



Научная статья  
УДК 552.3+553.493

EDN: ZPIHKQ

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-5



## Ниобиевое оруденение Большешетагнинского месторождения (Восточный Саян)

М.О. Сукнева<sup>a,✉</sup>, Т.А. Радомская<sup>b</sup>, В.В. Гавриленко<sup>c</sup>, А.Г. Чуешова<sup>d</sup>

<sup>a-d</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Российская Федерация

<sup>a</sup>Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Российская Федерация

**Резюме.** Большешетагнинское месторождение – одно из крупнейших известных эндогенных месторождений, перспективное для освоения ниобиевых руд. Оно приурочено к Зиминскому комплексу ультраосновных щелочных пород и карбонатитов позднерифейского возраста. Целью работы является выявление закономерностей распределения ниобия в породах и рудах Большешетагнинского щелочно-ультраосновного карбонатитового массива на разных этапах эндогенного и постмагматического процессов с помощью методов оптико-микроскопического анализа, сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа (микрозонд) и рентгенофлуоресцентного анализа. Установлено, что первичные ниобиевые руды относятся к полнокристаллическим апатит-слюдистым и апатит-пироксоловым породам. Основными минералами – концентраторами ниобия – в этих рудах является фторкальциопироксолом и ферроколумбит, отмечается тесный парагенезис апатита и пироксолом. Остальные (вторичные) типы руд связаны с продуктами изменения пироксолом из первичных руд и образовались вследствие переотложения ниобия в новых геохимических условиях. Вторичные ниобиевые руды представлены кальцитовыми карбонатитами, калишпатовыми и другими метасоматитами. Основные минералы в этих породах с наложенным ниобиевым оруденением – концентраторы ниобия – представлены ниобийсодержащим рутилом, ильменорутилом, ниобийсодержащим гематитом и новообразованным фторкальциопироксолом и ферроколумбитом. Пироксолом среди изученных пород представлен фторкальциопироксолом и уранпироксолом, значительно обогащен танталом. Неизменные фторкальциопироксолом из апатит-пироксолом, апатит-слюдистых пород и кальцит-полевошпатовой породы характеризуются выдержанным составом по CaO, Na<sub>2</sub>O и SrO. Измененные, гидратированные разновидности (по вакансии в позиции А) более характерны для метасоматических пород и кальцитовых карбонатитов с наложенной пироксолом минерализацией, что отражает разную степень флюидной переработки этих пироксолом. В результате проведенного исследования выявлено, что ниобиевые руды массива претерпели полифазное многостадийное преобразование, которое выражается в уменьшении содержания рудного компонента и различных оксидных формах нахождения ниобия во вторичных рудах по сравнению с первичными.

**Ключевые слова:** пироксолом, ниобий, Большешетагнинское месторождение

**Финансирование.** Исследования выполнены в рамках государственного задания по проекту № 0284-2021-0007.

**Благодарности.** Авторы благодарят А.Г. Дорошкевич, И.Р. Прокопьева, М.Н. Крука, И.А. Избродина (Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация) за предоставление образца апатит-пироксолом руды Большешетагнинского массива для проведения исследования ниобиевой минерализации. Авторы признательны вышеперечисленным коллегам и Н.В. Алымовой за помощь в организации экспедиционных работ в районе Белозиминской группы щелочных массивов.

**Для цитирования:** Сукнева М.О., Радомская Т.А., Гавриленко В.В., Чуешова А.Г. Ниобиевое оруденение Большешетагнинского месторождения (Восточный Саян) // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 55–71. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-5>. EDN: ZPIHKQ.



## Original article

## Niobium mineralization of the Bolshetagninskoye deposit (Eastern Sayan)

Maria O. Sukneva<sup>a,✉</sup>, Tatiana A. Radomskaia<sup>b</sup>,  
Veronika V. Gavrilenko<sup>c</sup>, Anastasia G. Chueshova<sup>d</sup>

<sup>a-d</sup>A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

<sup>a</sup>Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

**Abstract.** The Bolshetagninskoye deposit is one of the largest known endogenous deposits, which is promising for niobium ore development. It is confined to the Ziminsky complex of ultramafic alkaline ultramafic alkaline rocks and carbonatites of Late Riphean age. The purpose of the study is to identify the distribution patterns of niobium in rocks and ores of the Bolshetagninskoye alkaline-ultramafic carbonatite massif at different stages of endogenic and postmagmatic processes using the methods of optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction electron microprobe analysis (microprobe), and X-ray fluorescence analysis. It has been determined that the primary niobium ores belong to holocrystalline apatite-mica and apatite-pyrochlore rocks. The main minerals concentrating niobium in these ores are fluorocalciumpyrochlore and ferrocolumbite. It is noted that a close paragenesis of apatite and pyrochlore has been observed. The remaining (secondary) ore types are associated with pyrochlore alteration products from primary ores and formed as a result of the redeposition of niobium in new geochemical conditions. Secondary niobium ores are represented by calcite carbonatites, potassium feldspar, and other metasomatites. The main minerals in these rocks with superimposed niobium mineralization – niobium concentrators – are presented by niobium-bearing rutile, ilmenorutile, niobium-bearing hematite, newly formed fluorocalciopyrochlore and ferrocolumbite. Among the studied rocks pyrochlore is represented by fluorocalciopyrochlore and uraniumpyrochlore, significantly enriched in tantalum. Unaltered fluorocalciopyrochlores from apatite-pyrochlore, apatite-mica, and calcite-feldspar rocks are characterized by a consistent composition of CaO, Na<sub>2</sub>O, and SrO. Altered, hydrated varieties (based on the A-site vacancy) are more characteristic of metasomatic rocks and calcite carbonatites with superimposed pyrochlore mineralization. This reflects varying degrees of fluid processing of these pyrochlores. The conducted study revealed that the niobium ores of the massif underwent a multiphase, multistage transformation, which is represented by a decrease in the ore component content and the presence of different oxide forms of niobium in secondary ores compared to primary ores.

**Keywords:** pyrochlore, niobium, Bolshetagninskoye deposit

**Funding.** The research was carried out within the framework of the State assignment project No. 0284-2021-0007.

**Acknowledgements.** The authors thank A.G. Doroshkevich, I.R. Prokopiev, M.N. Kruk, and I.A. Izbrodin (V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia) for providing a sample of apatite-pyrochlore ore from the Bolshetagninsky massif for the study of niobium mineralization. The authors are grateful to the above-mentioned colleagues and to N.V. Alymova for her assistance in organizing the fieldwork in the Beloziminskaya group of alkaline massifs.

**For citation:** Sukneva M.O., Radomskaia T.A., Gavrilenko V.V., Chueshova A.G. Niobium mineralization of the Bolshetagninskoye deposit (Eastern Sayan). *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1):55-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-5>. EDN: ZPIHKQ.

### Введение

Минералы супергруппы пироклора относятся к сложным оксидам с общей формулой  $A_{2-m}B_2(X)_{6-w}Y_{1-n}$ , где  $A = Ca^{2+}, Na^+, Sr^{2+}, Ba^{2+}, Mn^{2+}, Sb^{3+}, Bi^{3+}, REE^{3+}, Th^{4+}, U^{4+}, H_2O^0, \square$ ;  $B = Nb^{5+}, Ta^{5+}, Ti^{4+}, Sb^{5+}, Sn^{4+}, Fe^{3+}, W^{6+}$ ;  $X = O, OH, F$ ;  $Y = OH^-, F^-, O^{2-}, H_2O^0, \square, K, Cs, Rb$  [1]. В современных работах используются две классификации минералов супергруппы пироклора: по Атенсио и др. [1] и по Хогарту и др. [2], которые применены и в данной работе.

Минералы супергруппы пироклора являются важным стратегическим сырьем на ниобий и тантал, также они могут содержать уран и легкие редкоземельные элементы. Все они включены в перечень основных видов стратегического минерального сырья (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 августа 2022 г. № 2473-р<sup>1</sup>). Одними из востребованных редких металлов являются ниобий и тантал – легирующие добавки к сплавам, металлы которых обладают устойчивостью к

<sup>1</sup> Распоряжение Правительства РФ от 30.08.2022 г. № 2473-р. Об утверждении Перечня основных видов стратегического минерального сырья. М., 2022. 3 с.



действию многих агрессивных сред, тугоплавкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью, сверхпроводящими и другими свойствами. Основу сырьевой базы составляют пирохлоровые концентраты (пирохлор, бари-пирохлор) и менее 10 % ферроколумбит [3]. В России потребность в сырье тантала и ниобия удовлетворяется большей частью за счет импорта [3, 4].

Ниобиевые руды с пирохлором образуются в различных породах: щелочных ультраосновных (пегматитах нефелиновых сиенитов) и кислых породах (анорогенные граниты и пегматиты), в карбонатитах и связанных с ними щелочных породах. Значительные месторождения ниобия, тантала, редкоземельных элементов, циркония, бария, стронция, тория, железа, а также апатита и флюорита связаны с ультраосновными щелочно-карбонатитовыми массивами (УЩК) [5].

Объектом настоящего исследования является Большешетагнинское месторождение, расположенное в Иркутской области и относящееся к Зиминскому рудному району, перспективному для разработки ниобиевых руд [4]. Большешетагнинское месторождение приурочено к карбонатитовому комплексу одноименного массива УЩК, входящему в Зиминский комплекс УЩК возрастом  $632 \pm 2$  млн лет [6].

Большешетагнинское месторождение изучалось неоднократно. В начале 50-х годов результатом проверки местности аэрогамма-радиометрической съемкой стали аномалии, выявленные поисковой партией Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ВИМС, г. Москва, Россия), в результате чего был обнаружен Белозиминский массив УЩК с тантал-ниобиевой минерализацией<sup>2</sup>. В 1975 году Урикско-Ийской партией открыто Большешетагнинское месторождение при проведении ГДП-50 одноименного массива. Поисковые работы на нем проводились ПГО «Иркутскгеология» с перерывами с 1957 по 1975 год. В 1988–1992 годах выполнены оценочные работы, на основании которых установлена высокая перспективность месторождения на ниобий. В период 2008–2012 годы были возобновлены работы на месторождении ФГБУ ВИМС, произведен необходимый

для завершения оценочной стадии объем буровых и горных работ, в результате чего запасы Большешетагнинского месторождения в 2012 году были поставлены на государственный баланс. В мае 2023 года АО «СТ Элементы» приобрело на аукционе права на разработку Большешетагнинского месторождения, в результате чего было запланировано построение горно-обогачительного комбината. По состоянию на 2016 год балансовые запасы  $Nb_2O_5$  по категории  $C_1$  были оценены в 362 тыс. т, по категории  $C_2$  – в 4,5 тыс. т, забалансовые запасы – 9,5 тыс. т<sup>2</sup>. Технологии обогащения руд разрабатывались в ФГБУ ВИМС неоднократно [4]. В работе В.С. Пикаловой<sup>2</sup> были предложены схемы переработки и извлечения пирохлора из микроклинитовых, карбонатит-слюдитовых и слудитовых руд с получением пирохлорового концентрата.

