



MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF APATITE-FLUORITE ROCKS OF THE BURPALA MASSIF IN THE NORTHERN BAIKAL REGION

I.A. Sotnikova ✉, N.V. Alymova , Yu.D. Scherbakov 

Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. The Burpala massif located in the Northern Baikal region contains ore-bearing pegmatites, carbonatites and apatite-fluorite rocks with Zr-Nb-REE-rare-metal mineralization. Considering their petrological, geochemical, geological and thermobarochemical features, it was established that apatite-fluorite rocks were formed from a residual fluid melt containing minor CO₂, increased P₂O₅ and F. Apatite-fluorite rocks of the Burpala massif are similar to the foscrite formations of most carbonatite complexes distinguished by the presence of fluorite.

The mineral composition of these rocks was for the first time studied in details. In addition to apatite and fluorite, the following minerals are present: zircon, baddeleyite, barite-celestine, barite, thorianite, ilmenite, magnetite, hematite, biotite, potassium feldspar, pyroxene, as well as rare minerals with high Ta, Nb and Pb content.

KEYWORDS: apatite-fluorite rocks; foscrite; Burpala massif; mineral and chemical composition of rocks; baddeleyite; titanomagnetite; carbonatites

FUNDING: This research was executed by the assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, theme 0284-2021-0008 "Geochemistry, petrology and ore content of intrusive and volcanic alkaline complexes and deposits of strategic metals and their mantle sources".

SHORT COMMUNICATION

Correspondence: Irina A. Sotnikova, sotnikova@igc.irk.ru

Received: June 13, 2022

Revised: June 24, 2022

Accepted: June 29, 2022

FOR CITATION: Sotnikova I.A., Alymova N.V., Scherbakov Yu.D., 2022. Mineralogical and Geochemical Features of Apatite-Fluorite Rocks of the Burpala Massif in the Northern Baikal Region. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0657. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0657

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АПАТИТ-ФЛЮОРИТОВЫХ ПОРОД БУРПАЛИНСКОГО МАССИВА (СЕВЕРНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

И.А. Сотникова, Н.В. Алымова, Ю.Д. Щербаков

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

АННОТАЦИЯ. Бурпалинский массив, расположенный в Северном Прибайкалье, содержит рудоносные пегматиты, карбонатиты и апатит-флюоритовые породы с Zr-Nb-REE-редкометалльной минерализацией. В результате изучения петролого-геохимических, геологических и термобарохимических особенностей апатит-флюоритовых пород установлено, что они образовались из остаточного флюид-расплава, который содержал незначительное количество CO_2 и повышенное – P_2O_5 и F. Апатит-флюоритовые породы Бурпалинского массива во многом аналогичны фоскоритам большинства карбонатитовых комплексов и отличаются присутствием флюорита.

Впервые был детально изучен минеральный состав данных пород. Установлено, что, кроме апатита и флюорита, в них содержатся следующие минералы: щелочной пироксен, биотит, калиевый полевой шпат, титаномагнетит, ильменит, бадделеит, циркон, торинит, а также редкие минералы с высоким содержанием Ta, Nb, Pb.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: апатит-флюоритовые породы; фоскориты; Бурпалинский массив; минеральный и химический состав пород; бадделеит; титаномагнетит; карбонатиты

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки РФ в части проведения НИР по теме № 0284-2021-0008 «Геохимия, петрология и рудоносность интрузивных и вулканических щелочных комплексов и месторождений стратегических металлов, их мантийные источники».

1. ВВЕДЕНИЕ

В ряде щелочно-ультраосновных комплексов [Wall, Zaitsev, 2004; Sorokhtina et al., 2019; Rass et al., 2020; Kruk et al., 2021; и др.] с карбонатитами тесно ассоциируют своеобразные изверженные породы – фоскориты, состоящие из апатита, магнетита, силикатов (оливин, клинопироксен, щелочные амфиболы, слюда) и карбонатов (кальцит, доломит). Они интересны как с научной (выяснение генетической связи с карбонатитами), так и с практической точки зрения, так как с ними зачастую связаны месторождения железных, фосфатных руд, бадделеита, меди и других полезных ископаемых [Lapin, 1995; Sorokhtina et al., 2019; и др.].

В Бурпалинском массиве редкометалльных щелочных пород (Северное Прибайкалье) в центральной части в щелочных сиенитах выходит «дайка» пород (рис. 1), состав которых отличается от «классических» фоскоритов тем, что в ассоциации с магнетитом, апатитом и эгирином вместо карбонатов присутствует флюорит и отсутствует оливин. Ряд исследователей [Zhidkov, 1961; Ganzeev, Efimov, 1972] рассматривали эти породы в качестве низкотемпературных гидротермальных образований. Однако в результате изучения газовой-жидких включений во флюорите и апатите [Sotnikova et al., 2011] было установлено, что полная гомогенизация рассолов в них достигается при температуре 520–560 и 800 °C соответственно.

В настоящей статье представлены новые данные по составу минералов и геохимии апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива и обсуждаются некоторые генетические аспекты.

2. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Бурпалинский массив редкометалльных щелочных пород расположен в Северном Прибайкалье и представляет собой многофазовую интрузию центрального типа площадью 250 км² (рис. 1), в строении которой принимают участие нефелиновые, щелочные и кварцевые сиениты и щелочные граниты [Zhidkov et al., 1963]. Возраст образования сиенита главной фазы массива составляет 294±1 млн лет, а редкометалльного пегматита – 283±8 млн лет [Kotov et al., 2013].

Апатит-флюоритовые и апатит-магнетит-флюоритовые породы образуют в центре массива крупное тело мощностью 10–50 м и протяженностью до 2–3 км в мелкозернистых щелочных сиенитах. В центральной части оно состоит в основном из флюорита (до 80 об. %), апатита (15 об. %), в небольшом количестве присутствует флогопит, щелочной пироксен; аксессуарные – бадделеит, циркон, торинит; рудные – титаномагнетит, ильменит, минералы группы пироклора. Вблизи контактов наблюдаются участки в виде полос, в которых преобладают силикатные минералы (щелочные пироксены, слюда) и магнетит. В центральной части тело данных пород пересекается тонкой жилой щелочных лейкогранитов.

Кроме того, в массиве присутствуют две жилы, на 70 об. % состоящие из кальцита, которые по геохимическим признакам можно отнести к карбонатитам.

Одна жила выходит во вмещающих породах юго-западной части массива, ее мощность составляет 0.2 м, протяженность – 3 м. Вторая прорывает нефелиновые

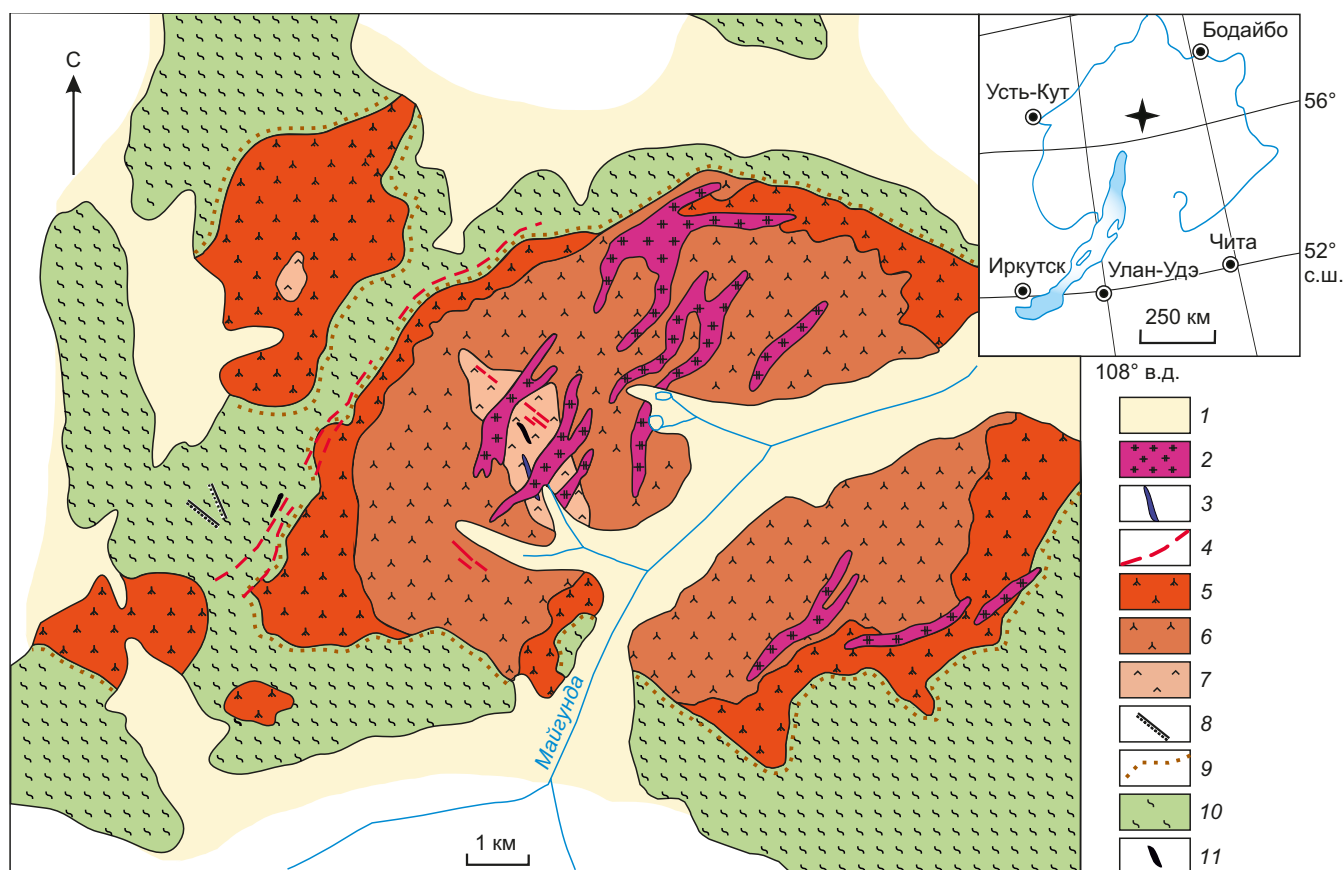


Рис. 1. Схема геологического строения Бурпалинского массива [Sotnikova, 2009, с добавлениями]. 1 – четвертичные отложения; 2 – щелочные граниты; 3 – апатит-флюоритовая жила; 4 – редкометалльные пегматиты; 5 – массивные кварцевые сиениты; 6 – полосчатые трахитоидные сиениты; 7 – нефелиновые сиениты; 8 – шонкиниты; 9 – пироксен-биотитовые кордиеритовые роговики; 10 – сланцы; 11 – карбонатиты.

