



## MELT INCLUSIONS IN OLIVINE AS A SOURCE OF INFORMATION ON THE COMPOSITION AND EVOLUTION OF DEEP MELTS OF AILLIKITES (ULTRAMAFIC LAMPROPHYRES) OF THE ILBOKICHI UPLIFT, THE SW SIBERIAN PLATFORM

A.E. Starikova <sup>1,2</sup>, I.R. Prokopyev <sup>1,2</sup>, A.G. Doroshkevich <sup>1,3</sup>, A.V. Kargin <sup>4</sup>, A.A. Nosova<sup>4</sup>, S.A. Kovalev<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>3</sup> Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

<sup>4</sup> Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, 35 Staromonetny Ln, Moscow 119017, Russia

**ABSTRACT.** Aillikites are kimberlite-like rocks, important for understanding the composition and processes occurring in the mantle. Melt inclusions represent a reliable source of information. The paper provides the first results of studies (Raman, EDS) on primary and secondary melt inclusions in olivine from the Ilbokich uplift aillikites. The composition of primary inclusions is close to that of parent melt of aillikites. It was significantly enriched in CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, phosphorus and titanium. Phlogopite, diopside, dolomite, calcite, apatite, Ti-containing phases (brookite, perovskite, Ti-magnetite) and lizardite were identified in these inclusions. The similarity of the composition and ratios of the daughter phases with the aillikite matrix indicates a slight change in the parent melt when it is rising to the surface. As to the secondary inclusions, there are wide variations in compositions and a smaller amount of silicates, as compared to the primary ones. The main daughter phases are carbonates, e.g. dolomite, calcite, magnesite and alkaline carbonates. In addition, phlogopite, clinopyroxene, apatite, halite, pyrrhotite and magnetite, graphite and CO<sub>2</sub> were discovered. The variability of the compositions of the secondary inclusions might be due to the silicate-carbonate immiscibility that appeared during the rising of the aillikite melt at pressures <4 GPa.

**KEYWORDS:** ultramafic lamprophyres; aillikites; olivine; melt inclusions; Raman spectroscopy; Raman mapping

**FUNDING:** The research was carried out under the Russian Science Foundation project 19-77-10004-P.

### SHORT COMMUNICATION

Received: August 5, 2022

Revised: September 7, 2022

Accepted: September 12, 2022

**Correspondence:** Anastasiya E. Starikova, [a\\_sklr@mail.ru](mailto:a_sklr@mail.ru)

**FOR CITATION:** Starikova A.E., Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Kargin A.V., Nosova A.A., Kovalev S.A., 2022. Melt Inclusions in Olivine as a Source of Information on the Composition and Evolution of Deep Melts of Aillikites (Ultramafic Lamprophyres) of the Ilbokichi Uplift, the SW Siberian Platform. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0655. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0655

## РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ОЛИВИНЕ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ О СОСТАВЕ И ЭВОЛЮЦИИ ГЛУБИННЫХ РАСПЛАВОВ АЙЛИКИТОВ (УЛЬТРАОСНОВНЫХ ЛАМПРОФИРОВ) ИЛЬБОКИЧСКОГО ПОДНЯТИЯ ЮЗ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

А.Е. Старикова<sup>1,2</sup>, И.Р. Прокопьев<sup>1,2</sup>, А.Г. Дорошкевич<sup>1,3</sup>, А.В. Каргин<sup>4</sup>, А.А. Носова<sup>4</sup>, С.А. Ковалев<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

<sup>4</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 119017, Москва, пер. Старомонетный, 35, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Айликиты – кимберлитоподобные породы – важны для понимания состава и процессов, происходящих в мантии. И одним из наиболее надежных источников информации являются расплавные включения. В статье представлены первые результаты исследований (КР-спектроскопия, ЭДС) первичных и вторичных расплавных включений в оливинах из айликитов Ильбокичского поднятия. Состав первичных включений наиболее близок к материнскому расплаву айликитов. Он существенно обогащен  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , фосфором и титаном. В этих включениях диагностированы флогопит, диопсид, доломит, кальцит, апатит, Ti-содержащие фазы (брукит, перовскит, Ti-магнетит) и лизардит. Схожесть состава и соотношений дочерних фаз с основной массой айликитов указывает на слабое изменение материнского расплава при подъеме его на поверхность. Для вторичных включений отмечаются широкие вариации составов и меньшая доля силикатов по сравнению с первичными. Основными дочерними фазами являются карбонаты: доломит, кальцит, магнезит и щелочные карбонаты. Кроме того, диагностировались флогопит, клинопироксен, апатит, галит, пирротин и магнетит, графит и  $\text{CO}_2$ . Непостоянство составов вторичных включений может быть связано с появлением силикатно-карбонатной несмешиваемости в процессе подъема айликитового расплава при давлении  $\leq 4$  ГПа.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ультраосновные лампрофиры; айликиты; оливин; расплавные включения; КР-спектроскопия; КР-картирование

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследования выполнены по проекту РНФ 19-77-10004-П.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Айликиты (ультраосновные лампрофиры, обогащенные карбонатами) являются магматическими породами с глубинным источником вещества. Они имеют схожие черты с кимберлитами I группы: существенно обеднены  $\text{SiO}_2$ , характеризуются высоким валовым содержанием магматических карбонатов и не имеют существенных признаков ассимиляции материала земной коры, захваченного во время подъема расплава, при этом отличаются более высоким содержанием железа [Foley et al., 2002; Kjarsgaard et al., 2009]. Как и кимберлиты, айликиты несут важную информацию о процессах, происходящих на границе астеносферы и литосферной мантии, однако понимание природы и состава материнских расплавов и айликитов, и кимберлитов сильно осложняется поздними гидротермальными изменениями этих пород. Одним из важнейших источников информации о материнских расплавах и их эволюции являются включения, захваченные минералом-хозяином во время его кристаллизации (первичные) либо при его растрескивании из-за быстрого подъема магмы с последующим залечиванием трещин (вторичные и первично-вторичные). В последние десятилетия ведется активное изучение расплавных

включений в минералах кимберлитов и в их ксенолитах [Kamenetsky et al., 2014, и ссылки в данной работе; Sharygin et al., 2021], однако данные о расплавных включениях ультраосновных лампрофиров единичны [Panina et al., 2016; Prokopyev et al., 2020; Starikova et al., 2021]. Цель данной работы – по результатам изучения первичных и вторичных включений в оливине определить специфику материнских расплавов и их эволюцию для айликитов Ильбокичского поднятия Сибирской платформы.