Большешетагнинский массив имеет округлую форму и зонально-кольцевое строение, он сложен пироксен-нефелиновыми породами серии мельтейгит – ийолит – уртит, нефелиновыми и щелочными сиенитами, калишпатовыми сиенитами и карбонатитами, также отмечаются поздние дайки пикритовых порфириров-айлликитов [5]. Формирование Большешетагнинского массива протекало в несколько последовательных этапов: на первом этапе произошло внедрение интрузивных пород серии мельтейгит – ийолит – уртит, затем нефелиновых и субщелочных сиенитов, становление массива завершилось внедрением карбонатитов и поздних даек айлликитов [5]. Внедрение УЩК вызвало фенитизацию вмещающих толщ, внедрение нефелиновых и субщелочных сиенитов, их калишпатизацию. По породам массива развито вторичное наложенное минералообразование, выраженное в карбонатизации, слудитизации, гематитизации, сульфидитизации и флюоритизации вмещающих толщ.

Согласно данным предшественников, было выявлено, что основное богатое ниобиевое оруденение в отличие от других месторождений, связанных с интрузиями УЩК, приурочено не к карбонатитам, а к силикатным породам – микроклинитам (80–85 % руд, калишпатовым сиенитам по ультраосновным щелочным породам) и слудитам (метасо-

<sup>2</sup> Пикалова В.С. Геолого-экономическая оценка нового потенциально-промышленного типа ниобиевых руд на примере Большешетагнинского месторождения: дис. ... кандидата геол.-минерал. наук: 25.00.11. М., 2018. 136 с. EDN: EEUVLR.



матитам карбонат-микроклин-биотитового состава<sup>2)</sup> [4]. Также отмечается рудоносная апатит-пирохлоровая линзовидная залежь [4]. Среди рудоносных пород карбонатитоидов отмечаются следующие разновидности: карбонат-микроклиновые (содержание карбонатов 15–20 %), карбонат-биотитовые (до 25 % прожилкового карбоната анкерит-доломитового ряда), существенно карбонатные (более 30 % карбонатов) [7].

Ранее пирохлоровая минерализация была изучена Л.К. Пожарицкой в работе [8], где первичный пирохлор Большетагнинского месторождения из микроклинитов и слюдитов представлен фторкальциопирохлором, в котором постоянно присутствует примесь стронция (0,021–0,034 ф. ед.) [7]. В работе Л.А. Азарановой [7] был описан калипирохлор, образованный в результате гипергенного изменения рудных микроклинитовых пород, и установлен гидратированный пирохлор.

Цель работы – раскрытие закономерностей распределения ниобия в породах и рудах Большетагнинского щелочно-ультраосновного карбонатитового массива на разных этапах эндогенного и постмагматического процессов. Выявление распределения рудных минералов в породах и рудах Большетагнинского массива, определение в них содержания ниобия необходимы в дальнейшем для уточнения поисковых критериев для более точного оконтуривания рудных залежей, разработки технологии извлечения полезных компонентов из новых комплексных типов руд, а также для создания модели процесса рудообразования.

### **Материалы и методы исследования**

В работе использованы результаты аналитических исследований пород и руд, выполненных на оборудовании Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» в Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук. Было исследовано 137 штучных образцов, более 120 шлифов и более 20 аншлифов. Характеристика образцов и определение диагностических свойств минералов выполнены с использованием

стереоскопического микроскопа Микромед MC-2-ZOOM Digital. Текстурно-структурные особенности пород и руд, их минеральный состав, морфологические особенности минералов и агрегатов, парагенетические минеральные ассоциации исследовались в шлифах и аншлифах петрографо-минераграфическим методом с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX-51 с 20–500-кратным диапазоном увеличения в проходящем и отраженном свете. Шлифы прокрашены по специальной методике, позволяющей наиболее эффективно оценить процентное соотношение полевых шпатов и фельдшпатоидов, карбонатов кальция и железа. Содержания редких элементов (ниобия, циркония, иттрия) в породах и рудах (120 проб) анализировались рентгенофлуоресцентным методом с помощью спектрометра VRA-30 (аналитики кандидаты химических наук В.М. Чубаров, А.А. Амосова, Т.С. Айсуева, Е.В. Чупарина, доктор технических наук А.Л. Финкельштейн). Пределы обнаружения элементов по используемой методике рентгенофлуоресцентного анализа составили: ниобий – 0,0005 %, цирконий – 0,0010 %, иттрий – 0,0010 %. Элементный состав основных породообразующих и рудных минералов был определен методом сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе MIRA 3 LMN TESCAN (6 препаратов аналитик А.Г. Чушова). Результаты количественного анализа пирохлора (6 препаратов), получены методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа с помощью волновых спектрометров на микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (JEOL Ltd, Япония, аналитик кандидат химических наук О.Ю. Белозерова).

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Из 122 исследованных образцов установлено, что 20 образцов содержат обильную ниобиевую минерализацию (при бортовом содержании  $Nb_2O_5$  более 0,3 масс. %). Согласно методическим рекомендациям<sup>3</sup>, рядовые руды этого месторождения содержат  $Nb_2O_5$  от 0,3 до 1,2 масс. % и при среднем содержании  $Nb_2O_5$  в руде – 1 масс. %. В проанализированных рудах среднее содержание  $Nb_2O_5$  составляет

<sup>3</sup> Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Ниобиевые, танталовые руды и редкоземельные элементы. М., 2007. 42 с.



1,5 масс. %. 13 проб соответствуют критериям рядовых руд, 7 проб отнесены к богатым и весьма богатым рудам – содержания  $Nb_2O_5$  в них попадают в интервал значений от 1,2 до 6,1 масс. % (рис. 1). Нами классифицированы два типа руд: первичные и вторичные. Первичные руды представлены апатит-сланцевыми и апатит-пироксеновой (apatитит) породами, относящимися к большинству исследованных руд (11 из 20 проб). Первичные апатит-сланцевые руды с пироксеном относятся к весьма богатым ( $Nb_2O_5 \sim 6,1$  масс. %), богатым ( $Nb_2O_5 > 1,2$  масс. %) и рядовым ( $Nb_2O_5 \sim 0,3$  масс. %) рудам. Содержание  $P_2O_5$  в этих породах достигает 12 масс. %. Основные ниобиевые рудные минералы первичных апатит-сланцевых руд – это пироксен и ферроколумбит. Остальные (вторичные) типы ниобиевых руд образовались путем переотложения ниобия по породам массива вследствие метасоматических и гидротермальных процессов. Вторичные руды относятся к богатым ( $Nb_2O_5 \sim 2$  масс. %) и рядовым рудам ( $Nb_2O_5 \sim 0,3$  масс. %). Основные рудные минералы этих пород представлены различными оксидами железа, титана, ниобия: ниобийсодержащим рутилом, ильменорутилом, ниобийсодержащим гематитом, новообразованным пироксеном и ферроколумбитом. Отмечается понижение содержания  $Nb_2O_5$  среди вторичных руд по сравнению с

первичными. Это, вероятно, связано с дисперсией ниобия в процессе метасоматоза и его рассеиванием в менее концентрированных минеральных формах – ниобийсодержащих рутиле и/или гематите. Вторичные ниобиевые руды представлены кальцитовыми карбонатитами, карбонат-apatит-эгирин-сульфидной породой и калиевополевошпатовыми метасоматитами.

В Большешагнинском массиве минералы группы пироксена являются главными концентраторами ниобия и встречаются в апатит-пироксеновых, апатит-сланцевых рудах с сульфидами, кальцитовых карбонатитах и в метасоматитах.

Апатит-пироксеновая руда (apatитит) (рис. 2, а) представляет собой массивную полнокристаллическую породу светло-бежевого цвета, сложенную преимущественно апатитом (~ 85 об. %) и пироксеном (~ 10), калиевым полевым шпатом (~ 5). На фоне гипидиоморфных и ксеноморфных округлых изометричных и призматических агрегатов зерен апатита выделяются крупные (~ 0,2 мм) идиоморфные вкрапленники пироксена кубооктаэдрического габитуса (см. рис. 2, е–h). Калиевый полевой шпат наблюдается в виде «шлировых» обособлений среди основной массы породы (см. рис. 2, b, d). В апатит-пироксеновых породах цвет пироксенов при боковом освещении изменяется от бесцветного,