Fig.1 Geological structure of the Burpalinsky massif [Sotnikova, 2009, with addition]. 1 – Quaternary deposits; 2 – alkaline granites; 3 – apatite-fluorite vein; 4 – rare-metal pegmatites; 5 – massive quartz syenites; 6 – trachtyoid syenites; 7 – nepheline-containing syenites; 8 – shonkinites; 9 – pyroxene-biotite cordierite hornfels; 10 – shales; 11 – carbonatites.

сиениты центральной части массива недалеко от выходов апатит-флюоритовых пород, ее мощность – 0.2–0.3 м и протяженность 50 м.

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Анализ пород и минералов выполнен в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН [Skuzovatov et al., 2022]. Содержание петрогенных компонентов апатит-флюоритовых пород было определено на основе рентгенофлуоресцентного анализа с использованием сканирующего волнодисперсионного спектрометра S4 Pioneer (Bruker AXS, Германия). Содержания редких элементов были определены методом ICP-MS на масс-спектрометре Thermo Finnigan ELEMENT 2. Пределы обнаружения элементов составляют от 0.005 до 0.100 мкг/г, точность анализа – в среднем 2–7 отн. %.

Идентификация и локальный анализ состава минералов, горных пород выполнены с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMN (Tescan, Чехия) с системой энергодисперсионного

микрoанализа Aztec Live Advanced Ultim Max 40 (Oxford Instruments Analytical Ltd., Англия).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Петрография и состав минералов. Породы центральной части «дайки» характеризуются массивной текстурой, крупно- и среднезернистой структурой, гипидиоморфно-зернистой микроструктурой. В краевых частях наблюдаются полосчатые текстуры, в основном средне- и мелкозернистые, гипидиоморфно-зернистые и сидеронитовые микроструктуры.

Апатит в породах образует идиоморфные и гипидиоморфные зерна размером до 20 мм. Его состав отвечает фторапатиту (Прил. 1, табл. 1.1), в котором количество F составляет 3.32–3.96 мас. %, постоянно присутствует примесь SrO (3.50–8.38 мас. %). Кроме того, апатит обогащен легкими лантаноидами (Ce~3.92 мас. %, La~3.72 мас. %, Nd~1.01 мас. %) и Th (до 0.67 мас. %). В отдельных зернах наблюдается зональность, выраженная увеличением от центра к краю содержания SrO и легких лантаноидов, и неоднородность состава, выраженная в изменении содержания легких

лантаноидов и тория при постоянном уровне концентраций SrO (рис. 1, а).

Флюорит присутствует в виде агрегатов ксеноморфных зерен, которые слагают «основную массу» породы. В его составе постоянно содержится Sr (до 1.87 мас. %) (Прил. 1, табл. 1.2). Существенных различий в составе апатита и флюорита из центральной и краевой части «дайки» не отмечается.

Клинопироксены встречаются в виде крупных и мелких зерен идиоморфного и гипидиоморфного облика среди агрегатов флюорита, в сростках с окиснорудными минералами и слюдами и в виде включений в ильмените (рис. 2, б). По составу отвечают эгирину и эгирин-авгиту (Прил. 1, табл. 1.3), в них содержится до 0.9 мас. % TiO_2 и обнаружена постоянная примесь ZrO_2 (0.6–1.0 мас. %).

Состав слюд изменяется от аннитов до флогопитов. Для них характерны повышенные содержания TiO_2 (2.30–3.97 мас. %) и F (~6 мас. %).

Магнетиты в породах редки, представлены небольшими гипидиоморфными зернами внутри агрегатов апатита и флюорита (рис. 2, а). Наибольшим распространением пользуется титаномагнетит, который характеризуется низкими содержаниями MgO и Al_2O_3 .

Ильменит наблюдается как в виде однородных гипидиоморфных и ксеноморфных зерен, так и в виде мелких закономерно ориентированных вростков, образованных в результате распада титаномагнетита (рис. 2, б, в). Формы и размеры вростков ильменита в титаномагнетите различны. Чаще всего он образует пластинки, ориентированные параллельно магнетиту с возникновением характерной решетчатой структуры

