, среднее 0.17 мас. %) (Прил. 1, табл. 1.1; см. рис. 3).

Разные генерации оливина различаются по положению линий на КР-спектрах (рис. 8), что согласуется с результатами ранее опубликованных работ о зависимости положений линий на КР-спектрах оливина от его химического состава [Cnopras, 1991; Kolesov, Geiger, 2004].

Дочерние шпинелиды характеризуются низкими концентрациями Al₂O₃ (≤1.9 мас. %), Cr₂O₃ (≤0.6 мас. %) и TiO₂ (<1.5 мас. %). В мол. % соотношение Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg) составляет 0.34–0.80, а соотношение Fe³⁺/(Fe³⁺+Al+Cr) – 0.95–0.99. Дочерний монтичеллит характеризуется значением Mg# от 90.3 до 92.9.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Происхождение Ol₁. Соответствие составов изученных ядер макрокристов составам оливина ксенолитов перидотитов из трубки Удачная-Восточная и многочисленным ранее опубликованным анализам ядер зерен оливина из этого кимберлита [Abersteiner et al., 2022, и ссылки в данной работе], а также форма ядер (угловатая или полуокатанная) однозначно указывают на то, что Ol₁ имеет ксеногенное происхождение, то есть ядра макрокристов представляют собой зерна или фрагменты зерен дезинтегрированных мантийных пород.

Происхождение Ol₂ и вторичных расплавленных включений в ядрах макрокристов. Взаимоотношения между

