



**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**

A.A. Tarasov ^{1,2}, **A.V. Golovin** ¹, **I.S. Sharygin** ³✉

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

³ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. The study reports the mineral assemblage of the crystallized secondary melt inclusions in the olivine of sheared peridotites xenoliths from Bultfontein kimberlite pipe (Kaalpvaal Craton, South Africa). In this type of xenoliths, the inclusions may correspond in composition to primitive kimberlite melts related to the magmatism that formed the Bultfontein pipe. Among 32 daughter phases within the inclusions, there are both ordinary rock-forming and minor minerals for kimberlites (silicates, carbonates, oxides) and "exotic" (alkali carbonates, sulfates, and chlorides) for these rocks. In the inclusions, 20 alkali-containing minerals are present, 12 of which are Na-bearing and – 4 Na-K-bearing. For instance, the inclusions contain nyerereite, K-nyerereite, shortite, gregoryite, eitelite, bradleyite, northupite, tychite, burkeite, apthitalite, arcanite, thenardite, sylvine, and halite. On the basis of these results, the kimberlite melt of the Bultfontein pipe had Na-specification rather than Ca or K ones. The carbonates, sulfates, and chlorides significantly prevail over silicates, which content (serpentine + micas) does not exceed 16 vol. %, in the inclusions.

The obtained results pose fundamental questions regarding the petrogenesis of kimberlites: (i) initial sodium concentrations in kimberlite melts and rocks, which are "traditionally" considered as very low; (ii) composition and ratio of volatile components in kimberlite magmas, namely, the initial contents of both CO₂ and the components such as Cl, SO₃ and H₂O; (iii) primary magmatic mineral association of kimberlite rocks, which loses diverse alkali-containing minerals, but mica, due to serpentinization process.

KEYWORDS: mantle xenoliths; kimberlites; melt inclusions; alkali carbonates; composition of primitive melts

FUNDING: The study was carried out as part of state assignment of IGM SB RAS and IEC SB RAS and with financial support from RFBR (project 20-35-70058). We used equipment of the Analytical Center for Multi-Elemental and Isotope Research SB RAS (IGM SB RAS) and the Shared Research Facilities "Geodynamics and Geochronology" at the IEC SB RAS (grant 075-15-2021-682).

SHORT COMMUNICATION

Received: June 15, 2022

Revised: August 25, 2022

Correspondence: Igor S. Sharygin, isharygin@crust.irk.ru

Accepted: September 12, 2022

FOR CITATION: 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 (Kaalpvaal Craton): Evidence on High Concentrations of Alkalis in Kimberlite Melts. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0662. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0662

ЩЕЛОЧЕСОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ ИЗ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ОЛИВИНАХ МАНТИЙНЫХ КСЕНОЛИТОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ ТРУБКИ БУЛТФОНТЕЙН (КРАТОН КААПВААЛЬ): СВИДЕТЕЛЬСТВО ВЫСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЩЕЛОЧЕЙ В КИМБЕРЛИТОВЫХ РАСПЛАВАХ

А.А. Тарасов^{1,2}, А.В. Головин¹, И.С. Шарыгин³

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

³ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АННОТАЦИЯ. Приведены результаты изучения дочерней минеральной ассоциации вторичных раскристаллизованных расплавных включений в оливинах ксенолитов деформированных перидотитов из кимберлитов трубки Булфонтейн (кратон Каапвааль, Южная Африка). Включения в таком типе ксенолитов по составу могут соответствовать примитивным кимберлитовым жидкостям, непосредственно связанным с магматизмом, сформировавшим трубку Булфонтейн. Среди 32 идентифицированных во включениях дочерних фаз были выявлены как обычные породообразующие и второстепенные для кимберлитов минералы (силикаты, карбонаты, оксиды), так и «экзотические» для этих пород щелочные карбонаты, сульфаты и хлориды. Во включениях диагностировано 20 щелочесодержащих минералов, из которых 12 являются Na-содержащими и 4 – Na-K-содержащими. В частности, во включениях присутствуют ньеререйт, К-ньеререйт, шортит, грегориит, зйтелит, брэдлиит, нортупит, тихит, беркейт, афтиталит, арканит, тенардит, сильвин и галит. Согласно полученным результатам, кимберлитовый расплав трубки Булфонтейн, вероятно, имел Na-спецификацию, а не Ca или K. Карбонаты, сульфаты и хлориды существенно преобладают над силикатами во включениях, содержание которых (серпентин + слюды) не превышает 16 об. %.