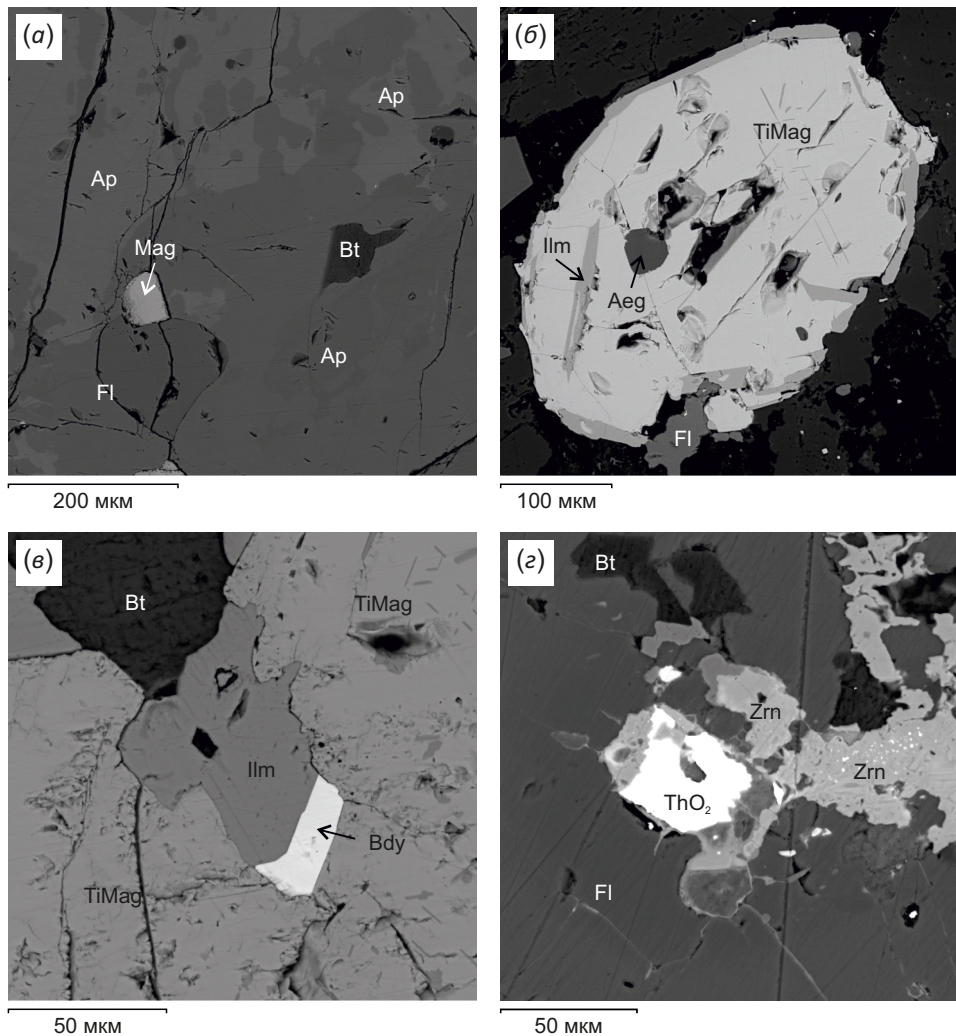


Рис. 2. Характер взаимоотношений между минералами. Изображение СЭМ.

(а) – неоднородное по составу зерно апатита; (б) – зерно титаномагнетита с включениями эгирина; (в) – бадделейт в ассоциации с ильменитом и титаномагнетитом; (г) – ториянит в цирконе. Аег – эгирин, Ар – апатит, Бт – биотит, Вдй – бадделейт, Fl – флюорит, Ilm – ильменит, ThO_2 – ториянит, Zrn – циркон.

Fig. 2. The pattern of relationships between the minerals. SEM image.

(а) – heterogeneous apatite grain; (б) – titanomagnetite grain with aegirine inclusions; (в) – baddeleyite associated with ilmenite and titanomagnetite; (г) – thorianite in zircon. Аег – aegirine, Ар – apatite, Бт – biotite, Вдй – baddeleyite, Fl – fluorite, Ilm – ilmenite, ThO_2 – thorianite, Zrn – zircon.

распада. Ильмениту и в зернах, и в структурах распада присущи высокие содержания MnO (до 15 мас. %) (Прил. 1, табл. 1.4).

Минералы циркония в апатит-флюоритовых породах Бурпалинского массива представлены бадделеитом и цирконом.

Бадделеит образует мелкие (20×10 мкм) гипидиоморфные однородные зерна, граничащие с зернами ильменита и титаномагнетита (рис. 2, в). В его составе обнаружены примеси HfO₂ (2.6–2.9 мас. %), TiO₂ (0.6–1.5 мас. %), FeO (2.2 об. %) (Прил. 1, табл. 1.4).

Циркон наблюдается в виде крупных ксеноморфных зерен, размером до 400×200 мкм в сростках с ильменитом среди агрегатов флюорита, апатита и эгирина. Также обнаружены цирконы, внутри которых присутствует торинанит (рис. 2, г). В составе циркона обнаружен HfO₂ (0.57–1.53 мас. %) (Прил. 1, табл. 1.4).

Сульфидные минералы представлены большей частью халькопиритом и сфалеритом.

Геохимические особенности апатит-флюоритовых пород. В состав апатит-флюоритовой породы входят следующие основные компоненты (мас. %): 2.77 SiO₂, 0.16 TiO₂, 0.9 Al₂O₃, 2.21 Fe₂O₃, 0.44 FeO, 0.06 MnO, 0.7 MgO, 64.65 CaO, 0.32 Na₂O, 0.33 K₂O, 0.035 Li₂O, 0.0049 Rb₂O, 1.28 SrO, 2.86 P₂O₅, 33.6 F, 0.04 ZrO, 0.04 S (сумма 100.21).