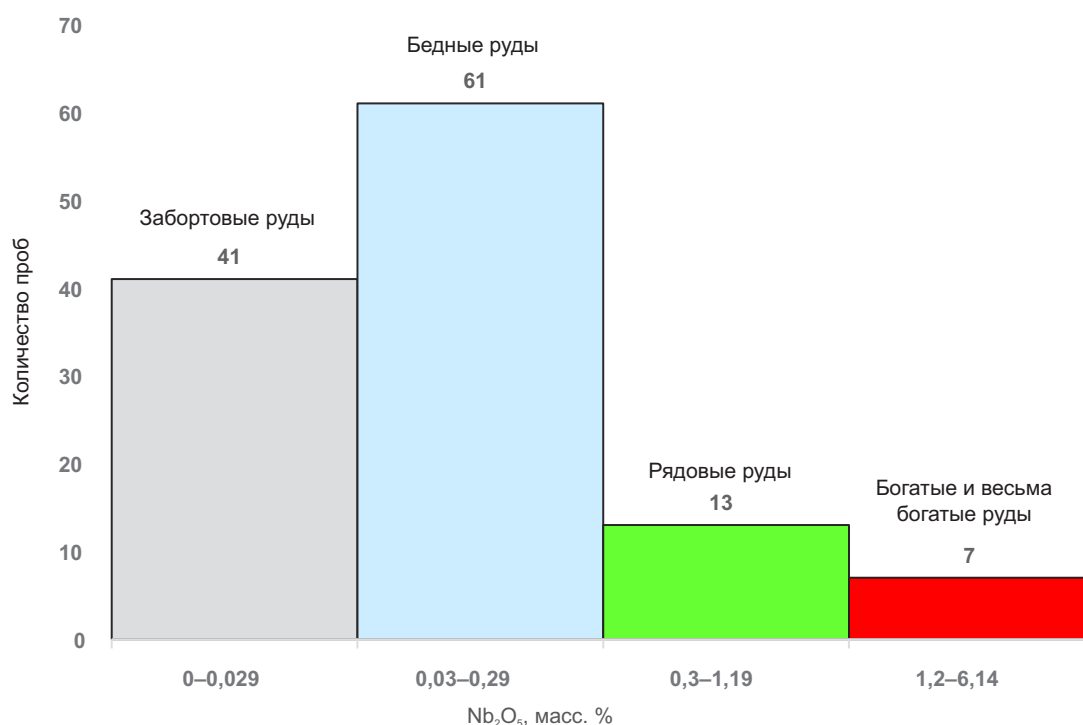


Рис. 1. Гистограмма встречаемости рудных содержаний ниобия в изученных породах массива  
Fig. 1. Histogram of niobium ore occurrence in the studied rocks of the massif

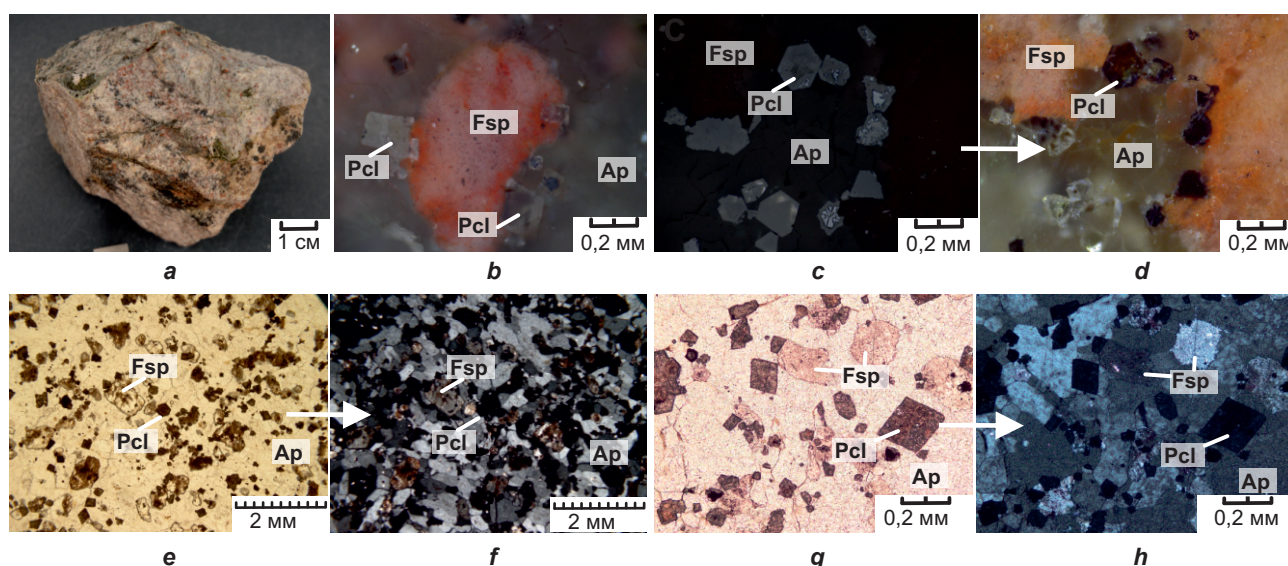


бледно-желтого, янтарно-желтого до бурого (см. рис. 2, *b, d*). Часто пироклор зональный, с секториальным распределением окраски, что также наблюдается в отраженном свете (рис. 2, *c, d*). Центральные части зерен некоторых пироклоров имеют дефекты поверхности и бурю окраску, а в отраженном свете они наблюдаются с более высоким коэффициентом отражения, вероятно, это обусловлено тем, что некоторые центральные части зерен имеют повышенные содержания оксидов железа.

Апатит-сланцевые руды являются полнокристаллическими средне- и мелкозернистыми породами черного цвета. Рудные апатит-сланцевые породы (рис. 3, *a*) состоят из (об. %) слюды – тетраферрианнита (20–60), сульфидов (10–15), апатита (1–12), калиевого полевого шпата (0–10), пироклора и/или ферроколумбита (1–6), магнетита (менее 5), карбоната (менее 5). Текстура руды – пятнистая, вкрапленная, прожилково-вкрапленная. Слюда наблюдается в виде идиоморфных табличек и чешуек псевдогексагонального облика, буро-оранжевого цвета. Апатит занимает интерстиции между чешуйками слюды, образует призматические зерна. Калиевый полевой шпат наблюдается в виде «шлифовых» обособлений среди основной массы породы. Пироклор в

apatite-slate rocks is observed in the form of large and small idiomorphic brown grains, which form a mottled appearance, separate rounded clusters of grains of irregular shape and veins (see fig. 3, *b–e*). It is noted that the close paragenesis of pyrochlore and apatite. In apatite-tetraferriannite rocks, pyrochlore is uniform in color and reflective properties, its color changes from colorless to pale yellow under side illumination (see fig. 3, *f, g*). Also, in apatite-slate rocks, ferrocolumbite is observed in the form of idiomorphic grains with numerous pores. It forms partial and complete pseudomorphs of pyrochlore. The degree of change of primary apatite-slate ores is insignificant. In apatite-slate rocks and ores, to a different degree, iron sulfides are developed, mainly in the form of pyrrhotite and pyrite. Altered (carbonatized and kaolinitized) apatite-slate rocks are characterized by a low content of niobium oxide (~0.2% and less).

Рудные кальцитовые карбонатиты – это среднезернистые и мелкозернистые породы серого, розового, охристого или темно-коричневого цвета. Текстуры руд – полосчатая,



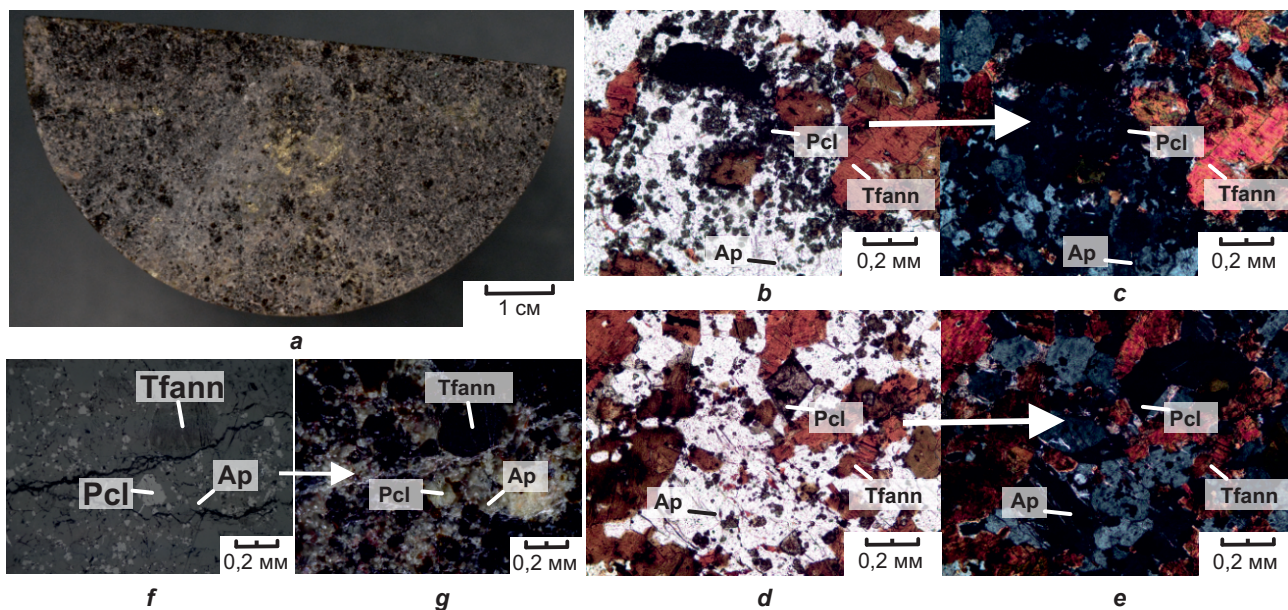
**Рис. 2. Рудная апатит-пироклоровая порода (апатитит) (образец БТГ-8-21):**  
*a* – фотография образца; *b–d* – микрофотографии шлифа: *c* – в отраженном свете,  
*b, d* – при боковом освещении; *e–h* – микрофотографии шлифа в проходящем свете:  
*e, g* – при одном поляризаторе, *f, h* – при скрещенных поляризаторах

*Pcl* – пироклор; *Fsp* – калиевый полевой шпат; *Ap* – апатит

**Fig. 2. Apatite-pyrochlore ore rock (apatitite) (sample BTG-8-21):**

*a* – photograph of the sample; *b–d* – micrographs of a polished section: *c* – in reflected light,  
*b, d* – with side illumination; *e–h* – micrographs of a thin section in transmitted light:

*e, g* – with a single polarizer; *f, h* – with crossed polarizers  
*Pcl* – pyrochlore; *Fsp* – potassium feldspar; *Ap* – apatite



**Рис. 3. Рудная апатит-слюдистая порода (образец БТГ-15-2):**

*a* – фотография образца: *b–e* – микрофотографии шлифа в проходящем свете:  
*b, d* – при одном поляризаторе, *c, e* – при скрещенных поляризаторах; *f, g* – микрофотографии аншлифа:  
*f* – в отраженном свете, *g* – при боковом освещении  
*Pcl* – пирохлор, *Tfann* – тетраферрианнит, *Ap* – апатит