### 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами исследования служили пробы из даек айликитов, отобранные в разрезе скважины Ильбокичская-3. Для невоскрытых расплавных включений в оливине с помощью КР-спектрометра LabRam HR800 Horiba Jobin Yvon (ИГМ, г. Новосибирск) были получены КР-спектры (спектры комбинированного рассеяния) присутствующих во включениях фаз. Спектрометр соединен с CCD детектором и конфокальным микроскопом Olympus BX40 (объектив 100×). Линия 514.5 нм от полупроводникового лазера и мощность 50 мВт использовались для возбуждения образца. Монохроматор был откалиброван по линии  $520.5 \text{ см}^{-1}$  кремния. Также для

невскрытых включений было проведено 2D картирование с помощью КР-спектрометра с автоматической конфокальной КР-визуализацией WITec Ayrugon (ИГМ, г. Новосибирск). Для возбуждения образца использовался лазер 488 нм (50 мВт). Спектры были зарегистрированы в интервале 100–4000 см<sup>-1</sup>. Разделение на фазы и построение карт были проведены с помощью алгоритма «True component analysis» в программном обеспечении WITec Project FIVE+, принцип которого описан в статье [Benito-González et al., 2020]. Из спектров была вычтена базовая линия и частично – линии соседних фаз.

Химический состав минералов и диагностика кристаллических фаз вскрытых включений были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding), оборудованного системами микроанализа Inca Energy 450+/Aztec Energy XMax-80 and Inca Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis). Условия съемки: энергия электронного пучка 20 кэВ, ток электронного зонда 1.5 нА. Для количественной оптимизации применялся металлический Со.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

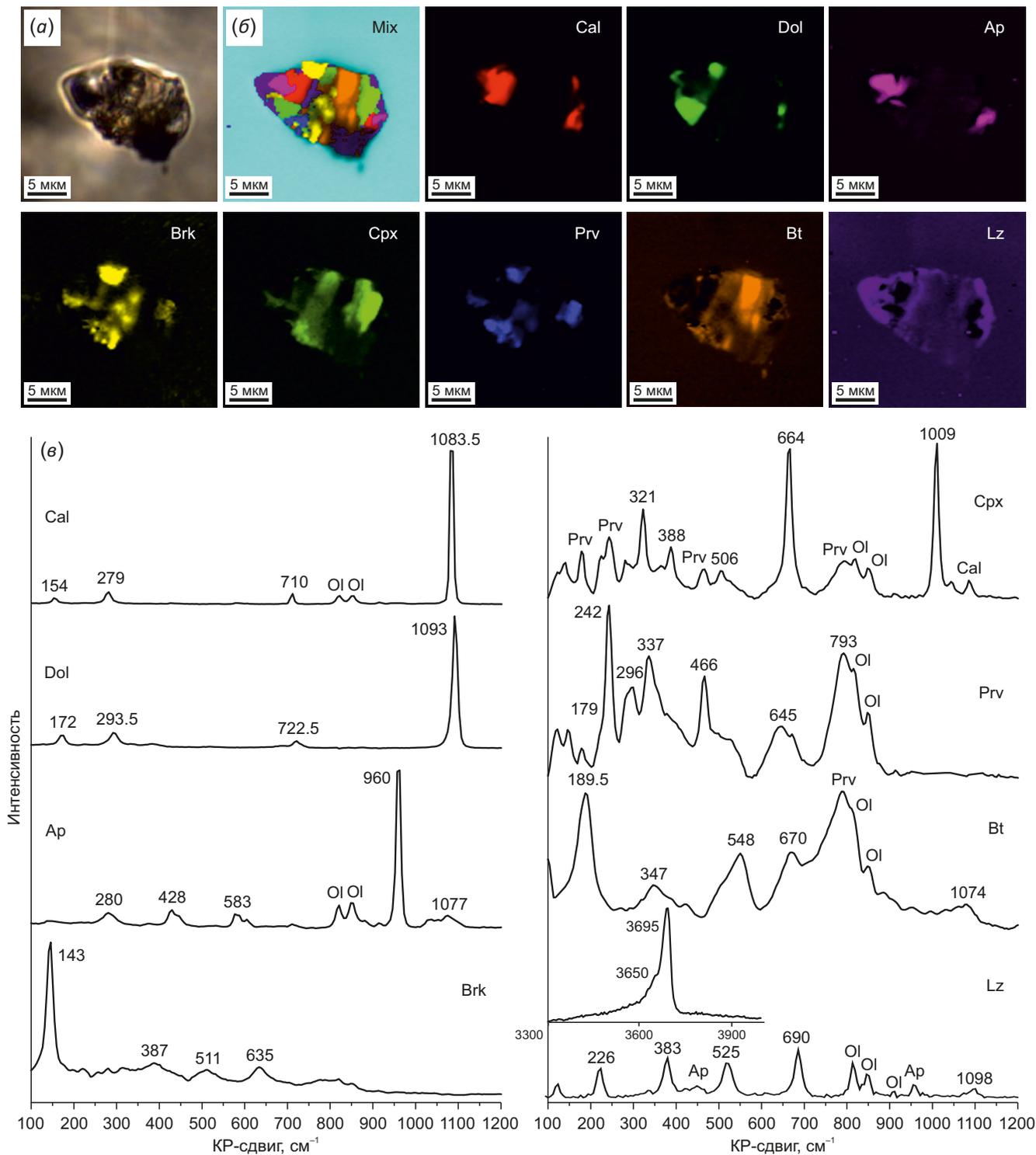
В осадочных толщах рифей-вендского возраста Ильбокичского поднятия (Иркинеево-Чадобецкий прогиб Сибирского кратона) установлены серии даек ультраосновных лампрофиров с возрастом 399±4 млн лет [Kargin et al., 2016; Nosova et al., 2020]. Изученные породы ильбокичских даек относятся к айликитам и имеют преимущественно порфиновую структуру, где в основной массе выделяются вкрапленники оливина (от 100 мкм до 1 мм) и флогопита. Основная масса представлена зональными чешуйками флогопита (30–60 об. %), оливином (до 10 об. %), диопсидом (до 15 об. %), карбонатами (20–50 об. %), апатитом (до 10 об. %), шпинелидами (до 5 об. %), ильменитом (до 5 об. %), полиморфом TiO<sub>2</sub> (до 2 об. %). Кроме того, встречаются агрегаты ильменита, вероятно, являющиеся псевдоморфозой по перовскиту (до 5 об. %) (Прил. 1, рис.1.1). Карбонаты представлены кальцитом (SrO до 1.3 мас. %) и доломитом (с некоторой долей анкеритового (4.5–24.5 мол. %) и кутногоритового (0.5–4.6 мол. %) минала), которые присутствуют в виде отдельных зерен в основной массе либо образуют агрегаты неправильной формы и округлые обособления (Прил. 1, рис. 1.1, а, в, и). Для большинства вкрапленников оливина наблюдается снижение форстеритового минала от центральных частей к краю (от 89.5 до 84.0 мол. %). Более подробная информация о минеральном и химическом составе айликитов Ильбокичского поднятия представлена в статьях [Kargin et al., 2016; Nosova et al., 2018, 2020].

