

УДК 553.21

DOI: 10.24930/2500-302X-2024-24-4-661-674

Редкоземельные минералы в докембрийских породах северной части Ляпинского антиклинория (Приполярный Урал)

О. В. Гракова, К. С. Попвасев

Институт геологии им. Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167982, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54,
e-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru

Поступила в редакцию 25.12.2023 г., принята к печати 12.03.2024 г.

Объект исследования. РЗЭ-содержащие минералы в метаморфических докембрийских породах северной части Ляпинского антиклинория Приполярного Урала. **Цель.** Установление типохимических особенностей и условий формирования редкоземельных минералов в исследуемых породах. **Материалы и методы.** Химические составы и фотографии минералов были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6400 с энергетическим спектрометром Link и Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Instruments X-Max. Содержания породообразующих оксидов определялись весовым химическим методом. Содержания редких и редкоземельных элементов определялись на масс-спектрометре с индуктивной связанной плазмой Agilent 7700х. **Результаты.** В докембрийских породах Приполярного Урала установлены редкоземельные карбонаты и титанониобаты. В слюдяных гранатосодержащих кристаллических сланцах няртинского комплекса впервые установлены анкилит-(Ce) и гидроксилбастнезит-(Ce), в актинолитосодержащих кварц-альбит-эпидот-хлоритовых сланцах пуйвинской свиты – гидроксилбастнезит-(La). В метариолитах саблегорской свиты изучены типохимические особенности бастнезита-(Ce), кайнозита-(Y) и эшинита-(Y). Анкилит-(Ce), гидроксилбастнезит-(Ce) и гидроксилбастнезита-(La) из нижнепротерозойских и верхнерифейских метаморфических пород, вероятно, сформировались при метаморфогенно-гидротермальных процессах в присутствии минералов, содержащих редкоземельные элементы, и при участии растворов углекислого состава. Для метариолитов верхнерифей-вендской саблегорской свиты предложена схема формирования редкоземельных минералов. Эшинит-(Y), вероятно, образовался в результате преобразования риолитов, за счет присутствия в остаточном расплаве повышенных концентраций некоторых редких металлов – Zr, Nb, Y и REE. Бастнезит-(Ce) – в результате метаморфогенно-гидротермальных процессов замещает алланит-(Ce). Кайнозит-(Y) в метариолитах является самым поздним минералом, сформировавшимся за счет перекристаллизации алланита-(Ce) и бастнезита-(Ce) при распаде эшинита-(Y). **Выводы.** В результате изучения РЗЭ-содержащих минералов в докембрийских породах Ляпинского антиклинория показано, что редкоземельные титанониобаты возникли в постмагматическую стадию преобразования метариолитов. Формирование редкоземельных карбонатов может быть связано с метаморфическими и гидротермальными процессами.

Ключевые слова: Приполярный Урал, Ляпинский антиклинорий, докембрий, бастнезит-(Ce), кайнозит-(Y), эшинит-(Y), анкилит-(Ce), гидроксилбастнезит-(Ce), гидроксилбастнезит-(La)

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственных тем НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН: “Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы”, 122040600012-2, “Развитие минерально-сырьевого комплекса Тимано-Североуральско-Баренцевоморского региона на основе эффективного прогноза, геологического моделирования, геолого-экономической оценки ресурсного потенциала и новых технологий переработки полезных ископаемых”, 122040600011-5

Rare-earth minerals in pre-Cambrian rocks of the Lyapinskii anticlinorium (Subpolar Urals)

Oksana V. Grakova, Konstantin S. Popvasev

N.P. Yushkin Institute of Geology Komi SC, UB RAS, 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar 167982, Russia,
e-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru

Received 25.12.2023, accepted 12.03.2024

Research subject. REE-containing minerals in metamorphic pre-Cambrian rocks of the northern part of the Lyapinskii anticlinorium of the Subpolar Urals. **Aim.** To establish typochemical features and conditions for the formation of rare-earth minerals in the studied rocks. **Materials and methods.** Chemical compositions and photographs of minerals were obtained

Для цитирования: Гракова О.В., Попвасев К.С. (2024) Редкоземельные минералы в докембрийских породах северной части Ляпинского антиклинория (Приполярный Урал). *Литосфера*, 24(4), 661–674. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-661-674>

For citation: Grakova O.V., Popvasev K.S. (2024) Rare-earth minerals in pre-Cambrian rocks of the Lyapinskii anticlinorium (Subpolar Urals). *Lithosphere (Russia)*, 24(4), 661–674. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-661-674>

© О.В. Гракова, К.С. Попвасев, 2024

using a JSM-6400 scanning electron microscope with a Link energy spectrometer and a Tescan Vega 3 LMH with an Instruments X-Max energy-dispersive attachment. The content of rock-forming oxides was determined by the gravimetric chemical method. The contents of rare and rare-earth elements were determined using an Agilent 7700x inductively coupled plasma mass spectrometer. *Results.* Rare earth carbonates and titanoniobates were identified in the pre-Cambrian rocks of the Subpolar Urals. In the mica garnet-bearing crystalline schists of the Nyartinskii complex, ankylite-(Ce) and hydroxylbastnäsite-(Ce) were identified for the first time, and hydroxylbastnäsite-(La) was identified in the actinolite-bearing quartz-albite-epidote-chlorite schists of the Puyva Formation. In the metarhyolites of the Sablegorskii Formation, the typological chemical features of bastnäsite-(Ce), kinosite-(Y), and aeschynite-(Y) were studied. Ankylite-(Ce), hydroxylbastnäsite-(Ce), and hydroxylbastnaesite-(La) from Lower Proterozoic and Upper Riphean metamorphic rocks were probably formed during metamorphogenic-hydrothermal processes in the presence of minerals containing rare-earth elements and with the participation of carbon dioxide solutions. A scheme for the formation of rare-earth minerals was proposed for the metarhyolites of the Upper Riphean-Vendian Sablegorskii Formation. Aeschynite-(Y) was probably formed as a result of the transformation of rhyolites, due to the presence in the residual melt of increased concentrations of some rare metals, i.e., Zr, Nb, Y, and REE. As a result of metamorphogenic-hydrothermal processes, bastnäsite-(Ce) replaces allanite-(Ce). Kinosite-(Y) in metarhyolites is the latest mineral, formed due to the recrystallization of allanite-(Ce) and bastnäsite-(Ce) during the decomposition of aeschynite-(Y). *Conclusions.* The study of REE-containing minerals in Precambrian rocks of the Lyapin anticlinorium found that rare-earth titanoniobates were formed during the post-magmatic stage of metarhyolite transformation. The formation of rare-earth carbonates may be associated with metamorphic and hydrothermal processes.

Keywords: Subpolar Urals, Lyapin anticlinorium, pre-Cambrian, bastnäsite-(Ce), kinosite-(Y) aeschynite-(Y), ankylite-(Ce), hydroxylbastnäsite-(Ce), hydroxylbastnaesite-(La)

Funding information

The work was carried out within the framework of the state themes of the Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS "Deep structure, geodynamic evolution, interaction of geospheres, magmatism, metamorphism and isotope geochronology of the Timan-Severouralsk segment of the lithosphere", 122040600012-2, "Development of the mineral resource complex of the Timan-North Ural-Barents Sea region based on effective forecasting, geological modeling, geological and economic assessment of resource potential and new technologies for processing minerals", 122040600011-5

ВВЕДЕНИЕ

Исследование типоморфических и кристаллохимических особенностей редкоземельных минералов из докембрийских пород важно для понимания геологических процессов, протекающих в сильно-измененных древних породах. Также оно позволит проследить закономерности формирования проявлений стратегически значимых металлов. Разрез докембрия на Приполярном Урале в пределах северной части Ляпинского антиклинория является опорным для всего Тимано-Североуральского региона. Он наиболее детально изучен в бассейне верховьев р. Кожым и ее притоках. Практически по всей площади осуществлены геологическая съемка и доизучение масштаба 1 : 50 000, неоднократно проводились и проводятся в настоящее время различные поисковые и тематические работы, в том числе нацеленные на детальное послыйное изучение разрезов докембрия, сбор и определение ископаемых остатков, датирование отложений, анализ процессов седименто- и литогенеза, магматизма и метаморфизма, минерагенических особенностей.

Однако, несмотря на хорошую изученность, некоторые вопросы остаются недостаточно освещенными. В частности, это касается условий формирования редкоземельной минерализации из разновозрастных стратифицированных подразделений рассматриваемой территории. Ранее на Приполярном Урале, в зоне контакта верхнерифейских и кембрий-ордовикских терригенных пород, а также в кварце-

вых жилах и хлоритоид-диаспор-пирофиллитовых и фуксит-альбит-кварцевых метасоматитах на западном крыле Пелингичейской горстантиклинали среди редкоземельных минералов были обнаружены монацит, ксенотим, таленит-(Nd), иттрокразит (Y), флоренсит, редкоземельные фосфатоарсенаты (Юдович и др., 1998; Козырева и др., 2003, 2004, 2005; Репина, Муфтахов, 2020). Нами были изучены типохимические особенности редкоземельного алюмофосфата, содержащего редкие земли – сванбергит в кварцитопесчаниках обеизской свиты (Никулова и др., 2022). В субщелочных гранитах и мусковит-фенгитовых прожилках в альбитизированных кварц-серицитовых породах среднеордовикского возраста был установлен бастрезит (Удоротина, Капитанова, 2016). В кристаллических сланцах пуйвинской свиты описан бастрезит-(Ce) (Ковальчук, 2015). Кайнозит установлен в золотосодержащих фукситовых прожилках среди риолитов саблегорской свиты на месторождении Чудное на Приполярном Урале (Онищенко, Кузнецов, 2019; Онищенко, 2020). В последние годы в Центрально-Уральской зоне Южного Урала в метаморфических и магматических докембрийских породах обнаружено большое количество РЗЭ-содержащие минералов, обсуждаются условия их образования и взаимосвязь с процессами метаморфизма и магматизма (Ковалев и др., 2020, 2023).