**Fig. 3. Apatite-mica ore rock (sample БТГ-15-2):**

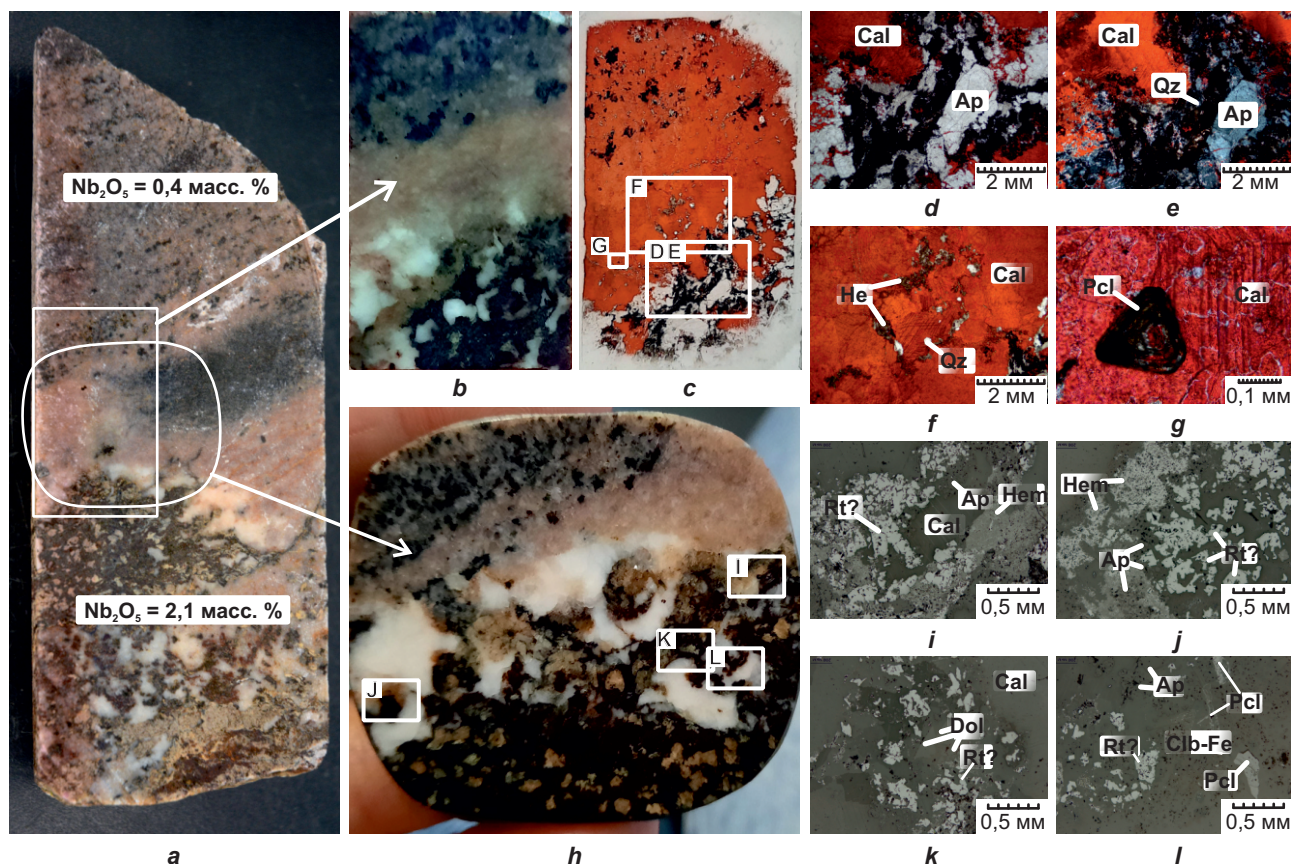
*a* – photograph of the sample; *b–e* – micrographs of a thin section in transmitted light:  
*b, d* – with a single polarizer, *c, e* – with crossed polarizers; *f, g* – micrographs of a polished section:  
*f* – in reflected light, *g* – with side illumination  
*Pcl* – pyrochlore, *Tfann* – tetraferriannite, *Ap* – apatite

линзовидная, прожилковая, прожилково-вкрапленная.

Образец апатит-кальцитового карбоната (БТГ-50) (рис. 4, *a*) сложен среднезернистым кальцитом розового цвета (~ 80 об. %) и апатитом (~ 20), также отмечается сидерит и доломит (см. рис. 4, *k*), кварц в виде идиоморфных зерен. Текстуры руды – пятнистая, полосчатая, прожилково-вкрапленная. Ниобиевое оруденение связано с продуктами изменения пирохлора – ниобийсодержащим рутилом, ильменорутилом, новообразованным ферроколумбитом, а также оксидами ниобия, железа и титана. Рутит, как основной рудный минерал, отмечается в виде аллотриоморфных зерен и агрегатов, образующих скопления и прожилки (см. рис. 4, *i–l*). Пирохлор наблюдается в виде единичных идиоморфных зерен, осколков зерен и реликтовых зерен, по которым развит ферроколумбит (см. рис. 4, *g, l*). Апатит-рутиловый парагенезис в кальцитовых карбонатах образует гнезда и прожилки. Порода в значительной степени была подвержена вторичным гидротермальным процессам – гематитизации и выщелачиванию пирохлора. Также наблюдается неравномерное распределение

рудного компонента в образце вследствие миграции ниобия под воздействием наложенных вторичных процессов (гематитизации).

В измененной карбонат-apatит-эгириносльфидной породе (рис. 5, *a*), пирохлор встречается в виде идиоморфных крупных зерен кубооктаэдрического габитуса и аллотриоморфных округлых зерен и скоплений зерен среди призматических зерен апатита и измененном эгирине. Текстура руды – пятнистая, прожилково-вкрапленная, вкрапленная. В проходящем свете цвет пирохлора бурый с каемкой более темного бурого цвета (см. рис. 5, *d*). При боковом освещении пирохлор имеет непостоянную окраску, изменяющуюся от янтарно-желтого, лимонно-желтого до светло-желтого в пределах одного зерна (см. рис. 5, *h, i*). Вероятно, цвет пирохлора связан с неоднородным химическим составом и присутствием уранил-иона в составе уранпирохлора (объясняется далее). Идиоморфный пирохлор часто зональный, с зонами развития ферроколумбита и уранпирохлора, а также с включениями гематита (см. рис. 5, *b, c*). Ферроколумбит в этих рудах наблюдается в виде частичной псевдоморфозы, он образует



**Рис. 4. Рудный апатит-кальцитовый карбонатит (образец БТГ-50):**

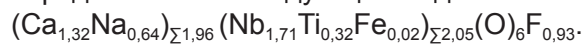
*a* – фотография образца; *b, c* – фотографии шлифа; *h* – фотографии аншлифа;  
*d–g, i–l* – микрофотографии шлифов и аншлифов апатит-карбонатитовой породы с пирохлоровым оруденением: *d–g* – в проходящем поляризованном свете, *d, f* – при одном поляризаторе, *e, g* – при скрещенных поляризаторах, *i–l* – в отраженном свете  
*Pcl* – пирохлор, *Cal* – кальцит, *Ap* – апатит, *Dol* – доломит, *Hem* – гематит,  
*Qz* – кварц, *Clb-Fe* – ферроколумбит, *Rt* – рутил

**Fig. 4. Ore apatite-calcite carbonatite (sample БТГ-50):**

*a* – photograph of the sample; *b, c* – photographs of a thin section; *h* – photographs of a polished section;  
*d–g, i–l* – micrographs of thin sections and polished sections of an apatite-carbonatite rock with pyrochlore mineralization: *d–g* – in transmitted polarized light, *d, f* – with a single polarizer, *e, g* – with crossed polarizers, *i–l* – in reflected light  
*Pcl* – pyrochlore, *Cal* – calcite, *Ap* – apatite, *Dol* – dolomite, *Hem* – hematite,  
*Qz* – quartz, *Clb-Fe* – ferrocolumbite, *Rt* – rutile

оторочки по идиоморфным кристаллам пирохлора (см. рис. 5, *b*). По породе значительно развиты сульфиды железа в виде пирротина и пирита, отмечаются также гематит и сфалерит.

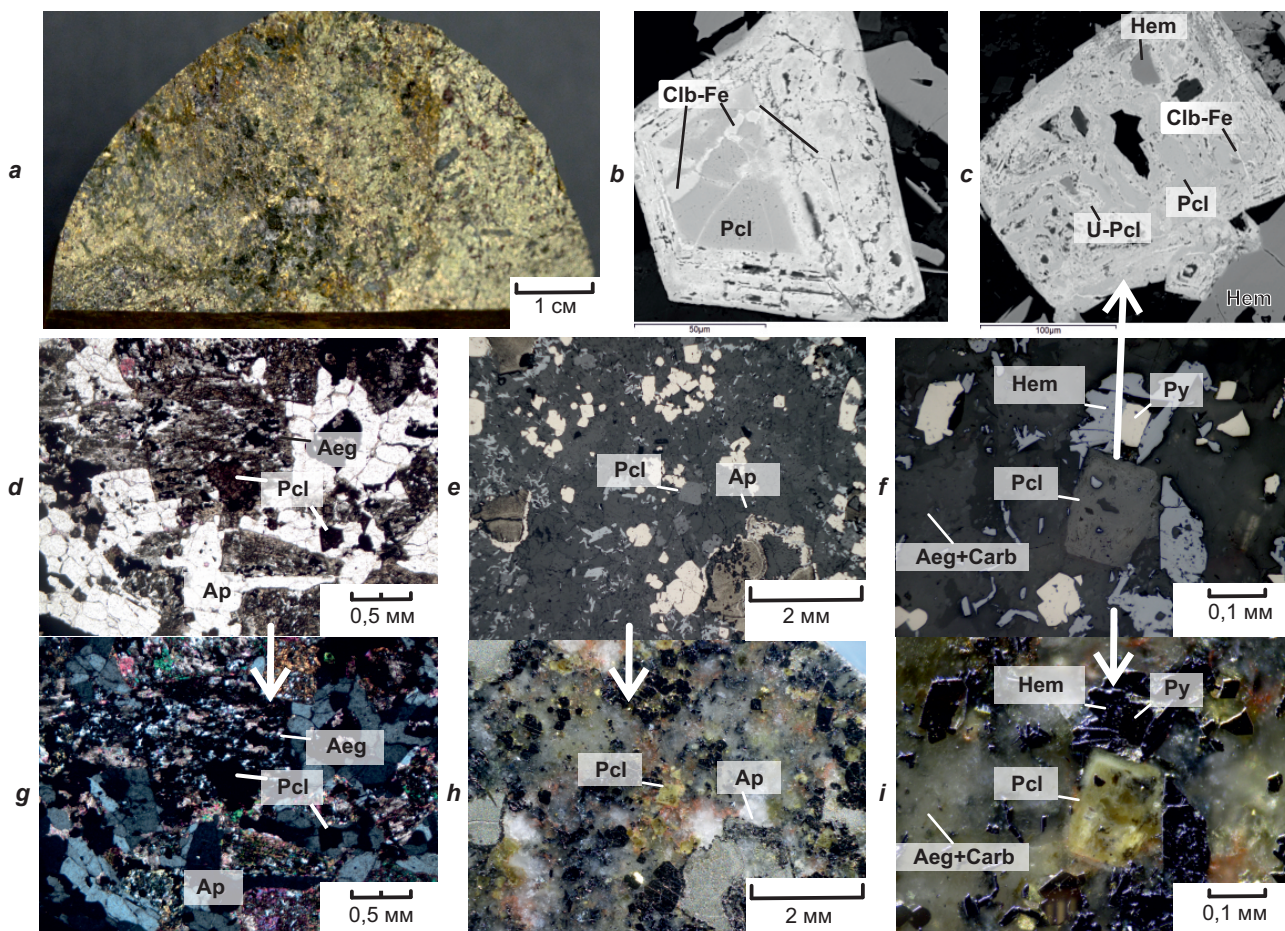
Пирохлор во всех изученных породах по составу соответствует фторкальциопирохлору, точки составов на диаграмме ниобия, титана, тантала в позиции В попадают в поле минералов группы пирохлора, наблюдается тренд в сторону обогащения титан-минералом (рис. 6, *a*). Эмпирическая формула фторкальциопирохлора представлена в следующем виде:



