

Минералы группы апатита из ультраосновных лампрофиров зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса (Урикско-Ийский грабен, Восточное Присяянье)

Я. Н. Нугуманова¹, А. Д. Калугина^{1,2}, А. Е. Старикова^{1,3},
А. Г. Дорошкевич^{1,4}, И. Р. Прокопьев¹

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: nugumanovaun@igm.nsc.ru

²Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15

³Новосибирский государственный университет, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

⁴Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 6450031, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6А

Поступила в редакцию 16.03.2023 г., принята к печати 03.08.2023 г.

Объект исследования. В работе приводятся результаты изучения минералов группы апатита из айлицитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса. *Цель.* Особенности состава апатитов исследовались для идентификации изученных пород с целью понимания закономерностей распределения элементов в магме айлицитов на поздних стадиях кристаллизации. *Материалы и методы.* Нами были изучены минералы группы апатита из 6 образцов (4 – из даек Большетагнинского массива, 1 – из Бушканайской дайки, 1 – из Белозиминской трубки). Образцы имеют схожие текстурно-структурные особенности, но разный минеральный состав основной массы. *Результаты.* Минералы группы апатита широко распространены в основной массе всех изученных пород. Для них характерны идиоморфные, субидиоморфные однородные по составу кристаллы, размером 10–100 мкм. Минералы были идентифицированы как фторапатиты и гидроксилapatиты, для которых характерны значительное содержание SiO₂ (до 5 мас. %), низкие содержания SrO (до 1.5 мас. %) и P₂O₅ (до 2 мас. %). Кроме того, в состав изученных апатитов входит MgO, FeO, Na₂O, SO₄, CO₃. Для фторапатитов из дайковых айлицитов характерно более высокое содержание кремния по сравнению с апатитами из Белозиминской трубки. Апатиты из свежих айлицитов Бушканайской дайки имеют относительно более высокое содержание Sr, P₂O₅, F, чем минералы из серпентинизированных образцов. *Выводы.* Состав изученных апатитов имеет низкое содержание Sr и Ba по сравнению с апатитами из оранжситов и лампроитов. По содержанию Sr, Si и P₂O₅ исследованные апатиты схожи с таковыми из кимберлитов и айлицитов. Эти различия позволяют использовать минералы группы апатита в качестве индикаторного минерала для классификации кимберлитов и родственных пород, но только в сочетании с петрографией и составом других минералов основной массы.

Ключевые слова: минералы группы апатита, фторапатит, гидроксилapatит, рамановские спектры, айлициты

Источник финансирования

Геология района изучалась в рамках заданий НИР ИГМ СО РАН (22041400241-5) и ГИН СО РАН (АААА-А21-121011390002-2), петрографические и минералогические исследования ультраосновных лампрофиров производились за счет средств проекта РНФ № 23-17-00098 <https://rscf.ru/project/23-17-00098/>

Minerals of the apatite group from ultramafic lamprophyres of the Zima alkaline-ultramafic carbonate complex (Urik-Iya graben, Eastern Sayan region)

Yazgul N. Nugumanova¹, Anastasiya D. Kalugina^{1,2}, Anastasia E. Starikova^{1,3},
Anna G. Doroshkevich^{1,4}, Iya R. Prokopyev¹

Для цитирования: Нугуманова Я.Н., Калугина А.Д., Старикова А.Е., Дорошкевич А.Г., Прокопьев И.Р. (2023) Минералы группы апатита из ультраосновных лампрофиров зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса (Урикско-Ийский грабен, Восточное Присяянье). *Литосфера*, 23(4), 589-602. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-589-602>

For citation: Nugumanova Ya.N., Kalugina A.D., Starikova A.E., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R. (2023) Minerals of the apatite group from ultramafic lamprophyres of the Zima alkaline-ultramafic carbonate complex (Urik-Iya graben, Eastern Sayan region). *Lithosphere (Russia)*, 23(4), 589-602. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-589-602>

© Я.Н. Нугуманова, А.Д. Калугина, А.Е. Старикова, А.Г. Дорошкевич, И.Р. Прокопьев, 2023

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia, e-mail: nugumanovayn@igm.nsc.ru

²A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia

³Novosibirsk State University, 1 Pirogov st., Novosibirsk 630090, Russia

⁴N.L. Dobretsov Geological Institute, SB RAS, 6A Sakh'yanova st., Ulan-Ude 670047, Russia

Received 16.03.2023, accepted 03.08.2023

Research subject. This paper presents the results of a study of minerals of the apatite group from aillikites of the Zima alkaline-ultramafic carbonatite complex. **Aim.** To determine the composition of apatites to characterize the studied rocks and to elucidate the patterns of element distribution in the magma of aillikites in the late crystallization stages. **Materials and Methods.** Minerals of the apatite group from 6 samples (4 from dikes of the Bol'shetagninsky massif, 1 from the Bushkanai dike, 1 from the Beloziminskaya pipe) were studied. The samples showed similar textural-structural features, differing in the mineral composition of the groundmass. **Results.** Minerals of the apatite group are widespread in the groundmass of all the studied rocks. They are characterized by idiomorphic, subidiomorphic crystals of homogeneous composition, 10–100 microns in size. Minerals of the apatite group were identified as fluorapatite and hydroxyapatite characterized by a significant SiO₂ content (up to 5 wt %), low SrO content (up to 1.5 wt %) and REE₂O₃ (up to 2 wt %). The studied apatites also include MgO, FeO, Na₂O, SO₄, and CO₃. Fluorapatites from dyke aillikites are characterized by a higher silicon content as compared to apatites from the Beloziminskiy pipe. Apatites from fresh aillikites of the Bushkanai dyke have a relatively higher content of Sr, REE, and F than minerals from serpentinized samples. **Conclusions.** The composition of the studied apatites has a lower Sr and Ba content than orangeite and lamproite apatites. In terms of Sr, Si and REE contents, the studied apatites are similar to kimberlite and aillikite apatites. Such a difference allows minerals of the apatite group to be used as an indicator mineral for classification of kimberlites and related rocks, but only in combination with petrography and composition of other minerals of the groundmass.

Keywords: apatite group minerals, fluorapatite, hydroxyapatite, Raman spectra of apatites, aillikites

Funding information

The geology of the region was supported by research projects of IGM SB RAS (22041400241-5) and GIN SB RAS (AAAA-A21-121011390002-2), petrographic and mineralogical studies of ultramafic lamprophyres was supported by RSF project No. 23-17-00098 <https://rscf.ru/project/23-17-00098/>

ВВЕДЕНИЕ

Минералы группы апатита – общее название группы минералов класса фосфатов с общей формулой Ca₅(PO₄)₃(OH,F,Cl) (Pasero et al., 2010). В зависимости от соотношения F, Cl и OH выделяют фторапатит, хлорапатит и гидроксилapatит. Минералы группы апатита способны включать половину элементов периодической таблицы в свою кристаллическую структуру. Большое количество катионов таких как K⁺, Na⁺, Mn²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Co²⁺, Zn²⁺, Sr²⁺, Ba²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺, Y³⁺ и редкоземельные элементы могут замещать Ca²⁺. Для некоторых апатитов соотношение Ca/P превышает 1.6, что связано с замещением PO₄³⁻ на анионные группы AsO₄³⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻, SiO₄⁴⁻ (Wopenka, Pasteris, 2005; Khan et al., 2013). Апатит является полигенным минералом, и его состав может значительно отличаться в зависимости от минералообразующей среды и условий кристаллизации. Последние десятилетия апатит привлекает пристальное внимание исследователей, так как этот минерал распространен повсеместно и является концентратом как летучих, так и редких элементов (Webster, Piccoli, 2015; Jones et al., 2016; Chakhmouradian et al., 2017; и др.).

Объектом нашего исследования послужили минералы группы апатита из айликитов зиминского

щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса. Айликиты считаются породами, родственными кимберлитам I группы, так как тоже имеют глубинный источник вещества, недосыщены кремнеземом, обогащены магматическими карбонатами и не несут серьезных признаков контаминации коровым материалом (Foley et al., 2002; Tappe et al., 2004; Kjarsgaard et al., 2009). Айликитовые расплавы, как и расплавы родственных им пород можно отнести к гибридным, образующимся в результате ассимиляции исходной магмы с мантийными породами (Tappe et al., 2006; Nosova, 2018; Dalton, 2019). Магма кимберлитов и ультраосновных лампрофиров быстро кристаллизуется на уровне земной коры в полнокристаллические породы, которые состоят из ксенокристаллов и макрокристаллов оливина, и основной массы. Основная масса айликитов и кимберлитов I группы может быть представлена разными минеральными ассоциациями, наиболее типичными и сквозными из которых являются хромит, перовскит, апатит, флогопит и карбонаты. Обычно кимберлиты и ультраосновные лампрофиров подвергаются гидротермальному преобразованию (серпентинизации, карбонатизации), что часто затрудняет использование традиционных геохимических методов для их идентификации. Одним из возможных решений является детальное изучение

особенностей состава минералов основной массы, например, слюд (в случае их сохранности) или более устойчивых к гидротермальному изменению шпинелидов. Тренды изменения составов этих минералов помогают классифицировать кимберлиты и родственные породы (Mitchell, 1986, 1995, 2008; Tappe et al., 2004, 2005).