Для уточнения условий образования REE-минералов нами проведены минералогические исследования в докембрийских породах на Севере

Урала в районе северной части Ляпинского антиклинория. Впервые обнаружены и описаны минералы карбонатов редких земель в нижнепротерозойских метаморфических породах няртинского комплекса – анкилит-(Ce) и гидроксилбастнезит-(Ce), а также уточнены типохимические особенности редкоземельных титанониобатов и карбонатов в метаморфических породах пуйвинской и саблегорской свит, предложена схема их формирования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы для исследования были отобраны в ходе полевых работ из естественных обнажений, приуроченных к зонам тектонических нарушений, докембрийских пород в северной части Ляпинского антиклинория на Приполярном Урале. Химические составы и фотографии минералов получены с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6400 с энергетическим спектрометром Link и Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Instruments X-Max 50 mm² Oxford instruments при ускоряющем напряжении 20 кВ, размер пучка 180 нм, и области возбуждения до 5 мкм, с использованием программного обеспечения Aztec. Калибровка производилась по кобальту (Co). В качестве дополнительных стандартов применяются 55 стандартов фирмы Micro-Analysis Consultants Ltd. Погрешность измерений, %: SiO₂ – до 0.23, ThO₂ – до 0.21, ZrO₂ – до 0.57, F – до 0.20, P₂O₅ – до 0.33, HfO₂ – до 0.27, Y₂O₃ – до 0.37, Al₂O₃ – до 0.07, FeO – до 0.08, UO₂ – до 0.18, La₂O₃ – до 0.23, CeO₂ – до 0.33, Pr₂O₃ – до 0.29, Nd₂O₃ – до 0.37, Gd₂O₃ – до 0.29, Sn₂O₃ – до 0.35, CaO – до 0.06, S – до 0.04, Y₂O₃ – до 0.54, Sm₂O₃ – до 0.23, Eu₂O₃ – до 0.33, Pu₂O₃ – до 0.33, Er₂O₃ – до 0.31, Yb₂O₃ – до 0.34, Ho₂O₃ – до 0.33. Содержания порообразующих оксидов определялись весовым химическим методом в лаборатории химии минерального сырья, работающей в рамках метрологических норм (заключение № 774). Определение содержаний редких и редкоземельных элементов проводилось на масс-спектрометре с индуктивной связанной плазмой Agilent 7700х. Чтобы перевести пробы в раствор, использован метод многокислотного разложения (смесь кислот в соотношении HNO₃ : HF : HCl = 1 : 5 : 2) в условиях микроволнового нагрева. Разложение велось в микроволновой системе пробоподготовки Sineo MDS-10. Все аналитические работы проведены в ЦКП “Геонаука” ИГ Коми НЦ УрО РАН.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД

При характеристике геологического строения района мы опираемся на принятую нами схе-

му докембрия (Пыстин и др., 2022), включающую в себя следующие стратифицированные подразделения: нижнепротерозойские – няртинский комплекс (гнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты, мрамора, диафоритовые сланцы) и щокурьинскую свиту (сланцы, кварциты, мрамора), верхнерифейские – пуйвинскую (сланцы, кварциты), хобеинскую (конгломераты, кварцито-песчаники, сланцы), мороинскую свиты (сланцы, мрамора, доломиты, кварциты), верхнерифейско-нижневендскую саблегорскую свиту (эффузивы основного, кислого состава) (рис. 1).

В тектоническом плане в пределах площади выделяют три докайнозойских структурных этажа: нижнепротерозойский (карельский), рифейско-вендский (байкальский) и ордовикско-нижнемезозойский (каледоно-герцинский) (Пыстин, 1994). При геологическом доизучении м-ба 1 : 200 000 (Государственная геологическая карта..., 2013) авторами в качестве нижнего структурного этажа выделяется рифейско-раннекембрийский (байкальский). На нем залегают нижнепалеозойские отложения каледоно-герцинского структурного этажа.

По данным Р.Г. Тимониной (1980) и А.М. Пыстина (1994), на рассматриваемой территории отмечается проявление трех этапов метаморфизма в разных *P-T* условиях. В качестве первого этапа выделен метаморфизм амфиболитовой (гранулитовой?) фации нижнепротерозойских образований, второго – повторное изменение ранее метаморфизованных нижнепротерозойских пород и проявление в них метасоматических процессов и прогрессивное преобразование рифейско-вендских отложений (зональный метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фации), третьего – низкотемпературный диафорез нижнепротерозойских и докембрийских толщ, а также прогрессивный метаморфизм нижне-среднепалеозойских образований.

Авторами объяснительной записки к Государственной геологической карте м-ба 1 : 200 000 ранний этап метаморфизма, охватывающий весь дохобеинский разрез, принят не выше уровня эпидот-амфиболитовой фации. Породы хобеинской, мороинской и саблегорской свиты метаморфизованы в условиях фации зеленых сланцев (Государственная геологическая карта..., 2013).

Петрографическое изучение пород показало, что в образце слюдяного гранатсодержащего кристаллического сланца няртинского комплекса устанавливается сланцеватая текстура, мелкозернистая структура. На микроуровне (рис. 2а) образец характеризуется гетеробластовой, лепидопорфирогранобластовой структурой и полосчато-сланцеватой текстурой. Основная ткань породы имеет гранобластовую структуру и представлена кварцем и плагиоклазом на 70%, при преобладании первого. Порода состоит из кварца (40%), кислого плагиоклаза (30), хлорита (10), мусковита (10), биотита (до 5),

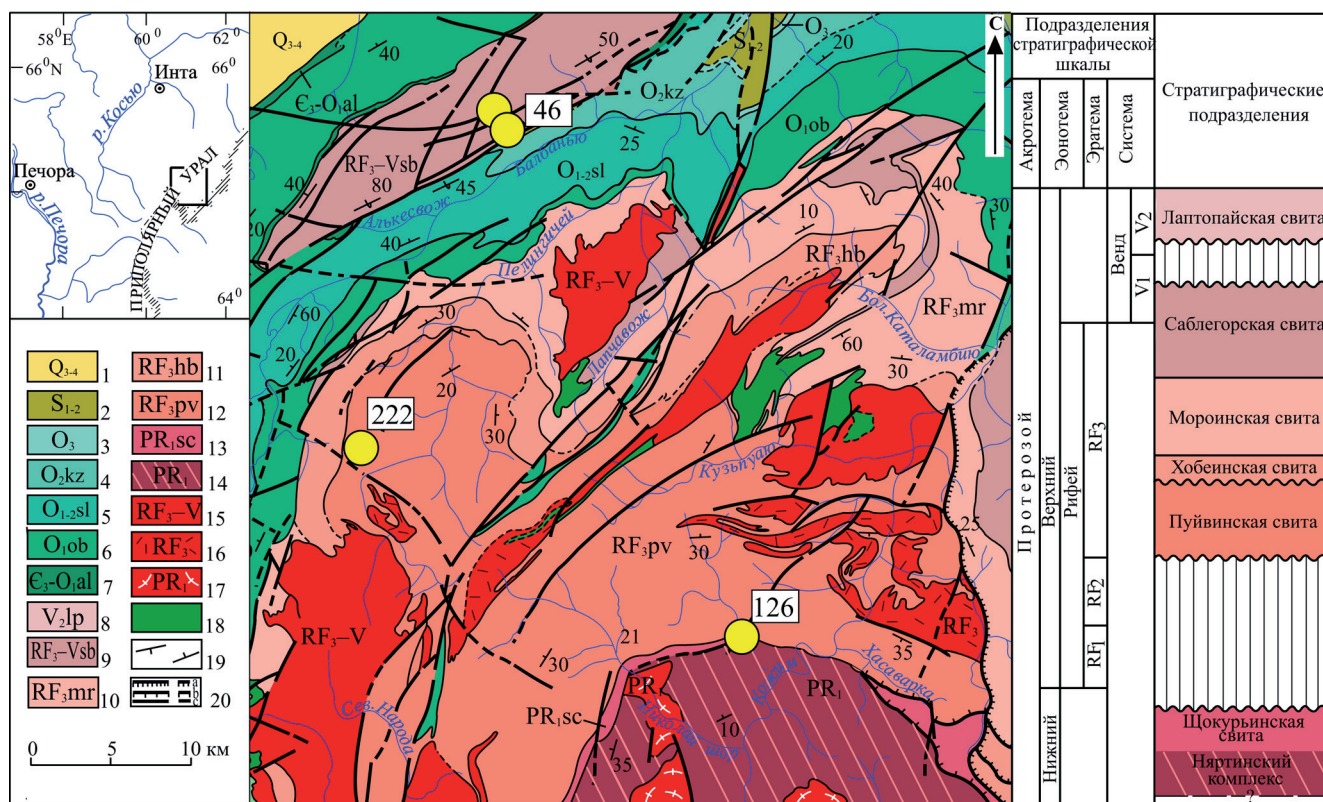


Рис. 1. Геологическая карта и стратиграфическая схема докембрийских образований северной части Приполярного Урала (Пыстин и др., 2022).

1 – верхнечетвертичные-современные отложения (Q_{3-4}); 2 – силурийские отложения (S_{1-2}); 3 – верхнеордовикские отложения (O_3); 4 – кожимская свита (O_2); 5 – саледейская свита (O_{1-2}); 6 – обейская свита (O_1); 7 – алькесвожская толща (ϵ_3-O_1); 8 – лаптопайская свита (V_2); 9 – саблегорская свита (RF_3-V); 10 – мороинская свита (RF_3); 11 – хобейнская свита (RF_3); 12 – пуйвинская свита (RF_3); 13 – шокурьинская свита (PR_1); 14 – няртинский комплекс (PR_1); 15–17 – гранитоидные комплексы: 15 – сальнеро-манхамбовский (RF_3-V), 16 – кожимский (RF_3), 17 – николайшорский (PR_1); 18 – хаталамбинский габбро-долеритовый комплекс (RF_3-V); 19 – элементы залегания плоскостных структур (слоистости, полосчатости, сланцеватости); 20 – тектонические границы: а – шарьяжи и надвиги, б – вбросы и сбросы, в – крутопадающие дизъюнктивы. Желтые круги – места отбора и номер пробы.

Fig. 1. Geological map of the northern part of the Subpolar Urals (Pystin et al., 2022).

1 – Upper Quaternary-Modern sediments (Q_{3-4}); 2 – Silurian sediments (S_{1-2}); 3 – Upper Ordovician sediments (O_3); 4 – Kozhinskii Formation (O_2); 5 – Saledskii Formation (O_{1-2}); 6 – Obyizskii Formation (O_1); 7 – Alkesvozhskii Formation (ϵ_3-O_1); 8 – Laptopaii Formation (V_2); 9 – Sablegorskii Formation (RF_3-V); 10 – Moroinskii Formation (RF_3); 11 – Khobeinskii Formation (RF_3); 12 – Puivinskii Formation (RF_3); 13 – Shchokuryinskii metamorphic complex (PR_1); 14 – Nikolaishorskii metamorphic complex (PR_1); 15–17 – granitoid complexes: 15 – Salnero-Mankhambovskii (RF_3-V), 16 – Kozhinskii (RF_3), 17 – Nikolaishorskii (PR_1); 18 – Khatalambinskii gabbro-dolerite complex (RF_3-V); 19 – elements of occurrence of planar structures (bedding, banding, schistosity); 20 – tectonic boundaries: а – nodules and thrust faults, б – faults and faults dew, в – steeply dipping disjunctives. Yellow circles indicate sampling locations and sample number.

