

Минералы редких и редкоземельных элементов в кислых метавулканитах саблегорской свиты (Северный Урал)

Т. А. Вовчина¹, О. В. Удоратина¹, А. С. Шуйский¹, С. Н. Сычев^{2,3}

¹Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167000, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54, e-mail: udoratina@geo.komisc.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, e-mail: s.sychev@spbu.ru

³Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 199106, г. Санкт-Петербург, Средний пр., 74

Поступила в редакцию 05.12.2024 г., принята к печати 10.06.2025 г.

Объект исследования. Метавулканиты саблегорской свиты, отобранные в районе горы Редка на западном склоне Северного Урала (Республика Коми). **Цель.** Изучение петрогеохимического состава метавулканитов и минеральных форм нахождения в них Nb и элементов редких земель. **Материалы и методы.** Образцы пород отобраны из элювиально-делювиальных развалов и горных выработок на юго-восточном склоне горы Редка. Аналитические процедуры включали: определение содержаний породообразующих оксидов в породах классическим химическим методом, измерение концентраций редких, рассеянных и редкоземельных элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), микрозондовый анализ состава минералов. **Результаты.** Изученные метавулканиты саблегорской свиты принадлежат риолитам и трахириолитам нормальной и субщелочной серий, сформированных во внутриплитной обстановке. В минеральном составе пород установлено присутствие редкометалльных (Nb-рутил) и редкоземельных (алланит, монацит, ксенотим, ниобозинит-Y) минералов. Они образуют рассеянную вкрапленность зерен размером 20–50 мкм (Aesh(Y), Xnt, Mnz) и 50–500 мкм (Nb-Rt, Aln). Их появление рассматривается нами как результат кристаллизации магм, автометасоматических процессов, последующего метаморфизма. **Выводы.** В составе кислых метавулканитов саблегорской свиты Северного Урала выявлено присутствие минералов редких металлов и редких земель. Высказывается предположение о возможности мобилизации Th, U, Y, Nb, PЗЭ из риолитов и трахириолитов в тектонически активных зонах с формированием соответствующих рудопроявлений.

Ключевые слова: риолиты, трахириолиты, саблегорская свита, гора Редка, Северный Урал, редкометалльно-редкоземельная минерализация, ниобозинит-(Y)

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках темы НИР “Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы” ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (регистрационный номер в системе ЕГИСУ НИОКТР – 122040600012-2; FUUU-2022-0085)

Minerals of rare and rare-earth elements in acidic metavolcanites of the Sablegorskaya Formation (Northern Urals)

Tatyana A. Vovchina¹, Oksana V. Udoratina¹, Aleksandr S. Shuisky¹, Sergey N. Sychev^{2,3}

¹N.P. Yushkin institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar 167000, Russia, e-mail: udoratina@geo.komisc.ru

²St. Petersburg State University, 7/9 University emb., St. Petersburg 199034, Russia, e-mail: s.sychev@spbu.ru

³A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74 Sredny av., St. Petersburg 199106, Russia

Received 05.12.2024, accepted 10.06.2025

Для цитирования: Вовчина Т.А., Удоратина О.В., Шуйский А.С., Сычев С.Н. (2025) Минералы редких и редкоземельных элементов в кислых метавулканитах саблегорской свиты (Северный Урал). *Литосфера*, 25(6), 1365–1383. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-6-1365-1383>. EDN: OXBQNO

For citation: Vovchina T.A., Udoratina O.V., Shuisky A.S., Sychev S.N. (2025) Minerals of rare and rare-earth elements in acidic metavolcanites of the Sablegorskaya Formation (Northern Urals). *Lithosphere (Russia)*, 25(6), 1365–1383. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-6-1365-1383>. EDN: OXBQNO