Минералы группы апатита являются сквозными минералами основной массы кимберлитов и ультраосновных лампрофиров. Это один из основных концентраторов галогенов, редкоземельных элементов (РЗЭ) и Sr, содержания которых чувствительны к фракционированию магмы, а также присутствию и составу флюидов во время кристаллизации (Milligan et al., 2017; Soltys et al., 2020). Апатит достаточно устойчив к гидротермальным изменениям, и может быть потенциально важным индикаторным минералом условий генерации и эволюции расплавов, а также использоваться при диагностике пород. Например, апатиты оранжейтов отличаются от таковых из кимберлитов I группы повышенными содержаниями РЗЭ и Sr (Mitchell, 1995). Однако, несмотря на потенциальную значимость минерала для реконструкции эволюции кимберлитового расплава, работ, посвященных изучению состава апатита в кимберлитах крайне мало (Soltys et al., 2020; ссылки в этой работе). Детальные исследования апатитов в таких кимберлитоподобных породах как айликиты не проводилось вообще. В данной работе нами были изучены минералы группы апатита из айликитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса. Эти данные могут служить основой для формирования базы данных по кимберлитоподобным породам и в дальнейшем использоваться для моделирования условий образования кимберлитов и родственных им пород.

Зиминский щелочно-ультраосновной карбонатитовый комплекс относится к Восточному Присаянью, юго-западной части Сибирской платформы. С ним связаны крупные запасы Nb, Ta, TR, U, Pb, Zn, флюорита и микроклина (Фролов, Белов, 1999). Восточное Присаянье является также перспективным регионом для обнаружения россышных и коренных месторождений алмазов различных генетических типов (Егоров и др., 2010). В пределах региона выделено несколько этапов внедрения кимберлитов и родственных пород: среднерифейские алмазоносные кимберлиты ингашинского комплекса (≈ 1200 млн лет); вендские кимберлитоподобные породы зиминского комплекса (≈ 630 млн лет) и девонские лампроиты (≈ 370 млн лет) (Егоров и др., 2010). Эти породы были детально изучены многими исследователями (Секерин и др., 1995; Василенко, 1996; Егоров и др., 2010; Корнаков и др., 2019; Савельева и др., 2020; Savelyeva et al., 2022), однако вопрос об их возрасте, классификации и их генетической свя-

зи остается открытым, поэтому для исследований был выбран объект именно этого региона.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЕТРОГРАФИЯ

Зиминский щелочно-ультраосновной карбонатитовый комплекс находится в пределах Урикско-Ийского грабена, расположенного в Восточном Присаянье. Грабен сложен протерозойскими осадочно-метаморфическими породами. Зиминский комплекс представлен породами уртит-ийолит-мельтейгитового ряда, нефелиновыми и щелочными сиенитами, кальцитовыми и анкеритовыми карбонатитами, докарбонатитовыми и посткарбонатитовыми кимберлитоподобными породами, слагающими три массива: Белозиминский, Большетагнинский и Среднезиминский (рис. 1) (Секерин и др., 1995; Егоров и др., 2010; Корнаков и др., 2019; Савельева и др., 2020; Savelyeva et al., 2022). Дайки и трубки взрыва зиминского комплекса выполнены щелочными пикритами, слюдястыми кимберлитами и айликитами (Фролов, Белов, 1999; Багдасаров, 2001; Фролов и др., 2005; Корнаков и др., 2019; Савельева и др., 2020). Их возраст оценивается как вендский (646.1 ± 8.6 млн лет) (Savelyeva et al., 2022). В соответствии с Ar-Ag датированием флогопита из анкеритовых карбонатитов (3 фаза), возраст карбонатитов составил 645 млн лет, что согласуется с возрастом внедрения сиенитов (2 фаза) (Doroshkevich et al., 2016).

Большетагнинский массив имеет правильную округлую форму диаметром 4 км и состоит из серий пород: ийолиты-мельтейгиты, нефелиновые и субщелочные сиениты, пикритовые порфириды и карбонатиты (Фролов, Белов, 1999). Пикриты и айликиты Большетагнинского массива слагают серию дуговидных даек, круто падающих по направлению к центру, мощностью от десятков сантиметров до нескольких сотен метров. Начало их формирования приходится на докарбонатитовый этап, часть – интракарбонатитовые (Фролов, Белов, 1999; Савельева и др., 2020).

Образцы для изучения были отобраны из посткарбонатитовых даек и трубки айликитов зиминского комплекса. В работе изучены минералы группы апатита из 6 образцов (4 из даек Большетагнинского массива (BTG 2/21, TGK 1, TGK 3, TGK 6/21), 1 – из Бушканайской дайки (Bush 3/21), 1 – из Белозиминской трубки (трубка Южная) (BZT 4/21)). Изученные образцы имеют схожие текстурно-структурные особенности, но разный минеральный состав основной массы. Они обладают порфиридной структурой, массивной текстурой и состоят из макрокристаллов оливина, погруженных в полностью раскристаллизованную основную массу. Содержание макрокристов варьирует в пределах 40–50%. Оливин, кроме образца из Бушка-

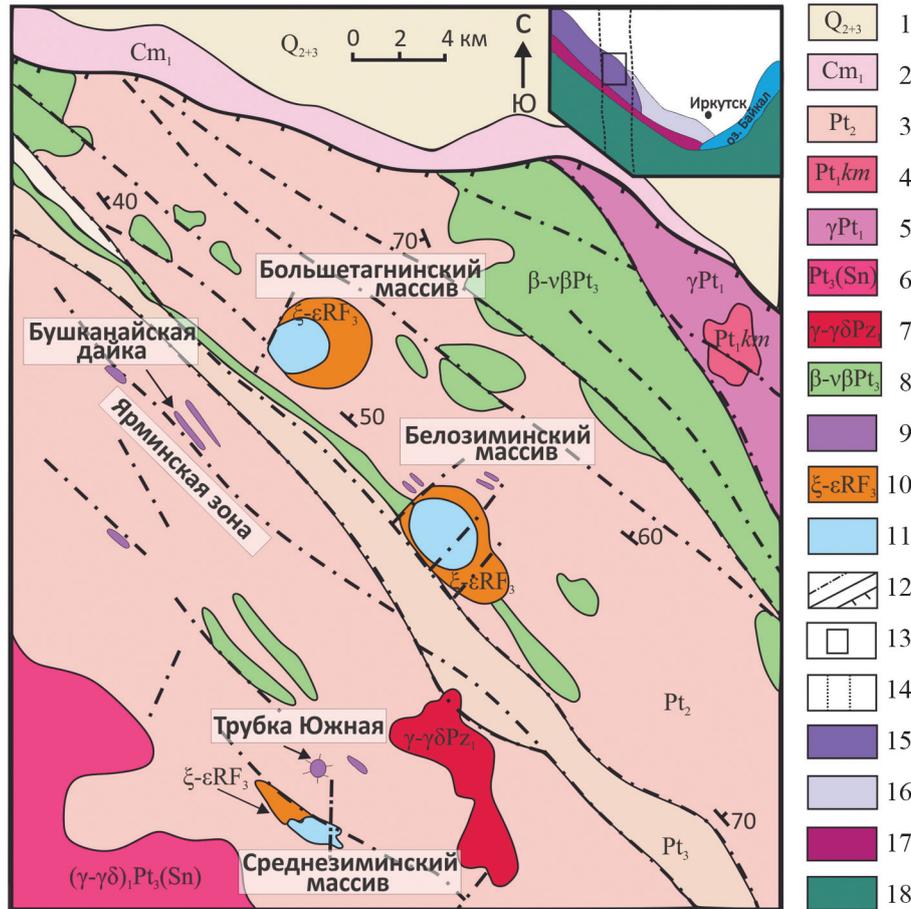


Рис. 1. Схема геологического строения зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса по (Фролов, Белов, 1999).

1 – четвертичные отложения предгорной впадины: галечники, песчано-глинистые отложения; 2 – конгломераты и аргиллиты карбона; 3 – среднепротерозойские отложения: глинистые сланцы, песчаники, кварциты, доломиты; 4 – кристаллические известняки, доломиты, амфиболовые сланцы и гнейсы, кварциты; 5 – Онотский комплекс, граниты, гнейсограниты; 6 – граниты, гранодиориты, граносиениты: Саянский комплекс и 7 – Чернозиминский комплекс; 8 – диабазы, габбродиабазы; 9 – дайки и трубки взрыва щелочных пикритов, слюдяных кимберлитов, айликов зиминского комплекса; 10, 11 – массивы ультраосновных щелочных пород (10) и карбонатитов (11) зиминского комплекса; 12 – разрывные нарушения; 13 – региональное положение зиминского рудного района; 14 – Таймыро-ангарский линиямент; 15 – Урикско-Ийский грабен; 16 – раннепротерозойский выступ Сибирской платформы; 17–18 – складчатое обрамление Сибирской платформы добайкальского (17) и байкальского (18) возраста.

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the Zima alkaline-ultramafic carbonatite complex (Frolov, Belov, 1999).

1 – Quaternary deposits: pebbles, sandy-argillaceous deposits; 2 – conglomerates and mudstones of the Carboniferous; 3 – Middle Proterozoic deposits: shales, sandstones, quartzites, dolomites; 4 – crystalline limestones, dolomites, amphibole schists and gneisses, quartzites; 5 – Onot complex, granites, gneiss-granites; 6 – granites, granodiorites, granosyenites: Sayan complex and 7 – Chernoziminsky complex; 8 – diabases, gabbrodiabases; 9 – kimberlite-like rocks of the Zima complex; 10 – massifs of ultramafic alkaline rocks and 11 – carbonatites of the Zima complex; 12 – discontinuous violations; 13 – regional position of the Zima ore region; 14 – Taimyr-Angara lineament; 15 – Urik-Iya graben; 16 – Early Proterozoic ledge of the Siberian platform; folded framing of the Siberian platform: pre-Baikal – 17, Baikal age – 18.