В центральных частях вкрапленников оливина (Fo 89.0–87.5 мол. %) были диагностированы редкие единичные первичные расплавные включения, а также цепочки и сетки вторичных включений. Первичные включения имеют округлую либо неправильную форму

(рис. 1, а; Прил. 1, рис. 1.2). Их размеры варьируются от нескольких до 30 микрон. Все первичные включения полифазны. Оптически в них наблюдается несколько относительно крупных бесцветных прозрачных кристаллов, светло-коричневая чешуйка слюды, мелкозернистый агрегат светлых фаз и несколько рудных непрозрачных зерен. Жидкая фаза и газовый пузырек во включениях оптически не диагностируются. Соотношения между слюдой, светлыми и рудными фазами в разных включениях схожи. Это позволяет предполагать, что все они являются дочерними фазами. Во вскрытых включениях были диагностированы доломит, флогопит, апатит и кальцит, из рудных – Ti-магнетит (Прил. 1, табл. 1.1).

Эти же дочерние фазы были обнаружены и в невскрытых включениях с помощью КР-спектроскопии. При КР-картировании одного из наиболее представительных первичных расплавных включений в нем удалось выявить спектры восьми минералов: кальцит (~10 %), доломит (~10 %), апатит (~10 %), флогопит (~15 %), клинопироксен (~15 %), перовскит (~7 %), брукит (~8 %) и фаза, спектр которой наиболее близок к лизардиту (~10 %) [Rinaudo et al., 2003] (рис. 1). Кроме того, непрозрачная рудная фаза (вероятно, является магнетитом), КР-спектр которой содержит слишком широкие линии и плохо вычленяется из общего спектра.

Вторичные включения имеют меньшие размеры и были законсервированы в оливине в результате залечивания трещин (Прил. 1, рис. 1.2). Все изученные включения являются полифазными. Их состав и пропорции слагающих фаз варьируются в значительной степени как в пределах одной группы включений, так и между группами. По сравнению с первичными включениями здесь наблюдается снижение доли силикатов, из которых наиболее часто диагностируется клинопироксен, реже – флогопит. В некоторых группах включений силикаты отсутствуют. Доминирующими дочерними фазами являются карбонаты, и наряду с часто диагностируемыми доломитом и кальцитом во включениях присутствуют щелочные безводные карбонаты и магнезит (рис. 2). На КР-спектрах основные линии колебаний CO<sub>3</sub>-групп лежат в области 1050–1100 см<sup>-1</sup> [Frezza et al., 2012]. Спектр самого распространенного во включениях щелочного карбоната в наибольшей степени соответствует синтетической фазе α-Na<sub>2</sub>Ca(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (ниерерит) с основными линиями 1072 см<sup>-1</sup> и 1086 см<sup>-1</sup> [Böttcher, Reutel, 1996]. В нескольких включениях фиксировались КР-линии колебаний CO<sub>2</sub> (диады Ферми), рассчитанная по ним плотность CO<sub>2</sub> [Wang et al., 2011] варьируется от 0.57 до 0.82 г/см<sup>3</sup>. В одной из групп включений были диагностированы сосуществующие доломит, графит и CO<sub>2</sub>. Исследование вскрытых включений выявило, кроме вышеперечисленных фаз, апатит, галит, пирротин, низкоTi магнетит и из силикатов – хлорит и цеолиты (возможно, их образование связано с разгерметизацией включения и преобразованием его более поздними процессами).