Полученные результаты ставят ряд фундаментальных вопросов в отношении петрогенезиса кимберлитов, в том числе: 1) о первоначальных концентрациях натрия как в кимберлитовых расплавах, так и в породах, которые «традиционно» считаются очень низкими; 2) о составе и соотношении летучих компонентов в кимберлитовых магмах, а именно о первоначальных содержаниях не только CO₂, но и таких компонентов, как Cl, SO₃ и H₂O; 3) о первично-магматической минеральной ассоциации кимберлитовых пород, которая в результате серпентинизации, за исключением слюд, теряет подавляющую часть щелочесодержащих минералов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мантийные ксенолиты; кимберлиты; расплавные включения; щелочные карбонаты; состав примитивных расплавов

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено по государственному заданию ИГМ СО РАН и ИЗК СО РАН и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-35-70058). В работе задействовано оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682 и ЦКП «Многоэлементных и изотопных исследований» ИГМ СО РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных нерешенных проблем петрогенезиса кимберлитов является определение вариаций первичного/примитивного состава кимберлитовых расплавов и трендов их эволюции при подъеме к поверхности. Для оценки состава таких расплавов обычно используется два подхода. В первом, «традиционном», валовый состав кимберлитовых пород отождествляется с составом кимберлитовых жидкостей. Согласно этому подходу, примитивные кимберлитовые расплавы являлись ультраосновными, преимущественно магнезиально-силикатными жидкостями с высоким содержанием H₂O и CO₂ [Mitchell et al., 2019]. Второй подход основан на масс-балансовых расчетах количества ксеногенных силикатов в кимберлитах и объемах растворения этих силикатов в кимберлитовых магмах. В этих двух подходах подразумевается, что в кимберлитовых расплавах концентрации элементов уменьшаются в

следующей последовательности: Ca >> K >> Na. Следует отметить, что в большинстве кимберлитов мира калий (K₂O ≤ 3.0 мас. %) преобладает над натрием (≤ 0.5 мас. % Na₂O) [Mitchell et al., 2019], однако в несерпентинизированных разновидностях кимберлитов трубки Удачная-Восточная (Сибирский кратон) натрий доминирует среди щелочей [Kamenetsky et al., 2012]. Так как кимберлиты практически повсеместно подвергаются вторичным изменениям, возникает вопрос, является ли оценка содержания щелочей в примитивных/первичных кимберлитовых расплавах корректной.

Альтернативный подход к реконструкции составов первичных/примитивных кимберлитовых расплавов заключается в изучении расплавных включений (микроразделов законсервированных расплавов) в минералах кимберлитов и мантийных ксенолитов из этих пород [Giuliani et al., 2017; Golovin et al., 2018, 2020]. Объектом изучения настоящей работы являлись ксенолиты

деформированных перидотитов из кимберлитов трубки Булфонтейн (кратон Каапвааль). Считается, что такой тип мантийных пород является одним из наиболее глубоких и располагается в мантийном разрезе вблизи границы литосферы с астеносферой [Liu et al., 2022]. Некоторые особенности микроструктур деформированных перидотитов свидетельствуют о том, что пластические деформации произошли незадолго до их попадания в кимберлитовую магму [Mercier, 1979], поэтому вторичные включения в минералах таких ксенолитов должны быть связаны непосредственно с кимберлитовым магматизмом. Изучение ассоциации дочерних минералов в раскристаллизованных вторичных расплавных включениях в оливине ксенолитов деформированных перидотитов и, соответственно, оценка содержаний щелочей в кимберлитовом расплаве трубки Булфонтейн являлись основной целью данной работы.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Изображения в отраженных электронах (BSE) введенные на поверхность расплавных включений и химические анализы дочерних минералов получены на сканирующем электронном микроскопе Tescan MIRA3

LMU с энергодисперсионной системой микроанализа Aztec Energy X-Max 50+ в ИГМ СО РАН.