найской дайки, полностью замещен серпентином и/или тальком. Образец из Белозиминской трубки содержит макрокристы не только оливина, но и амфибола, магнетита, флогопита и клинопироксена.

Основная масса ВТГ 2/21 представлена андрадитом (до 70 об. %), перовскитом (до 10 об. %), шпинелидами (до 6 об. %), минералами группы

апатита (до 5 об. %), кальцитом (до 1 об. %). Образец ТКГ 3 имеет среднезернистую основную массу, состоящую из чешуек флогопита и кристаллов шпинелидов, рутила, апатита и доломита. Для образца ТКГ 1 и ВТГ 6/21 характерна тонкозернистая основная масса (флогопит, апатит, кальцит, доломит, хлорит, тальк) с более крупными кристал-

Таблица 1. Модальный состав основной массы айликитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса

Table 1. Modal composition of the groundmass of aillikites of the Zima alkaline-ultramafic carbonatite complex

Минералы	Дайки Большетагнинского массива				Бушканайская дайка	Белозиминская трубка
	BTG 2/21	TGK 1	TGK 3	TGK 6/21	Bush 3/21	BZT 4/21
	Об. %					
Хромит	5	5	4	3	2	1
Магнетит	1	20	20	10	10	10
Перовскит	10	–	–	10	8	5
Пироксен	–	–	–	–	1	–
Ильменит	–	10	–	–	–	–
Рутил	–	–	3	–	–	–
Флогопит	–	38	60	20	70	40
Апатит	5	5	5	5	3	5
Кальцит	1	11	–	20	3	10
Доломит	–	–	5	1	–	–
Андрадит	70	–	–	–	–	10
Сульфиды	1	1	1	1	1	1
Серпентин	2	5	1	10	1	10
Хлорит	1	5	1	10	1	1

Примечание. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Dash – limit below detection.

лами шпинелидов, перовскита, кальцита. В TGK 1 перовскит не отмечен, но присутствует ильменит. Основная масса Bush 3/21 представлена чешуйками флогопита, магнетитом, перовскитом, апатитом, кальцитом, хромитом, клинопироксеном, баритом, серпентином и хлоритом. Основная масса Белозиминской трубки состоит преимущественно из флогопита, магнетита, апатита, кальцита и андрадита (табл. 1, рис. 2).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск, Россия).

Было исследовано 20 плоскополированных пластинок толщиной 500 мкм. Химический состав минералов основной массы и минералов группы апатита был проанализирован на электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU, оснащенный системой микроанализа AZtec Energy XMax-50 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd). Параметры съемки для минералов группы апатита: ускоряющее напряжение – 20 кэВ, ток – 1.5 нА, время набора сигнала – 90 с. Пределы обнаружения для каждого элемента были следующими (сигма мас. %): CaO – 0.07, P₂O₅ – 0.05, F – 0.21, Cl – 0.01, Na₂O – 0.04, MgO – 0.02, Al₂O₃ – 0.01, SiO₂ – 0.02, SO₃ – 0.01, K₂O – 0.01, Cr₂O₃ – 0.02, MnO – 0.03, FeO – 0.03, SrO – 0.05, BaO – 0.05, La₂O₃ – 0.06, Ce₂O₃ – 0.06,

Pr₂O₃ – 0.06, Nd₂O₃ – 0.06, Sm₂O₃ – 0.06, ThO₂ – 0.06. В данной работе используются данные, полученные с помощью электронного микроскопа, так как апатит оказался неустойчив под действием электронного пучка микрозонда и, как следствие, содержания некоторых компонентов оказались существенно заниженными.

Спектры комбинационного рассеяния света (КР-спектры) были получены с помощью спектрометра LabRAM HR800 фирмы Horiba Jobin Yvon, оснащенного Nd:YAG лазером 532 нм (ИГМ СО РАН). КР-спектры записывались при комнатной температуре в диапазонах 50–1600 см⁻¹ и 3200–3800 см⁻¹. Время накопления спектра и количество циклов составляли 5–10 с и 5–10, соответственно. Ширина дифракционной щели составляла 100 мкм, при решетке 1800 делений/мм. Спектры калибровались на известные эмиссионные линии неоновой лампы и пик кремния 520.6 см⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Минералы группы апатита составляют 3–5% основной массы всех изученных пород. Для них характерны идиоморфные, субидиоморфные однородные по составу кристаллы, размером 10–100 мкм (рис. 3).

Минералы группы апатита из образца BTG 2/21 расположены в агрегатах андрадита и содержат мономинеральные включения перовскита. Эти апати-

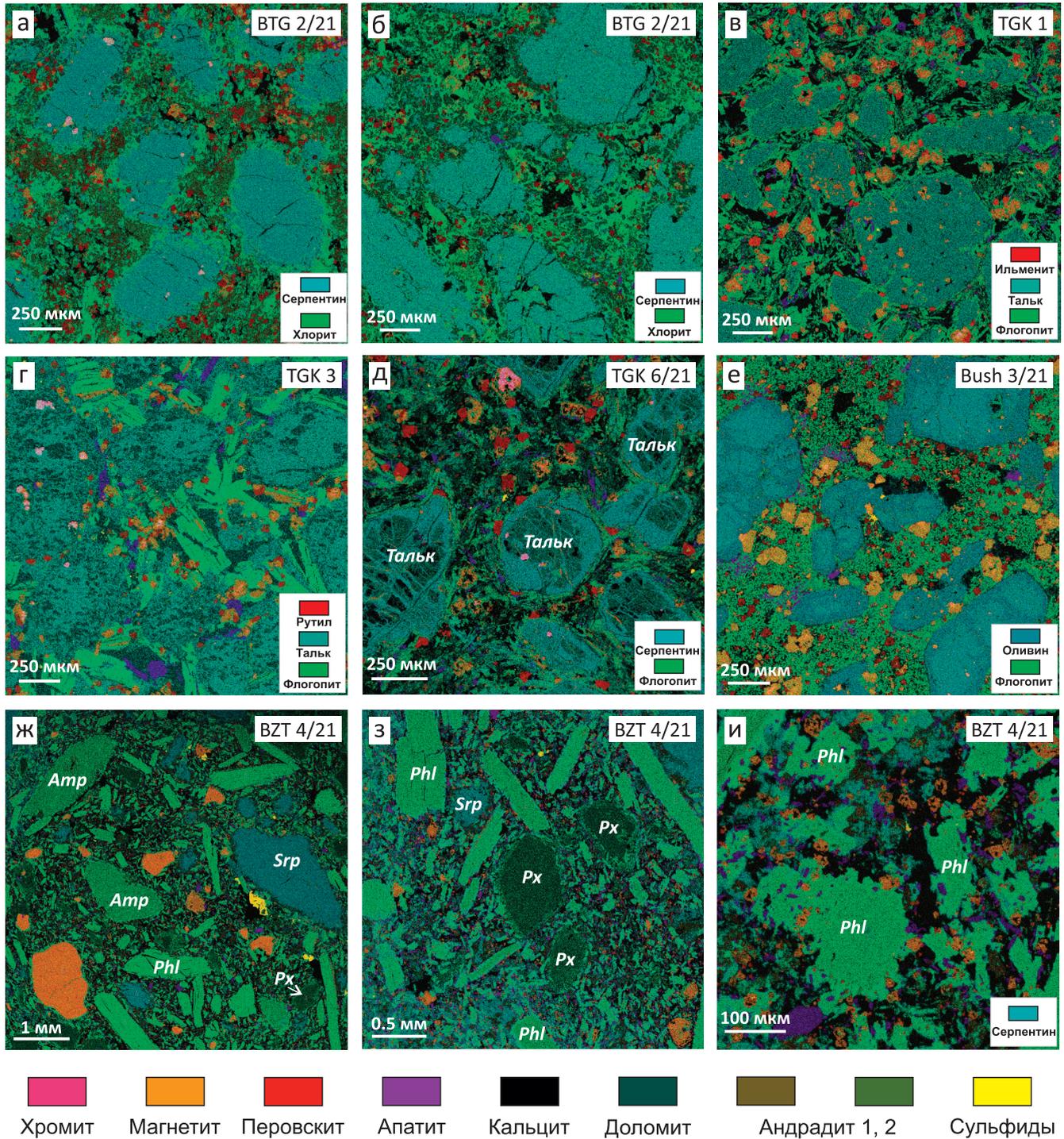


Рис. 2. Многослойные карты ЭДС для айликитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса.

Fig. 2. Multilayer EDS maps for aillikites of the Zima alkaline-ultramafic carbonatite complex.

ты имеют содержания (мас. %): CaO – 54.8–55.6, P₂O₅ – 39.1–40.7, F – 1.6–2.3, SiO₂ – 1.26–1.93 и низкое содержание PЗЭ – до 0.5, SrO – 1.15–1.27, а также SO₄ – 0.15–0.25 (см. рис. 3, 4, табл. 2). Отношение Ca/P составляет 1.68–1.71.