кальцита (до 5%) и граната (до 5%). Акцессорные минералы представлены эпидотом, апатитом. Среди рудных минералов установлен ильменит. Химический состав породы приведен в табл. 1. Для реконструкции первичного состава использована дискриминантная функция $DF(x) = -0.24SiO_2 - 0.16TiO_2 - 0.25Al_2O_3 - 0.28FeO^* - 0.30MgO - 0.48CaO - 0.79Na_2O - 0.46K_2O - 0.10P_2O_5 + 26.64$, где $FeO^* = 0.9Fe_2O_3 + FeO$, (Великославинский и др., 2013). При значениях $DF(x) < 0.3$ протолитом метаморфических пород являются магматические породы, при $DF(x) > -0.8$ – осадочные. Область неопре-

деленности $-0.8 < DF(x) < 0.3$ (Великославинский и др., 2013). Рассчитанное значение дискриминантной функции $DF(x)$ для описываемого образца составляет 1.16, что характеризует породу как параметаморфическую. Для оценки общей концентрации редких и редкоземельных элементов в породе (табл. 2) проведено сравнение с кларковыми содержаниями аналогичных пород (парагнейсов) верхней части континентальной коры (Григорьев, 2009). Относительно кларка отмечается повышенная концентрация только нескольких элементов: Sr, Nb, Ag, Ba (рис. 3а).

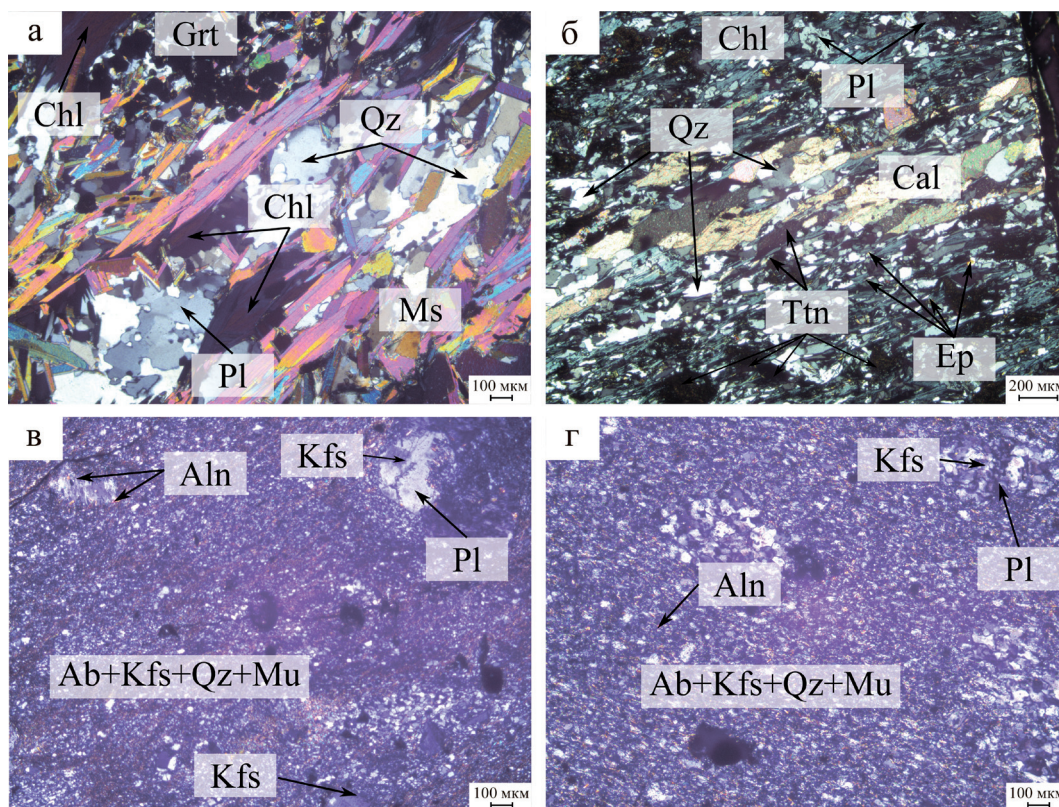


Рис. 2. Микрофотографии шлифов (с анализатором).

а – слюдяной гранатсодержащий кристаллический сланец няртинского комплекса (обр. 126); б – ортосланец пуйвинской свиты (обр. 222); в, г – метариолиты саблегорской свиты (обр. 44, 46). Ab – альбит, Aln – алланит, Chl – хлорит, Ep – эпидот, Grt – гранат, Kfs – калиевый полевой шпат, Mu – мусковит, Ttn – титанит, Qz – кварц.

Fig. 2. Photomicrographs of rock section (with an analyzer).

а – mica garnet-bearing crystalline schist of the Nyartinskii complex (sample 126); б – orthoschist of the Puivinskii Formation (sample 222); в, г – metarhyolites of the Sablegorskii Formation (samples 44, 46). Ab – albite, Aln – allanite, Chl – chlorite, Ep – epidote, Grt – garnet, Kfs – K-feldspar, Mu – muscovite, Ttn – titanite, Qz – quartz.

В составе пуйвинской свиты изучен образец актинолитсодержащего кварц-альбит-эпидот-хлоритового сланца (см. рис. 2б), имеющий сланцеватую текстуру и лепидогранобластовую структуру. Помимо перечисленных минералов в шлифах установлены кальцит и титанит. Рассчитанное значение $DF(x) = -1.46$ указывает на магматический характер протолита. Согласно петрохимической классификации (рис. 4) $SiO_2-(Na_2O + K_2O)$ (TAS), рассматриваемая порода относится к семейству андезибазальтов, калий-натрового типа щелочности ($Na_2O/K_2O = 1.34$). Сравнение концентраций редких и РЗЭ в актинолитсодержащем кварц-альбит-эпидот-хлоритовом сланце проведено с кларковыми содержаниями в редких и редкоземельных элементах в метаандезитах из верхней части земной коры (Григорьев, 2009). В ортосланце наблюдаются слегка повышенные содержания Zn (120 г/т при кларке 100 г/т), Nb (11 г/т при кларке 8.1 г/т). Концентрация Sm в ортосланце равняется практически двум кларковым содержаниям (5.1 г/т, кларк –

2.6 г/т). В несколько раз превышает кларк метаандезитов Pb (см. рис. 3б).

Геохимические особенности и петрографический состав кислых вулканитов саблегорской свиты хорошо изучены и представлены в монографии А.А. Соболевой (2004). Здесь мы приводим описание кислых вулканитов, приуроченных к зонам тектонических нарушений, в которых нами была установлена РЕЕ-минерализация. В метариолитах саблегорской свиты устанавливается порфировая структура (см. рис. 2в, г). Количество порфировых вкрапленников около 15%. Вкрапленники представлены калиевым полевым шпатом, плагиоклазом и кварцем, присутствующим в небольших количествах. Для основной массы характерна микропиклобластовая структура, образованная в ходе перекристаллизации и девитрификации первичной витрофировой структуры. В составе риолитов устанавливаются калиевый полевой шпат, плагиоклаз, кварц, мусковит (серицит). Среди аксессуарных минералов устанавливается алланит. Химические со-

Таблица 1. Химический состав пород, мас. %**Table 1.** Chemical composition of the rock, wt %

Компонент	Няртинский комплекс	Пуйвинская свита	Саблегорская свита	
	Обр. 126	Обр. 222	Обр. 44	Обр. 46
SiO ₂	58.36	53.16	73.44	75.54
TiO ₂	1.00	0.77	0.22	0.21
Al ₂ O ₃	20.60	14.00	13.45	11.48
FeO	5.75	2.32	0.91	1.28
Fe ₂ O ₃	1.91	3.68	0.64	1.02
MnO	0.15	0.10	0.022	0.017
MgO	2.33	1.82	0.49	0.33
CaO	1.19	15.67	0.46	0.35
Na ₂ O	0.55	1.82	2.47	1.66
K ₂ O	5.13	1.36	6.35	6.35
P ₂ O ₅	0.09	0.099	0.03	0.051
П.п.п.	2.93	6.11	0.84	0.86
H ₂ O	0.26	0.28	0.10	0.20
CO ₂	0.07	4.30	0.10	0.10
Сумма	100.32	99.67	99.32	99.61
Na ₂ O + K ₂ O	5.68	3.18	8.82	8.01
Na ₂ O/K ₂ O	0.11	1.34	0.39	0.26
DF(x)	1.16	-1.46	—	—

ставы пород приведены в табл. 1. На классификационной диаграмме SiO₂–(Na₂O + K₂O) (TAS) при содержании кремнезема 73.44–75.54 и сумме щелочей 8.01–8.82 вулканиты располагаются в поле трахириолитов (см. рис. 4). По соотношению Na₂O/K₂O породы соответствуют калий-натровому и калиевому типу щелочности. Распределение редких и редкоземельных элементов в двух образцах риолитов неодинаково (см. рис. 3в). Для образца 46 характерно повышенное (более 2 кларков) содержание РЗЭ, Be, Ge, Th, U, Y, Ta, что позволяет связать с его расположением в непосредственной близости от золотопалладиевого месторождения “Чудное” (Онищенко, Кузнецов, 2023). В образце 44 концентрация указанных элементов ниже кларковой.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ТИПОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МИНЕРАЛОВ

Слюдяной гранатсодержащий кристаллический сланец няртинского комплекса

Анкилит-(Ce) представлен зернами неправильной формы, выполняющими межзерновое пространство в слюдяных гранатсодержащих кристаллических сланцах няртинского комплекса. Размеры зерен около 50 мкм. Встречается в ассоциации с альбитом, хлоритом, цирконом и другими минералами (рис. 5а). В химическом составе анкилита отмечается повышенное содержание редкоземельных элементов (табл. 3). Отношение формульных коэффициентов La/Ce составляет 0.56–0.67.