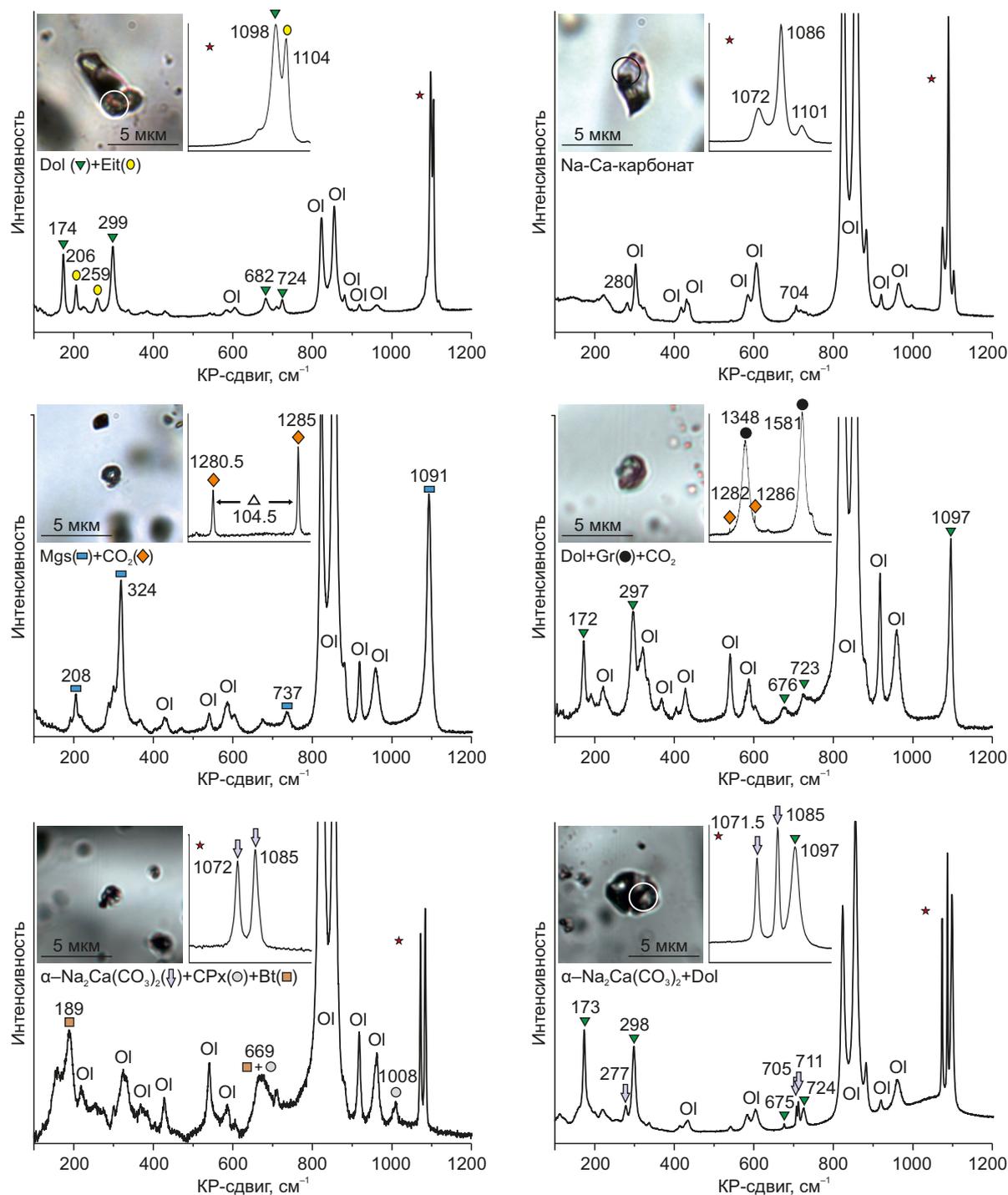


**Рис. 1.** Первичное расплавленное включение в оливине.

(а) – фотография в проходящем свете; (б) – КР-карты, полученные с использованием алгоритма WITec Project FIVE+ «True component analysis»; (в) – КР-спектры, соответствующие фазам на КР-картах. Карты подписаны по доминирующей фазе: Mix – общая карта по всем компонентам, Cal – кальцит, Dol – доломит, Ap – апатит, Brk – брукит, Cpx – клинопироксен, Prv – перовскит, Bt – биотит, Lz – лизардит, Ol– оливин (минерал-хозяин).

**Fig. 1.** Primary melt inclusion in olivine.

(a) – photo in transmitted light; (б) – Raman maps obtained by using the WITec Project FIVE+ "True component analysis" algorithm; (в) – Raman spectra corresponding to the phases on the maps. The maps are named according to the dominant phase: Mix – a map for all components, Cal – calcite, Dol – dolomite, Ap – apatite, Brk – brookite, Cpx – clinopyroxene, Prv – perovskite, Bt – biotite, Lz – lizardite, Ol – olivine (host mineral).



**Рис. 2.** КР-спектры вторичных расплавных включений в оливине. Gr – графит, Eit – эйтелит  $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ , Mgs – магнезит.  
**Fig. 2.** Raman spectra of secondary melt inclusions in olivine. Gr – graphite, Eit – eitelite  $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ , Mgs – magnesite.