Апатиты из TGK 1 представлены небольшими кристаллами размером до 30 мкм и находятся в агрегатах серпентина. Они имеют относительно высокое отношение Ca/P (1.82–2.00). Также минералы группы апатита из TGK 1 характеризуются

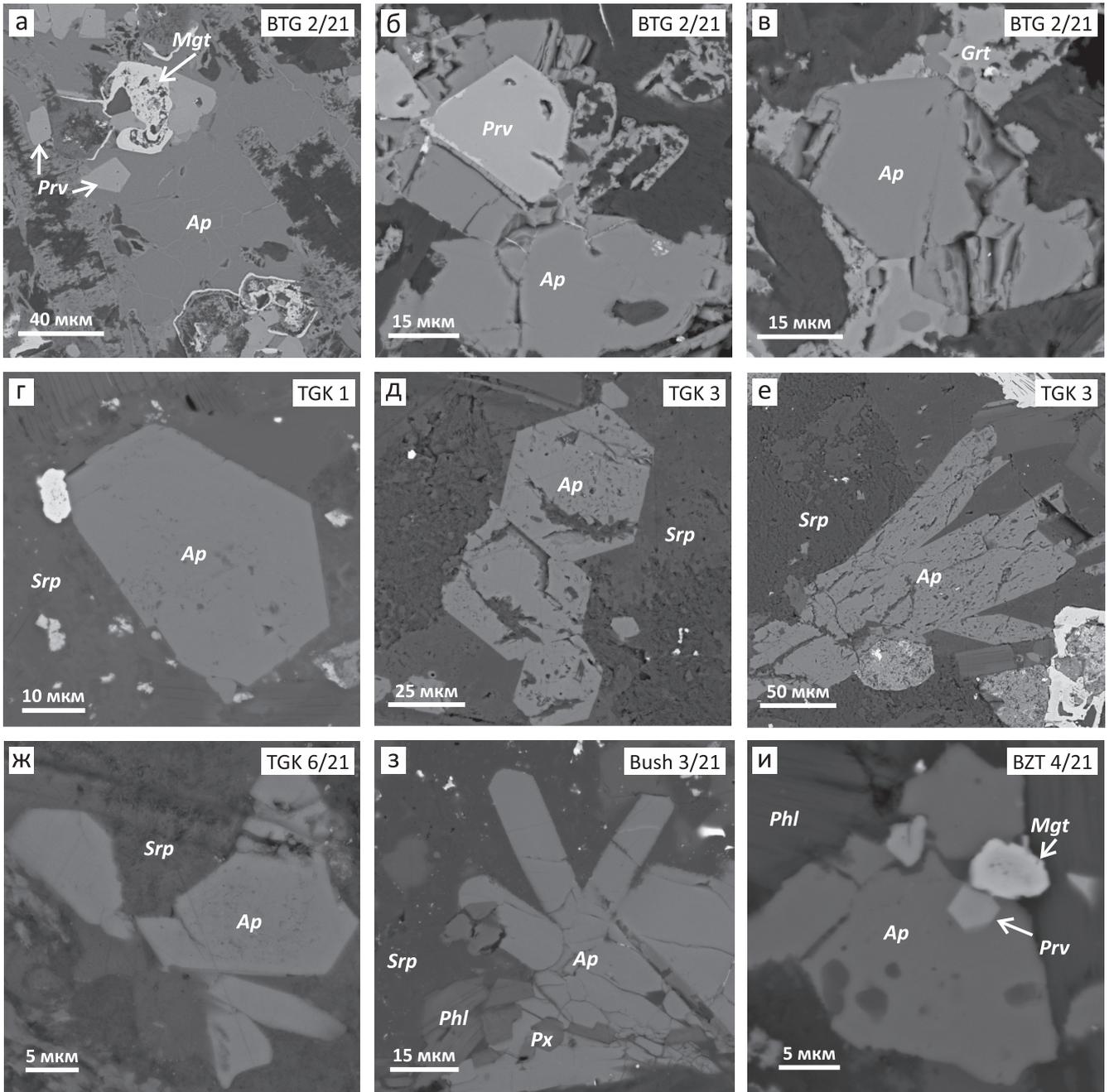


Рис. 3. BSE-изображения для апатитов из айликитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса.

Ap – минералы группы апатита, *Mgt* – магнетит, *Prv* – перовскит, *Grt* – минералы группы граната (андрадит), *Srp* – серпентин, *Px* – пироксен, *Cal* – кальцит, *Phl* – флогопит.

Fig. 3. BSE images for apatites from aillikites of the Zima alkaline-ultramafic carbonatite complex.

Ap – minerals of the apatite group, *Mgt* – magnetite, *Prv* – perovskite, *Grt* – minerals of the garnet group (andradite), *Srp* – serpentine, *Px* – pyroxene, *Cal* – calcite, *Phl* – phlogopite.

высоким SiO_2 – 2.8–4.36 мас. %, низким SrO – 0.8 и присутствием Na_2O – до 0.4 мас. % (см. рис. 3, 4, табл. 2).

В образце TGK 3 для апатитов характерны крупные пористые кристаллы, размером до 100 мкм, расположенные в серпентине. В них отношение

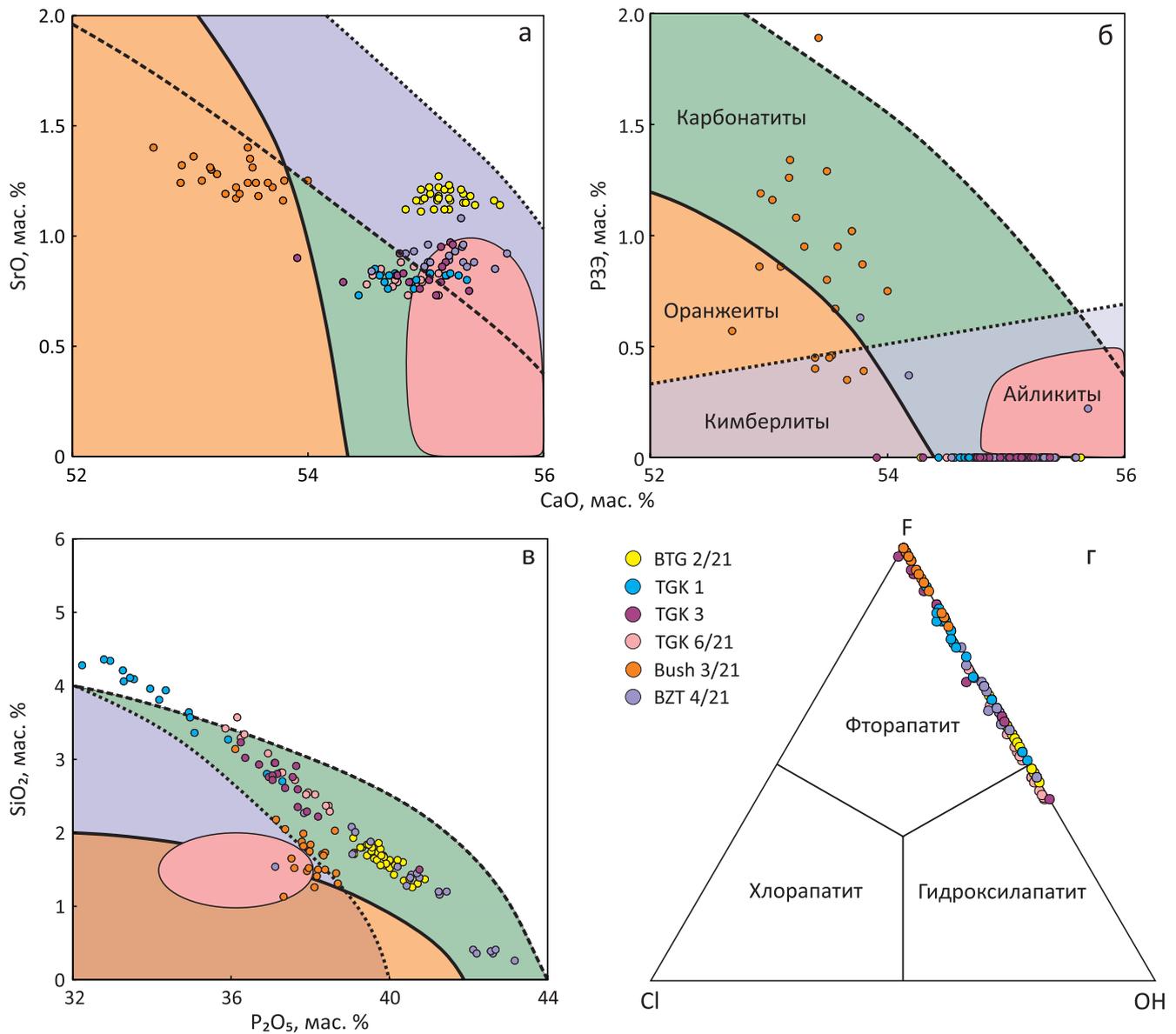


Рис. 4. Диаграммы составов минералов группы апатита из айликитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса.

Поля составов апатитов из кимберлитов, оранжеитов, карбонатитов и айликитов нанесены по данным (Soltys et al., 2020).

Fig. 4. Diagrams of compositions of apatite group minerals from aillikites of the Zima alkaline-ultramafic carbonatite complex.

The composition fields of apatites from kimberlites, orangeites, carbonatites, and aillikites are plotted according to (Soltys et al., 2020).

Ca/P достигает 1.84, SiO₂ – до 3.23 мас. % и SrO – до 0.95 мас. % (см. рис. 3, 4, табл. 2).

Мелкие зерна апатита размером до 25 мкм из TGK 6/21 были диагностированы в агрегатах серпентина. Они имеют высокое отношение Ca/P 1.80–1.86, относительно высокое SiO₂ – до 3.00 мас. % и низкое SrO – до 0.90 мас. % (см. рис. 3, 4, табл. 2).

Минералы группы апатита из Bush 3/21 были обнаружены как в серпентине, так и в кальците, и

имеют включения флогопита и диопсида. Состав этих апатитов характеризуется относительно высоким содержанием (мас. %): P₂O₅ – до 2.00, Na₂O – до 1.00, SrO – до 1.30, и F – 3.01–3.51. Отношение Ca/P = 1.72. (см. рис. 3, 4, табл. 2).