Анализ распределения редких и редкоземельных элементов апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива показал, что их различия проявляются закономерно как на минералогическом, так и на геохимическом уровне. Средний состав апатит-флюоритовых пород включает в себя следующие микроэлементы (г/т): 4.7 Be, 22.5 V, 11.2 Cr, 4.9 Co, 15.3 Ni, 248 Cu, 79.3 Zn, 25.3 Ga, 163 Y, 13.1 Nb, 3.2 Cs, 119 Ba, 805 La, 1210 Ce, 115 Pr, 401 Nd, 48.6 Sm, 10.3 Eu, 48.2 Gd, 4.1 Tb, 28.7 Dy, 4.1 Ho, 12.5 Er, 1.2 Tm, 7.0 Yb, 0.8 Lu, 1.19 Hf, 0.19 Ta, 42.3 Pb, 146 Th, 9.2 U.

Для апатит-флюоритовых пород характерны те же особенности, что и для более поздних образований массива – карбонатитов. В целом, анализируя их спектры на мультиэлементных диаграммах, можно отметить отрицательные аномалии Ba, Nb, Ta, Zr, Hf и повышенные аномалии Th, U, легких лантаноидов, так же примечательно отсутствие Sr аномалии, характерной для всех остальных пород Бурпалинского массива [Sotnikova, 2009, 2010]. Важно отметить высокий уровень содержаний ряда редких и радиоактивных элементов (Nb, Ta, Zr, REE, U и Th), свойственный и для карбонатитов.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее образование «дайки» апатит-флюоритовых пород связывалось с низкотемпературными гидротермальными процессами [Zhidkov, 1961; Ganzeev, Efimov, 1972]. Позднее они были отнесены к жильным пегматитам [Portnov, 1965].

В результате изучения газово-жидких включений во флюорите и апатите [Sotnikova, 2009; Sotnikova et

al., 2011] было установлено, что полная гомогенизация рассолов в них достигается при 520–560 и 800 °C соответственно. Тесная пространственная ассоциация с карбонатными жилами, особенности редкоэлементного состава апатит-флюоритовых пород позволили высказать предположение, что они могут быть аналогами фоскоритов.

Следует еще раз подчеркнуть, что главным отличием от типичных фоскоритов является отсутствие оливина и карбонатов, вместо них в Бурпалинском массиве присутствуют щелочные клинопироксены и флюорит.

Рассматривая особенности состава минералов, можно отметить, что по сравнению с фоскоритами Арбарастахского массива [Kruk et al., 2021] апатиты в Бурпалинском массиве характеризуются более высокими содержаниями SrO и редкоземельных элементов, а также в них отмечается присутствие тория. Состав бадделеита в Бурпалинском массиве сопоставим с таковым из фоскоритов Арбарастахского массива по уровню содержаний HfO₂, однако отличается от бадделеитов из фоскоритов Ковдорского массива, для которых характерна постоянная примесь Sc [Rass et al., 2020].

Проведенные исследования апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива подтверждают магматогенную природу их образования и генетическую связь с более поздними образованиями (карбонатитами) как аналогами фоскоритов. Ранее считалось, что Бурпалинская интрузия была сформирована в три последовательные фазы: нефелиновые сиениты, щелочные сиениты, кварцевые сиениты (1-я фаза) → дайки сиенит-порфиров, нефелиновых сиенитов и метасоматитов-пегматитов (2-я фаза) → жильный комплекс гранитоидного состава [Zhidkov et al., 1963]. Согласно последним исследованиям [Vladykin, Sotnikova, 2017], породы массива формировались в следующем порядке: шонкиниты → нефелиновые сиениты → щелочные сиениты → кварцевые сиениты → жильные породы: мариуполиты, щелочные граниты, редкометалльные пегматиты, апатит-флюоритовые породы, карбонатиты.

Апатит-флюоритовые породы наряду с жильными породами массива имеют высокие содержания Zr, Nb, REE, Ti и др., главным отличием является высокое содержание F преимущественно в составе флюорита, апатита и биотита. Подобные процессы наблюдаются при образовании фоскоритов, только вместо кальция происходит кристаллизация флюорита вследствие высокой активности фтора в минералообразующем флюиде.

Таким образом, образование апатит-флюоритовых пород, сходных с фоскоритами карбонатитовых комплексов, свидетельствует, скорее всего, об их предкарбонатитовом генезисе.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные по составу минералов апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива подтверждают представления о том, что они являются частью

карбонатитовых комплексов, которые, в свою очередь, являясь генетически сложными системами, возникают под действием глубинных высокотемпературных мантийных потоков, часто включающих в себя флюидно-магматические субстраты как мантийных, так и коровых пород.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы посвящают эту статью памяти Н.В. Владыкина, уникальная коллекция которого, собранная им еще в студенчестве и на полевых работах в 1992 г., послужила основой для изучения пород Бурпалинского массива.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

9. 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.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Ganzeev A.A., Efimov A.F., 1972. Microcline-Bearing Granite-Aplite of the Burpala Massif (Mineralogy and Issues of Genesis). In: L.V. Ovchinnikov (Ed.), *Rare-Metal Deposits, Their Genesis and Study Methods*. Nedra, Moscow, p. 179–190 (in Russian) [Ганзеев А.А., Ефимов А.Ф. Микроклинизированные гранит-аплиты массива Бурпала (минералогия и вопросы генезиса) // Редкометалльные месторождения, их генезис и методы исследования / Ред. Л.В. Овчинников. М.: Недра, 1972. С. 179–190].