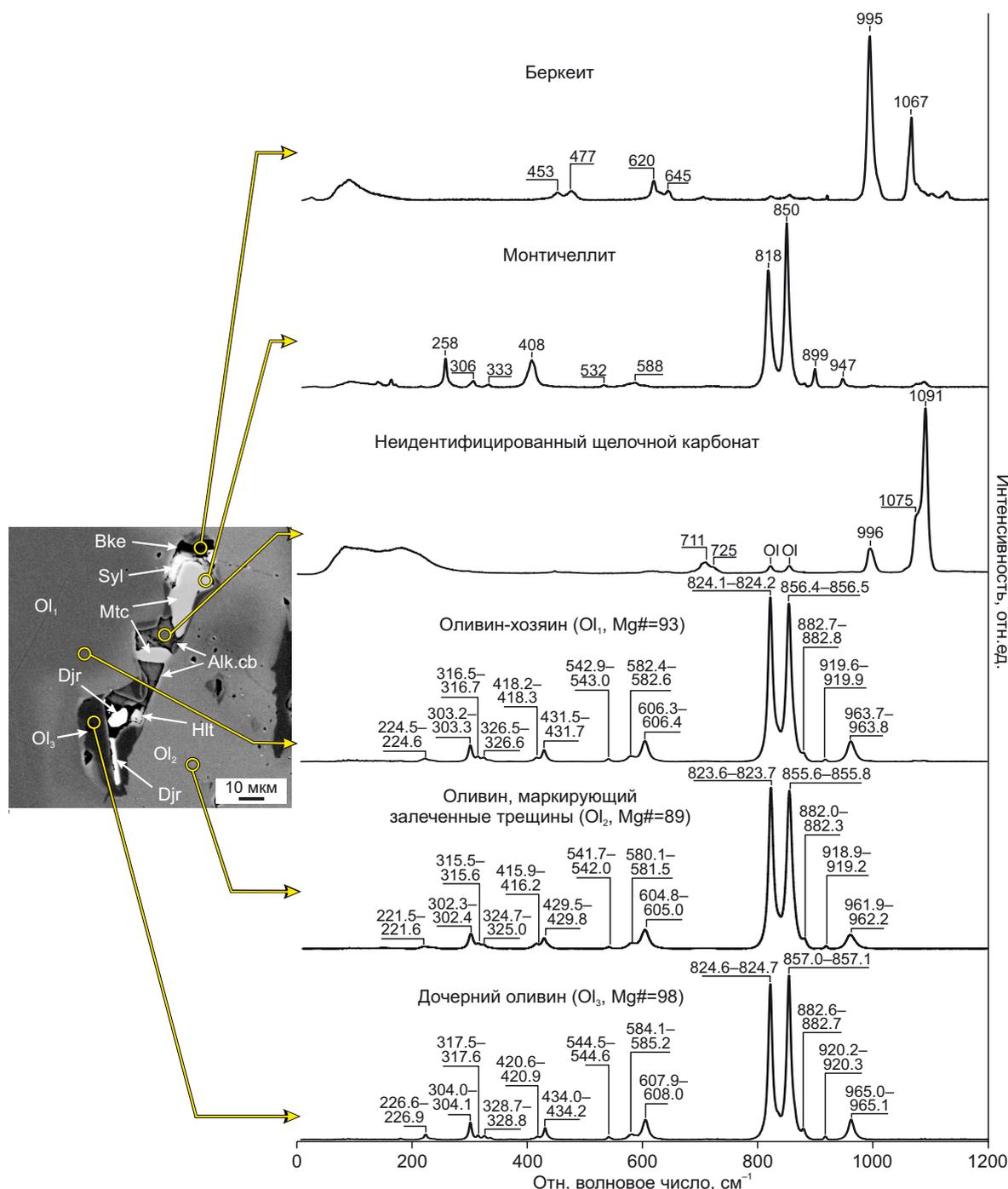


Рис. 8. BSE-изображение вторичного расплавленного включения в макрокристе оливина и КР-спектры дочерних минералов этого включения, оливина-хозяина (Ol₁) и оливина, маркирующего залеченные трещины (Ol₂).

Желтыми кружками на BSE-изображении отмечены области набора соответствующих КР-спектров. Надписями «Ol» на КР-спектре неидентифицированного щелочного карбоната отмечены линии оливина. Ol₁ – оливин ядер макрокристов; Ol₂ – оливин второй генерации, Ol₃ – экстремально магнизальный дочерний оливин, Mtc – монтичеллит, Alk.cb – неидентифицированный щелочной карбонат, Mag – магнетит, Hlt – галит, Syl – сylvite, Djr – джерфишерит.

Fig. 8. BSE image of a secondary melt inclusion in olivine macrocryst and the Raman spectra of the daughter minerals of this inclusion, host olivine (Ol₁) and olivine marking healed cracks with melt inclusions (Ol₂).

The yellow circles on the BSE image indicate the Raman-spectra gathering areas. "Ol" marks bands of olivine on the Raman spectrum of unidentified alkaline carbonate. Ol₁ – macrocrysts core olivine; Ol₂ – olivine of the second generation, Ol₃ – extreme-Mg daughter olivine, Mtc – monticellite, Alk.cb – unidentified alkaline carbonate, Mag – magnetite, Hlt – halite, Syl – sylvite, Djr – djerfisherite.

различными генерациями оливина позволили установить, что формирование включений и экстремально магнезиального оливина происходило в ходе последовательного протекания таких процессов, как: (1) растрескивание зерен оливина (Ol_1) в присутствии расплава (расплав 1), в котором оливин (Ol_1) имел ограниченную растворимость; (2) инфильтрация расплава 1 в трещины; (3) частичное растворение Ol_1 в расплаве 1, формирование гибридного расплава (расплав 2), насыщенного этим минералом; (4) кристаллизация новой генерации оливина (Ol_2) из гибридного расплава (расплав 2) на стенках трещин (залечивание трещин), изменение состава расплава 2 до расплава 3, разделение (расшнуровывание) расплава 3 на ограниченные изолированные объемы – расплавные включения; (5) кристаллизация экстремально магнезиального дочернего оливина и других дочерних фаз включений из расплава 3 при дальнейшем понижении температуры.

Время формирования расплавных включений может быть установлено достаточно точно. С одной стороны, оливин характеризуется высокими скоростями диффузии ионов Mg^{2+} и Fe^{2+} при мантийных температурах и давлениях, поэтому различия химического состава между оливином первой и второй генерации не могли сохраниться в течение долгого промежутка времени при условиях литосферной мантии Земли. Следовательно, формирование расплавных включений и Ol_2 тесно связано по времени с этапом кимберлитового магматизма, который впоследствии сформировал трубку Удачная-Восточная. О частичном диффузионном уравнивании между Ol_1 и Ol_2 свидетельствуют сглаженные формы профилей изменения магнезиальности на границах этих двух генераций оливина (см. рис. 6). Математическое моделирование показывает, что такие сглаженные формы профилей могли сформироваться из-за диффузии магния и железа при P-T- fO_2 параметрах, характерных для поднимающейся кимберлитовой магмы трубки Удачная-Восточная (T 900–1300 °C, P 0.1–7.0 ГПа, $\log(fO_2)$ –4...–8 лог. ед. [Casetta et al., 2023]), в промежуток времени от девяти дней до трех месяцев. С другой стороны, залеченные трещины, маркированные цепочками расплавных включений и Ol_2 , не пересекают внешние каймы макрокристов оливина (Ol_1) (см. рис. 2), следовательно, формирование трещин в ядрах макрокристов происходило раньше, чем кристаллизация оливина этих кайм (наиболее ранняя генерация оливина, которая кристаллизовалась из кимберлитового расплава после попадания данного зерна в магму).