Идентификация дочерних минералов включений также проводилась методом Рамановской спектроскопии на Horiba Jobin Yvon LabRAM HR800 с 532-нм Nd:YAG лазером в ИГМ СО РАН и WITec alpha 300R (WITec GmbH) с 532-нм Nd:YAG лазером в ИЗК СО РАН.

Химические анализы породообразующих минералов ксенолитов были проведены на рентгеноспектральном микроанализаторе Jeol JXA-8230 в ИГМ СО РАН.

В работе использовалась коллекция из пяти образцов, среди которых по два гранатовых лерцолита и гарцбургита и один шпинелевый лерцолит. По данным термобарометрии [Nickel, Green, 1985; Taylor, 1998], P-T-параметры последнего минерального равновесия ксенолитов составляют 895–1112 °C и 3.8–4.9 ГПа, что соответствует глубинам 120–152 км.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Зерна оливина содержат многочисленные залеченные трещины, в которых располагаются группы вторичных расплавных включений (рис. 1, а). Визуально включения состоят из дочерних минералов и пузырьков усадки. Криометрические и Раман-спектроскопические

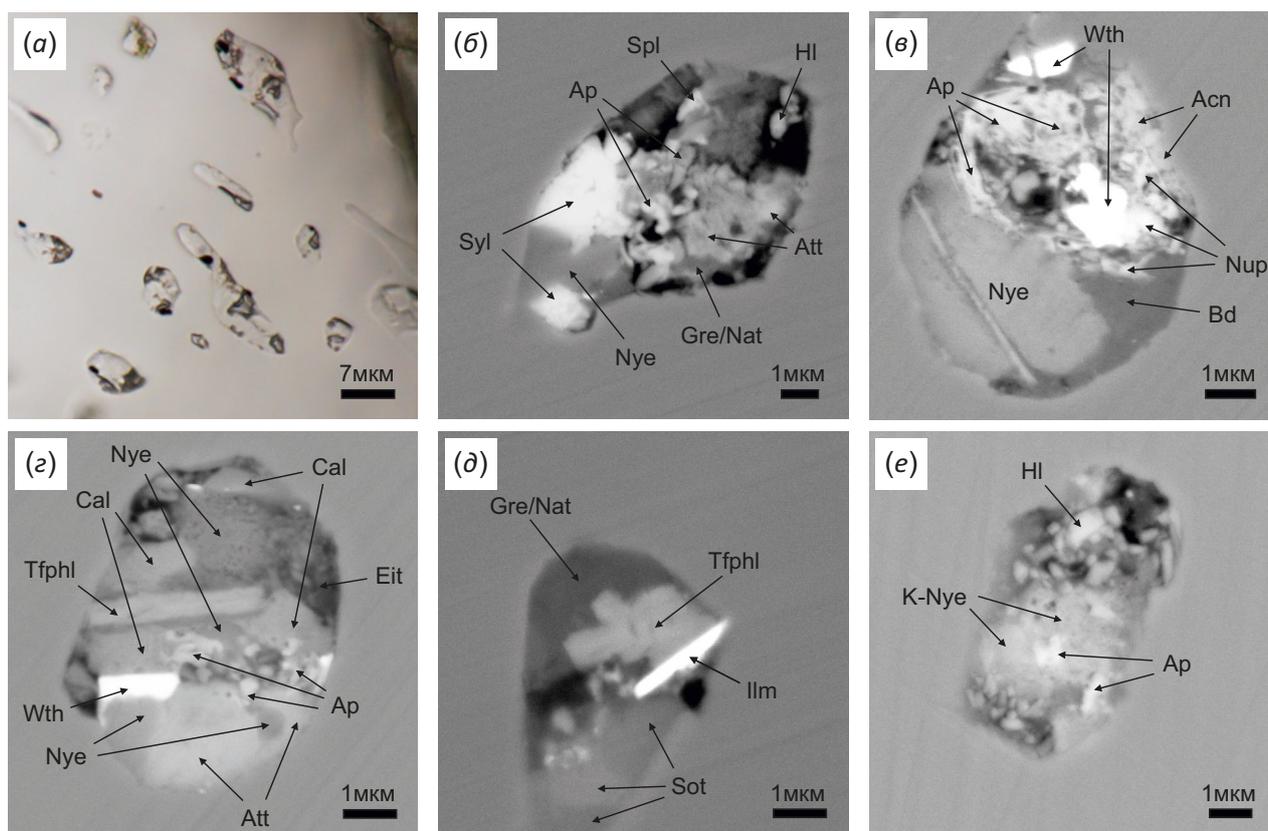


Рис. 1. Вторичные расплавные включения в оливине деформированных перидотитов из трубки Булфонтейн.