Kotov A.B., Vladykin N.V., Yarmolyuk V.V., Salnikova E.B., Sotnikova I.A., Yakovleva S.Z., 2013. Permian Age of the Burpala Alkaline Massif (Northern Baikal Region): Geodynamic Implications. *Doklady Earth Sciences* 453 (3), 295–299 (in Russian) [Котов А.Б., Владыкин Н.В., Ярмольюк В.В., Сальникова Е.Б., Сотникова И.А., Яковлева С.З. Пермский возраст Бурпалинского щелочного массива (Северное Прибайкалье): геодинамические следствия // Доклады АН. 2013. Т. 453. № 3. С. 295–299]. <https://doi.org/10.7868/S0869565213330165>.

Kruk M.N., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izbrodin I.A., 2021. Mineralogy of Phoscorites of the Arbarastakh Complex (Republic of Sakha, Yakutia, Russia). *Minerals* 11 (6), 556–579. <https://doi.org/10.3390/min11060556>.

Lapin A.V., 1995. Rare-Metal Deposits of Carbonatite Weathering Crusts (Formation Conditions, Genetic Types, Forecast Basics). Brief PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Moscow, 63 p. (in Russian) [Лапин А.В. Редкометалльные месторождения кор выветривания карбонатитов

(условия образования, генетические типы, основы прогнозирования): Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М., 1995. 63 с.].

Portnov A.M., 1965. Rare-Metal Mineralization of the Burpala Alkaline Massif in the Northern Baikal Region. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Moscow, 12 p. (in Russian) [Портнов А.М. Редкометалльная минерализация щелочного массива Бурпала в Северном Прибайкалье: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1965. 12 с.].

Rass I.T., Petrenko D.B., Koval'chuk E.V., Yakushev A.I., 2020. Phoscorites and Carbonatites: Relations, Possible Petrogenetic Processes, and Parental Magma, with Reference to the Kovdor Massif, Kola Peninsula. *Geochemistry International* 58, 753–778. <https://doi.org/10.1134/S0016702920070095>.

Skuzovatov S.Yu., Belozeroва O.Yu., Vasil'eva I.E., Zarusbina O.V., Kaneva E.V., Sokolnikova Yu.V., Chubarov V.M., Shabanova E.V., 2022. Centre of Isotopic and Geochemical Research (IGC SB RAS): Current State of Micro- and Macro-analysis. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0585 (in Russian) [Скузоватов С.Ю., Белозерова О.Ю., Васильева И.Е., Зарубина О.В., Канева Е.В., Сокольникова Ю.В., Чубаров В.М., Шабанова Е.В. Центр коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН: современное состояние методов изучения вещества на микро- и макроуровне. Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0585]. <http://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0585>.

Sorokhtina N.V., Kogarko L.N., Zaitsev V.A., Kononkova N.N., Asavin A.M., 2019. Sulfide Mineralization of Phoscorites and Carbonatites of the Guli Massif (Polar Siberia) and Potential of These Rocks on Noble Metals. *Geochemistry* 66 (11), 1111–1132 (in Russian) [Сорохтина Н.В., Когарко Л.Н., Зайцев В.А., Кононкова Н.Н., Асавин А.М. Сульфидные ассоциации карбонатитов и фоскоритов Гулинского массива (Полярная Сибирь) и их перспективность на благородные металлы // Геохимия. 2019. Т. 64. № 11. С. 1111–1132]. <https://doi.org/10.31857/S0016-752564111111-1132>.

Sotnikova I.A., 2009. Mineralogical and Geochemical Features of Rare-Metal Alkaline Rocks of the Northern Baikal Region. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 22 p. (in Russian) [Сотникова И.А. Минералого-геохимические особенности редкометалльных щелочных пород Северного Прибайкалья: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2009. 22 с.].

Sotnikova I.A., 2010. Geochemical Features of Alkaline Rocks of the Burpala Massif in the Baikal Region. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences Russian Academy of Natural Sciences. Geology Prospecting and Exploration of Ore Deposits* 37 (2), 93–99 (in Russian) [Сотникова И.А. Геохимические особенности щелочных пород массива Бурпала (Северное Прибайкалье) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2010. Т. 37. № 2. С. 93–99].

Sotnikova I.A., Prokofiev V.Yu., Vladykin N.V., 2011. Genesis of Apatite-Fluorite Rocks of the Burpala Massif. *Doklady Earth Sciences* 441 (5), 682–684 (in Russian) [Сотникова И.А., Прокофьев В.Ю., Владыкин Н.В. Генезис апатит-флюоритовых пород массива Бурпала // Доклады АН. 2011. Т. 441. № 5. С. 682–684].