Для объяснения формирования расплавных включений в ксеногенном оливине (Ol_1) могут быть использованы три модели: (1) включения формируются *in situ* в мантии, когда Ol_1 является частью мантийной породы, при инфильтрации порций кимберлитовых или протокимберлитовых расплавов непосредственно из источника их генерации незадолго до импульса кимберлитового магматизма, приведшего впоследствии к формированию трубки [Golovin et al., 2018]; (2) вклю-

чения формируются *in situ* в мантии и представляют собой реликты расплавов нереализовавшихся кимберлитовых интрузий [Giuliani et al., 2023]; (3) включения формируются после попадания ксенолита в кимберлитовую магму из-за декомпрессионного растрескивания кристаллов оливина. Этот процесс может происходить как до дезинтеграции мантийного ксенолита на отдельные зерна, так и после. Численное моделирование показывает, что при скорости подъема, характерной для кимберлитовых магм (от 0.1 и 20 м/с), оливин мантийных ксенолитов растрескивается через 17–19 км после захвата ксенолита кимберлитовой магмой вне зависимости от того, находится он в составе ксенолита или нет [Brett et al., 2015]. Согласно любой из трех моделей вторичные расплавные включения сформировались в короткий промежуток времени до или после попадания мантийного ксенолита в кимберлитовую магму на мантийном уровне и представляют собой реликты мантийного кимберлитового расплава.

Следует отметить, что аналогичные изученным в данной работе вторичные расплавные включения ранее описаны в ядрах ксенокристов и фенокристов оливина из кимберлитов трубки Удачная-Восточная [Golovin et al., 2003, 2007, 2017; Kamenetsky M.B. et al., 2004; Mernagh et al., 2011; Abersteiner et al., 2018a] и других кимберлитов мира [Golovin, Kamenetsky, 2023, и ссылки в данной работе], а также в зернах оливина мантийных ксенолитов из различных кимберлитовых проявлений мира [Golovin et al., 2017, 2018, 2020, 2023; Sharygin et al., 2021, 2022; Khan et al., 2024; Tarasov et al., 2022]. Однако во всех этих работах составам оливина, маркирующего залеченные трещины, и дочернего оливина расплавных включений практически не уделялось какого-либо внимания. Только в работе [Golovin et al., 2003] были опубликованы результаты единичных анализов дочернего оливина без интерпретации высоких значений магнезиальности.

Происхождение дочернего оливина расплавных включений (Ol_2). Построенные профили изменения магнезиальности (см. рис. 6) показывают, что на границах между дочерним оливином расплавных включений (Ol_2), оливином залеченных трещин (Ol_2) и оливином ядер макрокристов (Ol_1) отсутствуют какие-либо зоны, оливин в которых имеет промежуточные значения магнезиальности (зоны диффузионного уравнивания), в отличие от границ Ol_2 с Ol_1 , где такие зоны присутствуют и профили изменения магнезиальности имеют сглаженные формы (см. рис. 6). Отсутствие зон диффузионного уравнивания на границах Ol_2 свидетельствует об относительно низких температурах формирования этой генерации и/или о коротких временах присутствия Ol_2 при относительно высоких температурах. В любом случае сравнение распределений магнезиальности на границах различных генераций оливина, как и взаимоотношения между этими генерациями, свидетельствует о том, что экстремально магнезиальный Ol_2 является более поздней генерацией,

чем Ol_2 . То есть раскристаллизация гибридного расплава включений (расплав 3) и формирование Ol_3 происходили при более низких P-T-параметрах по сравнению с теми, при которых происходило формирование этих включений и кристаллизация Ol_2 .

Причины высокой магнезиальности дочернего оливина Ol_3 . Причиной высоких значений магнезиальности дочернего оливина расплавных включений может служить низкая активность кремнезема и высокая фугитивность кислорода в гибридном расплаве включений (расплав 3), которые смещают равновесие в следующей реакции: $3Fe_2SiO_4$ (фаялит) + $O_2 = 2FeFe_2O_4$ (магнетит) + $3SiO_2$ (в расплав) [Bell et al., 2024] (1) в сторону продуктов реакции. В результате протекания этой реакции фаялитовая компонента оливина расходуется на формирование дочернего магнетита, а из растворившейся магнезиальной компоненты впоследствии формируется экстремально магнезиальный оливин. Кроме того, высокая активность серы может вызывать перераспределение двухвалентного железа из фаялитовой компонента оливина в сульфидную фазу расплавных включений (джерфшерит, $K_6(Fe,Cu,Ni)_{25}S_{26}Cl$), что ведет к повышению магнезиальности оливина [Plechov et al., 2018]. О возможности увеличения магнезиальности оливина при его совместной кристаллизации с джерфшеритом свидетельствуют находки джерфшерита в экстремально магнезиальном оливине кайм кристаллов оливина из изученного образца