(а) – фотография группы вторичных расплавных включений в проходящем свете; (б–е) – BSE-изображения индивидуальных вскрытых расплавных включений. Аббревиатура минералов приведена согласно табл. 1.

Fig. 1. The secondary melt inclusions in olivine of the sheared peridotites from the Bultfontein pipe.

(а) – cluster of the secondary melt inclusions in transmitted light; (б–е) – backscattered electron images of individual exposed melt inclusions. Mineral symbols are same as in Table 1.

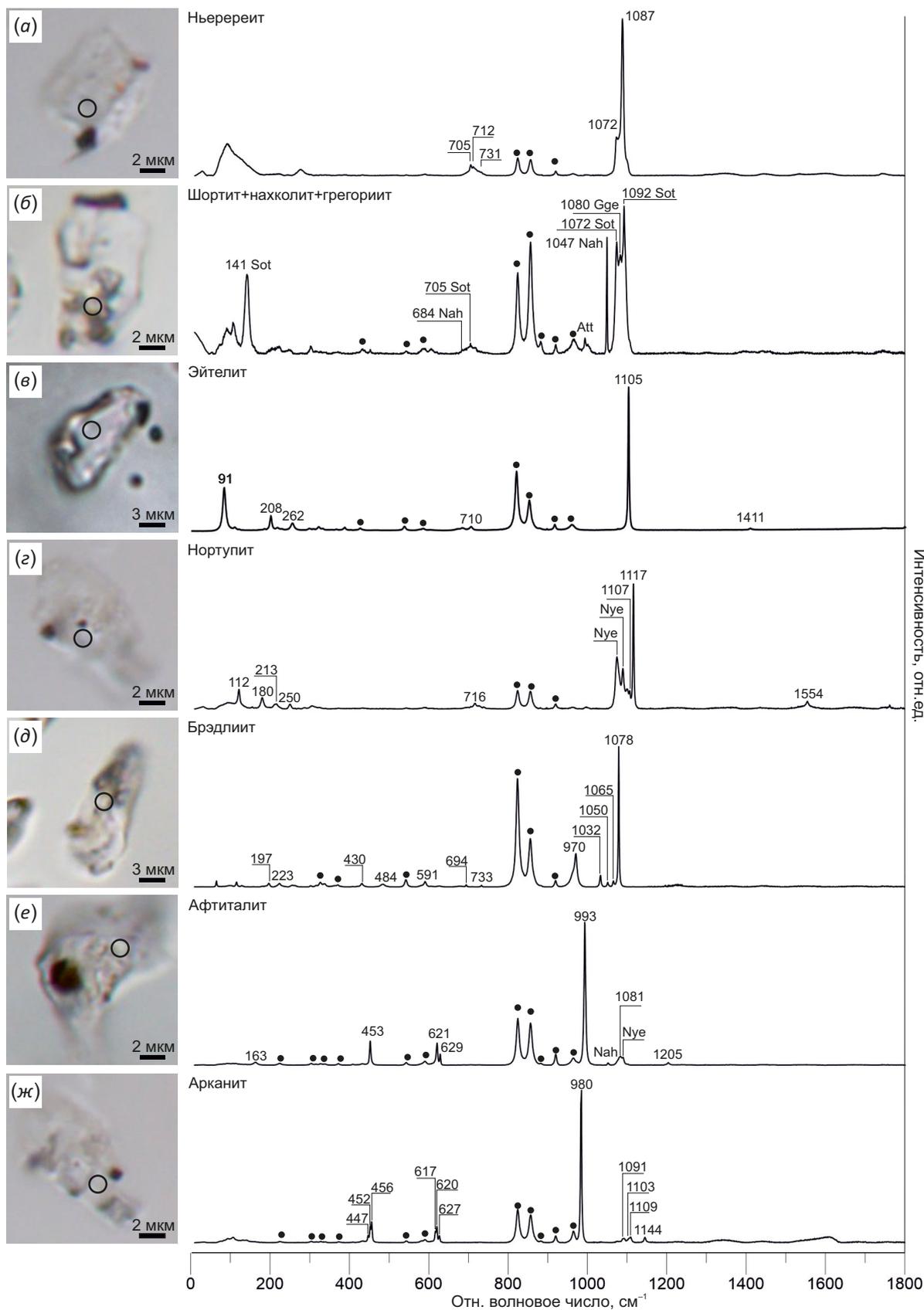


Рис. 2. Раман-спектры некоторых щелочесодержащих дочерних минералов во вторичных расплавных включениях. Кругом на фотографиях в проходящем свете обозначена область анализа. Черный круг на Раман-спектрах – положение линий оливина-хозяина.

Fig. 2. Raman spectra of certain alkali-bearing daughter mineral in the secondary melt inclusions. On the images the circle in transmitted light indicates the point of spectra measurement. Black circles in Raman spectra are main bands of host olivine.

Таблица 1. Список минералов, идентифицированных в расплавных включениях в оливине деформированных перидотитов из трубки Булфонтейн

Table 1. The minerals identified within melt inclusions in olivine of the sheared peridotites from the Bultfontein pipe

Минерал	Формула	Символ
Карбонаты		
Ньеререит	$(\text{Na,K})_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$	Nye
К-ньеререит	$(\text{K,Na})_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$	K-Nye
Шортит	$\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3$	Sot
Грегориит	$(\text{Na,K,Ca})_2\text{CO}_3$	Gge