Гидроксилбастнезит-(Ce) присутствует в виде включений в эпидоте, устанавливается в мусковите в виде агрегатов с неясными краями, а иногда в виде отдельных зерен вместе с хлоритом, мусковитом, биотитом и другими минералами (см. рис. 5б–з). Размеры зерен варьируют от 20 до 50 мкм. Химический состав гидроксилбастнезита-(Ce) приведен в табл. 3. В составе гидроксилбастнезита-(Ce) обнаружены примеси FeO, Y₂O₃, ThO₂ (см. табл. 3). Отношение формульных коэффициентов La/Ce составляет 0.41–0.56.

Актинолитсодержащий кварц-альбит-эпидот- хлоритовый сланец пуйвинской свиты

Гидроксилбастнезит-(La) представлен зернами неправильной формы размером 35–40 мкм, выполняющая пространство между кальцитом и хлоритом (см. рис. 5и). Ассоциирует с кварцем, альбитом, титанитом и сульфидами железа. В составе гидроксилбастнезита-(La) присутствуют примеси FeO и Y₂O₃ (см. табл. 3). Отношение формульных коэффициентов La/Ce составляет 1.21.

Метариолит саблегорской свиты

Бастнезит-(Ce) обнаружен в виде зерен неправильной формы и их небольшими скоплениями, размеры зерен 25–30 мкм, он замещает алланит-(Ce) (рис. 6а, б). Состав алланита-(Ce), мас. %: SiO₂ – 30.07–31.45; CaO – 8.55–11.11; Al₂O₃ – 12.06–16.70; Fe₂O₃ – 13.60–17.30; LaO₃ – 5.14–7.27; Ce₂O₃ – 11.86–12.48; Pr₂O₃ – 0.89–1.32; Nd₂O₃ – 3.96–6.09; Sm₂O₃ – 0.66–1.08; Gd₂O₃ – 0.91. Минерал ассоци-

Таблица 2. Содержание редких и редкоземельных элементов в породах, г/т

Table 2. Content of impurity elements of the rock, ppm

Компонент	Няртинский комплекс	Пуйвинская свита	Саблегорская свита		Параметаморфит*	Метаандезит*	Метариолит*
	Обр. 126	Обр. 222	Обр. 44	Обр. 46			
Li	27.0	17.0	21.0	15.0	36.0	26.0	26.0
Be	1.9	1.7	2.6	5.4	2.4	2.7	3.0
Sc	6.5	8.1	4.5	7.8	14.4	11.0	9.0
V	40.0	82.0	4.9	11.0	170.0	110.0	42.0
Cr	5.3	51.0	3.9	10.0	129.0	47.0	33.0
Co	11.0	12.0	0.9	1.6	18.0	17.0	9.0
Ni	2.7	19.0	3.6	4.4	73.0	40.0	27.0
Cu	6.2	4.4	10.0	23.0	50.0	39.0	28.0
Zn	84.0	120.0	26.0	58.0	91.0	100.0	35.0
Ga	19.0	18.0	17.0	18.0	17.0	20.0	23.0
Ge	3.9	3.3	1.2	2.4	1.4	0.5	0.5
Rb	62.0	48.0	120.0	196.0	98.0	60.0	130.0
Sr	486.0	304.0	10.0	37.0	260.0	0.031	0.02
Y	19.0	21.0	15.0	70.0	23.0	24.0	53.0
Zr	56.0	30.0	147.0	165.0	150.0	160.0	170.0
Nb	22.0	11.0	29.0	36.0	14.0	8.1	14.0
Mo	Н.п.о.	0.39	0.49	0.87	1.86	2.2	1.2
Ag	0.2	0.1	0.48	0.53	0.13	0.11	0.11
Cd	1.2	1.2	3.0	4.4	0.86	0.3	0.3
Cs	4.4	1.3	2.8	3.1	3.6	4.0	7.0
Ba	510.0	193.0	243.0	179.0	430.0	240.0	690.0
La	17.0	28.0	10.0	62.0	31.0	34.0	20.0
Ce	39.0	61.0	24.0	134.0	71.0	69.0	43.0
Pr	4.8	7.1	3.4	16.0	10.0	Не опр.	3.1
Nd	20.0	27.0	13.0	58.0	34.0	Не опр.	11.0
Sm	4.2	5.1	3.1	13.0	6.0	2.6	2.7
Eu	2.0	1.3	0.35	0.5	1.3	1.5	1.3
Gd	4.9	6.0	3.4	14.0	7.0	Не опр.	3.9
Tb	0.75	0.9	0.63	2.4	0.87	1.5	0.68
Dy	3.6	4.3	3.5	13.0	5.5	Не опр.	Не опр.
Ho	0.71	0.8	0.72	2.6	1.6	Не опр.	Не опр.
Er	2.0	2.5	2.3	8.1	3.0	Не опр.	Не опр.
Tm	0.25	0.34	0.37	1.2	0.48	Не опр.	Не опр.
Yb	1.6	2.1	2.7	7.8	2.4	3.5	3.8
Lu	0.3	0.32	0.41	1.2	0.5	0.51	Не опр.
Hf	2.3	1.1	5.6	6.3	5.2	Не опр.	7.6
Ta	1.4	0.8	2.1	2.6	1.0	1.3	1.2
W	0.88	0.51	1.9	2.1	2.5	Не опр.	Не опр.
Pb	7.0	42.0	7.3	61.0	20.0	12.0	31.0
Bi	0.42	0.14	0.12	1.9	0.54	0.15	0.15
Th	2.0	8.3	6.6	18.0	8.7	6.0	9.5
U	1.0	2.7	1.7	3.5	2.2	Не опр.	Не опр.

*Кларки элементов-примесей в горных породах верхней части земной коры по типам пород (Григорьев, 2009).

Примечание. Н.п.о. – ниже предела обнаружения. Не. опр. – не определено.

*Clarks of trace elements in rocks of the upper part of the earth's crust by rock type (Grigoriev, 2009).

Note. Н.п.о. – below the detection limit. Не. опр. – undefined.

ирует с мусковитом, альбитом, калиевым полевым шпатом, титанитом. В химическом составе бастнезита-(Ce) отмечена примесь FeO. Отношение формульных коэффициентов La/Ce составляет 0.58–0.61.

Кайнозит-(Y) встречается в виде агрегатов с неясными краями, такие же очертания имеет и алланит-(Ce), встреченный в этой же пробе. Размеры зерен минералов 45–50 мкм (см. рис. 6в, г). Алланит имеет следующий химический состав,

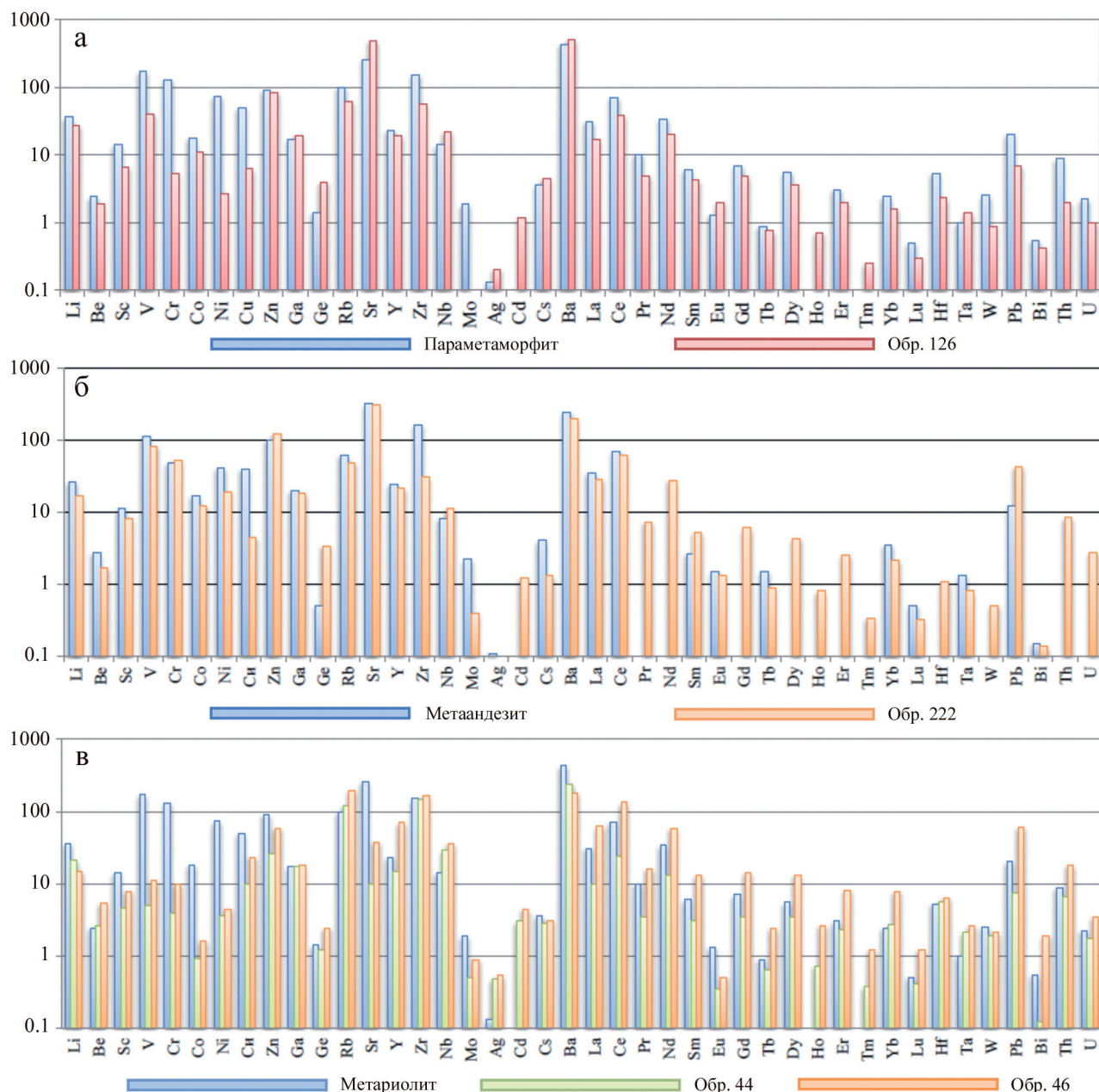


Рис. 3. Концентрации редких и редкоземельных элементов в образцах и их сравнение с кларковыми содержаниями аналогичных пород верхней части континентальной коры (Григорьев, 2009).

а – обр. 126, б – обр. 222, в – обр. 44, 46.