(рис. 9). Низкие содержания NiO в дочернем оливине (≤ 0.04 мас. %) изученных расплавных включений могут также быть объяснены перераспределением этого элемента в сульфидную фазу [Li, Audéat, 2015], что косвенно свидетельствует о возможности перераспределения FeO в сульфидные фазы из-за высокой активности сульфидной серы в расплаве. Кроме того, формирование экстремально магнезиального оливина (Mg 98.8–98.9) в карбонатах щелочного комплекса Ока (Канада) было объяснено реакцией фаялитовой компоненты оливина с серой в ходе следующей реакции: $4Fe_2SiO_4$ (фаялит) + $S_2 = 2FeFe_2O_4$ (магнетит) + $2FeS$ (пирротин) + $4SiO_2$ (в расплав) [Treiman, Essene, 1984] (2). Также экстремально магнезиальный оливин (Mg 99.6) в ассоциации с пирротинном, кальцитом и магнетитом широко распространен в магнезиальных скарнах и кальцифирах мира, например в породах месторождения Кухилал (Памир, Таджикистан) [Plechov et al., 2018]. Вероятно, реакция, подобная реакции 2 с участием джерфшерита, приводила к формированию экстремально магнезиального дочернего оливина в изученных расплавных включениях. Таким образом, высокие значения магнезиальности дочернего оливина расплавных включений обусловлены комбинацией следующих характеристик расплава включений, а именно высокой фугитивностью кислорода, высокой активностью серы и низкой активностью кремнезема в гибридном расплаве, из которого кристаллизовался дочерний оливин.

Подобная высокая фугитивность кислорода и низкая активность кремнезема предполагаются для проэволюционировавших кимберлитовых расплавов и используются для объяснения формирования тонких внешних кайм экстремально магнезиального оливина в зернах оливина из различных кимберлитов мира [Pilbeam et al., 2013; Bussweiler et al., 2015; Howarth, Taylor, 2016]. Обнаружение экстремально магнезиального оливина среди дочерних минералов расплавных включений в ассоциации с кальцитом и щелочными карбонатами напрямую свидетельствует о возможности кристаллизации почти чистого форстерита из щелочного карбонатного или силикатно-карбонатного расплава, что подтверждает модель карбонатных составов поздних проэволюционировавших кимберлитовых жидкостей. Кроме того, проведенные исследования указывают на то, что такие карбонатные расплавы могли иметь щелочную натровую спецификацию.

Еще одним свидетельством возможности кристаллизации экстремально магнезиального оливина из щелочного карбонатного расплава является состав основной массы изученного несерпентинизированного кимберлита. Среди минералов основной массы изученного кимберлита установлены различные Na-Ca-K карбонаты, кальцит, галит, сильвин, афтиталит, апатит, монтичеллит, флогопит, шпинелиды и перовскит. Соотношения между этими минералами и структурные особенности основной массы изученного кимберлита свидетельствуют о том, что расплав, из которого

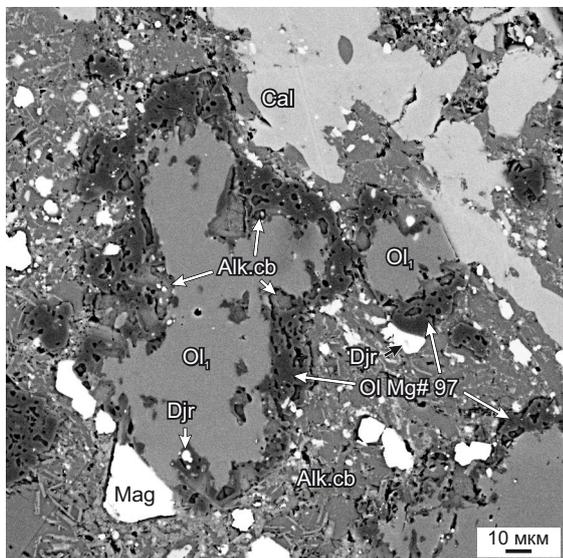


Рис. 9. Кайма экстремально магнезиального оливина (Ol Mg#97) вокруг кристалла оливина основной массы (Ol_1) с включениями щелочного карбоната (Alk.cb) и джерфшерита (Djr) и в сростании с магнетитом (Mag). Основная масса кимберлита, помимо оливина, содержит щелочной карбонат (Alk.cb) и кальцит (Cal).

Fig. 9. Extremely magnesian olivine (Ol Mg#97) rim around a groundmass olivine (Ol_1) crystal with inclusions of alkaline carbonate (Alk.cb) and djerfisherite (Djr) intergrowth with magnetite (Mag). Besides olivine, the kimberlite groundmass contains alkaline carbonate (Alk.cb) and calcite.