Vladykin N.V., Sotnikova I.A., 2017. Petrology, Mineralogical and Geochemical Features and Mantle Sources of the Burpala Rare-Metal Alkaline Massif, Northern Baikal Region. *Geoscience Frontiers* 8 (4), 711–719. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.04.006>.

Wall F., Zaitsev A.N. (Eds), 2004. Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, 503 p. <https://doi.org/10.1180/MSS.10>.

Zhidkov A.Ya., 1961. New Northern Baikal Alkaline Province and Some Features of Nepheline Content in Rocks. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 140 (1), 181–184 (in Russian) [Жидков А.Я. Новая Северо-Байкальская щелочная провинция и некоторые черты нефелиности пород // Доклады АН СССР. 1961. Т. 140. № 1. С. 181–184].

Zhidkov A.Ya., Mirkina S.L., Golubchina M.N., 1963. Absolute Age of Alkaline and Nepheline Syenites of the Northern Baikal Highland. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 149 (1), 152–155 (in Russian) [Жидков А.Я., Миркина С.Л., Голубчина М.Н. Об абсолютном возрасте щелочных и нефелиновых сиенитов Северо-Байкальского нагорья // Доклады АН СССР. 1963. Т. 149. № 1. С. 152–155].

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Представительные анализы апатита (мас. %)
Table 1.1. Representative electron microanalyses of apatite (wt. %)

Образец	302/15	302/15	302/9	302/9	302/9	302/9	302/9	302/9	302/9	302/9	302/9
CaO	47.92	39.75	48.77	46.41	47.56	48.73	47.50	49.24	49.39	48.60	47.70
Na ₂ O	0.56	1.46	0.52	0.47	0.48	0.43	0.50	0.45	0.50	0.51	0.52
SrO	4.64	8.73	4.07	4.15	4.10	4.10	4.09	3.97	3.60	3.79	3.93
Ce ₂ O ₃	2.16	4.58	2.27	4.04	3.21	1.95	3.28	2.13	1.56	2.14	3.21
La ₂ O ₃	1.55	3.88	1.49	2.95	2.41	1.37	2.34	1.48	1.17	1.72	2.31
Nd ₂ O ₃	н.о.	0.90	н.о.	1.04	0.80	0.43	0.80	0.00	0.38	0.50	0.83
ThO ₂	н.о.	н.о.	н.о.	0.69	0.44	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
P ₂ O ₅	38.90	36.52	39.09	36.53	37.44	39.18	37.53	39.26	39.67	39.05	37.49
F	3.55	4.13	3.62	3.45	3.39	3.43	3.59	3.44	3.64	3.67	3.76
Сумма	99.28	99.94	99.84	99.74	99.83	99.64	99.63	99.99	99.92	99.98	99.74
Формульные количества											
Ca	4.44	3.89	4.43	4.28	4.35	4.43	4.35	4.45	4.50	4.42	4.36
Na	0.09	0.26	0.09	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09
Sr	0.23	0.46	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20	0.19	0.18	0.19	0.19
Ce	0.07	0.15	0.07	0.13	0.10	0.06	0.10	0.07	0.05	0.07	0.10
La	0.05	0.13	0.05	0.09	0.08	0.04	0.07	0.05	0.04	0.05	0.07
Nd	-	0.03	-	0.03	0.02	0.01	0.02	-	0.01	0.02	0.03
Th	-	-	-	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-
P	2.84	2.82	2.80	2.66	2.71	2.81	2.71	2.80	2.86	2.81	2.71
F	0.97	1.19	0.97	0.94	0.92	0.92	0.97	0.92	0.98	0.98	1.01

Примечание. Здесь и в таблицах 2-4: 302/15 – центральная часть дайки, 302/9 – краевая часть дайки. Н.о. – ниже предела обнаружения.
 Note. In this table and in tables 2-4: 302/15 – central part of dyke, 302/9 – marginal part of dyke. Н.о. – below detection limit.

Таблица 1.2. Представительные анализы флюорита, мас. %
Table 1.2. Representative electron microanalyses of fluorite, wt. %

Образец	Ca	Sr	F	Сумма	Формульные количества	Ca	Sr	F	Сумма
302/15	50.50	1.95	47.54	99.99		1.00	0.02	1.98	3.00
302/15	50.34	1.86	47.64	99.84		1.00	0.02	1.99	3.00
302/15	50.00	1.83	47.54	99.37		0.99	0.02	1.98	3.00
302/15	49.91	1.88	47.73	99.52		0.99	0.02	1.99	3.00
302/15	50.15	1.83	47.98	99.96		0.99	0.02	1.99	3.00
302/15	49.90	1.90	48.02	99.82		0.98	0.02	2.00	3.00
302/15	49.91	1.82	48.23	99.95		0.97	0.02	1.98	3.00
302/15	50.05	1.80	48.06	99.91		0.99	0.02	2.00	3.00
302/15	50.37	1.84	47.77	99.98		0.99	0.02	1.99	3.00
302/9	50.32	1.51	48.10	99.93		0.99	0.01	2.00	3.00
302/9	50.56	1.54	47.86	99.96		1.00	0.01	1.99	3.00
302/9	50.56	0.90	48.53	100.00		0.99	0.01	2.00	3.00
302/9	51.11	1.35	47.52	99.98		1.01	0.01	1.97	3.00
302/9	50.92	1.30	47.73	99.95		1.00	0.01	1.98	3.00
302/9	50.23	1.51	48.25	100.00		0.99	0.01	2.00	3.00
302/9	51.04	1.10	47.74	99.89		1.00	0.01	1.98	3.00