**4. ОБСУЖДЕНИЕ**

Оливин является ликвидусным минералом айлицитов Ильбокичского поднятия, и первичные включения, расположенные в ядрах вкрапленников, отражают характеристики расплава, наиболее близкого к материнскому. Состав дочерних фаз включений и их соотношения соответствуют основной массе самих айлицитов: флогопит и клинопироксен как основные силикаты (не считая оливина, который кристаллизовался на

стенках включений), высокое содержание карбонатов (кальцит, доломит) и Ti-содержащих фаз, апатита (см. рис. 1; Прил. 1, рис. 1.1). Такое соответствие свидетельствует о слабом изменении состава материнских расплавов ильбокичских айлицитов в процессе их подъема на поверхность, что отличает их от кимберлитов, большинство изученных включений в которых имеет преимущественно карбонатный состав [Kamenetsky et al., 2014; Golovin et al., 2017; Sharygin et al., 2021] и для

которых предполагается первоначально щелочно-карбонатный расплав, изменяющийся при ассимиляции мантийных перидотитов [Kamenetsky et al., 2014; Sharygin et al., 2017, и ссылки в данных работах]. Материнский расплав ильбокичских айликитов был существенно обогащен летучими: водой, углекислотой, а также фосфором и титаном. В качестве его глубинного источника была предложена умеренно деплетированная литосферная мантия, содержащая метасоматиты с флогопитом или амфиболом, и сделан вывод об участии карбонатного метасоматизирующего агента [Nosova et al., 2020].

Непостоянство состава вторичных включений и пропорций их дочерних фаз может быть объяснено несколькими факторами. Различие в пределах одной группы включений указывает на начало кристаллизации дочерних фаз до полного залечивания трещин и расщуривания включений. Широкие вариации между группами вторичных включений связаны либо с их одновременным захватом, либо с гетерогенностью среды. В первом случае группы включений фиксируют разные стадии эволюции расплавов, однако данные по первичным включениям не подтверждают значимую кристаллизационную дифференциацию расплавов. Можно предположить гетерогенность расплава во время захвата вторичных включений. Экспериментальные работы для кимберлитовых систем (в том числе с высоким содержанием  $K_2O$ ,  $CO_2$  и  $H_2O$  в источнике) показали принципиальную возможность существования карбонатно-силикатной несмесимости при  $\leq 4$  ГПа и 1140–1000 °C [Kamenetsky, Yaxley, 2015], 2 ГПа и 1000–1200 °C [Sharygin et al., 2017] и 5.5 ГПа и 1350 °C [Sokol, Kruk, 2021]. При давлении ниже 2 ГПа в экспериментах наблюдалась дегазация с выделением молекулярной  $CO_2$  [Kamenetsky, Yaxley, 2015]. Схожий процесс дегазации мог произойти при быстром подъеме айликитовых расплавов Ильбокичского поднятия, что в результате привело к захвату вторичных включений, содержащих высокоплотную  $CO_2$ . Оценки минимального давления захвата включений с наиболее высокоплотной  $CO_2$  составили 6.5 кбар (учитывался эффект пластической деформации для оливина [Yamamoto, Kagi, 2008, и ссылки в данной работе], в качестве температуры захвата принималась температура образования краевых частей вкрапленников оливина 1120–1150 °C [Nosova et al., 2018]). Вероятно, при подъеме айликитовый расплав представлял собой карбонатно-силикатную эмульсию, что объясняет наличие агрегатов и глобул карбонатов в айликитах Ильбокичского поднятия (Прил. 1, рис. 1.1, а, в, и). Доминирование карбонатной составляющей во вторичных включениях, возможно, связано с меньшей вязкостью карбонатитового расплава по сравнению с силикатным и более легким его проникновением в трещины оливина. Присутствие во вторичных включениях щелочных карбонатов указывает на щелочную специализацию карбонатитовой составляющей. Отсутствие этих карбонатов в основной массе самих айликитов,

вероятно, связано с их растворением при поздних гидротермальных процессах.

Изученные в данной работе включения (первичные и вторичные) имеют сильное сходство с включениями в макрокристаллах оливина из айликитов посттраппового Чадобецкого комплекса [Prokopyev et al., 2020; Starikova et al., 2021], также расположенного в Иркинеево-Чадобецком прогибе. В них тоже выделяются ранние карбонатно-силикатные включения, состав которых соответствует основной массе айликитов, и более поздние, содержащие щелочные карбонаты и сульфаты. Кроме того, изучение силикатно-карбонатных и карбонатных глобул в щелочно-ультраосновных лампрофирах Чадобецкого комплекса показало, что в их эволюции имело место проявление расплавной силикатно-карбонатной несмесимости, а на более поздних стадиях – отделение обогащенного  $CO_2$  флюида [Nosova et al., 2021]. Можно сделать вывод о том, что механизмы эволюции расплава для ильбокичских айликитов и пород Чадобецкого комплекса схожи.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, айликиты Ильбокичского поднятия кристаллизовались из слабоизмененного в ходе подъема на поверхность карбонатно-силикатного материнского расплава с высоким содержанием летучих и титана. Сброс давления при подъеме расплава привел к появлению карбонатно-силикатной несмесимости и отделению молекулярной  $CO_2$ .

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам И.С. Шарыгину и В.С. Каменецкому, а также Е.В. Склярору за советы по улучшению статьи и конструктивные замечания.

## 7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Подготовка статьи – А.Е. Старикова; исследования, обработка и интерпретация результатов – А.Е. Старикова, И.Р. Прокопьев, С.А. Ковалев, А.Г. Дорошкевич; пробоподготовка и доработка рукописи – А.В. Каргин, А.А. Носова.

Writing – А.Е. Starikova; research and interpretation – А.Е. Starikova, I.R. Prokopyev, S.A. Kovalev, A.G. Doroshkevich; sample preparation and editing – А.В. Kargin, А.А. Nosova.