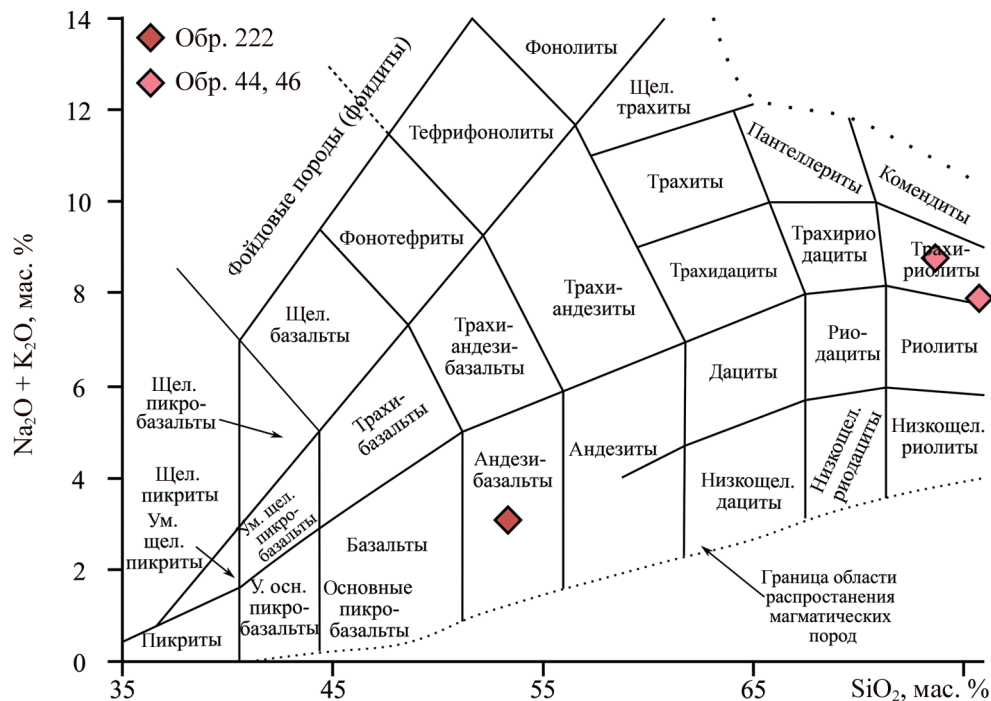
Fig. 3. Concentrations of rare and rare earth elements in samples and their comparison with clarkite contents of similar rocks of the upper part of the continental crust (Grigoriev, 2009).

а – sample 126, б – sample 222, в – sample 44, 46.

мас. %: SiO_2 – 31.19; CaO – 10.42; Al_2O_3 – 14.82; Fe_2O_3 – 15.50; La_2O_3 – 4.87; Ce_2O_3 – 14.06; Pr_2O_3 – 1.21; Nd_2O_3 – 3.70. По химическому составу видно, что в составе кайнозита-(Y), как и алланита-(Ce), преобладают легкие лантаноиды. Можно предположить, что кайнозит-(Y) в процессе метаморфизма замещает алланит-(Ce), учитывая их схожий об-

щий вид и присутствие в их составах легких REE элементов (см. табл. 3).

Эшнит-(Y) представлен зернами неправильной формы размером 10–15 мкм (см. рис. 6д, е). В составе минерала содержатся преимущественно тяжелые лантаноиды, U и Th, что может указывать на митамиктность минерала (см. табл. 3).

Рис. 4. Диаграмма сумма щелочей SiO_2 –($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (TAS).Fig. 4. Diagram of the sum of alkalis SiO_2 –($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (TAS).

REE-содержащие минералы в риолитах саблегорской свиты ассоциируют с калиевым полевым шпатом, мусковитом и кварцем.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вопрос о генетической природе редкоземельной минерализации метаморфогенного типа остается предметом дискуссий (Ковалев и др., 2020; ссылки в этой работе). Процесс образования эпидота, алланита и других минералов, содержащих редкие земли, из слабоустойчивого при гранитизации, но устойчивого при метаморфизме монацита был описан в литературе (Finger et al., 1998). На Южном Урале в кислых разновидностях пород среднерифейской машакской свиты установлены ниобозинит-(Y), эшинит-(Y), таленит-(Dy), таленит-(Nd), синхизит-(Ce). Образование РЗЭ-содержащих минералов, по мнению авторов, происходило в ходе единого процесса, а один из этапов редкоземельного минералообразования связывается с динамотермальным метаморфизмом в вендское время (Ковалев и др., 2023).

В гранатосодержащем кристаллическом сланце няртинского комплекса установлены анкилит-(Ce) и гидроксилбастнезита-(Ce). Анкилит-(Ce) – водосодержащий карбонат редких земель. Общая формула минерала имеет вид – $(\text{Sr}_{0.59-0.62}\text{Ce}_{0.55-0.58}\text{La}_{0.31-0.39}\text{Ca}_{0.19-0.26}\text{Nd}_{0.16-0.24}\text{Pr}_{0.06})_{\Sigma=2.00}(\text{CO}_3)_2(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$. Гидроксилбастнезит-(Ce) – редкоземельный карбо-

нат, содержащий гидроксильную группу и фтор с преобладающим содержанием церия. Общая формула минерала: $(\text{Ce}_{0.32-0.46}\text{La}_{0.16-0.22}\text{Nd}_{0.14-0.17}\text{Ca}_{0.03-0.15}\text{Si}_{0.02-0.07}\text{Fe}_{0.02-0.05}\text{Th}_{0.01-0.05}\text{Pr}_{0.03-0.04}\text{Y}_{0.01-0.04}\text{Sm}_{0.02-0.03}\text{Gd}_{0.01-0.02})_{\Sigma=0.98-1.01}(\text{CO}_3)((\text{OH})_{0.75-0.92}(\text{F})_{0.08-0.25})$. В ортосланцах пуйвинской свиты обнаружен гидроксилбастнезит-(La) – редкоземельный карбонат, содержащий гидроксильную группу и фтор с преобладающим содержанием лантана. Формула минерала имеет следующий вид: $(\text{La}_{0.35}\text{Ce}_{0.29}\text{Nd}_{0.13}\text{Fe}_{0.09}\text{Y}_{0.06}\text{Pr}_{0.04}\text{Ca}_{0.04}\text{Sm}_{0.01})_{\Sigma=0.90}(\text{CO}_3)\text{F}_{0.42}(\text{OH})_{0.58}$.

Типохимическое изучение редкоземельной минерализации из нижнепротерозойских и верхнерифейских метаморфических пород северной части Ляпинского антиклинория позволяет предположить, что образование редкоземельных карбонатов проходило в одно и то же время при метаморфических и гидротермальных преобразованиях в присутствии минералов, содержащих редкие земли (алланит, апатит и др.), и при участии растворов углекислого состава.

В метариолитах саблегорской свиты установлены алланит-(Ce), бастнезит-(Ce), кайнозит-(Y) и эшинит-(Y). Бастнезит-(Ce) – безводный фторсодержащий карбонат редких земель. Общая формула минерала: $(\text{Ce}_{0.41-0.43}\text{La}_{0.25}\text{Nd}_{0.20}\text{Pr}_{0.05}\text{Sm}_{0.04}\text{Gd}_{0.03}\text{Ca}_{0.01}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma=0.92}(\text{CO}_3)\text{F}$. Кайнозит-(Y) – углеродводосодержащий силикат Ca-Y-REE. Формула кайнозита-(Y) имеет следующий вид: $(\text{Y}_{1.52}\text{Ca}_{0.88}\text{Nd}_{0.34}\text{Gd}_{0.20}\text{Ce}_{0.19}\text{Sm}_{0.18}\text{Dy}_{0.12}\text{Pr}_{0.06}\text{La}_{0.02})_{\Sigma=3.51}(\text{Si}_{3.59}\text{Fe}_{0.41})_{\Sigma=4}\text{O}_{12.49}$

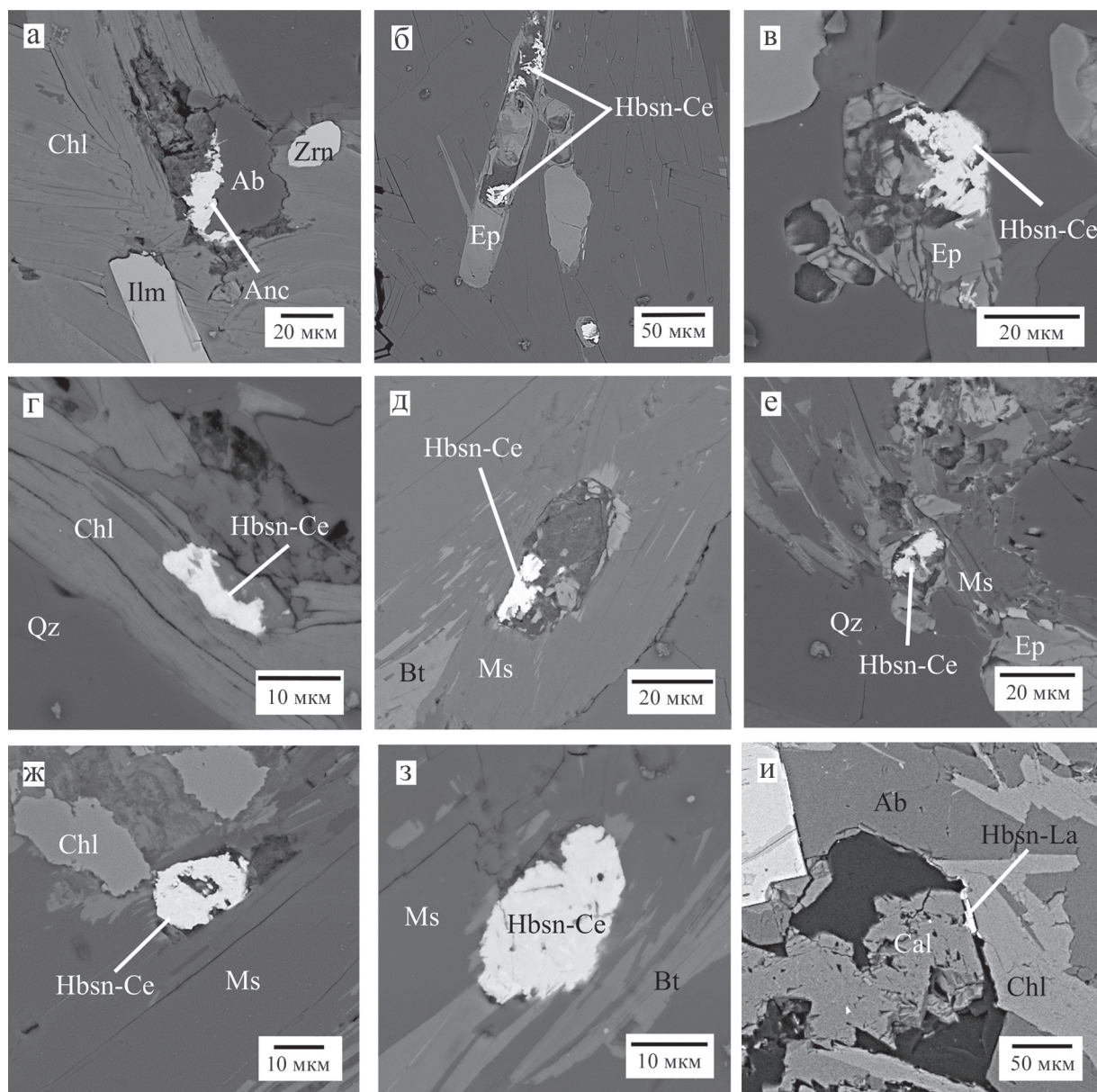


Рис. 5. Морфологические особенности редкоземельных минералов из слюдяного гранатсодержащего кристаллического сланца няртинского комплекса (а–з) и ортосланца пуйвинской свиты (и).