Таблица 1.3. Представительные анализы клинопироксенов, мас. %
Table 1.3. Representative electron microanalyses of clinopyroxenes, wt. %

Образец	302/15	302/15	302/15	302/15	302/9	302/9	302/9	302/9	302/9	302/9
SiO ₂	50.60	50.40	49.91	51.26	52.29	50.38	52.18	51.97	50.79	50.85
TiO ₂	0.57	0.85	0.62	0.45	н.о.	0.75	0.77	0.85	0.92	0.85
Al ₂ O ₃	0.98	1.00	1.06	3.34	1.04	1.06	1.32	1.27	1.08	1.15
Fe ₂ O ₃	26.08	24.66	22.95	28.61	31.92	19.59	24.54	26.17	20.16	21.66
FeO	3.36	4.21	3.70	2.88	0.92	5.74	3.89	3.34	5.77	5.30
MnO	0.49	0.36	0.41	н.о.	н.о.	0.62	0.48	0.23	0.62	0.59
MgO	1.86	1.39	2.42	н.о.	н.о.	3.02	1.91	1.41	2.90	2.84
CaO	5.08	3.71	5.43	0.71	0.52	8.34	5.60	3.20	7.84	7.65
Na ₂ O	10.29	10.74	9.76	12.54	13.14	8.41	10.33	11.50	8.75	8.91
ZrO ₂	0.61	1.01	0.70	0.39	н.о.	0.88	н.о.	1.04	1.07	0.87
Сумма	99.9	98.34	96.96	100.2	100	98.78	101.4	101	100	100.8
Формульные количества										
Si	1.96	1.98	1.98	1.96	2.00	1.97	1.98	1.98	1.96	1.95
Ti	0.02	0.03	0.02	0.01	–	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Al	0.05	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05
Fe ²⁺	0.11	0.14	0.12	0.09	0.03	0.19	0.12	0.11	0.19	0.17
Mn	0.02	0.01	0.01	–	–	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
Mg	0.11	0.08	0.14	–	–	0.18	0.11	0.08	0.17	0.16
Ca	0.21	0.16	0.23	0.03	0.02	0.35	0.23	0.13	0.32	0.31
Na	0.77	0.82	0.75	0.93	0.98	0.64	0.76	0.85	0.66	0.66
Zr	0.01	0.02	0.01	0.01	–	0.02	–	0.02	0.02	0.02
Fe ³⁺	0.76	0.73	0.68	0.82	0.92	0.58	0.70	0.75	0.59	0.63
Сумма	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00

Примечание. Fe³⁺ – рассчитано по стехиометрии минерала.

Note. Fe³⁺ is calculated from stoichiometry of the mineral.

Таблица 1.4. Представительные анализы основных акцессорных минералов (мас. %)
Table 1.4. Representative electron microanalyses of main accessory minerals (wt. %)

Ильменит											
Образец	302_15	302_9	302_9	302_9	302_9	302_9	302_9	302_9	302_9	302_9	302_9
TiO ₂	50.76	53.76	52.53	52.84	54.76	54.21	52.81	52.28	52.54	53.71	52.16
FeO	30.73	34.32	33.73	33.65	31.04	32.54	32.82	32.47	33.11	34.8	32.55
MnO	15.48	12.41	13.14	12.68	13.76	13.02	13.34	13.48	12.73	11.5	13.14
BaO	н.о.	н.о.	0.88	0.9	1.12	н.о.	0.83	1.07	1.08	н.о.	н.о.
ZnO	0.34	0.55	н.о.	0.25	0.25	0.32	0.35	0.35	н.о.	н.о.	н.о.
V ₂ O ₃	0.32	н.о.	0.51	0.5	0.59	н.о.	0.44	0.44	0.5	н.о.	н.о.
Сумма	97.64	101	100.8	100.8	101.5	100.1	100.6	100.1	100	100	97.85

Циркон								Бадделлит		
Образец	302_15	302_15	302_9	302_9	302_9	302_9	302_9	Образец	302_9	302_9
SiO ₂	30.51	31.15	31.38	31.36	32.00	31.75	30.99	TiO ₂	1.48	0.6
Al ₂ O ₃	3.4	3.21	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	FeO	1.15	1.21
FeO	0.32	1.24	н.о.	н.о.	0.51	0.3	0.55	ZrO ₂	95	95.89
CaO	0.36	0.32	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.11	HfO ₂	2.57	2.52
CaO	0.36	0.32	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.11	Сумма	100.2	100.1
ZrO ₂	63.06	64.14	66.47	66.62	65.30	66.24	66.57			
HfO ₂	0.93	0.57	1.16	1.53	1.20	1.40	1.25			
Сумма	99.71	100.6	99.01	99.52	99.02	99.69	99.48			