Состав фторкальциопирохлоров схож с составами фторкальциопирохлоров из со-

седнего Белозиминского массива в работе Е.А. Хромовой [9], но в исследованных пирохлорах отмечается больше титана и железа в В-позиции из-за примесей FeO до 3,7 % и TiO<sub>2</sub> до 7 масс. % (см. рис. 6, *b*).

Пирохлоры, вероятно, первично-флюидно-магматического происхождения, по составу соответствующие фторкальциопирохлорам, имеют выдержанный состав по катионам в позиции А (отсутствующей или незначительной вакансии в позиции А) (см. рис. 6, *c*). Пирохлоры поздние гидротермального происхождения (или слишком измененные) характеризуются существенной вакансией в позиции А и нестехиометрическим соотношением натрия



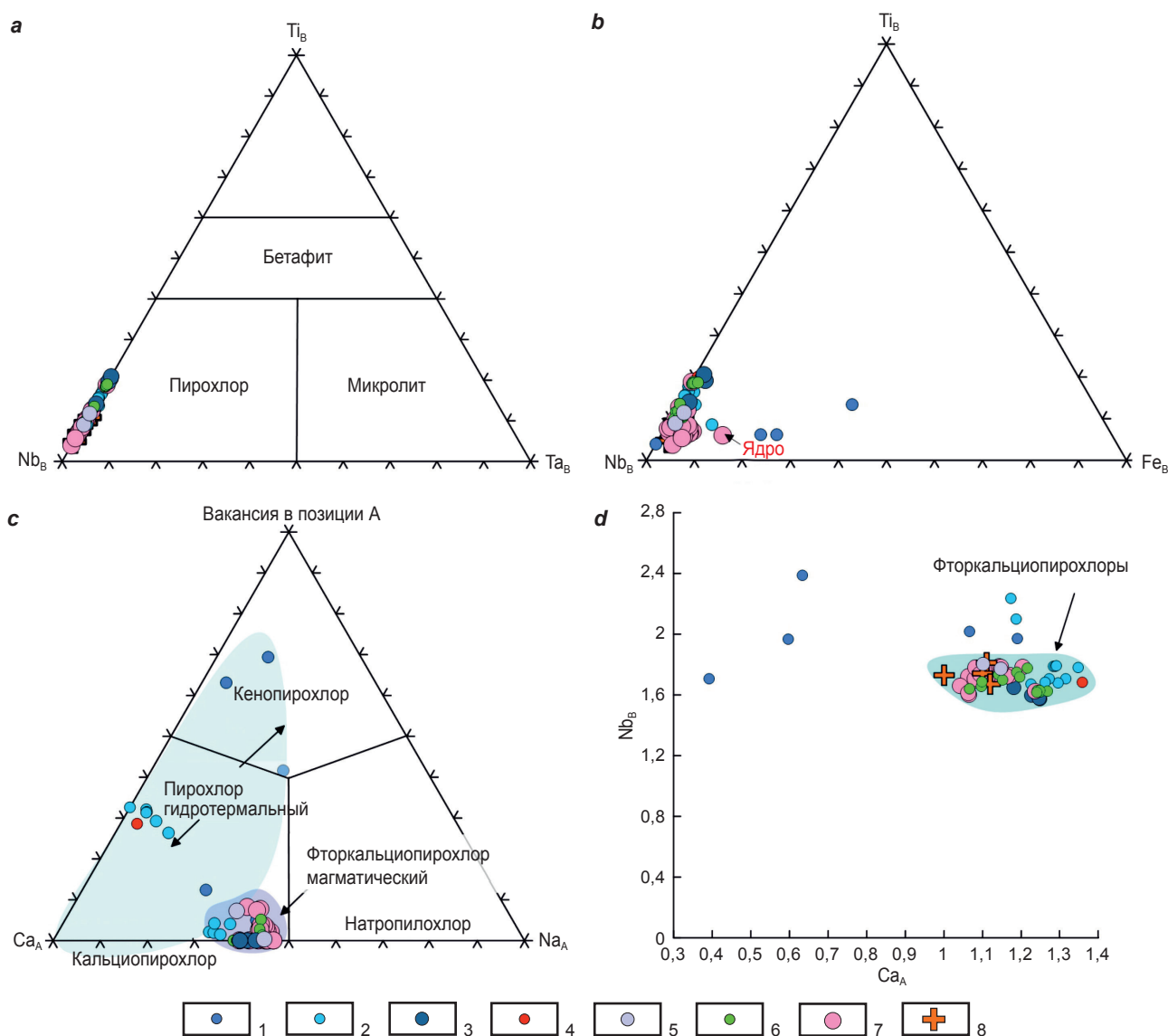
**Рис. 5. Рудная карбонат-апатит-эгирин-сульфидная порода (образец БТГ-18):**  
 а – фотография образца; б, с – микрофотографии в обратно-рассеянных электронах;  
 д, г – микрофотографии шлифа в проходящем свете: д – при одном поляризаторе,  
 г – при скрещенных поляризаторах; е, ф, h, i – микрофотографии анишлифа:  
 е, ф – в отраженном свете, h, i – при боковом освещении  
 Pcl – пирохлор; U-Pcl – уранпирохлор; Aeg+Carb – эгирин и карбонат; Ap – апатит;  
 Dol – доломит; Hem – гематит; Clb-Fe – ферроколумбит; Py – пирит  
**Fig. 5. Carbonate-apatite-aegirine-sulfide ore rock (sample BTG-18):**  
 a – photograph of the sample; b, c – micrographs in back scattered electrons;  
 d, g – micrographs of a thin section in transmitted light: d – with a single polarizer,  
 g – with crossed polarizers; e, f, h, i – microraphs of a polished section:  
 e, f – in reflected light, h, i – with side illumination  
 Pcl – pyrochlore; U-Pcl – uraniumpyrochlore; Aeg+Carb – aegirine and carbonate; Ap – apatite;  
 Dol – dolomite; Hem – hematite; Clb-Fe – ferrocolumbite; Py – pyrite

и кальция в позиции А, отвечающим неидеализированным составам фторкальциопирохлоров. Стехиометрия состава минералов пирохлора, не соответствующая идеализированной, обусловлена низким содержанием натрия и слишком высоким содержанием кальция в позиции А (см. рис. 6, с), или слишком высоким содержанием ниобия и железа в позиции В (см. рис. 6, b, d), или ошибкой анализа.

Во фторкальциопирохлорах обнаружена примесь SrO до 1,8 масс. %. При этом составы пирохлоров, отвечающие составам фторкальциопирохлоров, из, вероятно, первично-флю-

идно-магматических апатит-пирохлоровых и апатит-слюдистых пород, характеризуются выдержанными значениями SrO в пределах от 0,5 до 1,7 масс. %. Значительный разброс значений по SrO наблюдается в рудах с новообразованным (или измененным) пирохлором (в кальцитовых карбонатитах и метасоматитах).

Среди пирохлоров в образце карбонат-апатит-эгирин-сульфидной породы был обнаружен урансодержащий пирохлор (UO<sub>2</sub> до 1,6 масс. %) с зонами развития уранпирохлора (гаттчетолита) с содержаниями UO<sub>2</sub> – 6,4 масс. % и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,9 масс. % (см. рис. 5, с).