## 8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

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

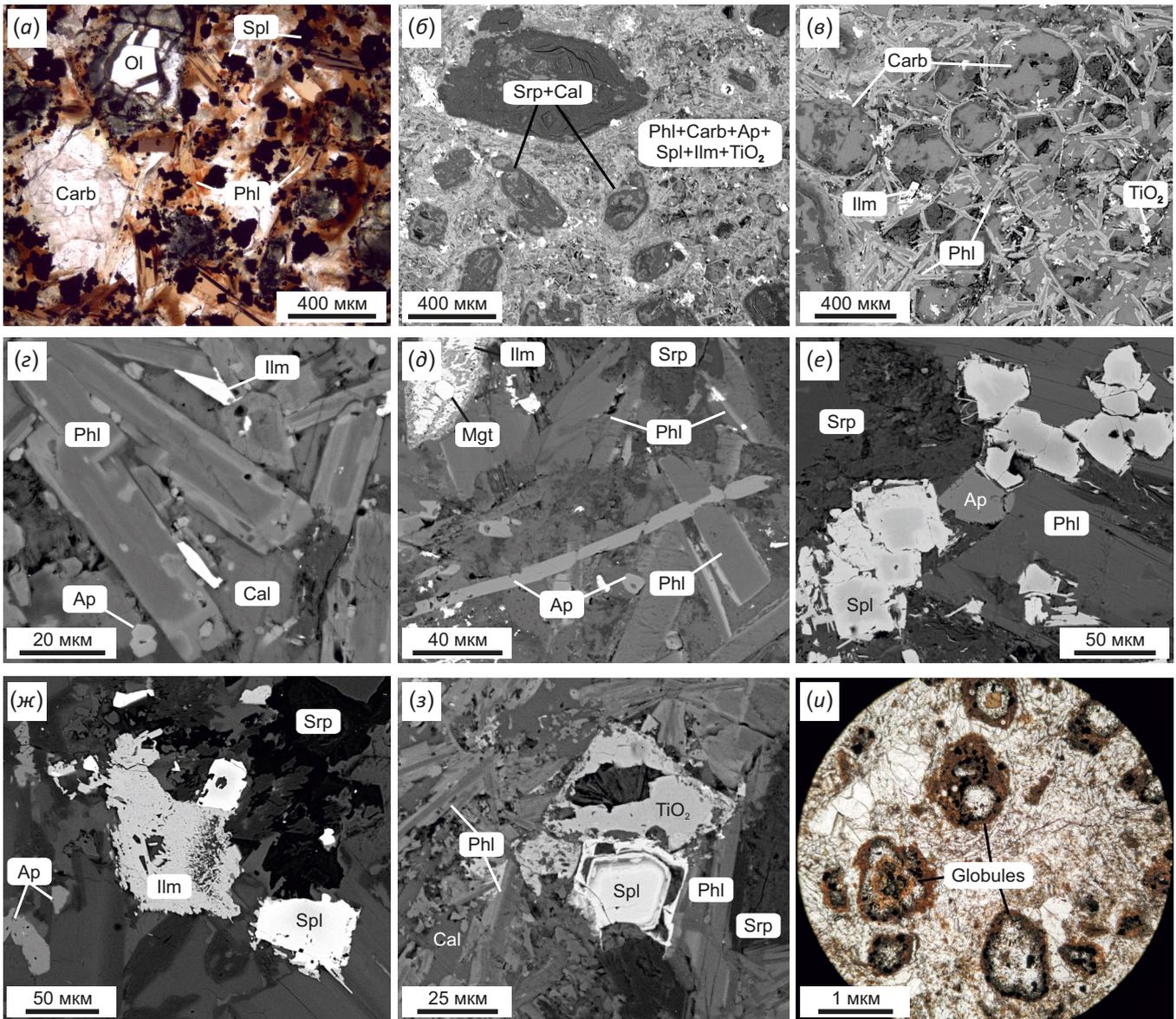
The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Benito-González I., Martínez-Sanz M., López-Rubio A., Gómez-Mascaraque L.G., 2020. Confocal Raman Imaging as