кристаллизовалась основная масса, имел щелочной карбонатный состав. Тонкие внешние каймы кристаллов оливина, имеющие магнезиальность 97–98, находятся в контакте с щелочными карбонатами и кальцием основной массы (рис. 9). Следовательно, тонкие каймы почти чистого форстерита кристаллизовались из проэволюционировавшего кимберлитового расплава щелочного карбонатного состава.

Низкие концентрации воды, как и некоторые другие особенности изученного кимберлита из трубки Удачная-Восточная, свидетельствуют о том, что эта порода никогда не была затронута процессами вторичных гидротермальных изменений (серпентинизация) [Abersteiner et al., 2018a]. Это однозначно указывает на то, что экстремально магнезиальный оливин может формироваться без участия гидротермальных флюидов, приводящих к серпентинизации кимберлитов, как предполагалось в работе [Soltys et al., 2020].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных исследований можно сформулировать следующим образом.

1. Процессы формирования вторичных расплавных включений и оливина второй генерации, маркирующих залеченные трещины в ядрах макрокристов когерентного несерпентинизированного кимберлита трубки Удачная-Восточная, происходили на мантийном уровне и тесно связаны по времени с этапом кимберлитового магматизма, который впоследствии привел к формированию этого кимберлитового проявления.

2. После кристаллизации оливина, маркирующего залеченные трещины, и образования вторичных расплавных включений из гибридного расплава формировался экстремально магнезиальный (Mg# 97–98) дочерний оливин расплавных включений при более низких РТ-параметрах.

3. Ассоциация экстремально магнезиального оливина с щелочными карбонатами и кальцитом в расплавных включениях указывает на возможность формирования оливина такого состава при кристаллизации щелочного карбонатного расплава. Это подтверждает модель формирования экстремально магнезиального оливина в каймах зерен оливина из различных кимберлитов мира за счет кристаллизации проэволюционировавших кимберлитовых расплавов карбонатного состава [Pilbeam et al., 2013; Bussweiler et al., 2015; Howarth, Taylor, 2016].

4. Высокие значения магнезиальности дочернего оливина расплавных включений связаны с такими особенностями состава щелочного карбонатного или силикатно-карбонатного гибридного расплава включений, как высокая фугитивность кислорода, высокая активность серы и низкая активность кремнезема.

5. Присутствие экстремально магнезиального оливина в неизмененных кимберлитах трубки Удачная-Восточная не согласуется с моделью формирования такого оливина за счет флюидов, связанных с серпентинизацией кимберлитов [Soltys et al., 2020].

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Е.Н. Нигматулиной и Н.С. Карманову за помощь в проведении аналитических работ.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Both authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

Both authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Goemann K., Golovin A., Kamenetsky M., 2022. Olivine in Kimberlites: Magma Evolution from Deep Mantle to Eruption. *Journal of Petrology* 63 (7), egac055. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac055>.

Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Golovin A., Goemann K., Ehrig K., 2021. Dissolution of Mantle Orthopyroxene in Kimberlitic Melts: Petrographic, Geochemical and Melt Inclusion Constraints from an Orthopyroxenite Xenolith from the Udachnaya-East Kimberlite (Siberian Craton, Russia). *Lithos* 398–399, 106331. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106331>.

Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Golovin A.V., Kamenetsky M., Goemann K., 2018b. Was Crustal Contamination Involved in the Formation of the Serpentine-Free Udachnaya-East Kimberlite? New Insights into Parental Melts, Liquidus Assemblage and Effects of Alteration. *Journal of Petrology* 59 (8), 1467–1492. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy068>.

Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Pearson D.G., Kamenetsky M., Goemann K., Ehrig K., Rodemann T., 2018a. Monticellite in Group-I Kimberlites: Implications for Evolution of Parental Melts and Post-Emplacement CO₂ Degassing. *Chemical Geology* 478, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.06.037>.

Bell A.S., Waters L., Ghiorso M., 2024. The Olivine-Spinel- $\alpha_{\text{SiO}_2}^{\text{melt}}$ (OSaS) Oxybarometer: A New Method for Evaluating Magmatic Oxygen Fugacity in Olivine-Phyric Basalts. *American Mineralogist*. <https://doi.org/10.2138/am-2023-9021>.

Brett R.C., Russell J.K., Andrews G.D.M., Jones T.J., 2015. The Ascent of Kimberlite: Insights from Olivine. *Earth and Planetary Science Letters* 424, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.05.024>.

Brett R.C., Russell J.K., Moss S., 2009. Origin of Olivine in Kimberlite: Phenocryst or Impostor? *Lithos* 112 (1), 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.030>.

Busweiler Y., Foley S.F., Prelević D., Jacob D.E., 2015. The Olivine Macrocryst Problem: New Insights from Minor and Trace Element Compositions of Olivine from Lac de Gras Kimberlites, Canada. *Lithos* 220–223, 238–252. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.016>.