**Рис. 6. Состав пирохлоров:**

a – классификационная диаграмма для минералов группы пирохлора Nb, Ti, Ta в позиции B по источнику [2];  
b – Nb, Fe, Ti в позиции B в формульных единицах; c – классификационная диаграмма для пирохлоров Na, Ca – в позиции A, вакансия в позиции A по источнику [10] (голубым цветом обозначено поле гидротермальных пирохлоров, сиреневым – магматических пирохлоров); d – бинарная диаграмма Nb в позиции B и Ca в позиции A

1 – БТГ-50 – кальцитовый карбонатит; 2 – БТГ-18 – карбонат-апатит-эгирин-сульфидная порода;

3 – БТГ-74 – кальцит-полевошпатовая порода; 4–6 – БТГ-76, БТГ-23, БТГ-15/2 – апатит-слюдистая порода;

7 – БТГ-8/21 – апатит-пирохлоровая руда; 8 – составы фторкальциопирохлоров из работы [9]

**Fig. 6. Pyrochlore composition:**

a – classification diagram for pyrochlore group minerals Nb, Ti, Ta in B-site according to source [2];

b – Nb, Fe, Ti in B-site in formula units; c – classification diagram for pyrochlores Na, Ca – in A-site,

A-site vacancy according to source [10] (the field of hydrothermal pyrochlores is marked in blue, the field of magmatic pyrochlores is marked in purple); d – binary diagram Nb in B-site and Ca in A-site;

1 – БТГ-50 – calcite carbonatite; 2 – БТГ-18 – carbonate-apatite-aegirine-sulfide rock;

3 – БТГ-74 – calcite-feldspar rock; 4–6 – БТГ-76, БТГ-23, БТГ-15/2 – apatite-mica rock;

7 – БТГ-8/21 – apatite-pyrochlore ore; 8 – fluorocalciopyrochlore compositions from work [9]

Ферроколумбит является второстепенным рудным минералом ниобия Большетагинского месторождения. Ферроколумбит наблюдается в виде идиоморфных пористых зерен в апатит-слюдистых породах, в виде полных и частичных ячеистых псевдоморфоз – по

кристаллам пирохлора (см. рис. 4, л), образует оторочки по кристаллам пирохлора (см. рис. 5, б), а также в виде аллотриоморфных и игольчато-пластинчатых агрегатов среди кальцитовых карбонатитов. Состав ферроколумбита очень непостоянен и характеризуется



следующими вариациями составов (масс. %):  $Nb_2O_5$  (58,88–68,55), FeO (12,13–19,98), MnO (0,84–7,22),  $TiO_2$  (3,27–14,26).

Среди вторичных рудных пород ниобиевые минералы представлены (содержание  $Nb_2O_5$ , масс. %) ниобийсодержащим рутилом (до 7), ильменорутилом (до 25), ниобийсодержащим гематитом (до 7,4), новообразованным пироксеном и ферроколумбитом. Также продуктами преобразования пироксена являются оксиды ниобия, железа и титана с очень непостоянным составом. Максимально приближен к этому составу минерал дмитрийварламовит с составом [11] (масс. %):  $Nb_2O_5$  (40,08), FeO (20,77),  $TiO_2$  (37,72), MnO (0,11),  $V_2O_3$  (0,89). Однако состав исследуемого минерала несколько отличается, что, скорее всего, связано с явлениями изоморфизма (масс. %):  $Nb_2O_5$  (43,43), FeO (18,44),  $TiO_2$  (31,48),  $V_2O_3$  (2,29).

В работах предшественников отмечалось, что основное оруденение Большешагнинского массива связано с «микроклинитовыми» пироксеновыми рудами и «слюдитами», являющимися производными метасоматическими образованиями по первичным ультраосновным щелочным и средним умереннощелочным породам<sup>2</sup> [7, 12]. При петрографических исследованиях в работе В.С. Пикаловой<sup>2</sup> выявлено, что «слюдиты» (апатит-биотитовые метасоматиты) образовались при замещении ийолитов, а «микроклиниты» (доломит-анкерит-кальцит-микроклиновые породы) развиты, предположительно, по сиенитам, при этом не указан первичный источник рудного компонента – ниобия, предполагается метасоматический генезис пироксена. В этой работе<sup>2</sup> отмечено, что состав пироксенов в «микроклинитах» и «слюдитах» похож, что говорит об едином этапе рудообразования. Однако при проведении петрографических работ нами установлено, что рудные апатит-пироксеновые и апатит-слюдистые породы, являющиеся первичными рудами, вероятнее всего имеют раннемагматически-флюидную природу.

Пространственно и генетически ассоциированные с карбонатами ультраосновных щелочных комплексов силикатно-фосфатные породы – фоскориты и глиммериты. Глиммериты – это породы, состоящие в основном ( $\geq 75$  об. %) из слюды (тетраферрофлогопита или биотита), апатита и карбонатных минералов, может также присутствовать амфибол [13, 14]. Предполагается метасоматический (более общепринятый)

[14, 15] или магматический [13, 16] генезис глиммеритов. Пример образования флогопитовых метасоматитов (флогопититы, биотититы или глиммериты) [17, 18] по пироксенитам из-за воздействия карбонатитовой расплава наблюдается в комплексе пород Якупиранга в Бразилии [15]. При этом отмечается реакционная зона между резко различающимися по составу породами и смена типичных скарновых («антискарновых») ассоциаций (оливин, флогопит, кальцит, титанит, амфибол) в зоне контакта пород. Также глиммериты являются основной рудой в массивах Сокли и Сийлиньярви в Финляндии, с которыми связаны промышленные запасы фосфатного сырья [13]. Фоскориты – это породы, состоящие из апатита, магнетита и силикатных минералов (оливин и/или пироксен, и/или флогопит) [19], по некоторым моделям образование таких пород связано с прямой кристаллизацией из фоскоритовой расплава или с фракционной кристаллизацией из фосфатной расплава, или ликвацией из карбонатитовой расплава [19, 20]. Апатит-слюдистые породы и апатититы из Большешагнинского месторождения могут быть генетически связаны с фоскоритами и глиммеритами, отличающиеся от них другим способом эволюции щелочно-фосфатного раствора-расплава, значительно насыщенного флюидами. Это подтверждается в наблюдаемых морфологических и оптических свойствах минералов, их текстурно-структурных взаимоотношениях минеральных парагенезисов и ассоциаций в рудах. Апатит-слюдистые породы не образовались из измененных ультраосновных щелочных пород. Пироксен в апатит-слюдистых породах наблюдается в виде крупных идиоморфных и мелких идиоморфных зерен, образующих вкрапленность и отдельные скопления, отмечается тесный парагенезис пироксена и апатита. При этом пироксен в калиевом полевошпате не обнаружен. Калиевый полевошпат в апатит-слюдистых породах и в апатит-пироксеновых рудах образует «шлиры» – мелкокристаллические агрегаты округлой формы, при этом метасоматической реакционной каймы и калишпатизации слюды не наблюдается. Контакт пород апатит-слюдистых пород и калиевополевошпатовых пород – ровный, без реакционных каемок.

Основные руды месторождения («микроклинитовые» и «биотит-микроклинитовые», «биотититы», относимые к глиммеритам),



вероятно, образовались по исходным калиевошпатовым метасоматитам вследствие воздействия карбонатно-фосфатного раствора-расплава с существенной ролью HF, PO<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> во флюиде, концентрирующего ниобий. Это подтверждается тем, что рудные «микроклиниты» характеризуются неоднородным распределением рудного компонента, образующего чаще прожилковые и прожилково-пятнистые текстуры руд, при этом калиевой полевой шпат брекчирован, перекристаллизован и корродирован (растворен). Из экспериментальной работы [21], в которой было проведено плавление в системах такого рода при 800 °С, установлено, что при воздействии карбонатного расплава доломитового состава на калиевый полевой шпат образуется флогопит и кальцит, при этом пироклор и ниобиевые фазы кристаллизуются вдоль метасоматического контакта рядом с флогопитом между калиевым полевым шпатом и карбонатом (или между глиммеритом и карбонатитом) [21]. В этой работе [21] была предложена модель образования рудных глиммеритов, связанных с воздействием карбонатного расплава на вмещающие калиевошпатовые метасоматиты. Эта модель может объяснить образование рудных метасоматитов калиевополевошпатовых, слюдисто-полевошпатовых и слюдистых пород Большетагнинского месторождения.

Апатит-пироклоровые руды из Чуктуконского месторождения карбонатитов (Чадобецкое поднятие, окраина Сибирской платформы) сходны с подобными рудами из Большетагнинского месторождения [22]. Полученные данные могут указать на важное рудогенерирующее значение фракционирования карбонатитовой системы с обособлением щелочной фосфатно-редкометалльной фазы [22], содержащей значительные повышенные концентрации ниобия по сравнению с вмещающими метасоматитами и карбонатитами.

Явление несмесимости в фосфатно-силикатных и фосфатно-алюмосиликатных системах давно изучено и подтверждено экспериментально [23, 24]. Эти эксперименты показали область широкой несмесимости в силикатном и фосфатном расплаве и позволяют предполагать о ликвидационной природе генезиса ряда апатитовых месторождений, связанных с ультраосновными щелочными породами, например, апатит-нефелиновые руды Хибинского массива [24]. Из экспериментальной работы [24] установлено, что в «сухой» системе соста-

ва Ab – Di – NaPO<sub>3</sub> – Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ниобий и тантал концентрируются преимущественно в фосфатной фазе, а не в силикатной, поэтому можно предполагать, что образование пироклора возможно в фосфатной фазе в системах такого рода. Из экспериментальных исследований ниобийсодержащих гаплогранулитов установлено, что пироклор может быть начальной кристаллизующейся фазой в широком диапазоне давлений и температур в пироклоровых апатититах [25–27]. Например, Роджер Митчелл в своей работе [27] показал, что в системе CaCO<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-(Ca, Na)Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>-F, пироклор является первоначальной ликвидусной фазой, когда содержание фтора в расплаве превышает 1 масс. % при температурах ≥900 °С, понижение концентраций фтора и температуры ведет к образованию луешитовой фазы.

В работе<sup>2</sup> указывается, что магматические кальцитовые карбонатиты Большетагнинского массива характеризуются очень низким содержанием Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (сотые, редко десятые доли масс. %), и рудных тел с промышленным оруденением в них не выявлено. Среди исследованных руд помимо апатит-слюдистых и апатит-пироклоровых пород нами были обнаружены рудные кальцитовые карбонатиты с разным содержанием ниобия (от бортовых значений до богатых содержаний) и калиево-полевошпатово-карбонатные породы (содержание Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ~ 0,5 масс. %).

Пироклор в рудах наблюдается в виде идиоморфных вкрапленников в апатит-пироклоровых породах, идиоморфных зерен и скоплений зерен округлой формы среди апатит-слюдистых пород, а также в виде идиоморфных единичных зерен среди кальцитовых карбонатитов. Вторичные ниобиевые руды, вероятнее всего, образовались при изменении первичных апатит-слюдистых пород, что подтверждается в уменьшении содержания ниобия в измененных апатит-слюдистых породах и в различных многочисленных оксидных минеральных формах нахождения ниобия, образующего наложенное оруденение по другим породам массива. Вторичные руды связаны с новообразованным пироклором и с продуктами изменения первоначального пироклора, отложенными по измененным породам массива вследствие гидротермальных и метасоматических процессов с существенной ролью привноса железа. Вторичная наложенная минерализация представлена ферроколумбитом, который мог псевдоморфно полно-



стью<sup>2</sup> или частично заместить пироклор, ильменорутилом, ниобийсодержащим рутилом и ниобийсодержащим гематитом.