Апатиты из BZT 4/21 представлены мелкими кристаллами размером до 10 мкм и расположены в зернах флогопита или в агрегатах кальцита и серпентина. В самих апатитах были найдены включе-

Таблица 2. Химический состав минералов группы апатита из айликитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса (мас. %)

Table 2. Composition of minerals of the apatite group from aillikites of the Zima alkaline-ultramafic carbonatite complex (wt %)

Компонент	BTG 2/21		TGG 1/21		TGG/3		TGG 6/21		Bush 3/21		BZT 4/21	
CaO	55.2	55.2	54.6	54.7	55.4	55.2	54.8	54.8	53.2	53.8	53.8	54.2
SrO	1.17	1.12	0.85	0.83	0.75	0.97	0.79	0.82	1.28	1.16	1.62	1.58
MgO	0.12	0.12	0.10	0.15	0.18	0.08	0.17	0.15	0.38	0.73	0.17	0.13
FeO	0.22	0.22	0.28	0.35	0.30	0.37	0.28	0.27	0.44	0.33	0.36	0.37
Na ₂ O	–	–	0.26	0.34	–	0.20	–	–	0.71	0.42	–	–
Ce ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	0.56	0.48	0.41	0.37
La ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	0.52	0.39	0.22	–
P ₂ O ₅	39.8	39.9	33.3	32.2	37.7	38.2	36.9	37.6	37.4	37.8	42.1	42.2
SiO ₂	1.78	1.67	4.06	4.28	2.91	2.22	3.08	2.72	2.05	1.88	0.41	0.36
SO ₃	0.20	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.30	0.22	–	–	–	–
F	1.97	1.92	3.20	2.91	3.06	3.03	1.85	1.65	3.47	3.32	1.65	1.64
Cl	–	–	–	0.06	–	–	0.06	–	–	–	–	–
Сумма	100	100	96.7	96.1	100	101	98.2	98.2	100	100	101	101

Примечание. BaO, Pr₂O₃, Nd₂O₃, Sm₂O₃, ThO₂ и прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. BaO, Pr₂O₃, Nd₂O₃, Sm₂O₃, ThO₂ and dash – limit below detection.

ния перовскита и магнетита. В этих апатитах отношение Ca/P составляет ≈ 1.67 , содержание SiO₂ – до 1.5 мас. %; SrO – 0.90; F – 2.4 мас. % (см. рис. 3, 4, табл. 2).

Для всех рамановских КР-спектров исследованных минералов группы апатита характерен наиболее интенсивный пик с частотой 964 см⁻¹, который соответствует моде симметричных валентных колебаний PO₄³⁻ (ν_1) (рис. 5).

В частотном диапазоне от 1020 до 1090 см⁻¹ пики соответствуют асимметричным валентным колебаниям (ν_3) в группе PO₄³⁻ и симметричным валентным колебаниям (ν_1) в группе CO₃²⁻ (≈ 1070 см⁻¹). В этом частотном диапазоне обычно наиболее интенсивные линии с частотами ≈ 1050 см⁻¹, ≈ 1075 см⁻¹ ($\nu_3 - PO_4^{3-}$) и ≈ 1070 см⁻¹ ($\nu_1 - CO_3^{2-}$) обычно перекрывается с ≈ 1075 см⁻¹; менее интенсивные пики с частотами ≈ 1030 см⁻¹ и ≈ 1040 см⁻¹ ($\nu_3 - PO_4^{3-}$) или проявлены слабо (BTG 2/21, Bush 3/21), или полностью перекрываются и образуют плечо (BZT 4/21, TGG 1). В спектре TGG 3, напротив, отчетливо проявлены пики с частотами 1032 и 1041 см⁻¹, и они более интенсивные по отношению к пику 1055 см⁻¹, также в этом спектре проявлен пик с частотой 1060 см⁻¹ ($\nu_3 - PO_4^{3-}$) (Comodi et al., 2001). Также для исследованных образцов было отмечено увеличение относительной интенсивности пика 1070 см⁻¹ ($\nu_1 - CO_3^{2-}$) по отношению к пикам ($\nu_3 - PO_4^{3-}$) с ростом содержания кремния.

В частотном диапазоне 400–610 см⁻¹ расположены пики, связанные с симметричными ($\nu_2 - 430$ см⁻¹) и асимметричными ($\nu_4 - 447, 580, 590, 607$ и 612 см⁻¹) деформационными колебаниями PO₄³⁻.

В спектре TGG 3 проявлены все перечисленные линии для диапазона 400–610 см⁻¹, в спектрах, полученных для остальных образцов, линии 607 см⁻¹ и 612 см⁻¹ – низкоинтенсивные или вовсе перекрываются (BZT 4/21 и TGG 1).

Пики, расположенные до 300 см⁻¹, связаны с решеточными колебаниями в структуре апатита. В спектрах TGG 1, TGG 3 и Bush 3/21 наблюдались пики в частотном диапазоне колебаний O–H. Пики в диапазоне 3650–3750 см⁻¹ в спектре BTG 2/21 вероятно связаны с наложением спектра флогопита.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По соотношению F, Cl и OH большинство изученных минералов группы апатита айликитов относится к фторапатитам и только часть попадает в поле гидроксилapatита (см. рис. 4г, табл. 3). Подобные соотношения анионов являются наиболее распространенными для минералов группы апатита магматического генезиса, включая кимберлиты и щелочно-карбонатитовые комплексы (Webster, Piccoli, 2015; Soltys et al., 2020). Апатиты из пробы BTG 2/21 попадают в область между фтор- и гидроксилapatитом (см. рис. 4г). Присутствие в их составе значимого количества гидроксил-группы подтверждается хорошо выраженными линиями в области 3650–3750 см⁻¹ на КР спектрах (см. рис. 5).

Изученные апатиты за редким исключением характеризуются повышенными содержаниями SiO₂ – >1 мас. %, умеренными – SrO – до 1.5 мас. % и низкими – PЗЭ (см. рис. 4, табл. 2). Апатиты из Белозиминской трубки имеют самое низкое содер-

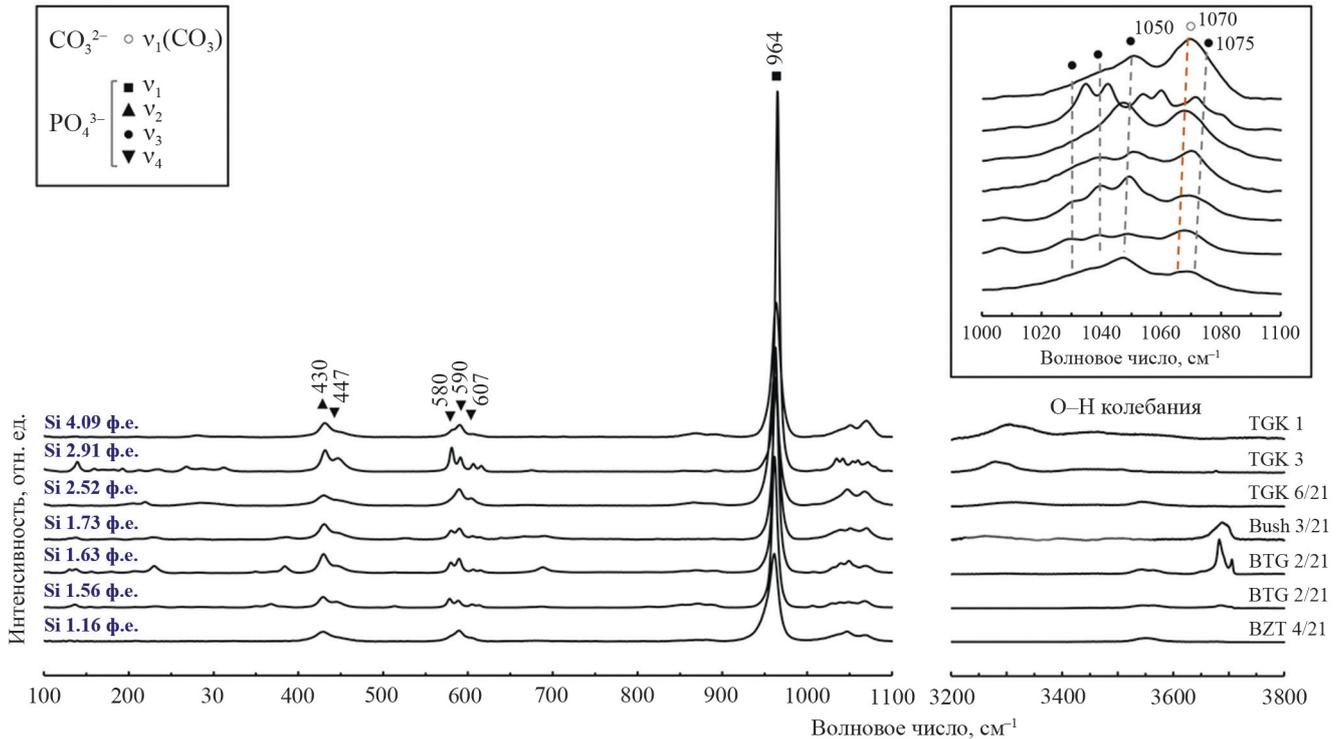


Рис. 5. КР-спектры минералов группы апатита из айликитов зиминского комплекса.