Research subject. Metavolcanics of the Sablegorskaya Formation collected in the area of Mount Redka on the western slope of the Northern Urals (Komi Republic). *Aim.* To study the petrogeochemical composition of metavolcanics and mineral forms of Nb and rare-earth elements contained therein. *Materials and methods.* Rock samples were collected from eluvial-deluvial rubble and mine workings on the southeastern slope of Mount Redka. The analytical procedures included determination of the contents of rock-forming oxides in rocks by the classical chemical method; measurement of concentrations of rare, trace, and rare-earth elements by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS); microprobe analysis of mineral composition. *Results.* The studied metavolcanics of the Sablegorskaya Formation belong to rhyolites and trachyrhyolites of normal and subalkaline series formed in an intraplate setting. The presence of rare-metal (Nb-rutile) and rare-earth (allanite, monazite, xenotime, nioboeschinite-Y) in the mineral composition of the rocks was established. They form a scattered dissemination of grains 20–50 µm (Aesh(Y), Xnt, Mnz) and 50–500 µm (Nb-Rt, Aln) in size. We consider their appearance to be a result of magma crystallization, autometasomatic processes, and subsequent metamorphism. *Conclusions.* The presence of rare metal and rare-earth minerals in the composition of acid metavolcanics of the Sablegorskaya Formation of the Northern Urals was established. An assumption is made about the possibility of mobilization of Th, U, Y, Nb, and REE from rhyolites and trachyrhyolites in tectonically active zones with the formation of corresponding ore occurrences.

Keywords: rhyolites, trachyrhyolites, Sablegorskaya Formation, town of Redka, Northern Urals, rare metal–rare earth mineralization, niobeschinite-(Y)

Funding information

The work was carried out within the framework of the research topic “Deep structure, geodynamic evolution, geosphere interaction, magmatism, metamorphism and isotopic geochronology of the Timan-Severouralsk lithospheric” of the IG FRC Komi SC UB RAS (registration number in the EGISU NIOKTR system – 122040600012-2; FUUU-2022-0085)

Acknowledgements

The authors are grateful to V.A. Kapitanova, a leading geologist at the Petrography Laboratory, for her help in designing the graphic material.

ВВЕДЕНИЕ

На Северном Урале в верховьях р. Подчерем с 60-х гг. прошлого века известны комплексные проявления и аномалии U-Th – Редка I и Редка II (Душин и др., 2018). Проявление Редка I расположено в 1250 м к юго-западу от одноименной горы, в верховьях правого притока р. Подчерем (рис. 1). Согласно предшествующим исследованиям, аномальная по содержанию U-Th зона локализована в тектонически преобразованных вулканитах саблегорской свиты (альбитовых риолитах), в которых широко проявились процессы окварцевания, серицитизации, карбонатизации, связанные с развитием ураноносных березитов и эйситов. Аномалия Редка II расположена в 2.5 км на северо-восток от горы Редка и локализована в рассланцованных, окварцованных фельзитовых риолитах. В саблегорских вулканитах также известны аномалии Y и Yb (Душин и др., 2017, 2018), минеральные формы нахождения элементов в которых не установлены.

В последние годы, благодаря широкому использованию микрозондовых исследований в кислых вулканитах саблегорской свиты на территории Северного и Приполярного Урала, обнаружены минералы редких и редкоземельных элементов бастнезит-(Ce), кайнозит-(Y) и эшинит-(Y), ниобозинит-(Y), анкилит-(Ce), гидроксилбастнезит-(Ce) и гидроксилбастнезит-(La) (Удоратина и др., 2022; Гракова, Попвасев, 2024). В продолжение

данных исследований нами изучен состав кислых вулканитов саблегорской свиты вблизи горы Редка и одноименных аномалий в целях поиска минеральных форм нахождения редких и редкоземельных элементов. Данное исследование может иметь прикладное значение, касающееся прогноза и поиска на редкометалльно-редкоземельное оруденение.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Саблегорская свита в составе Центрально-Уральской мегазоны выделена В.Н. Малашевским в 1961 г. как возрастной аналог верхней толщи маньинской свиты со стратотипом на хр. Сабля (Душин и др., 2018). Состав свиты представлен лавами базальтов, андезибазальтов с прослоями филлитовидных парасланцев, линзами конгломератов, туфоконгломератов (нижняя подсвита) и кислыми эффузивами, их туфами, туффитами с подчиненными прослоями эпидот-хлорит-кварц-серицитовых, плагиоклаз-серицит-кварцевых и биотит-кварц-альбит-хлоритовых сланцев (верхняя подсвита). Нижняя граница свиты проводится по подошве туфоконгломератов и конгломератов либо по подошве потока базальтов, а верхняя – по несогласию налеганию груботерригенных пород поздневендско-раннепалеозойского возраста. Суммарная мощность отложений достигает 1500–2000 м (Душин и др., 2018). Субвулканические тела основных и кислых пород в составе саблегорской свиты