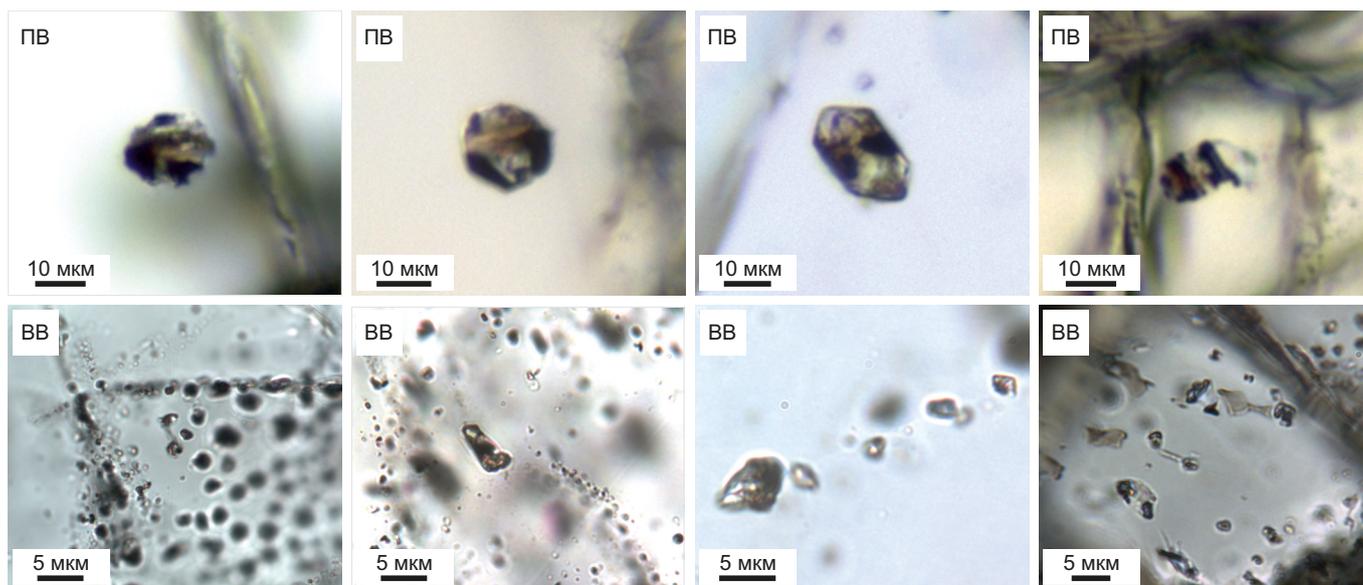
- a Useful Tool to Understand the Internal Microstructure of Multicomponent Aerogels. *Journal of Raman Spectroscopy* 51, 2022–2035. <https://doi.org/10.1002/jrs.5936>.
- Böttcher M.E., Reutel C., 1996. The Raman Spectrum of Alpha- $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ . *Journal of Raman Spectroscopy* 27 (11), 859–861. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4555\(199611\)27:11<859::AID-JRS40>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4555(199611)27:11<859::AID-JRS40>3.0.CO;2-T).
- Foley S., Andronikov A., Melzer S., 2002. Petrology of Ultramafic Lamprophyres from the Beaver Lake Area of Eastern Antarctica and Their Relation to the Breakup of Gondwanaland. *Mineralogy and Petrology* 74, 361–384. <https://doi.org/10.1007/s007100200011>.
- Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A., 2012. Raman Spectroscopy for Fluid Inclusion Analysis. *Journal of Geochemical Exploration* 112, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009>.
- 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>.
- 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 Review* 139, 145–167. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.004>.
- Kamenetsky V.S., Yaxley G.M., 2015. Carbonate–Silicate Liquid Immiscibility in the Mantle Propels Kimberlite Magma Ascent. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 158, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.03.004>.
- Kargin A.V., Nosova A.A., Postnikov A.V., Chugaev A.V., Postnikov O.V., Popova L.P., Poshibaev V.V., Sazonova L.V., Dokuchaev A.Y., Smirnova M.D., 2016. Devonian Ultramafic Lamprophyre in the Irkineeva–Chadobets Trough in the Southwest of the Siberian Platform: Age, Composition, and Implications for Diamond Potential Prediction. *Geology of Ore Deposits* 58, 383–403. <https://doi.org/10.1134/S1075701516050068>.
- Kjarsgaard B.A., Pearson D.G., Tappe S., Nowell G.M., Dowall D.P., 2009. Geochemistry of Hypabyssal Kimberlites from Lac de Gras, Canada: Comparisons to a Global Database and Applications to the Parent Magma Problem. *Lithos* 112, 236–248. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.001>.
- Nosova A.A., Kargin A.V., Sazonova L.V., Dubinina E.O., Chugaev A.V., Lebedeva N.M., Yudin D.S., Larionova Y.O., Abersteiner A., Gareev B.I., Batalin G.A., 2020. Sr-Nd-Pb Isotopic Systematic and Geochronology of Ultramafic Alkaline Magmatism of the Southwestern Margin of the Siberian Craton: Metasomatism of the Sub-Continental Lithospheric Mantle Related to Subduction and Plume Events. *Lithos* 364–365, 105509. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105509>.
- Nosova A.A., Sazonova L.V., Kargin A.V., Dubinina E.O., Minervina E.A., 2021. Mineralogy and Geochemistry of Ocelli in the Damtjernite Dykes and Sills, Chadobets Uplift, Siberian Craton: Evidence of the Fluid–Lamprophyric Magma Interaction. *Minerals* 11 (7), 724. <https://doi.org/10.3390/min11070724>.
- Nosova A.A., Sazonova L.V., Kargin A.V., Smirnova M.D., Lapin A.V., Shcherbakov V.D., 2018. Olivine in Ultramafic Lamprophyres: Chemistry, Crystallisation, and Melt Sources of Siberian Pre- and Post-Trap Aillikites. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 173, 55. <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1480-3>.
- Panina L.I., Rokosova E.Y., Isakova A.T., Tolstov A.V., 2016. Lamprophyres of the Tomtor Massif: A Result of Mixing between Potassic and Sodic Alkaline Mafic Magmas. *Petrology* 24 (6), 608–625. <https://doi.org/10.1134/S0869591116060047>.
- Prokopyev I., Starikova A., Doroshkevich A., Nugumanova Y., Potapov V., 2020. Petrogenesis of Ultramafic Lamprophyres from the Terina Complex (Chadobets Upland, Russia): Mineralogy and Melt Inclusion Composition. *Minerals* 10 (5), 419. <https://doi.org/10.3390/min10050419>.
- Rinaudo C., Gastaldi D., Belluso E., 2003. Characterization of Chrysotile, Antigorite and Lizardite by FT-Raman Spectroscopy. *Canadian Mineralogist* 41 (4), 883–890. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.4.883>.
- Sharygin I.S., Golovin A.V., Tarasov A.A., Dymshits A.M., Kovaleva E., 2021. Confocal Raman Spectroscopic Study of Melt Inclusions in Olivine of Mantle Xenoliths from the Bultfontein Kimberlite Pipe (Kimberley Cluster, South Africa): Evidence for Alkaline Carbonate Melt in the Mantle beneath Kaapvaal Craton. *Journal of Raman Spectroscopy* 53 (3), 508–524. <https://doi.org/10.1002/jrs.6198>.
- Sharygin I.S., Litasov K.D., Shatskiy A., Safonov O.G., Golovin A.V., Ohtani E., Pokhilenko N.P., 2017. Experimental Constraints on Orthopyroxene Dissolution in Alkali-Carbonate Melts in the Lithospheric Mantle: Implications for Kimberlite Melt Composition and Magma Ascent. *Chemical Geology* 455, 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.09.030>.
- Sokol A.G., Kruk A.N., 2021. Role of  $\text{CO}_2$  in the Evolution of Kimberlite Magma: Experimental Constraints at 5.5 GPa and 1200–1450 °C. *Lithos* 386–387, 106042. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106042>.
- Starikova A., Prokopyev I., Doroshkevich A., Ragozin A., Chervyakovsky V., 2021. Polygenic Nature of Olivines from the Ultramafic Lamprophyres of the Terina Complex (Chadobets Upland, Siberian Platform) Based on Trace Element Composition, Crystalline, and Melt Inclusion Data. *Minerals* 11 (4), 408. <https://doi.org/10.3390/min11040408>.
- Wang X., Chou I.-M., Hua W., Burruss R.C., Sun Q., Song Y., 2011. Raman Spectroscopic Measurements of  $\text{CO}_2$  Density: Experimental Calibration with High-Pressure Optical Cell (HPOC) and Fused Silica Capillary Capsule (FSCC) with Application to Fluid Inclusion Observations. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75 (14), 4080–4093. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.04.028>.
- Yamamoto J., Kagi H., 2008. Application of Densimetry Using Micro-Raman Spectroscopy for  $\text{CO}_2$  Fluid Inclusions: A Probe for Elastic Strengths of Mantle Minerals. *European Journal of Mineralogy* 20 (4), 529–535. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1825>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1