Спектры расположены по мере увеличения содержания Si (ф.е. – формульные единицы): $\nu_1(\text{CO}_3^{2-})$ – мода симметричных валентных колебаний в группе CO_3^{2-} (1071 cm^{-1}); колебания в группе PO_4^{3-} (ν_1 – мода симметричных валентных колебаний (964 cm^{-1}), ν_2 – мода симметричных деформационных колебаний (430 cm^{-1}), ν_3 – моды ассиметричных валентных колебаний (1040, 1050 и 1075 cm^{-1}), ν_4 – моды ассиметричных деформационных колебаний (447, 580 и 607 cm^{-1}).

Fig. 5. Raman spectra of minerals of the apatite group from aillikites of the Zima alkaline-ultramafic carbonatite complex.

The spectra are arranged with increasing Si content (f.e. – formula units): (1071 cm^{-1}); vibrations in the PO_4^{3-} group (ν_1 is the mode of symmetric stretching vibrations (964 cm^{-1}), ν_2 is the mode of symmetric deformation vibrations (430 cm^{-1}), ν_3 is the mode of asymmetric stretching vibrations (1040, 1050 and 1075 cm^{-1}), ν_4 – modes of asymmetric deformation vibrations (447, 580 and 607 cm^{-1}).

жание SiO_2 – до 2 мас. %, апатиты из TGK 1 – самое высокое – до 4 мас. %. В соответствии с данными КР спектров, наблюдаются пики CO_3^{2-} . Известно, что CO_3^{2-} может занимать два разных положения в структуре апатита. Он может замещать OH^- группы и PO_4^{3-} . Пик CO_3^{2-} КР-спектров около 1070 cm^{-1} характерен для апатитов, где CO_3^{2-} занимает положение PO_4^{3-} . Пики CO_3^{2-} около 715 и 689 cm^{-1} показывают CO_3^{2-} в положении OH^- группы (Awonusi, Morris, 2007; Ishimaru et al., 2018). Пик CO_3^{2-} в изученных апатитах наблюдается в 1070 cm^{-1} и не проявлен в 715 и 689 cm^{-1} , что позволяет предположить наличие CO_3^{2-} в позиции PO_4^{3-} . SiO_4 , как и CO_3^{2-} , входит в позицию PO_4^{3-} . Однако при этом должен сохраниться баланс зарядов, которого можно достичь с помощью следующих изоморфных схем: 1) $\text{PZ}^{3+} + \text{SiO}_4^{4-} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{PO}_4^{3-}$; 2) $\text{SO}_4^{2-} + \text{SiO}_4^{4-} \leftrightarrow 2\text{PO}_4^{3-}$; 3) $\text{SiO}_4^{4-} + \text{CO}_3^{2-} \leftrightarrow 2\text{PO}_4^{3-}$ (Pan, Fleet, 2002; Piccoli, Candela, 2002). В нашем случае 3-я схема является наиболее подходящей. Апатиты из

Бушканайской дайки отличаются от других изученных апатитов более высоким содержанием РЗЭ и низким SiO_2 при одинаковом содержании P_2O_5 (см. рис. 4в). Поэтому мы предполагаем, что в апатитах Бушканайской дайки сохранение баланса зарядов происходит по схеме 1.

Фторапатиты из айликитов Белозиминской трубки характеризуются низким содержанием кремния, а апатиты из даек – высоким содержанием, что могло быть результатом обогащения кремнием или повышения активности кремния в остаточном расплаве последних. Предполагается, что нахождение CO_3^{2-} и SiO_4 в структуре апатита в позиции PO_4^{3-} отражает более высокий уровень содержания CO_2 в исходном расплаве и более высокое содержание SiO_2 из-за предпочтительной кристаллизации карбонатов по сравнению со слюдой и монтчеллитом (Soltys et al., 2020).

Основным концентратом Sr в кимберлитах и родственных им айликитах являются карбонаты

Таблица 3. Формулы для минералов группы апатита из айликитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса

Table 3. Formulas for minerals of the apatite group from aillikites of the Zima alkaline-ultramafic carbonatite complex

№ образца	Формула	Вид апатита
BTG 2/21	$(\text{Ca}_{9,8}\text{Sr}_{0,1}\text{Mg}_{0,03}\text{Fe}_{0,03})[(\text{PO}_4)_{5,7}(\text{SiO}_4)_{0,3}(\text{SO}_4)_{0,02}(\text{CO}_3)_{0,003}](\text{F}_{1,2}(\text{OH})_{0,8})$	Фторапатит
TGK 1	$(\text{Ca}_{9,8}\text{Na}_{0,1}\text{Sr}_{0,08}\text{Fe}_{0,05}\text{Mg}_{0,04})[(\text{PO}_4)_{5,3}(\text{SiO}_4)_{0,7}(\text{SO}_4)_{0,01}(\text{CO}_3)_{0,007}](\text{F}_{1,8}(\text{OH})_{0,2})$	То же
TGK 3	$(\text{Ca}_{9,8}\text{Sr}_{0,09}\text{Mg}_{0,05}\text{Fe}_{0,05})[(\text{PO}_4)_{5,6}(\text{SiO}_4)_{0,4}(\text{SO}_4)_{0,01}(\text{CO}_3)_{0,006}](\text{F}_{1,5}(\text{OH})_{0,5})$	“_”
TGK 6/21	$(\text{Ca}_{9,9}\text{Sr}_{0,08}\text{Mg}_{0,03}\text{Fe}_{0,03})[(\text{PO}_4)_{5,6}(\text{SiO}_4)_{0,4}(\text{SO}_4)_{0,03}(\text{CO}_3)_{0,005}](\text{OH})_{1,1}\text{F}_{0,9}$	Гидроксилapatит
Bush 3/21	$(\text{Ca}_{9,6}\text{Na}_{0,2}\text{Sr}_{0,1}\text{PЗЭ}_{0,07}\text{Mg}_{0,05}\text{Fe}_{0,05})[(\text{PO}_4)_{5,7}(\text{SiO}_4)_{0,3}(\text{CO}_3)_{0,004}](\text{F}_{1,8}(\text{OH})_{0,2})$	Фторапатит
BZT 4/21	$(\text{Ca}_{9,8}\text{Sr}_{0,09}\text{Fe}_{0,06}\text{Mg}_{0,04})[(\text{PO}_4)_{5,9}(\text{SiO}_4)_{0,1}(\text{CO}_3)_{0,001}](\text{F}_{1,3}(\text{OH})_{0,7})$	То же

(Mitchell, 1997; Chakhmouradian et al., 2002). При отсутствии первичных карбонатных фаз Sr преимущественно накапливается в апатите. Если в породе нет ни первичных карбонатов, ни минералов группы апатита, то Sr концентрируется в перовските. Очень высокое содержание Sr в апатитах объясняется привнесением в расплав водных флюидов дейтериевого или гидротермального происхождения (Soltys et al., 2020). Возможно, более высокие содержания Sr в BTG 2/21 и Bush 3/21 связаны с низким содержанием магматических карбонатов.

Низкое содержание PЗЭ в апатитах может быть результатом кристаллизации апатита из расплава, который был обеднен PЗЭ при кристаллизации перовскита (Jones, Wyllie, 1984). В основной массе изученных айликитов присутствует перовскит до 10 об. % с содержанием PЗЭ от 1 до 6 мас. %. В соответствии с полученными петрографическими данными, низкое содержание PЗЭ в минералах группы апатита из айликитов зиминского комплекса связано с тем, что перовскит кристаллизуется раньше апатита.

По составу явно выделяются апатиты из Бушканайской дайки (Bush 3/21), которые содержат повышенные содержания PЗЭ и SrO, а также максимально высокий F. Именно для этой пробы отмечается наименьшая степень гидротермальной проработки, и можно было бы сделать заключение об отсутствии взаимодействия апатитов с растворами и переуравновешивания их составов. Однако, считается, что для минералов группы апатита влияние вторичных процессов не играет существенной роли (Webster, Piccoli, 2015). Можно предположить, что расплав из которого кристаллизовались апатиты Бушканайской дайки первоначально имел относительно высокое содержание Sr, PЗЭ, F.

Минералы группы апатита из кимберлитов и родственных пород являются чистыми фторгидроксилapatитами со значительным количеством кремния (Mitchell, 1986). Апатиты из оранжеитов имеют высокое содержание SrO – до 6 мас. % и низкое содержание PЗЭ₂O₃ – до 1 мас. %. Кимберлитовые апатиты обеднены SrO (<1 мас. %), чем оранжеитовые. Лампроитовые апатиты пред-

ставляют собой фторапатиты и имеют высокое содержание SrO – до 6 и BaO – до 10 мас. %, низкое PЗЭ₂O₃ – до 2 и SiO₂ – до 1 мас. %. Карбонатитовые апатиты содержат более высокие LREE, S, Cl и F, но более низкое содержание Fe относительно апатитов из кимберлитов (Soltys et al., 2020). Айликитовые апатиты по своему химическому составу близки с кимберлитовыми (Mitchell, 1986, 1995; Soltys et al., 2020; Нугуманова, Калугина, 2022). Сходство составов апатитов из кимберлитов и айликитов может свидетельствовать о сходных составах их расплавов на поздних стадиях кристаллизации (Soltys et al., 2020). Исследованные в этой работе минералы группы апатита схожи по составу с апатитами из кимберлитов и родственных пород. Составы изученных апатитов наиболее близки к апатитам из кимберлитов и айликитов мира, в отличие от оранжеитовых и лампроитовых они имеют низкое содержания Sr и Ba.