Anc – анкилит-(Ce), *Hbsn-Ce* – гидроксилбастнезит-(Ce), *Hbsn-La* – гидроксилбастнезит-(La), *Ep* – эпидот, *Qz* – кварц, *Chl* – хлорит, *Ab* – альбит, *Ms* – мусковит, *Bt* – биотит, *Cal* – кальцит, *Zrn* – циркон, *Ilm* – ильменит.

Fig. 5. Morphological features of rare earth minerals from mica garnet-bearing crystalline schist of the Nyartinskii complex (а–з) and orthoschist of the Puyvinskii Formation (и).

Anc – ancyllite-(Ce), *Hbsn-Ce* – hydroxylbastnäsite-(Ce), *Hbsn-La* – hydroxylbastnäsite-(La), *Ep* – epidote, *Qz* – quartz, *Chl* – chlorite, *Ab* – albite, *Ms* – muscovite, *Bt* – biotite, *Cal* – calcite, *Zrn* – zircon, *Ilm* – ilmenite.

(CO₃)·H₂O. Эшинит-(Y) – Y-REE титанониобат. Общая формула минерала: (Y_{0.57–0.64}Dy_{0.06–0.07}Gd_{0.04–0.05}Er_{0.04–0.05}Yb_{0.03–0.04}Th_{0.01–0.03}U_{0.02–0.03}Sr_{0.03}Sm_{0.02}Ho_{0.02}Ca_{0.01}Nd_{0.01})Σ0.85–93(Ti_{1.09–1.27}Nb_{0.58–0.63}Fe_{0.03}Si_{0.11–0.29})Σ2[O_{5.59–5.75}(OH)_{0.03}].

Для метариолитов верхнерифейско-вендской саблегорской свиты мы предлагаем следующую

схему формирования редкоземельных минералов (рис. 7). В метаморфизованных риолитах саблегорской свиты алланит-(Ce) наряду с монацитом, ксенотимом и другими РЗЭ-содержащими минералами является одним из концентраторов и поставщиков РЗЭ-элементов из магматических пород. Учитывая, что бастнезит-(Ce) отличается устойчивостью

Таблица 3. Химический состав РЗЭ минералов, мас. %
Table 3. Chemical composition of REE minerals, wt %

№ п/п	SiO ₂	CaO	FeO	Al ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	Nb ₂ O ₅	Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	ThO ₂	F	CO ₂ *	H ₂ O*	Σ
1	—	2.98	—	—	—	—	—	—	14.50	32.60	2.70	7.22	—	—	—	—	20.53	4.20	91.63
2	—	2.76	—	—	—	—	—	—	14.70	32.50	2.20	7.10	—	—	—	—	22.01	4.09	89.76
3	—	2.73	1.10	—	—	—	—	0.50	13.60	24.40	2.70	11.20	2.00	1.10	4.10	1.56	19.02	6.30	90.32
4	—	2.81	0.60	—	—	—	—	0.90	12.50	27.90	3.30	11.70	1.90	1.30	2.70	1.91	19.43	6.14	93.08
5	—	1.89	1.30	—	—	—	—	1.00	14.47	29.13	2.67	11.92	2.11	1.49	—	1.87	19.12	6.05	93.02
6	—	1.62	2.02	—	—	—	—	0.80	14.08	29.53	3.11	11.69	2.62	1.61	1.83	1.11	20.10	7.17	97.29
7	—	2.00	0.68	—	—	—	—	2.34	14.16	27.76	3.19	12.32	2.11	1.77	1.51	1.12	19.71	7.00	95.68
8	—	0.85	2.53	—	—	—	—	2.54	22.34	18.78	2.39	8.66	0.85	—	—	3.16	17.39	4.12	86.78
9	—	—	—	—	—	—	—	—	17.21	29.62	3.30	14.30	2.78	2.40	—	4.53	18.50	—	92.64
10	—	0.31	0.46	—	—	—	—	—	18.64	30.16	3.56	15.19	2.89	2.18	—	4.8	19.79	—	97.80
11	27.2	6.14	4.08	—	—	—	—	21.30	0.47	3.97	1.17	7.05	3.83	4.50	—	—	5.57	2.28	90.99
12	2.69	0.14	0.73	—	—	28.15	24.96	20.40	—	—	—	0.63	0.97	2.50	2.52	—	—	0.16	95.80
13	5.26	0.24	0.81	—	—	26.05	23.25	19.26	—	—	—	0.56	0.97	1.95	1.77	—	—	0.18	91.15
14	2.04	0.23	0.79	—	—	30.36	23.18	21.50	—	—	—	0.73	0.90	2.30	0.85	1.24	—	0.15	93.51
15	31.19	10.42	15.50	14.82	0.81	—	—	—	4.87	14.06	1.21	3.70	—	—	—	—	—	3.04	99.62
16	30.07	8.55	17.27	13.38	0.94	—	—	—	6.74	12.43	1.05	5.17	—	—	0.51	—	—	3.01	98.61
17	31.45	11.11	13.61	16.74	0.68	—	—	—	5.14	11.86	0.89	3.96	0.66	—	0.29	—	—	3.10	98.54
18	31.74	11.72	13.02	17.27	0.65	—	—	—	4.30	11.48	1.15	3.76	—	—	—	—	—	3.12	98.21

1 – (Sr_{0.02}Ce_{0.38}La_{0.39}Ca_{0.19}Nd_{0.16}Pr_{0.06})(CO₃)₂(OH) · H₂O; 2 – (Sr_{0.39}Ce_{0.55}La_{0.31}Ca_{0.26}Nd_{0.24}Pr_{0.06})(CO₃)₂(OH) · H₂O; 3 – (Ce_{0.34}La_{0.19}Nd_{0.15}Ca_{0.11}Fe_{0.04}Pr_{0.04}Th_{0.03}Sm_{0.03}Gd_{0.01}Y_{0.01})_{20.85}(CO₃)₂(OH)_{0.81}; 4 – (Ce_{0.39}La_{0.17}Nd_{0.16}Pr_{0.05}Fe_{0.02}Y_{0.02}Th_{0.02}Sm_{0.02}Gd_{0.02})(CO₃)₂F_{0.23}(OH)_{0.77}; 5 – (Ce_{0.41}La_{0.20}Nd_{0.16}Ca_{0.08}Fe_{0.04}Pr_{0.04}Th_{0.03}Sm_{0.03}Gd_{0.01}Y_{0.01})_{20.90}(CO₃)₂F_{0.13}(OH)_{0.87}; 6 – (Ce_{0.39}La_{0.19}Nd_{0.15}Ca_{0.06}Pr_{0.04}Sm_{0.03}Gd_{0.02}Y_{0.02}Th_{0.01})_{20.86}(CO₃)₂F_{0.13}(OH)_{0.87}; 7 – (Ce_{0.38}La_{0.19}Nd_{0.16}Ca_{0.08}Y_{0.05}Pr_{0.04}Sm_{0.03}Gd_{0.02}Th_{0.01})_{20.90}(CO₃)₂F_{0.13}(OH)_{0.87}; 8 – (La_{0.35}Ce_{0.29}Nd_{0.13}Fe_{0.09}Y_{0.06}Pr_{0.04}Ca_{0.04}Sm_{0.01})_{20.90}(CO₃)₂F_{0.42}(OH)_{0.58}; 9 – (Ce_{0.43}La_{0.24}Nd_{0.20}Pr_{0.05}Sm_{0.04}Gd_{0.03})(CO₃)₂F_{0.10}; 10 – (Ce_{0.41}La_{0.25}Nd_{0.20}Pr_{0.05}Sm_{0.04}Gd_{0.03}Ca_{0.01}Fe_{0.01})_{20.93}(CO₃)₂F_{0.11}; 11 – (Y_{1.59}Ca_{0.88}Nd_{0.34}Gd_{0.20}Ce_{0.19}Sm_{0.18}Dy_{0.12}Pr_{0.06}La_{0.02})_{23.51}(Si_{3.59}Fe_{0.41})_{24.02}(CO₃)₂ · H₂O; 12 – (Y_{0.61}Dy_{0.07}Gd_{0.05}Er_{0.04}Yb_{0.03}Th_{0.03}U_{0.03}Sm_{0.02}Ca_{0.01}Nd_{0.01})_{20.93}(Ti_{1.19}Nb_{0.63}Fe_{0.03}Si_{0.15})_{22.10}(OH)_{0.03}; 13 – (Y_{0.57}Dy_{0.06}Gd_{0.04}Er_{0.04}Yb_{0.04}Th_{0.02}U_{0.02}Sm_{0.02}Ho_{0.02}Ca_{0.01}Nd_{0.01})_{20.93}(Ti_{1.09}Nb_{0.59}Fe_{0.03}Si_{0.29})_{22.10}(OH)_{0.03}; 14 – (Y_{0.64}Dy_{0.07}Er_{0.05}Gd_{0.04}Yb_{0.04}Sm_{0.02}Ca_{0.01}Nd_{0.01})_{20.90}(Ti_{1.27}Nb_{0.58}Fe_{0.03}Si_{0.11})_{22.10}(OH)_{0.03}; 15 – (Ca_{0.08}Ce_{0.50}La_{0.17}Nd_{0.13}Mn_{0.07}Pr_{0.04})_{21.98}(Al_{1.68}Fe_{1.32})_{23.00}(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH); 16 – (Ca_{0.89}Ce_{0.44}La_{0.24}Nd_{0.18}Mn_{0.08}Pr_{0.04}Th_{0.01})_{21.87}(Al_{1.52}Fe_{1.48})_{23.00}(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH); 17 – (Ca_{1.13}Ce_{0.41}La_{0.18}Nd_{0.13}Mn_{0.05}Pr_{0.03}Sm_{0.02}Th_{0.01})_{21.96}(Al_{1.86}Fe_{1.14})_{23.00}(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH); 18 – (Ca_{1.18}Ce_{0.40}La_{0.13}Nd_{0.13}Mn_{0.05}Pr_{0.04})_{21.95}(Al_{1.91}Fe_{1.09})_{23.00}(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH).