Casetta F., Asenbaum R., Ashchepkov I., Abart R., Ntaflou T., 2023. Mantle-Derived Cargo vs Liquid Line of Descent: Reconstructing the P-T-fO₂-X Path of the Udachnaya-East Kimberlite Melts during Ascent in the Siberian Sub-Cratonic Lithosphere. *Journal of Petrology* 64 (1), egac122. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac122>.

Cnopras A., 1991. Single Crystal Raman Spectra of Forsterite, Fayalite, and Monticellite. *American Mineralogist* 76 (7–8), 1101–1109.

Fedortchouk Y., Canil D., 2004. Intensive Variables in Kimberlite Magmas, Lac de Gras, Canada and Implications for Diamond Survival. *Journal of Petrology* 45 (9), 1725–1745. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh031>.

Ganguly J., 2002. Diffusion Kinetics in Minerals: Principles and Applications to Tectono-Metamorphic Processes. In: C.M. Gramaccioli (Ed.), *Energy Modelling in Minerals*. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. <https://doi.org/10.1180/EMU-notes.4.9>.

Giuliani A., 2018. Insights into Kimberlite Petrogenesis and Mantle Metasomatism from a Review of the Compositional Zoning of Olivine in Kimberlites Worldwide. *Lithos* 312–313, 322–342. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.04.029>.

Giuliani A., Schmidt M.W., Torsvik T.H., Fedortchouk Y., 2023. Genesis and Evolution of Kimberlites. *Nature Reviews Earth & Environment* 4, 738–753. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00481-2>.

Golovin A.V., Kamenetsky V.S., 2023. Compositions of Kimberlite Melts: A Review of Melt Inclusions in Kimberlite Minerals. *Petrology* 31, 143–178. <https://doi.org/10.1134/S0869591123020030>.

Golovin A.V., Sharygin I.S., Kamenetsky V.S., Korsakov A.V., Yaxley G.M., 2018. Alkali-Carbonate Melts from the Base of Cratonic Lithospheric Mantle: Links to Kimberlites. *Chemical Geology* 483, 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.02.016>.

Golovin A.V., Sharygin I.S., Korsakov A.V., 2017. Origin of Alkaline Carbonates in Kimberlites of the Siberian Craton: Evidence from Melt Inclusions in Mantle Olivine of the Udachnaya-East Pipe. *Chemical Geology* 455, 357–375. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.10.036>.

Golovin A.V., Sharygin I.S., Korsakov A.V., Kamenetsky V.S., Abersteiner A., 2020. Can Primitive Kimberlite Melts Be Alkali-Carbonate Liquids: Composition of the Melt Snapshots Preserved in Deepest Mantle Xenoliths. *Journal of Raman Spectroscopy* 51 (9), 1849–1867. <https://doi.org/10.1002/jrs.5701>.

Golovin A.V., Sharygin V.V., Pokhilenko N.P., 2007. Melt Inclusions in Olivine Phenocrysts in Unaltered Kimberlites from the Udachnaya-East Pipe, Yakutia: Some Aspects of Kimberlite Magma Evolution During Late Crystallization Stages. *Petrology* 15, 168–183. <https://doi.org/10.1134/S086959110702004X>.

Golovin A.V., Sharygin V.V., Pokhilenko N.P., Mal'kovets V.G., Kolesov B.A., Sobolev N.V., 2003. Secondary Melt Inclusions in Olivine from Unaltered Kimberlites of the Udachnaya-East Pipe, Yakutia. *Doklady Earth Sciences* 388 (1), 93–96.

Golovin A.V., Tarasov A.A., Agasheva E.V., 2023. Mineral Assemblage of Olivine-Hosted Melt Inclusions in a Mantle Xenolith from the V. Grib Kimberlite Pipe: Direct Evidence for the Presence of an Alkali-Rich Carbonate Melt in the Mantle beneath the Baltic Super-Craton. *Minerals* 13 (5), 645. <https://doi.org/10.3390/min13050645>.

Howarth G.H., Taylor L.A., 2016. Multi-Stage Kimberlite Evolution Tracked in Zoned Olivine from the Benfontein Sill, South Africa. *Lithos* 262, 384–397. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.028>.

Jaoul O., Bertran-Alvarez Y., Liebermann R.C., Price G.D., 1995. Fe-Mg Interdiffusion in Olivine up to 9 GPa at T=600–900 °C; Experimental Data and Comparison with Defect Calculations. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 89 (3–4), 199–218. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)03008-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)03008-7).

Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Kamenetsky V.S., Maas R., Danyushevsky L.V., Thomas R., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., 2004. Kimberlite Melts Rich in Alkali Chlorides and Carbonates: A Potent Metasomatic Agent in the Mantle. *Geology* 32 (10), 845–848. <https://doi.org/10.1130/G20821.1>.