Полученные нами данные значительно расширяют поля составов апатитов из айликитов. На рис. 4а диапазон содержания SrO в айликитах увеличивается до 1.5 мас. %, содержание PЗЭ – до 1.5 мас. % (см. рис. 4б), содержание SiO₂ – до 4 мас. % (см. рис. 4в).

ВЫВОДЫ

Изученные минералы группы апатита из айликитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса были идентифицированы как фторапатиты и гидроксилapatиты. Эти апатиты имеют повышенное содержание SiO₂ – до 5 мас. %, низкое содержание SrO – до 1.5 мас. % и PЗЭ₂O₃ – до 2 мас. %. Кроме того, в состав изученных апатитов входят MgO, FeO, Na₂O, SO₄, CO₃. Для фторапатитов из дайковых айликитов характерно более высокое содержание кремния относительно апатитов из Белозиминской трубки. Предполагается, что наличие CO₃²⁻ и SiO₄ в позиции PO₄³⁻ отражает более высокий уровень содержания CO₂ в исходном расплаве и более высокое содержание SiO₄. Апатиты из Бушканайской дайки (Bush 3/21) содержат повышенные содержания PЗЭ и SrO, а также макси-

мально высокий F. Именно для этой пробы отмечается наименьшая степень гидротермальной обработки, и можно было бы сделать заключение об отсутствии взаимодействия апатитов с растворами и переуравновешивания их составов. Однако, считается, что для минералов группы апатита влияние вторичных процессов не играет существенной роли (Webster, Piccoli, 2015). Можно предположить, что расплав, из которого кристаллизовались апатиты Бушканайской дайки первоначально имел относительно высокое содержание Sr, P3Э, F.

Исследованные апатиты по своему химическому составу отличаются от апатитов из оранжеев и лампроитов более низкими содержаниями Sr и Ba. По содержаниям Sr, Si и P3Э изученные апатиты схожи с апатитами из кимберлитов и айлики-тов. Эти различия позволяют использовать минералы группы апатита в качестве индикаторного минерала для классификации кимберлитов и родствен-ных пород.

Полученные нами данные значительно расширяют поля составов апатитов из айлики-тов. Диапазон содержания SrO в айлики-тах увеличивается до 1.5 мас. %, P3Э – до 1.5 мас. %, а SiO₂ – до 4 мас. %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багдасаров Ю.А. (2001) Металлогения карбонатитовых комплексов России. *Металлогения магматических комплексов внутриплитовых геодинамических обстановок*. М.: ГЕОС, 128-506.
- Василенко А.А. (1996) Отчет о результатах поисково-оценочных работ на Большектагнинском апатит-редкометалльном месторождении и Ярминском торий-редкометалльном рудопроявлении за 1988–1992 гг. Иркутский филиал ФГУ “ТФИ по Иркутской области”.
- Корнаков В.В., Матвейчук А.А., Кнутова С.В. (2019) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Восточно-Саянская. Лист N-47-XXIII (Белая Зима). М.: Роснедра, 132 с.
- Нугуманова Я.Н., Калугина А.Д. (2022) Особенности состава минералов группы апатита из ультраосновных лампрофиров Большектагнинского щелочно-ультраосновного карбонатитового массива (Восточно-Саянская область). *Тр. Ферсмановской науч. сессии ГИ КНЦ РАН*, (19), 266-270.
- Савельева В.Б., Данилова Ю.В., Базарова Е.П., Данилов Б.С. (2020) Кимберлитоподобные породы Урикско-Ийского грабена, Восточное Присяянье: минеральный состав, геохимия и условия формирования. *Геодинамика и тектонофизика*, **11**(4), 678-696. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0500>
- Секерин А.П., Меньшагин Ю.В., Лашенов В.А. (1995) Присяянская провинция высококальциевых щелочных пород и лампроитов. *Докл. АН*, **342**(1), 82-86.
- Фролов А.А., Белов С.В. (1999) Комплексные карбонатитовые месторождения зиминского рудного района (Восточный Саян, Россия). *Геология руд. месторождений*, **41**(2), 109-130.
- Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В., Зинчук Н.Н., Белов С.В., Бурмистров А.А. (2005) Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерагения, прогноз). М.: НИИ–Природа, 540 с.
- Awonusi A., Morris M.D., Tecklenburg M.M.J. (2007) Carbonate Assignment and Calibration in the Raman Spectrum of Apatite. *Calcified Tissue Int.*, **81**(1), 46-52.
- Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Mitchell R.H. (2002) Strontium-apatite: New occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals. *Can. Mineral.*, **40**, 121-136.
- Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Zaitsev A.N., Couëslan C., Xue C., Kynický J., Mumin H., Yang P. (2017) Apatite in carbonatitic rocks: Compositional variation, zoning, element partitioning and petrogenetic significance. *Lithos*, **274-275**, 188-213.
- Comodi P., Liu Yu, Frezzotti M.L. (2001) Structural and vibrational behavior of fluorapatite with pressure. Part II: in situ micro-Raman spectroscopic investigation. *Phys. Chem. Minerals*, **28**, 225-231.
- Dalton H.B., Giuliani A., O'Brien H., Phillips D., Hergt J. (2019) Petrogenesis of a hybrid cluster of evolved kimberlites and ultramafic lamprophyres in the Kuusamo area, Finland. *J. Petrol.*, **60**(10), 2025-2050. <https://doi.org/10.1093/petrology/egz062>
- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladyskin N.V. (2016) Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids. *J. Asian Earth Sci.*, **26**, 81-96.
- Egorov K.N., Kiselev A.I., Men'Shagin Y.V., Minaeva Y.A. (2010) Lamproite and Kimberlite of the Sayany Area: Composition, Sources, and Diamond Potential. *Dokl. Earth Sci.*, **435**(2), 1670-1675. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10120251>
- 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. *Mineral. Petrol.*, **74**, 361-384. <https://doi.org/10.1007/s007100200011>
- Ishimaru Y., Oshima Y., Imai Y., Iimura T., Takanezawa S., Hino K., Miura H. (2018) Raman Spectroscopic Analysis to Detect Reduced Bone Quality after Sciatic Neurectomy in Mice. *Molecules*, **23**(12), 3081.
- Jones A.P., Wyllie P.J. (1984) Minor elements in perovskite from kimberlite and the distribution of rare earth elements: An electron probe study. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **69**, 128-140.
- Jones R.H., McCubbin F.M., Guan Y. (2016) Phosphate minerals in the H group of ordinary chondrites, and fluid activity recorded by apatite heterogeneity in the Zag H3-6 regolith breccia. *Amer. Mineralogist*, **101**(11), 2452-2467.
- Khan A.F., Awais M., Khan A.S., Tabassum S., Chaudhry A.A., Rehman I.U. (2013) Raman Spectroscopy of Natural Bone and Synthetic Apatites. *Appl. Spectroscopy Rev.*, **48**, 329-355.
- 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>

thos.2009.06.001

- Milligan R., Fedortchouk Y., Normandeau P.X., Fulop A., Robertson M. (2017) Features of apatite in kimberlites from Ekati Diamond Mine and Snap Lake, Northwest Territories, Canada: modelling of kimberlite composition. *11th International Kimberlite Conference Extended Abstract*. No. 11IKC-4519.
- Mitchel R.H. (1997) Preliminary studies of the solubility and stability of perovskite group compounds in the synthetic carbonatite system calcite–portlandite. *J. Afr. Earth Sci.*, **25**, 147-158.
- Mitchel R.H. (2008) Petrology of hypabyssal kimberlites: Relevance to primary magma compositions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **174**, 1-8.
- Mitchel R.H., Tappe S. (2008) Discussion of “Kimberlites and aillikites as probes of the continental lithospheric mantle”, by D. Francis and M. Patterson (*Lithos*, **109**, 72-80). *Lithos*, **115**(1), 288-292.
- Mitchell R.H. (1986) Kimberlites: mineralogy, geochemistry, and petrology. New York, Springer Science & Business Media, 442 p.
- Mitchell R.H. (1995) Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks. New York, Springer Science & Business Media, 410 p.
- 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **173**, 55. <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1480-3>
- Pan Y., Fleet M.E. (2002) Compositions of the Apatite-Group Minerals: Substitution Mechanisms and Controlling Factors. *Rev. Mineral. Geochem.*, **48**(1), 13-49.
- Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C., Pekov I.V., Rakovan J., White T.J. (2010) Nomenclature of the apatite supergroup minerals. *Europ. J. Miner.*, **22**, 163-179.
- Piccoli P.M., Candela P.A. (2002) Apatite in igneous systems. in “Phosphates – geochemical, geobiological, and materials importance”. (Eds M.J. Kohn, J. Rakovan, J.M. Hughes). *Rev. Mineral. Geochem.*, **48**, 255-292.
- Savelyeva V.B., Danilova Yu.V., Letnikov F.A., Demontterova E.I., Yudin D.S., Bazarova E.P., Danilov B.S., Sharygin I.S. (2022) Age and Melt Sources of Ultramafic Dykes and Rocks of the Bolshetagninskii Alkaline Carbonatite Massif (Urik-Iya Graben, SW Margin of the Siberian Craton). *Dokl. Earth Sci.*, **505**, 452-458.
- Soltys A., Giuliani A., Phillips D. (2020) Apatite compositions and groundmass mineralogy record divergent melt/fluid evolution trajectories in coherent kimberlites caused by differing emplacement mechanisms. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **175**(49). <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01686-0>
- Tappe S., Foley S., Jenner G., Heaman L., Kjarsgaard B., Romer R., Stracke A., Joyce N., Hoefs J. (2006) Genesis of Ultramafic Lamprophyres and Carbonatites at Aillik Bay, Labrador: A Consequence of Incipient Lithospheric Thinning beneath the North Atlantic Craton. *J. Petrol.*, **47**(7), 1261-1315.
- Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjarsgaard B.A. (2005) Integrating Ultramafic Lamprophyres into the IUGS Classification of Igneous Rocks: Rationale and Implications. *J. Petrol.*, **46**(9), 1893-1900. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi039>
- Tappe S., Jenner G.A., Foley S.F., Heaman L., Besserer D., Kjarsgaard B.A., Ryan B. (2004) Torngat Ultramafic Lamprophyres and Their Relation to the North Atlantic Alkaline Province. *Lithos*, **76**(1-4), 491-518. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.040>
- Webster J.D., Piccoli P.M. (2015) Magmatic apatite: A powerful, yet deceptive, mineral. *Elements*, **11**, 177-182.
- Wopenka B., Pasteris J.D. (2005) A mineralogical perspective on the apatite in bone. *Materials Science and Engineering, C*, **25**(2), 131-143.