### Заключение

В результате проведенного исследования сделан вывод, что ниобиевое оруденение в Большешагнинском месторождении связано не только с пироклор-апатитовыми, калишпатовыми метасоматитами и апатит-слюдистыми породами (что выявлено предшественниками), но также обнаружено в кальцитовых карбонатитах и в других различных метасоматитах.

Установлено, что первичные ниобиевые руды связаны с апатит-слюдистыми и апатит-пироклоровыми породами. Ключевым первичным минералом – концентратором ниобия в этих породах – является фторкальциопироклор, отмечается также ферроколумбит. При этом пироклор существенно ассоциирует с апатитом. Первичные ниобиевые руды, в отличие от вторичных руд, характеризуются низкой степенью метасоматических и постмагматических изменений, что обусловило нахождение ниобия в новых минеральных формах и, как следствие, понижение концентраций ниобия.

Неизменные фторкальциопироклолы из апатитит-пироклоровых, апатит-слюдистых пород и кальцит-полевошпатовой породы характеризуются выдержанным составом по CaO, Na<sub>2</sub>O и SrO. Более измененные, гидратированные разности (по вакансии в позиции А) и составы пироклоров, не отвечающие составу фторкальциопироклора, характеры более для метасоматических пород (БТГ-18) и каль-

цитовых карбонатитов (БТГ-50) с наложенной пироклоровой минерализацией, что отражает разную степень флюидной переработки этих пироклоров.

Интенсивные постмагматические процессы существенно повлияли на перераспределение ниобия и его переотложение в новых геохимических условиях, формируя вторичные рудные залежи. В этих метасоматических образованиях ниобий содержится в виде крупного новообразованного фторкальциопироклора, обогащенного значительно ураном и танталом. В кальцитовых карбонатитах оруденение имеет наложенный прожилково-вкрапленный, прожилковый характер. Также выявлено, что руды массива претерпели многофазное полистадийное преобразование, вторичное ниобиевое оруденение связано с продуктами изменения пироклора – новообразованным ферроколумбитом, ниобийсодержащим рутилом, ильменорутилом и ниобийсодержащим гематитом. Гидротермальное преобразование руд на заключительных этапах завершило многостадийную историю формирования ниобиевого оруденения. Данные вторичные руды могут представлять интерес как комплексное сырье на ниобий, титан и железо. Первичные типы руд (apatitit-piroklorovye и apatit-slyudistyie porody) также могут представлять промышленный интерес на фосфатное сырье. Полученные новые данные могут учитываться при построении схемы отработки рудных залежей для полного извлечения рудного компонента и для разработки схемы обогащения новых комплексных типов руд из месторождения.

### Список источников

1. Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature // *The Canadian Mineralogist*. 2010. Vol. 48. Iss. 3. P. 673–698. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.3.673>.
2. Hogarth D.D. Classification and nomenclature of the pyrochlore group // *American Mineralogist*. 1977. Vol. 62. P. 403–410.
3. Нечаев А.В., Поляков Е.Г., Белоусова Е.Б., Пикалова В.С., Быховский Л.З. Минерально-сырьевая база ниобия России: приоритеты освоения // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2020. № 4–5. С. 8–15. EDN: AOUUJQ.
4. Быховский Л.З., Потанин С.Д. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений. М.: РИС ВИМС, 2009. 156 с. EDN: QKJAKT.
5. Фролов А.А. Структура и оруденение карбонатитовых массивов. М.: Недра, 1975. 160 с.
6. Stifeeva M.V., Salnikova E.B., Savelyeva V.B., Kotov A.B., Danilova Y.V., Bazarova E.P., et al. Timing of carbonatite ultramafic complexes of the Eastern Sayan Alkaline Province, Siberia: U–Pb (ID–TIMS) Geochronology of Ca–Fe Garnets // *Minerals*. 2023. Vol. 13. Iss. 8. P. 1086. <https://doi.org/10.3390/min13081086>.
7. Азарнова Л.А., Темнов А.В., Чистякова Н.И., Наумова И.С. Калипироклор из зоны окисления ниобиевых руд Большешагнинского месторождения // *Разведка и охрана недр*. 2010. № 3. С. 34–37. EDN: MSREBH.
8. Пожарицкая Л.К., Вейс Б.Т., Квитко Т.Д., Нечелюстов Г.Н., Чернышева Е.А. Большешагнинское месторождение ниобия // *Современные проблемы сырьевой базы редких металлов России (1956–2006): Минеральное сырье*. М.: ВИМС, 2006. № 18. С. 119–135.



9. Хромова Е.А., Дорошкевич А.Г., Шарыгин В.В., Избродин И.А. Особенности эволюции состава минералов группы пирохлора в карбонатитах Белозиминского массива (Восточный Саян) // Записки Российского минералогического общества. 2017. Т. 146. №1. С. 84–102. EDN: YHZFML.
10. Ma R.L., Chen W.T., Tang Y.W. Magmatic and hydrothermal controls on diverse Nb mineralization associated with carbonatite-alkaline complexes in the southern Qinling orogenic belt, Central China // *American Mineralogist*. 2024. Vol. 109. Iss. 3. P. 574–590.
11. Udoratina O.V., Panikorovskii T.L., Chukanov N.V., Voronin M.V., Lutoev V.P., Agakhanov A.A., et al. Dmitryvarlamovite,  $Ti_2(Fe^{3+}Nb)O_8$ , a new columbite-supergroup mineral related to the wolframite group // *Mineralogical Magazine*. 2024. Vol. 88. Iss. 2. P. 147–154. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.95>.
12. Базарова Е.П., Савельева В.Б., Данилова Ю.В. Геохимия ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов Большетагнинского массива (Восточный Саян) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. № 18. С. 31–36. <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.006>. EDN: LAZTKW.
13. O'Brien H., Heilimo E., Heino P. The archaic Siilinjärvi carbonatite complex // *Mineral deposits of Finland*. Amsterdam: Elsevier, 2015. P. 327–343. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410438-9.00013-3>.
14. Silva D., Daczko N., Piazzolo S., Raimondo T. Glimmerite: A product of melt-rock interaction within a crustal-scale high-strain zone // *Gondwana Research*. 2022. Vol. 105. P. 160–184. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.09.005>.
15. Chmyz L., Azzone R.G., Ruberti E., Guarino V. Wall rock assimilation in carbonatite magmas: Textural, mineral and whole-rock geochemical signatures in the Jacupiranga complex, Brazil // *Geochemistry*. 2025. Vol. 85. Iss. 1. P. 126218. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2024.126218>.
16. Karvinen S., Heinonen A., Beier C., Jönes N. The composition of apatite in the Archean Siilinjärvi glimmerite-carbonatite complex in Eastern Finland // *Bulletin of the geological society of Finland*. 2024. Vol. 96. Iss. 1. P. 5–34. <https://doi.org/10.17741/bgsf/96.1.001>.
17. Becker H., Wenzel T., Volker F. Geochemistry of glimmerite veins in peridotites from Lower Austria – implications for the origin of K-rich magmas in collision zones // *Journal of Petrology*. 1999. Vol. 40. Iss. 2. P. 315–338. <https://doi.org/10.1093/petrology/40.2.315>.
18. Anenburg M., Walters J. B. Metasomatic ijolite, glimmerite, silicocarbonatite, and antiskarn formation: carbonatite and silicate phase equilibria in the system  $Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-O_2-CO_2$  // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2024. Vol. 179. Iss. 5. P. 40. [https://doi.org/10.1007/s00410-024-02109-0?urlappend=%3Futm\\_source%3Dresearchgate.net%26utm\\_medium%3Darticle](https://doi.org/10.1007/s00410-024-02109-0?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle).
19. Krasnova N.I., Balaganskaya E.G. Garcia D. Kovdor – classic phoscorites and carbonatites // *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province*. Mineralogical Society Series. Iss. 10. / ed. F. Wall, A.N. Zaitsev. London: Mineralogical Society of Great Britain & Ireland, 2004, P. 95–127.
20. Kruk M.N., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izbrodin I.A. Mineralogy of phoscorites of the Arbarastakh complex (Republic of Sakha, Yakutia, Russia) // *Minerals*. 2021. Vol. 11. Iss. 6. P. 556. <https://doi.org/10.3390/min11060556>.
21. Williams-Jones A.E., Vasyukova O.V., Kostyuk A.V. Niobium ore genesis in a capsule // *Geology*. 2024. Vol. 52. Iss. 7. P. 560–564. <https://doi.org/10.1130/G52169.1>.
22. Лапин А.В., Куликова И.М., Левченко Е.Н. О перспективном типе апатит-пирохлоровых руд в породах экзо-контактового ореола карбонатитов // *Разведка и охрана недр*. 2016. № 11. С. 36–41. EDN: XIKZPX.
23. Когарко Л.Н., Кригман Л.Д., Петрова Е.Н., Соловова И.П. Фазовые равновесия в системе фторапатит – нефелин – диопсид в связи с генезисом апатитовых месторождений Хибин. Геохимия. 1977. № 1. С. 42-55.
24. Сук Н.И. Жидкостная несмесимость в щелочных магматических системах. М.: Книжный дом Университет, 2017. 238 с.
25. Mitchell R.H., Wahl R., Cohen A. Mineralogy and genesis of pyrochlore apatite from the good hope carbonatite, Ontario: A potential niobium deposit // *Mineralogical Magazine*. 2019. Vol. 84. Iss. 1. P. 81–91. <https://doi.org/10.1180/mgm.2019.64>.
26. Kjarsgaard B.A., Mitchell R.H. Solubility of Ta in the system  $CaCO_3-Ca(OH)_2-NaTaO_3-NaNbO_3 \pm F$  at 0.1 GPa: Implications for the crystallization of pyrochlore group minerals in carbonatites // *The Canadian Mineralogist*. 2008. Vol. 46. Iss. 4. P. 981–990. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.4.981>.
27. Mitchell R.H. Mineralogical and experimental constraints on the origins of niobium mineralization in carbonatites // *Rare element geochemistry and mineral deposits*. Geological Association of Canada: Short course notes 17. 2004. P. 201–215.