Примечание. 1–7 – метаморфиты няртинского комплекса, 8 – ортосланцы пуйвинской свиты, 9–18 – метариолиты сабегорской свиты. *Содержание H₂O и CO₂ – расчетные данные. Прочерк – ниже предела обнаружения. В анализе 1 содержится SrO – 6.90 мас. %, анализе 2 – SrO – 6.40, анализе 11 – Dy₂O₃ – 2.70, анализе 12 – Dy₂O₃ – 3.82, Er₂O₃ – 2.51, SrO – 0.90, UO₃ – 2.83 и Yb₂O₃ – 1.89, анализе 13 – Dy₂O₃ – 3.59, Er₂O₃ – 2.26, Ho₂O₃ – 0.93, UO₃ – 1.73 и Yb₂O₃ – 2.34, анализе 14 – Dy₂O₃ – 4.01, Er₂O₃ – 2.66, UO₃ – 1.24 и Yb₂O₃ – 2.57 мас. %. Формулы (расчет на фиксированную сумму катионов металлов) рассчитаны по (Булах и др., 2014).

Note. 1–7 – metamorphites of the Nyartinskii complex, 8 – orthoschists of the Puyvinskii Formation, 9–18 – metarhyolites of the Sabegorskii Formation. *H₂O and CO₂ content – calculated data. A dash means below the detection limit. Analysis 1 contains SrO – 6.90 wt %, analysis 2 – SrO – 6.40, analysis 11 – Dy₂O₃ – 2.70, analysis 12 – Dy₂O₃ – 3.82, Er₂O₃ – 2.51, SrO – 0.90, UO₃ – 2.83 and Yb₂O₃ – 1.89, analysis 13 – Dy₂O₃ – 3.59, Er₂O₃ – 2.26, Ho₂O₃ – 0.93, UO₃ – 1.73 and Yb₂O₃ – 2.34, analysis 14 – Dy₂O₃ – 4.01, Er₂O₃ – 2.66, UO₃ – 1.24 and Yb₂O₃ – 2.57 wt %. Formulas (calculation for a fixed amount of metal cations) are calculated according to (Bulakh et al., 2014).

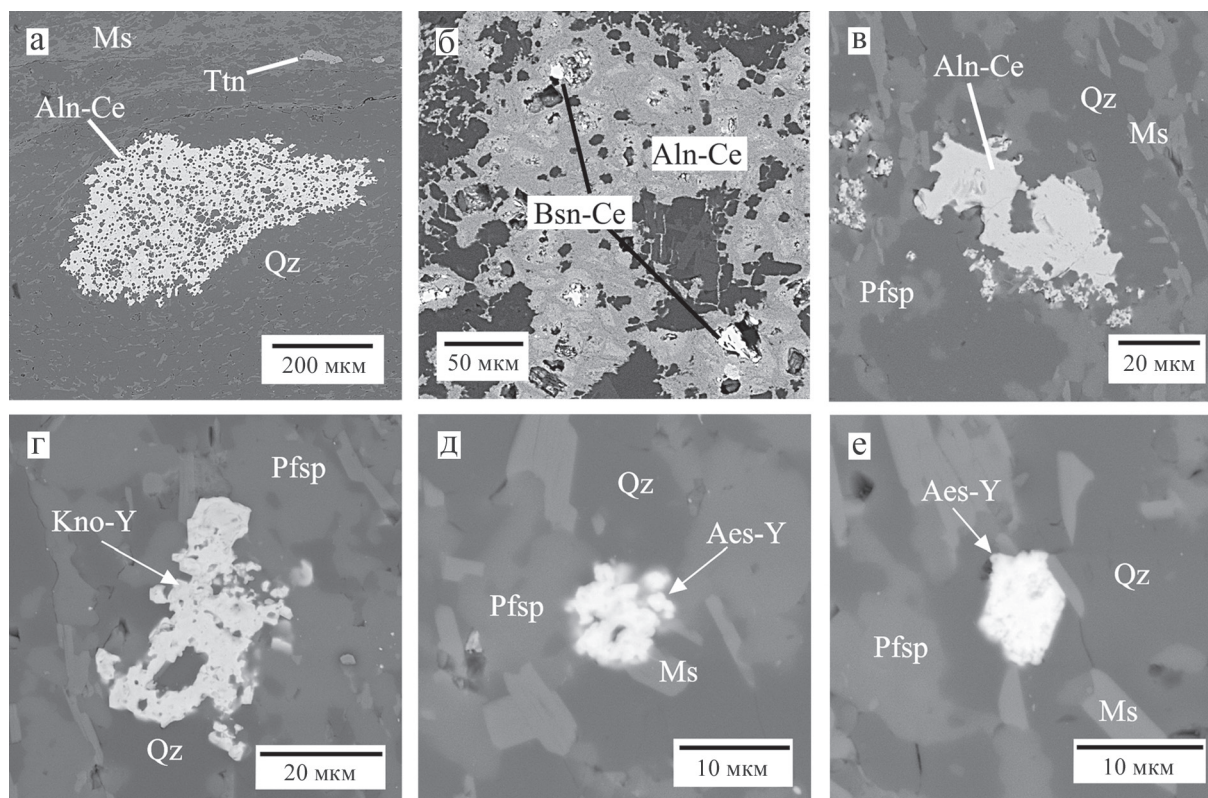


Рис. 6. Морфологические особенности редкоземельных минералов из метариолитов сбалегорской свиты.

Bsn-Ce – бастнезит-(Ce), *Kno-Y* – кайнозит-(Y), *Aes-Y* – эшинит-(Y), *Aln-Ce* – алланит-(Ce), *Qz* – кварц, *Pfsp* – калиевый полевой шпат, *Ms* – мусковит, *Ttn* – титанит.

Fig. 6. Morphological features of rare earth minerals from metarhyolites of the Sbalegorskii Formation.

Bsn-Ce – bastnäsite-(Ce), *Kno-Y* – kainosite-(Y), *Aes-Y* – aeschynite-(Y), *Aln-Ce* – allanite-(Ce), *Qz* – quartz, *Pfsp* – potassium feldspar, *Ms* – muscovite, *Ttn* – titanite.

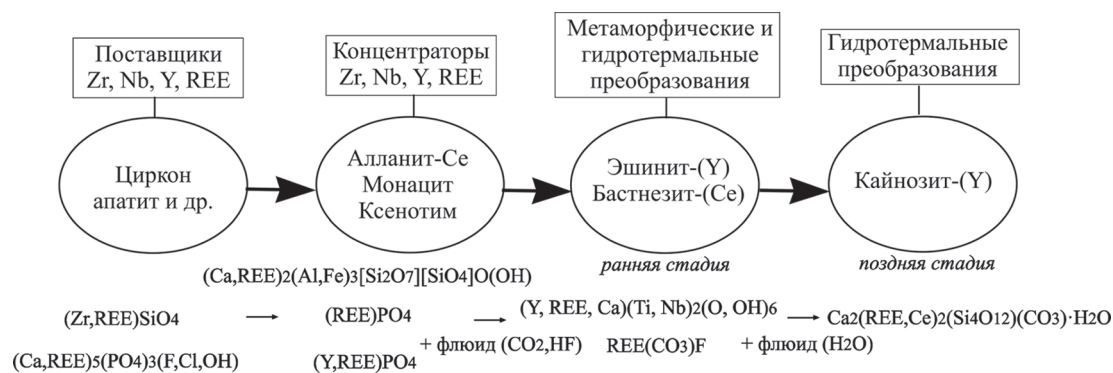


Рис. 7. Схема формирования редкоземельных минералов в метариолитах сбалегорской свиты.

Fig. 7. Scheme of the formation of rare earth minerals in metarhyolites of the Sablegorskii Formation.

на самых низких ступенях метаморфизма, он мог образоваться на поздних стадиях в результате аутометаморфизма и низкотемпературной гидротермальной переработки магматических пород. Подобный процесс формирования бастнезита был описан Е.Н. Кайгородовой с соавторами в рио-

литах хуламского комплекса (Северный Кавказ) (2021). Редкоземельные титанониобаты, в том числе эшинит-(Y), вероятно, образовались в постмагматическую стадию преобразования риолитов в присутствии в остаточном расплаве повышенных концентраций некоторых редких металлов – Zr, Nb,

Y и REE, поставщиками которых являлись циркон, апатит, монацит и др. Кайнозит-(Y) из метариолитов саблегорской свиты выступает самым поздним минералом. Его появление могло происходить за счет перекристаллизации алланита-(Ce) в результате распада эшинита-(Y) при участии гидротермальных растворов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докембрийских породах Приполярного Урала установлены редкоземельные карбонаты и титанониобаты. В метаморфических породах няртинского комплекса изучены анкилит-(Ce) и гидроксилбастнезит-(Ce), пуйвинской свиты – гидроксилбастнезит-(La), саблегорской свиты – бастнезит-(Ce), кайнозит-(Y) и эшинит-(Y).

Анкилит-(Ce) и гидроксилбастнезит-(Ce) из нижнепротерозойских пород образовались в ходе единого процесса на поздних метаморфогенно-гидротермальных этапах за счет присутствия минералов, содержащих редкоземельные элементы, и при участии растворов углекислого состава. Гидроксилбастнезит-(La) из верхнерифейской пуйвинской свиты образован в схожих условиях при поздних гидротермальных преобразованиях.