REFERENCES

- Awonusi A., Morris M.D., Tecklenburg M.M.J. (2007) Carbonate Assignment and Calibration in the Raman Spectrum of Apatite. *Calcified Tissue Int.*, **81**(1), 46-52.
- Bagdasarov Yu.A. (2001) Metallogeny of Carbonatite Complexes of Russia. *Metallogeny of Magmatic Complexes of Within-Plate Geodynamic Settings*. Moscow, GEOS Publ., 128-506. (In Russ).
- Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Mitchell R.H. (2002) Strontium-apatite: New occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals. *Can. Mineral.*, **40**, 121-136.
- Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Zaitsev A.N., Couëslan C., Xue C., Kynický J., Mumin H., Yang P. (2017) Apatite in carbonatitic rocks: Compositional variation, zoning, element partitioning and petrogenetic significance. *Lithos*, **274-275**, 188-213.
- Comodi P., Liu Yu, Frezzotti M.L. (2001) Structural and vibrational behavior of fluorapatite with pressure. Part II: in situ micro-Raman spectroscopic investigation. *Phys. Chem. Minerals*, **28**, 225-231.
- Dalton H.B., Giuliani A., O'Brien H., Phillips D., Hergt J. (2019) Petrogenesis of a hybrid cluster of evolved kimberlites and ultramafic lamprophyres in the Kuusamo area, Finland. *J. Petrol.*, **60**(10), 2025-2050. <https://doi.org/10.1093/petrology/egz062>
- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladykin N.V. (2016) Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids. *J. Asian Earth Sci.*, **26**, 81-96.
- Egorov K.N., Kiselev A.I., Men'Shagin Y.V., Minaeva Y.A. (2010) Lamproite and Kimberlite of the Sayany Area: Composition, Sources, and Diamond Potential. *Dokl. Earth Sci.*, **435**(2), 1670-1675. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10120251>
- 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. *Miner. Petrol.*, **74**, 361-384. <https://doi.org/10.1007/s007100200011>
- Frolov A.A., Belov S.V. (1999) Complex carbonatite deposits of the Ziminsky ore region (Eastern Sayan, Russia). *Geol. Ore Depos.*, **41**(2), 109-130.
- Frolov A.A., Lapin A.V., Tolstov A.V., Zinchuk N.N., Belov S.V., Burmistrov A.A. (2005) Carbonatites and kimberlites (relationships, minerageny, forecast). Moscow, NIA-Priroda Publ., 540 p. (In Russ)
- Ishimaru Y., Oshima Y., Imai Y., Imura T., Takanezawa S., Hino K., Miura H. (2018) Raman Spectroscopic Analysis to Detect Reduced Bone Quality after Sciatic Neurectomy in Mice. *Molecules*, **23**(12), 3081.

- Jones A.P., Wyllie P.J. (1984) Minor elements in perovskite from kimberlite and the distribution of rare earth elements: An electron probe study. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **69**, 128-140.
- Jones R.H., McCubbin F.M., Guan Y. (2016) Phosphate minerals in the H group of ordinary chondrites, and fluid activity recorded by apatite heterogeneity in the Zag H3-6 regolith breccia. *Amer. Mineralogist*, **101**(11), 2452-2467.
- Khan A.F., Awais M., Khan A.S., Tabassum S., Chaudhry A.A., Rehman I.U. (2013) Raman Spectroscopy of Natural Bone and Synthetic Apatites. *Appl. Spectroscopy Rev.*, **48**, 329-355.
- 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>
- Kornakov V.V., Matveichuk A.A., Knutova S.V. (2019) State geological map of the Russian Federation, scale 1 : 200,000. Second edition. East Sayan series. Sheet N-47-XXIII (White Winter). Moscow, Rosnedra Publ., 132 p. (In Russ.)
- Milligan R., Fedortchouk Y., Normandeau P.X., Fulop A., Robertson M. (2017) Features of apatite in kimberlites from Ekati Diamond Mine and Snap Lake, Northwest Territories, Canada: modelling of kimberlite composition. *11th International Kimberlite Conference Extended*. Abstract. No. 11IKC-4519.
- Mitchel R.H. (1997) Preliminary studies of the solubility and stability of perovskite group compounds in the synthetic carbonatite system calcite-portlandite. *J. Afr. Earth Sci.*, **25**, 147-158.
- Mitchel R.H. (2008) Petrology of hypabyssal kimberlites: Relevance to primary magma compositions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **174**, 1-8.
- Mitchel R.H., Tappe S. (2008) Discussion of “Kimberlites and aillikites as probes of the continental lithospheric mantle”, by D. Francis and M. Patterson (*Lithos*, **109**, 72-80). *Lithos*, **115**(1), 288-292.
- Mitchell R.H. (1986) Kimberlites: mineralogy, geochemistry, and petrology. New York, Springer Science & Business Media, 442 p.
- Mitchell R.H. (1995) Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks. New York, Springer Science & Business Media, 410 p.
- 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **173**, 55. <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1480-3>
- Nugumanova Ya.N., Kalugina A.D. (2022) Features of the composition of minerals of the apatite group from ultramafic lamprophyres of the Bolshetagninsky alkaline-ultramafic carbonatite massif (East Sayan region). *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*, (19), 266-270. (In Russ.)
- Pan Y., Fleet M.E. (2002) Compositions of the Apatite-Group Minerals: Substitution Mechanisms and Controlling Factors. *Rev. Mineral. Geochem.*, **48**(1), 13-49.
- Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C., Pekov I.V., Rakovan J., White T.J. (2010) Nomenclature of the apatite supergroup minerals. *Europ. J. Miner.*, **22**, 163-179.
- Piccol, P.M., Candela P.A. (2002) Apatite in igneous systems. in “Phosphates – geochemical, geobiological, and materials importance”. (Eds M.J. Kohn, J. Rakovan, J.M. Hughes). *Rev. Mineral. Geochem.*, **48**, 255-292.
- Savelieva V.B., Danilova Yu.V., Bazarova E.P., Danilov B.S. (2020) Kimberlite-like rocks of the Urik-Iya graben, Eastern Sayan region: mineral composition, geochemistry and formation conditions. *Geodynamics & Tectonophysics*, **11**(4), 678-696. (In Russ). <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0500>
- Savelyeva V.B., Danilova Yu.V., Letnikov F.A., Demonterova E.I., Yudin D.S., Bazarova E.P., Danilov B.S., Sharygin I.S. (2022) Age and Melt Sources of Ultramafic Dykes and Rocks of the Bolshetagninskii Alkaline Carbonatite Massif (Urik-Iya Graben, SW Margin of the Siberian Craton). *Dokl. Earth Sci.*, **505**, 452-458.
- Sekerin A.P., Men'shagin Yu.V., Lashchenov V.A. (1995) The Sayan Province of High-Potassium Alkaline Rocks and Lamproites. *Dokl. Earth Sci.*, **342**(1), 82-86. (in Russ.)
- Soltys A., Giuliani A., Phillips D. (2020) Apatite compositions and groundmass mineralogy record divergent melt/fluid evolution trajectories in coherent kimberlites caused by differing emplacement mechanisms. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **175**(49). <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01686-0>
- Tappe S., Foley S., Jenner G., Heaman L., Kjarsgaard B., Romer R., Stracke A., Joyce N., Hoefs J. (2006) Genesis of Ultramafic Lamprophyres and Carbonatites at Aillik Bay, Labrador: A Consequence of Incipient Lithospheric Thinning beneath the North Atlantic Craton. *J. Petrol.*, **47**(7), 1261-1315.
- Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjarsgaard B.A. (2005) Integrating Ultramafic Lamprophyres into the IUGS Classification of Igneous Rocks: Rationale and Implications. *J. Petrol.*, **46**(9), 1893-1900. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi039>
- Tappe S., Jenner G.A., Foley S.F., Heaman L., Besserer D., Kjarsgaard B.A., Ryan B. (2004) Torngat Ultramafic Lamprophyres and Their Relation to the North Atlantic Alkaline Province. *Lithos*, **76**(1-4), 491-518. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.040>
- Vasilenko A.A. (1996) Report on the results of exploration work at the Bolshetagninsky apatite-rare-metal deposit and the Yarma thorium-rare-metal ore occurrence for 1988–1992. Irkutsk branch of the Federal State Institution “TFI in the Irkutsk Region”. (In Russ, unpublished).
- Webster J.D., Piccoli P.M. (2015) Magmatic apatite: A powerful, yet deceptive, mineral. *Elements*, **11**, 177-182.
- Wopenka B., Pasteris J.D. (2005) A mineralogical perspective on the apatite in bone. *Materials Science and Engineering, C*, **25**, 131-143.