Эйтелит	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$	Eit
Брэдлиит	$\text{Na}_3\text{Mg}(\text{PO}_4)(\text{CO}_3)$	Bd
Нортупит	$\text{Na}_3\text{Mg}(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$	Nup
Тихит	$\text{Na}_6\text{Mg}_2(\text{CO}_3)_4(\text{SO}_4)$	Tyc
Доломит	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dol
Беркеит	$\text{Na}_6\text{CO}_3(\text{SO}_4)_2$	Bke
Нахколит	NaHCO_3	Nah
Натрит	Na_2CO_3	Nat
Кальцит	CaCO_3	Cal
Магнезит	MgCO_3	Mgs
Витерит	BaCO_3	Wth
Сульфаты		
Афтиталит	$\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$	Att
Арканит	K_2SO_4	Acn
Тенардит	Na_2SO_4	Thn
Глауберит	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$	Glb
Барит	BaSO_4	Brt
Фосфаты		
Апатит	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$	Ap
Сульфиды		
Хизлевудит	Ni_3S_2	Hzl
Галогениды		
Сильвин	KCl	Syl
Галит	NaCl	Hal
Оксиды		
Шпинель	$(\text{Mg,Fe})\text{Al}_2\text{O}_4$	Spl
Магнетит	FeFe_2O_4	Mag
Рутил	TiO_2	Rt
Ильменит	FeTiO_3	Ilm
Перовскит	CaTiO_3	Prv
Силикаты		
Флогопит	$\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F,Cl,OH})$	Phl
Тетраферрифлогопит	$\text{KMg}_3\text{FeSi}_3\text{O}_{10}(\text{F,Cl,OH})$	Tfphl
Оливин	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	Ol
Рихтерит	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}](\text{OH,F})_2$	Rct
Сerpентин*	$\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)_2(\text{OH})_4$	Srp

Примечание. * – в части включений серпентин отсутствует.
Note. * – serpentine is absent in some inclusions.

исследования включений не показали присутствие какой-либо жидкости во включениях в виде отдельной фазы.