Для метариолитов верхнерифейско-вендской саблегорской свиты предложена следующая схема формирования редкоземельных минералов. Редкоземельный титанониобат – эшинит-(Y) возник в результате постмагматического преобразования риолитов, за счет присутствия в остаточном расплаве повышенных концентраций некоторых редких металлов – Zr, Nb, Y и REE. Примерно в это же время в результате автометаморфизма по алланиту-(Ce) формируется бастнезит-(Ce). Кайнозит-(Y) в метариолитах является самым поздним минералом, сформировавшимся за счет перекристаллизации алланита-(Ce) и бастнезита-(Ce) при распаде эшинита-(Y) в присутствии гидротермальных растворов.

Исследуемый район является перспективным для дальнейшего изучения и обнаружения новых редкоземельных минералов и представляет большой интерес в качестве нового направления в металлогенической редкоземельной специализации метаморфических пород на Приполярном Урале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г. (2014) Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов. СПб.: СПбГУ, 133 с.
- Великославинский С.Д., Глебовицкий В.А., Крылов Д.П. (2013) Разделение силикатных осадочных и магматических пород по содержанию петрогенных элементов с помощью дискриминантного анализа. *Докл. РАН*, **453**(3), 310-313.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. (2013) Масштаб 1 : 200 000. Сер. Северо-Уральская. Л. Q-41-XXV. Объясн. зап. (Ред. М.А. Шишкин). М.: ВСЕГЕИ, 252 с.
- Григорьев Н.А. (2009) Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 382 с.
- Кайгородова Е.Н., Набелкин О.А., Карташов П.М., Лебедев В.А. (2021) Редкоземельная и ниобиевая минерализация в трахитах и риолитах хуламского вулканоплутонического комплекса, Северный Кавказ. *Минералогия*, **7**(4), 31-45.
- Ковальчук Н.С. (2015) Редкоземельная минерализация в метаморфических сланцах пуйвинской свиты (RF₂), Приполярный Урал. *Вестн. Коми НЦ*, (10), 38-44.
- Козырева И.В., Юдович Я.Э., Швецова И.В., Кетрис М.П., Ефанова Л.И. (2003) Глиноземистые и железистые породы Приполярного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 102 с.
- Козырева И.В., Швецова И.В., Попова Т.Н. (2004) Находка Nd-таленита на Приполярном Урале. *Вестн. Коми НЦ*, (6), 2-3.
- Козырева И.В., Швецова И.В., Галускина И.О. (2005) Первая находка иттрокразита на Приполярном Урале. *Вестн. Коми НЦ*, (12), 3-4.
- Ковалев С.Г., Маслов А.В., Ковалев С.С. (2020) Минералого-геохимические аспекты поведения редкоземельных элементов при метаморфизме (на примере верхнедокембрийских структурно-вещественных комплексов Башкирского мегантиклинория, Южный Урал). *Георесурсы*, **22**(2), 56-66. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.56-66>
- Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Шарипова А.А. (2023) Первые данные о редкоземельной минерализации в кислых разновидностях пород шатакского комплекса (Южный Урал). *Литосфера*, **23**(5), 910-929. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>
- Никулова Н.Ю., Сокерина Н.В., Гракова О.В., Козырева И.В., Филиппов В.Н. (2022) Алюмосульфатфосфаты из кварцитопесчаников и кварцевых жил г. Черной (Приполярный Урал). *Зап. РМО*, **151**(3), 86-95. <https://doi.org/10.31857/S0869605522030078>
- Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2019) Палладий-золото-сульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал). *Вестн. Коми НЦ*, (6), 20-27. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-20-27>
- Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2023) Самородное золото Au-Pd месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия). *Геология и геофизика*, **64**(2), 233-254. <https://doi.org/10.15372/GiG2022122>
- Онищенко С.А. (2020) Цинкохромит на золоторудном месторождении Чудное (Приполярный Урал). *Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2020)*. Сыктывкар: Геопринт, 223-224.
- Пыстин А.М. (1994) Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб.: Наука, 208 с.
- Пыстин А.М., Гракова О.В., Пыстина Ю.И., Кушманова Е.В., Попвасев К.С., Потапов И.Л., Хубанов В.Б. (2022) U-Pb (LA-SF-ICP-MS) возраст и вероятные источники сноса детритовых цирконов из терригенных отложений верхнего докембрия Приполярного Урала. *Литосфера*, **22**(6), 741-760. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-741-760>
- Репина С.А., Муфтахов В.А. (2020) Природа осцилли-

- онной зональности и механизмы роста кристаллов в сростке флоренсита и ксенотима. *Зан. РМО*, **149**(5), 29-58. <https://doi.org/10.31857/S0869605520050068>
- Соболева А.А. (2004) Вулканиды и ассоциирующие с ними гранитоиды Приполярного Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 147 с.
- Тимонина Р.Г. (1980) Петрология метаморфических пород Приполярного Урала. Л.: Наука, 100 с.
- Удоротина О.В., Капитанова В.А. (2016) Геохронология пород субстрата и руд редкометалльно-редкоземельных месторождений и рудопроявлений на Севере Урала и Тимане. *Изв. Коми НЦ*, **4**(28), 85-100.
- Юдович Я.Э., Ефанова Л.И., Швецова И.В., Козырева И.В., Котельникова Е.А. (1998) Зона межформационного контакта в каре оз. Грубепендиты. Сыктывкар: Геопринт, 97 с.
- Finger F., Broska I., Roberts M.P., Schermaier A. (1998) Replacement of primary monazite by apatite-allanite-epidote coronas in an amphibolite facies granite gneiss from the eastern Alps. *Amer. Miner.*, **83**, 248-258.
- ### REFERENCES
- Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G. (2014) Structure, isomorphism, formulas, classification of minerals. St.Petersburg, SPbGU, 133 p. (In Russ.)
- Finger F., Broska I., Roberts M.P., Schermaier A. (1998) Replacement of primary monazite by apatite-allanite-epidote coronas in an amphibolite facies granite gneiss from the eastern Alps. *Amer. Miner.*, **83**, 248-258.
- Grigoriev N.A. (2009) Chemical element distribution in the upper continental crust. Ekaterinburg, UrO RAN, 382 p. (In Russ.)
- Kaygorodova E.N., Nabelkin O.A., Kartashov P.M., Lebedev V.A. (2021) Rare earth and niobium mineralization in trachytes and rhyolites of the Khulam volcano-plutonic complex, Northern Caucasus. *Mineralogiya*, **7**(4), 31-45. (In Russ.)
- Kovalchuk N.S. (2015) Rare earth mineralization in metamorphic shales of the Puyva Formation (RF2), Subpolar Urals. *Vestn. Komi NTs*, (10), 38-44. (In Russ.)
- Kozyreva I.V., Yudovich Ya.E., Shvetsova I.V., Ketris M.P., Efanova L.I. (2003) Aluminous and ferruginous rocks of the Subpolar Urals. Ekaterinburg, UrO RAN, 102 p. (In Russ.)
- Kozyreva I.V., Shvetsova I.V., Popova T.N. (2004) Finding of Nd-thalena in the Subpolar Urals. *Vestn. Komi NTs*, (6), 2-3. (In Russ.)
- Kozyreva I.V., Shvetsova I.V., Galuskina I.O. (2005) The first discovery of yttrocrasite in the Subpolar Urals. *Vestn. Komi NTs*, (12), 3-4. (In Russ.)
- Kovalev S.G., Maslov A.V., Kovalev S.S. (2020) Mineralogical and geochemical aspects of the behavior of rare earth elements during metamorphism (using the example of the Upper Precambrian structural-material complexes of the Bashkir meganticlinorium, Southern Urals). *Georesursy*, **22**(2), 56-66. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.56-66>
- Kovalev S.G., Kovalev S.S., Sharipova A.A. (2023) First data on rare earth mineralization in acidic rock varieties of the Shatak complex (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, **23**(5), 910-929. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>
- Nikulova N.Yu., Sokerina N.V., Grakova O.V., Kozyreva I.V., Filippov V.N. (2022) Aluminosulfate-phosphates from quartzite sandstones and quartz veins in the city of Chernaya (Subpolar Urals). *Zap. RMO*, **151**(3), 86-95. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869605522030078>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. (2019) Palladium-gold sulfide mineralization in andesites at the Chudnoe deposit (Subpolar Urals). *Vestn. Komi NTs*, (6), 20-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-20-27>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. (2023) Native gold Au-Pd from the Chudnoe deposit (Subpolar Urals, Russia). *Geologiya i Geofizika*, **64**(2), 233-254. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG2022122>
- Onishchenko S.A. (2020) Zinc-chromite at the Chudnoe gold deposit (Subpolar Urals). *Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin readings – 2020)*. Syktyvkar, Geoprint Publ., 223-224. (In Russ.)
- Pystin A.M. (1994) Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals. St.Petersburg, Nauka Publ., 208 p. (In Russ.)
- Pystin A.M., Grakova O.V., Pystina Yu.I., Kushmanova E.V., Popvasev K.S., Potapov I.L., Khubanov V.B. (2022) U-Pb (LA-SF-ICP-MS) age and probable sources of detrital zircons from Upper Precambrian terrigenous sediments of the Subpolar Urals. *Lithosphere (Russia)*, **6**(22), 741-760. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-741-760>
- Repina S.A., Muftakhov V.A. (2020) The nature of oscillatory zoning and mechanisms of crystal growth in the intergrowth of florencite and xenotime. *Zap. RMO*, **149**(5), 29-58. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869605520050068>
- Soboleva A.A. (2004) Volcanics and associated granitoids of the Subpolar Urals. Ekaterinburg, RIO UrO RAN, 147 p. (In Russ.)
- State geological map of the Russian Federation. (2013) Scale 1 : 200 000. Severo-Uralskaya series. Sheet Q-41-XXV. Explanatory letter. (Ed. by M.A. Shishkin). Moscow, VSEGEI, 252 p. (In Russ.)
- Timonina R.G. (1980) Petrology of metamorphic rocks of the Subpolar Urals. Leningrad, Nauka Publ., 100 p. (In Russ.)
- Udoratina O.V., Kapitanova V.A. (2016) Geochronology of substrate rocks and ores of rare metal-rare earth deposits and ore occurrences in the north of the Urals and Timan. *Izv. Komi NTs*, **4**(28), 85-100. (In Russ.)
- Velikoslavinsky S.D., Glebovitsky V.A., Krylov D.P. (2013) Separation of silicate sedimentary and igneous rocks by the content of major elements using discriminant analysis. *Dokl. RAN*, **453**(3), 310-313. (In Russ.)
- Yudovich Ya.E., Efanova L.I., Shvetsova I.V., Kozyreva I.V., Kotelnikova E.A. (1998) Interformation contact zone in the lake's crust Grubependites. Syktyvkar, Geoprint Publ., 97 p. (In Russ.)