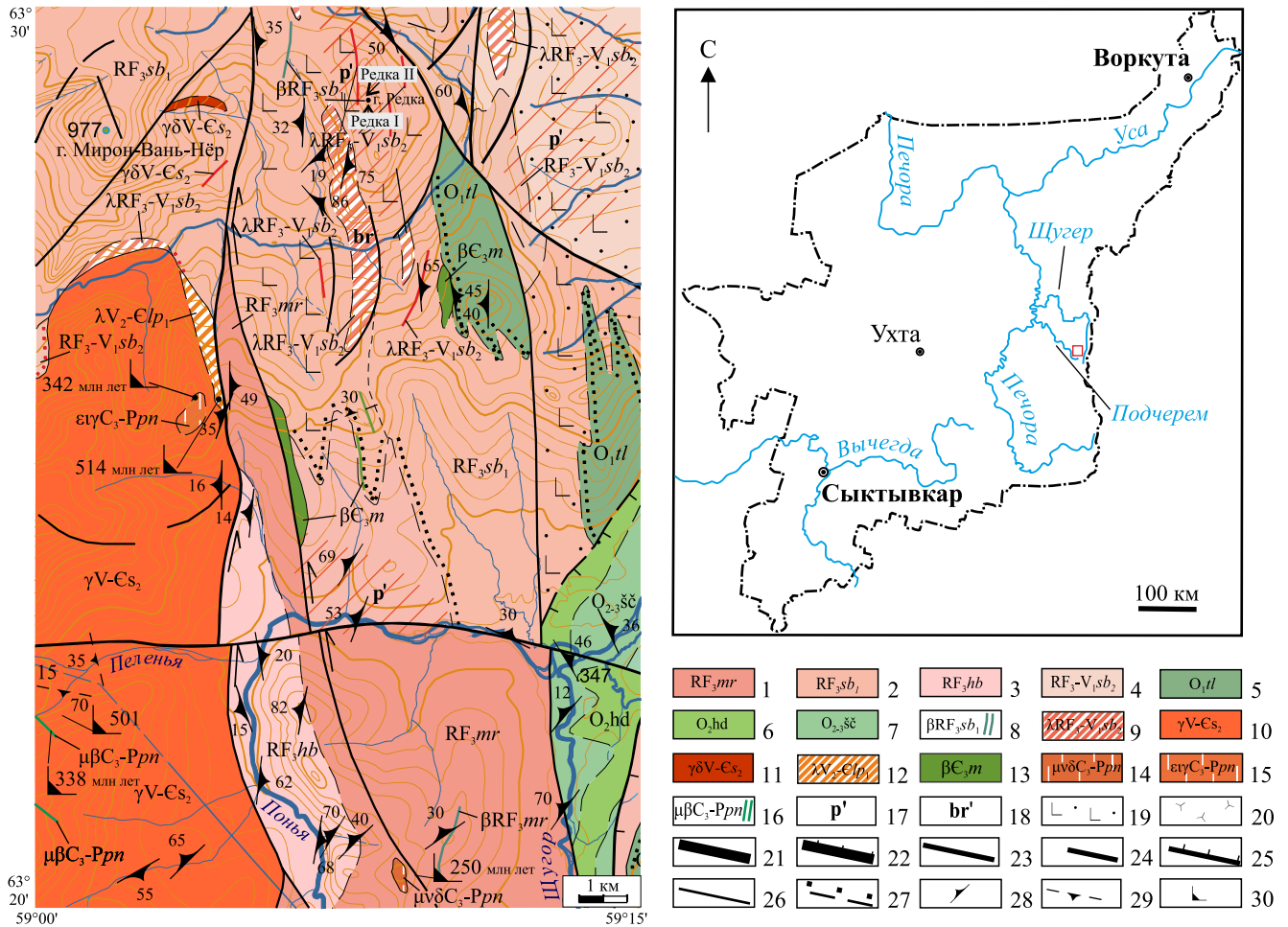


Рис. 1. Схематическая геологическая карта района работ в верховьях р. Подчерем (Душин и др., 2018, с изменениями).