В расплавных включениях было идентифицировано 32 минерала (табл. 1; рис. 1, 2). В числе дочерних минералов включений установлено 15 карбонатов, 5 сульфатов, 2 хлорида, по 4 оксида и силиката, сульфид и фосфат. Среди 32 дочерних минералов 20 являются щелочесодержащими: 12 – Na-содержащими, 4 – K-содержащими и 4 – Na-K-содержащими. В целом, во включениях отмечаются высокие объемные содержания карбонатов, >50 об. %, и довольно низкие – силикатов (серпентин и слюды), ~16 об. %. Кроме того, исходя из количества Na-содержащих минералов, включения имеют скорее Na-спецификацию, чем K или Ca. Предварительно рассчитанное атомное соотношение Na:K:Ca в веществе включений составляет ~1.2:1.1:1.0.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее вторичные расплавные включения, идентичные изученным в данной работе, были установлены в оливинах деформированных перидотитов из кимберлитов трубки Удачная-Восточная (Сибирский кратон) [Golovin et al., 2018, 2020]. Для ксенолитов деформированных перидотитов возможны две модели формирования вторичных расплавных включений в породообразующих минералах, и обе модели связаны с кимберлитовым магматизмом [Golovin et al., 2018, 2020]. Образование трещин в минералах мантийных ксенолитов и инфильтрация жидкостей в эти трещины могли происходить либо in-situ в мантии незадолго до захвата ксенолитов кимберлитовой магмой, либо в короткий промежуток времени после попадания ксенолитов в кимберлитовую магму. Согласно первой модели, незадолго до начала движения кимберлитовых расплавов способом гидроразрыва часть кимберлитовых жидкостей из источника генерации начинает просачиваться через мантийные породы, что может приводить к образованию вторичных расплавных включений в минералах ксенолитов [Golovin et al., 2018, 2020]. Поскольку изученные мантийные породы из трубки Булфонтейн располагаются на глубине 120–150 км вблизи границы литосферы с астеносферой (вблизи источника генерации кимберлитовых расплавов), состав этих вторичных расплавных включений может отвечать составу незначительно проэволюционировавших первичных кимберлитовых жидкостей и, таким образом, соответствовать составу примитивных кимберлитовых расплавов.

Согласно второй модели, образование вторичных расплавных включений происходит из-за декомпрессионного растрескивания минералов мантийных ксенолитов. Численное моделирование показывает, что растрескивание оливина может происходить через 17–19 км после попадания ксенолита в кимберлитовую магму [Brett et al., 2015], поэтому эта модель предполагает, что в случае изученных ксенолитов из трубки Булфонтейн оливины захватывали расплав на глубине

100–130 км. Вторая модель, с нашей точки зрения, подразумевает, что состав вторичных расплавных включений также может соответствовать примитивным кимберлитовым жидкостям, поскольку кимберлитовая магма еще не успевает на дистанции 20–50 км от источника как захватить, так и растворить значительное количество ксеногенных силикатов.

Помимо «экзотических» для кимберлитов щелочных карбонатов, сульфатов и хлоридов, в ассоциации дочерних минералов изученных включений присутствуют все основные и второстепенные для кимберлитов минералы: кальцит, доломит, оливин, серпентин, слюды, минералы группы шпинели, рутил, ильменит и апатит. Более того, щелочные карбонаты, сульфаты и хлориды совместно с обычными для кимберлитов минералами были установлены в первичных расплавных включениях в фенокристаллах оливина и шпинели из кимберлитов трубки Булфонтейн [Giuliani et al., 2017]. Однако в самих кимберлитах Булфонтейн щелочесодержащие минералы, за исключением флогопита, отсутствуют [Giuliani et al., 2017].

Все представленные выше рассуждения и модели, с нашей точки зрения, свидетельствуют о том, что щелочно-карбонатитовый состав изученных включений, вероятно, отвечает составу примитивной кимберлитовой жидкости трубки Булфонтейн. Существование щелочно-карбонатитовых расплавов в субкратонной мантии подтверждается результатами изучения первичных расплавных/флюидных микровключений в волокнистых алмазах [Zedgenizov et al., 2007; Logvinova et al., 2019; Golovin et al., 2020]. В таком случае актуальным вопросом является отсутствие щелочных карбонатов, сульфатов и хлоридов в кимберлитах Булфонтейн и других кимберлитах мира. Общеизвестно, что такие щелочесодержащие соединения чрезвычайно водорастворимы [Zaitsev et al., 2008]; взаимодействие этих минералов с метеорными и/или погребенными водами, очевидно, приводит к их массовому уничтожению в кимберлитах и, соответственно, существенному изменению химического состава этих пород при серпентинизации.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изученные расплавные включения, вероятно, представляют собой микропорции примитивного кимберлитового расплава трубки Булфонтейн. Эта жидкость по составу была щелочно-карбонатитовой, с преобладанием таких дополнительных компонентов среди летучих, как Cl и SO₃, над H₂O.