**Рис. 1.1.** Фотографии айликитов Ильбокичского поднятия в проходящем свете (*a, u*) и BSE (*б-з*). (*a*) – частично замещенный серпентином вкрапленник оливина и карбонатное обособление в основной массе айликита; (*б*) – полностью замещенные вкрапленники оливина в основной массе айликита; (*в*) – карбонатные глобулы, окруженные чешуйками флогопита; (*г*) – зональные чешуйки слюды со включениями апатита; (*д*) – длиннопризматическое зерно апатита; (*е*) – зональные зерна минералов группы шпинели в айликите; (*ж*) – агрегат ильменита, вероятно, являющийся псевдоморфозой по перовскиту; (*з*) – срастание шпинелида с полиморфом  $TiO_2$ ; (*u*) – карбонатные глобулы в основной массе айликита. Ap – апатит, Cal – кальцит, Carb – карбонат, Ilm – ильменит, Mgt – магнетит, Ol – оливин, Phl – флогопит, Srp – серпентин, Spl – минералы группы шпинели,  $TiO_2$  – полиморф  $TiO_2$ .

**Fig. 1.1.** Photographs of aillikites of the Ilbokich uplift in transmitted light (*a, u*) and BSE images (*б-з*). (*a*) – partially replaced by serpentine olivine phenocryst and carbonate separation in the aillikite groundmass; (*б*) – completely replaced olivine phenocrysts in the aillikite groundmass; (*в*) – carbonate globules surrounded by flakes of phlogopite; (*г*) – zonal mica flakes with inclusions of apatite; (*д*) – long-prismatic grain of apatite; (*е*) – zonal grains of spinel group minerals in aillikite; (*ж*) – ilmenite aggregate, probably a pseudomorphosis of perovskite; (*з*) – intergrowth of spinel group mineral and  $TiO_2$  – polymorph in the aillikite groundmass; (*u*) – carbonate globules in the aillikite groundmass. Ap – apatite, Cal – calcite, Carb – carbonate, Ilm – ilmenite, Mgt – magnetite, Ol – olivine, Phl – phlogopite, Srp – serpentine, Spl – spinel group minerals,  $TiO_2$  – polymorph  $TiO_2$ .



**Рис. 1.2.** Фотографии в проходящем свете первичных (PB) и вторичных (BB) расплавных включений в оливинах ильбокичских айликитов.

Все включения многофазны. Для первичных включений наблюдается относительное постоянство соотношений дочерних фаз: коричневая чешуйка флогопита, несколько прозрачных и рудных фаз. Вторичные включения образуют сетки и цепочки, иногда пересекающие друг друга и широко варьирующиеся по размеру.

**Fig. 1.2.** Photos in transmitted light of primary (PB) and secondary (BB) melt inclusions in olivine of the Ilbokich aillikites.

All inclusions are multi-phased. In primary inclusions, the ratios of daughter phases are relatively constant: a brown flake of phlogopite, several transparent and ore phases. The secondary inclusions produce planes and chains that sometimes intersect each other and vary widely in size.

**Таблица 1.1.** Список диагностированных минеральных фаз в первичных и вторичных расплавных включениях (PB) из оливинов айликитов Ильбокичского поднятия

**Table 1.1.** List of diagnosed mineral phases in the primary and secondary melt inclusions (PB) from olivine of the Ilbokich aillikites.

Минеральные фазы	Первичные PB	Вторичные PB
Силикаты		
Флогопит	+	+
Клинопироксен	+	+
Лизардит	+	-
Хлорит	-	+
Цеолиты	-	+
Карбонаты		
Доломит	+	+
Кальцит	+	+
Магнезит	-	+
Ниеререйт	-	+
Эйтелит	-	+
Са-Na-карбонаты*	-	+
Апатит	+	+
Графит	-	+
Галит	-	+
Рудные		
Перовскит	+	-
Брукит	+	-
Магнетит	+	+
Пирротин	-	+

Примечание. \* – щелочные карбонаты, которые не удалось точно идентифицировать.

Note.\* – alkaline carbonates, not precisely identified.