### References

1. Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *The Canadian Mineralogist*. 2010;48(3):673-698. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.3.673>.
2. Hogarth D.D. Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineralogist*. 1977;62:403-410.
3. Nechaev A.V., Polyakov E.G., Belousova E.B., Pikalova V.S., Bykhovskiy L.Z. Mineral resources of niobium in Russia: priorities of development. *Mineral resources of Russia. Economics & Management*. 2020;4-5:8-15. (In Russ.). EDN: AOUUJQ.
4. Bykhovskiy L.Z., Potanin S.D. *Geological and industrial types of rare metal deposits*. Moscow: Editorial and Publishing Sector of the All-Russian Research Institute of Mineral Resources; 2009, 156 p. (In Russ.). EDN: QKJAKT.
5. Frolov A.A. *Structure and mineralization of carbonatite massifs*. Moscow: Nedra; 1975, 160 p. (In Russ.).



6. Stifeeva M.V., Salnikova E.B., Savelyeva V.B., Kotov A.B., Danilova Y.V., Bazarova E.P., et al. Timing of carbonatite ultramafic complexes of the Eastern Sayan Alkaline Province, Siberia: U–Pb (ID–TIMS) Geochronology of Ca–Fe Garnets. *Minerals*. 2023;13(8):1086. <https://doi.org/10.3390/min13081086>.
7. Azarnova L.A., Temnov A.V., Chistyakova N.I., Naumova I.S. Kalipyrochlore from weathered ore at Bolshetagninskoe deposit. *Prospect and protection of mineral resources*. 2010;3:34–37. (In Russ.). EDN: MSREBH.
8. Pozharitskaia L.K., Veis B.T., Kvitko T.D., Nechelyustov G.N., Chernysheva E.A. Bolshetagninskoye niobium deposit. In: Current problems of the raw material base of rare metals in Russia (1956–2006): Mineral raw materials. Moscow: All-Russian Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky; 2006;18:119–135. (In Russ.).
9. Khromova E.A., Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Izbrodin I.A. Evolution of pyrochlore group mineral composition in carbonatites of the Belaya Zima massif (Eastern Sayan). *Zapiski RMO. Proceedings of the Russian mineralogical society*. 2017;146(1):84–102. (In Russ.). EDN: YHZFML.
10. Ma R.L., Chen W.T., Tang Y.W. Magmatic and hydrothermal controls on diverse Nb mineralization associated with carbonatite-alkaline complexes in the southern Qinling orogenic belt, Central China. *American Mineralogist*. 2024;109(3):574–590.
11. Udoratina O.V., Panikorovskii T.L., Chukanov N.V., Voronin M.V., Lutoev V.P., Agakhanov A.A., et al. Dmitryvarlamovite,  $Ti_2(Fe^3+ Nb)O_8$ , a new columbite-supergroup mineral related to the wolframite group. *Mineralogical Magazine*. 2024;88(2):147–154. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.95>.
12. Bazarova E.P., Savelyeva V.B., Danilova Yu.V. Geochemistry of ultramafic-alkaline rocks and carbonatites of the Bol'shetagninsky massif (Eastern Sayan). *Proceedings of the Fersman scientific session of the Geological Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021;18:31–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.006>. EDN: LAZTKW.
13. O'Brien H., Heilimo E., Heino P. The archaic Siilinjärvi carbonatite complex. In: *Mineral deposits of Finland*. Amsterdam: Elsevier; 2015, 327–343. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410438-9.00013-3>.
14. Silva D., Daczko N., Piazzolo S., Raimondo T. Glimmerite: A product of melt-rock interaction within a crustal-scale high-strain zone. *Gondwana Research*. 2022;105:160–184.
15. Chmyz L., Azzone R.G., Ruberti E., Guarino V. Wall rock assimilation in carbonatite magmas: Textural, mineral and whole-rock geochemical signatures in the Jacupiranga complex, Brazil. *Geochemistry*. 2025;85(1):126218. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2024.126218>.
16. Karvinen S., Heinonen A., Beier C., Jönes N. The composition of apatite in the Archean Siilinjärvi glimmerite-carbonatite complex in Eastern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 2024;96(1):5–34. <https://doi.org/10.17741/bgsf/96.1.001>.
17. Becker H., Wenzel T., Volker F. Geochemistry of glimmerite veins in peridotites from Lower Austria – implications for the origin of K-rich magmas in collision zones. *Journal of Petrology*. 1999;40(2):315–338. <https://doi.org/10.1093/petrology/40.2.315>.
18. Anenburg M., Walters J. B. Metasomatic ijolite, glimmerite, silicocarbonatite, and antiskarn formation: carbonatite and silicate phase equilibria in the system  $Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-O_2-CO_2$ . *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2024;179(5):40. [https://doi.org/10.1007/s00410-024-02109-0?urlappend=%3Futm\\_source%3Dresearchgate.net%26utm\\_medium%3Darticle](https://doi.org/10.1007/s00410-024-02109-0?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle).
19. Krasnova N.I., Balaganskaya E.G., Garcia D., Kovdor – classic phoscorites. In: Wall F., Zaitsev A.N. (ed.). *Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: The key example of the Kola alkaline province*. Mineralogical Society Series. Iss. 10. London: Mineralogical Society of Great Britain & Ireland; 2004, p. 95–127.
20. Kruk M.N., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izbrodin I.A. Mineralogy of phoscorites of the Arbarastakh complex (Republic of Sakha, Yakutia, Russia). *Minerals*. 2021;11(6):556. <https://doi.org/10.3390/min11060556>.
21. Williams-Jones A.E., Vasyukova O.V., Kostyuk A.V. Niobium ore genesis in a capsule. *Geology*. 2024;52(7):560–564. <https://doi.org/10.1130/G52169.1>.
22. Lapin A.V., Kulikova I.M., Levchenko E.N. About the prospects of apatite-pyrochlore type ore in the rocks excontact halo of carbonatites. *Prospect and protection of mineral resources*. 2016;11:36–41. (In Russ.). EDN: XIKZPX.
23. Kogarko L.N., Krigman L.D., Petrova E.N., Solovova I.P. Phase equilibria in the fluorapatite–nepheline–diopside system in relation to the genesis of the Khibiny apatite deposits. *Geochemistry International*. 1977, № 1, p. 42–55. (In Russ.).
24. Suk N.I. *Liquid immiscibility in alkaline magmatic systems*. Moscow: Knizhnii Dom Universitet; 2017, 238 p. (In Russ.).
25. Mitchell R.H., Wahl R., Cohen A. Mineralogy and genesis of pyrochlore apatite from the good hope carbonatite, Ontario: A potential niobium deposit. *Mineralogical Magazine*. 2020;84(1):81–91. <https://doi.org/10.1180/mgm.2019.64>.
26. Kjarsgaard B.A. and Mitchell R.H. Solubility of Ta in the system  $CaCO_3-Ca(OH)_2-NaTaO_3-NaNbO_3 \pm F$  at 0.1 GPa: Implications for the crystallization of pyrochlore group minerals in carbonatites. *The Canadian Mineralogist*. 2008;46(4):981–990. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.4.981>.
27. Mitchell R.H. Mineralogical and experimental constraints on the origins of niobium mineralization in carbonatites. In: *Rare Element Geochemistry and Mineral Deposits*. Geological Association of Canada, Short Course Notes 17. 2004:201–215.

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Сукнева Мария Олеговна,**  
инженер-исследователь лаборатории физико-химической петрологии  
и генетической минералогии,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
Лаборант лаборатории палеогеодинамики,  
Институт земной коры  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
✉ [masha.sukneva@mail.ru](mailto:masha.sukneva@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0005-4676-3331>

**Maria O. Sukneva,**  
Research Engineer of the Laboratory of Physicochemical Petrology  
and Genetic Mineralogy,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
Laboratory Assistant of the Laboratory of Paleogeodynamics,  
Institute of the Earth's Crust,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
✉ [masha.sukneva@mail.ru](mailto:masha.sukneva@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0005-4676-3331>



**Радомская Татьяна Алесандровна,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
научный сотрудник лаборатории физико-химической петрологии  
и генетической минералогии,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
[radomskaya@igc.irk.ru](mailto:radomskaya@igc.irk.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-6220-9980>

**Tatiana A. Radomskaia,**  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Researcher of the Laboratory of Physicochemical Petrology and Genetic Mineralogy,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
[radomskaya@igc.irk.ru](mailto:radomskaya@igc.irk.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-6220-9980>



**Гавриленко Вероника Владимировна,**  
инженер-исследователь лаборатории физико-химической петрологии  
и генетической минералогии,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
[i@verf61.ru](mailto:i@verf61.ru)  
<https://orcid.org/0009-0001-3402-5746>

**Veronika V. Gavrilenko,**  
Research Engineer of the Laboratory of Physicochemical Petrology  
and Genetic Mineralogy,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
[i@verf61.ru](mailto:i@verf61.ru)  
<https://orcid.org/0009-0001-3402-5746>



**Чуешова Анастасия Геннадьевна,**  
младший научный сотрудник лаборатории физико-химической петрологии  
и генетической минералогии,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
trill6521@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-1107-3179>  
**Anastasia G. Chueshova,**  
Junior Researcher of the Laboratory of Physicochemical Petrology  
and Genetic Mineralogy,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
trill6521@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-1107-3179>

#### **Вклад авторов / Contribution of the authors**

М.О. Сукнева – проведение исследования, визуализация данных, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Т.А. Радомская – получение финансирования, проведение исследования, научное руководство, редактирование рукописи.

В.В. Гавриленко – курирование данных, получение финансирования, проведение исследования, редактирование рукописи.

А.Г. Чуешова – проведение исследования.

Maria O. Sukneva – investigation, visualization, writing – original draft, writing – editing.

Tatiana A. Radomskaia – funding acquisition, investigation, supervision, writing – editing.

Veronika V. Gavrilenko – data curation, funding acquisition, investigation, writing – editing.

Anastasia G. Chueshova – investigation.

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 05.03.2026; одобрена после рецензирования 13.03.2026; принята к публикации 19.03.2026.

The article was submitted 05.03.2026; approved after reviewing 13.03.2026; accepted for publication 19.03.2026.