В разнообразных моделях, посвященных реконструкциям составов кимберлитовых расплавов, исходя из полученных результатов, содержание щелочей и таких летучих, как CO₂, Cl и SO₃, является недооцененным, в то время как концентрации SiO₂ и H₂O оцениваются слишком высоко.

Проведенные исследования показывают, что массовая серпентинизация кимберлитов приводит к существенным изменениям как валового состава этих

пород, так и их первично-магматической минералогии. В частности, при взаимодействии кимберлитов с водными флюидами происходит растворение щелочных карбонатов, сульфатов и хлоридов.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

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>.

Giuliani A., Soltys A., Phillips D., Kamenetsky V.S., Maas R., Goemann K., Woodhead J.D., Drysdale R.N., Griffin W.L., 2017. The Final Stages of Kimberlite Petrogenesis: Petrography, Mineral Chemistry, Melt Inclusions and Sr-C-O Isotope Geochemistry of the Bultfontein Kimberlite (Kimberley, South Africa). *Chemical Geology* 455, 342–356. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.10.011>.

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., 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>.

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>.

Liu Z., Ionov D.A., Nimis P., Xu Y., He P., Golovin A.V., 2022. Thermal and Compositional Anomalies in a Detailed Xenolith-Based Lithospheric Mantle Profile of the Siberian Craton and the Origin of Seismic Midlithosphere Discontinuities. *Geology* 50 (8), 891–896. <https://doi.org/10.1130/G49947.1>.

Logvinova A., Zedgenizov D., Wirth R., 2019. Specific Multiphase Assemblages of Carbonatitic and Al-Rich Silicic Diamond-Forming Fluids/Melts: TEM Observation of Microinclusions in Cuboid Diamonds from the Placers of

Northeastern Siberian Craton. *Minerals* 9 (1), 50. <https://doi.org/10.3390/min9010050>.

Mercier J.-C.C., 1979. Peridotite Xenoliths and the Dynamics of Kimberlite Intrusion. In: F.R. Boyd, H.O.A. Meyer (Eds), *The Mantle Sample: Inclusion in Kimberlites and Other Volcanics*. Vol. 16. American Geophysical Union, p. 197–212. <https://doi.org/10.1029/SP016p0197>.

Mitchell R.H., Giuliani A., O'Brien H., 2019. What is a Kimberlite? *Petrology and Mineralogy of Hypabyssal Kimberlites*. *Elements* 15 (6), 381–386. <https://doi.org/10.2138/gselements.15.6.381>.

Nickel K.G., Green D.H., 1985. Empirical Geothermobarometry for Garnet Peridotites and Implications for the Nature of the Lithosphere, Kimberlites and Diamonds. *Earth and Planetary Science Letters* 73 (1), 158–170. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90043-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90043-3).

Taylor R.W., 1998. An Experimental Test of Some Geothermometer and Geobarometer Formulations for Upper Mantle Peridotites with Application to the Thermobarometry of Fertile Lherzolite and Garnet Websterite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie: Abhandlungen* 172 (2–3), 381–408. <https://doi.org/10.1127/njma/172/1998/381>.

Zaitsev A.N., Keller J., Spratt J., Perova E.N., Kearsley A., 2008. Nyerereite – Pirssonite – Calcite – Shortite Relationships in Altered Natrocarbonatites, Oldoinyo Lengai, Tanzania. *The Canadian Mineralogist* 46 (4), 843–860. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.4.843>.

Zedgenizov D.A., Rege S., Griffin W.L., Kagi H., Shatsky V.S., 2007. Composition of Trapped Fluids in Cuboid Fibrous Diamonds from the Udachnaya Kimberlite: LAM-ICPMS Analysis. *Chemical Geology* 240, 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.02.003>.