1 – мороинская свита (RF₃mr); 2 – саблегорская свита, нижняя подсвита (RF₃sb₁); 3 – хобеинская свита (RF₃hb); 4 – саблегорская свита, верхняя подсвита (RF₃-V₁sb₂); 5 – тельпосская свита (O₁tl); 6 – хыдейская свита (O₂hd); 7 – шугорская серия (O₂₋₃sc); 8, 9 – саблегорские субвулканические образования: 8 – базальты, первая фаза (βRF₃sb₁), 9 – риолиты вторая фаза (λRF₃-V₁sb₂); 10, 11 – сальнеро-маньхамбовский комплекс гранит-лейкогранитовый плутонический: 10 – граниты, вторая фаза (γV-Cs₂), 11 – гранодиориты, вторая фаза (γδV-Cs₂); 12 – лаптопайские субвулканические образования, риолиты, первая фаза (λV₂-Clp₁); 13 – малопатокский комплекс габбро-долеритовый гипабиссальный, базальты (βC₃m); 14–16 – поньинский комплекс монцогаббро-монцитонитовый гипабиссальный: 14 – монцогаббро-диориты (μνδC₃-Ppn), 15 – умереннощелочные лейкограниты (εγC₃-Ppn), 16 – монцодолериты (μβC₃-Ppn); 17 – пропилитизированные породы (p'); 18 – березитизированные породы (неполнопроявленные) (br'); 19 – туфы базальтового состава; 20 – вулканические образования нерасчлененные; 21 – главные разломы; 22 – надвиг; 23 – разломы второстепенные; 24 – разломы второстепенные (предполагаемые); 25 – надвиг (второстепенный); 26 – согласные залегания и интрузивные контакты; 27 – несогласные залегания (предполагаемые); 28 – метаморфической полосчатости, гнейсовидности; 29 – трещины отдельности; 30 – пункты, для которых имеются определения радиологического возраста пород.

Fig. 1. Schematic geological map of the work area in the upper reaches of the Podcherem River (Dushin et al., 2018, with changes).

1 – Moroin'skaya Formation (RF₃mr); 2 – Sablegorskaya Formation, lower subformation (RF₃sb₁); 3 – Khobeinskaya Formation (RF₃hb); 4 – Sablegorskaya Formation, upper subformation (RF₃-V₁sb₂); 5 – Telposkaya Formation (O₁tl); 6 – Kheveyskaya Formation (O₂hd); 7 – Shchugorskaya series (O₂₋₃sc); 8, 9 – Sablegorsk subvolcanic formation: 8 – basalts, first phase (βRF₃sb₁), 9 – rhyolites, second phase (λRF₃-V₁sb₂); 10, 11 – Salner-Mankhambovsky granitoid-leucogranite plutonic formation: 10 – granites, second phase (γV-Cs₂), 11 – granodiorites, second phase (γδV-Cs₂); 12 – Laptopay subvolcanic formation, rhyolites, first phase (λV₂-Clp₁); 13 – Malopatok gabbro-dolerite hypabyssal formation, basalts (βC₃m); 14–16 – Pinyin monzogabbro-monzonite hypabyssal formation: 14 – monzogabbrodiorites (μνδC₃-Ppn), 15 – moderately alkaline leucogranites (εγC₃-Ppn), 16 – monzodolerites (μβC₃-Ppn); 17 – propylitized rocks (p'); 18 – beresitized rocks (incompletely developed) (br'); 19 – basaltic composition tuffs; 20 – undifferentiated volcanic formations; 21 – major faults; 22 – thrust; 23 – minor faults; 24 – minor (inferred) faults; 25 – minor thrust; 26 – conformable beds and intrusive contacts; 27 – unconformities (inferred); 28 – banding, gneissiness; 29 – jointing; 30 – localities with radiometric age determinations.

рассматриваются в качестве одноименного комплекса (Душин и др., 2018).

Исследованию состава пород свиты, в частности кислых вулканитов, картируемых на Приполярном и Северном Урале, посвящен ряд работ, описывающих их минералого-петрографические и петрогеохимические характеристики (Белякова, 1972; Червяковский, 1992; Иванов и др., 1995; Соболева, 2004; Ильясова и др., 2017; Душин и др., 2018; Трутнев, 2022; и др.). Установлено, что эти породы принадлежат контрастной базальт-риолитовой ассоциации, связанной с обстановкой континентального рифтогенеза и, возможно, предшествующей ей надсубдукционной обстановкой.