Kamenetsky V.S., Golovin A.V., Maas R., Giuliani A., Kamenetsky M.B., Weiss Ya., 2014. Towards a New Model for Kimberlite Petrogenesis: Evidence from Unaltered Kimberlites and Mantle Minerals. *Earth-Science Reviews* 139, 145–167. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.004>.

Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Golovin A.V., Sharygin V.V., Maas R., 2012. Ultrafresh Salty Kimberlite of the Udachnaya – East Pipe (Yakutia, Russia): A Petrological Oddity or Fortuitous Discovery? *Lithos* 152, 173–186. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.032>.

Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Golovin A.V., Demouchy S., Faure K., Sharygin V.V., Kuzmin D.V., 2008. Olivine in the Udachnaya-East Kimberlite (Yakutia, Russia): Types, Compositions and Origins. *Journal of Petrology* 49 (4), 823–839. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm033>.

Khan S., Fedortchouk Ya., Feichter M., Toth T.M., 2024. Confocal Raman Spectroscopic Study of Melt Inclusions from Peridotite Xenoliths in Economic and Barren Kimberlites from Kaapvaal Craton. *Journal of Raman Spectroscopy*. <https://doi.org/10.1002/jrs.6709>.

Kolesov B.A., Geiger C.A., 2004. A Raman Spectroscopic Study of Fe-Mg Olivines. *Physics and Chemistry of Minerals* 31, 142–154. <https://doi.org/10.1007/s00269-003-0370-y>.

Le Maitre R.W. (Ed.), 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press, Cambridge, 251 p. <https://doi.org/10.1017/CB09780511535581>.

Li Y., Audétat A., 2015. Effects of Temperature, Silicate Melt Composition, and Oxygen Fugacity on the Partitioning of V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Sn, Sb, W, Au, Pb, and

Bi between Sulfide Phases and Silicate Melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 162, 25–45. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.04.036>.

Lim E., Giuliani A., Phillips D., Goemann K., 2018. Origin of Complex Zoning in Olivine from Diverse, Diamondiferous Kimberlites and Tectonic Settings: Ekati (Canada), Alto Paranaíba (Brazil) and Kaalvallei (South Africa). *Mineralogy and Petrology* 112, 539–554. <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0607-6>.

Mernagh T.P., Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., 2011. A Raman Microprobe Study of Melt Inclusions in Kimberlites from Siberia, Canada, SW Greenland and South Africa. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 80 (1), 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.01.034>.

Patterson M., Francis D., McCandless T., 2009. Kimberlites: Magmas or Mixtures? *Lithos* 112, 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.004>.

Pilbeam L.H., Nielsen T.F.D., Waight T.E., 2013. Digestion Fractional Crystallization (DFC): An Important Process in the Genesis of Kimberlites. Evidence from Olivine in the Majuagaa Kimberlite, Southern West Greenland. *Journal of Petrology* 54 (7), 1399–1425. <https://doi.org/10.1093/petrology/egt016>.

Plechov P.Y., Shcherbakov V.D., Nekrylov N.A., 2018. Extremely Magnesian Olivine in Igneous Rocks. *Russian Geology and Geophysics* 59 (12), 1702–1717. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.12.012>.

Rezvukhin D.I., Alifirova T.A., Golovin A.V., Korsakov A.V., 2020. A Plethora of Epigenetic Minerals Reveals a Multistage Metasomatic Overprint of a Mantle Orthopyroxenite from the Udachnaya Kimberlite. *Minerals* 10 (3), 264. <https://doi.org/10.3390/min10030264>.

Sharygin I.S., Golovin A.V., Dymshits A.M., Kalugina A.D., Solovov K.A., Malkovets V.G., Pokhilenko N.P., 2021. Relics of Deep Alkali–Carbonate Melt in the Mantle Xenolith from the Komsomolskaya–Magnitnaya Kimberlite Pipe (Upper

Muna Field, Yakutia). *Doklady Earth Sciences* 500, 842–847. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21100147>.

Sharygin I.S., Golovin A.V., Tarasov A.A., Dymshits A.M., Kovaleva E., 2022. Confocal Raman Spectroscopic Study of Melt Inclusions in Olivine of Mantle Xenoliths from the Bultfontein Kimberlite Pipe (Kimberley Cluster, South Africa): Evidence for Alkali-Rich Carbonate Melt in the Mantle beneath Kaapvaal Craton. *Journal of Raman Spectroscopy* 53 (3), 508–524. <https://doi.org/10.1002/jrs.6198>.

Soltys A., Giuliani A., Phillips D., 2018. A New Approach to Reconstructing the Composition and Evolution of Kimberlite Melts: A Case Study of the Archetypal Bultfontein Kimberlite (Kimberley, South Africa). *Lithos* 304–307, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.01.027>.

Soltys A., Giuliani A., Phillips D., Kamenetsky V.S., 2020. Kimberlite Metasomatism of the Lithosphere and the Evolution of Olivine in Carbonate-Rich Melts – Evidence from the Kimberley Kimberlites (South Africa). *Journal of Petrology* 61 (6), ega062. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa062>.

Tarasov A.A., Golovin A.V., Sharygin I.S., 2022. Alkali-Containing Minerals within Melt Inclusions in Olivine of Mantle Xenoliths from Bultfontein Kimberlite Pipe (Kaapvaal Craton): Evidence on High Concentrations of Alkalis in Kimberlite Melts. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0662 (in Russian) [Тарасов А.А., Головин А.В., Шарыгин И.С. Щелочесодержащие минералы из расплавных включений в оливинах мантийных ксенолитов из кимберлитов трубки Булфонтейн (кратон Каапвааль): свидетельство высоких концентраций щелочей в кимберлитовых расплавах. *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13. № 4. 0662]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-4-0662>.

Treiman A.H., Essene E.J., 1984. A Periclase-Dolomite-Calcite Carbonatite from the Oka Complex, Quebec, and Its Calculated Volatile Composition. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 149, 149–157. <https://doi.org/10.1007/BF00371705>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Представительные анализы химического состава оливина различных генераций
Table 1.1. Representative analysis of chemical composition of various-generation olivine

	Зерно	SiO ₂	MgO	FeO	NiO	CaO	MnO	Cr ₂ O ₃	Сумма	Mg#
Ol ₁	1	41.38	51.04	7.25	0.346	0.023	0.094	0.022	100.16	92.6
	2	41.53	50.94	7.30	0.353	0.019	0.092	0.021	100.25	92.6
	3	40.59	46.23	13.19	0.246	0.023	0.178	0.011	100.46	86.2
	4	41.53	51.06	6.99	0.347	0.013	0.095	0.037	100.07	92.9
	5	41.89	51.19	6.79	0.347	0.012	0.094	0.040	100.35	93.1
	6	41.71	50.91	7.17	0.349	0.017	0.097	0.030	100.29	92.7
	7	41.11	49.14	9.90	0.304	0.015	0.145	0.017	100.62	89.8
	8	41.47	50.97	7.43	0.353	0.017	0.098	0.020	100.36	92.4
Ol ₂	1	40.82	48.18	10.75	0.304	0.033	0.126	0.035	100.25	88.9
	2	41.19	48.72	9.94	0.334	0.028	0.127	0.035	100.37	89.7
	3	40.79	47.87	11.07	0.283	0.032	0.145	0.039	100.23	88.5
	4	40.92	48.39	10.30	0.322	0.030	0.130	0.035	100.12	89.3
	5	41.33	48.83	9.47	0.335	0.022	0.128	0.028	100.15	90.2
	6	41.14	48.49	10.04	0.326	0.036	0.121	0.017	100.17	89.6
	7	40.82	47.69	11.60	0.251	0.047	0.164	0.019	100.59	88.0
	8	40.93	48.74	10.09	0.334	0.021	0.130	0.025	100.27	89.6
Ol ₃	1	42.54	55.51	2.08	0.024	0.161	0.352	0.003	100.67	97.9
	2	42.60	55.22	2.56	0.034	0.206	0.194	0.001	100.81	97.5
	3	42.51	55.59	2.31	0.027	0.147	0.304	0.001	100.89	97.7
	4	42.57	55.33	2.04	0.034	0.143	0.372	0.001	100.50	98.0
	5	42.70	55.11	2.22	0.036	0.126	0.327	0.002	100.52	97.8
	6	42.73	55.02	2.38	0.038	0.172	0.348	н.п.о.	100.69	97.6
	7	42.43	55.50	2.24	0.028	0.199	0.383	н.п.о.	100.79	97.8
	8	42.37	55.17	2.54	0.033	0.167	0.308	0.001	100.59	97.5

Примечание. Ol₁ – оливин ядер макрокристов (оливин-хозяин); Ol₂ – оливин второй генерации, маркирующий залеченные трещины с расплавленными включениями; Ol₃ – экстремально магниезильный дочерний оливин расплавленных включений. Mg#=100·MgO/(MgO+FeO) в мол. %. Зерно – номер изученного макрокриста. н.п.о. – ниже предела обнаружения.

Note. Ol₁ – macrocryst core olivine (host olivine); Ol₂ – olivine of the second generation, marking healed cracks with melt inclusions; Ol₃ – extreme-Mg daughter olivine of melt inclusions. Mg#=100·MgO/(MgO+FeO) mol. %. Grain is the number designation for the macrocryst studied. н.п.о. – below detection limit.