Возраст пород саблегорской свиты и саблегорского комплекса принят как позднерифейско-ранневендский (RF_3-V_{1sb}). Он базируется на определениях U-Pb возраста единичных кристаллов циркона из вулканических и субвулканических пород, составляющих, по разным данным, 642 млн лет (Иванов и др., 1995), 603 ± 12 млн лет (Сорока и др., 1995), 586 ± 12 млн лет (Червяковский, 1992), 550 млн лет (Белякова, 1972), 568 ± 4 млн лет (Ильясова и др., 2017). Столь широкий диапазон возраста вулканитов – в 100 млн лет и более – подтверждает возможное совмещение в пределах свиты комплексов, сформированных в разное время и разной тектонической обстановке (Ильясова и др., 2017).

Рассматриваемые в данной работе вулканиты кислого состава отобраны на Северном Урале в верховьях рек Подчерем и Щугер на участке юго-восточнее горы Редка вблизи одноименных аномалий Th-U (см. рис. 1). Здесь на дневную поверхность выведены комплексы доуралид, представленные отложениями саблегорской свиты и частично сохраненными перекрывающими их отложениями тельпосской свиты (O_1tl) уралид, разделенные угловым несогласием. Породы верхней подсвиты саблегорской свиты, обнаженные в районе горы Редка, локализируются в пределах реконструируемой здесь крупной Подчеремско-Тельпосской кольцевой вулканоструктуры, расположенной в северном экзоконтакте Ильязского гранитного массива (Душин и др., 2018), и вскрыты на отдельных участках поверхностными горными выработками (канавами).

Опробование пород проведено на площади в 850 м из элювиально-делювиальных развалов и полотна канав с шагом между профилями 250 м и между точками 100 м со сгущением точек отбора в канавах (рис. 2). Породы представлены чередованием рассланцованных дацитов, риодацитов, риолитов, трахириолитов серой, серовато-белой и белой окраски нередко с зеленоватым оттенком. Установлены контакты между риолитами и риодацитами, риолитами и трахириолитами. Превалируют северо-восточные, единичные северные и южные углы падения сланцеватости от $40-85^\circ$.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП “Геонаука” ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Породы изучались в прозрачных шлифах на исследовательском поляризационном микроскопе Olympus VX-51. Микрозондовый анализ проводился на электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMN с EDS X-MAX 50mm Oxford Instruments. Содержания оксидов породообразующих элементов в породах определены там же классическим химическим методом. Концентрации редких и рассеянных элементов получены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в ЦЛ ФГБУ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Пересчет химических составов пород и минералов произведен при помощи программ PetroExploer (Кориневский, 2010), Makemineral (электронная таблица, созданная в 2004 г. сотрудником ИГЕМ РАН С.С. Абрамовым) и Magma (автор Ken Wohletz).

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

Изученные вулканиты (риолиты, трахириолиты) изменены в условиях не выше серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации метаморфизма, вследствие чего они должны определяться с приставкой “мета”, однако в дальнейшем для упрощения восприятия материала мы будем именовать их в соответствии с их первичной магматической природой.

Риолиты (обр. 35-9, 36-1, 40-1, 40-1в) – это осветленные породы светло-серого, до белого, цвета с зеленоватым оттенком (рис. 3а). Они имеют первичную порфиловую или редкопорфировую структуру, массивную, слабосланцеватую текстуру. Вкрапленники слагают до 10 об. % породы, представлены табличками (1.0–1.5 мм) плагиоклаза (An_{0-2}), образующего гломеропорфировые сростки, калиевым полевым шпатом (0.5–1.0 мм) и единичными зернами кварца изометричной формы размером 0.5–1.0 мм (рис. 3б, в). Основная масса сложена на кварц-полевошпат-серицит-хлоритовым агрегатом. Среди аксессуарных минералов наблюдаются апатит, циркон, монацит, алланит, ниобозинит (Y), титаномагнетит, ильменит, ниобиевый рутил.

Трахириолиты (обр. 41-1, 41-3, 42-2, 43-1, 44-3, 45-1а) имеют светло-серый цвет (рис. 3г). Первичная структура пород афирровая, реже – редкопорфировая, текстура массивная. Небольшое количество порфировых вкрапленников (до 3 об. %) представлено широкими табличками (до 0.8 мм) калиевого полевого шпата с пертитовыми вростками альбита, реже – субидиоморфными таблитчатыми зернами плагиоклаза (An_{0-2}) и округлыми зернами кварца размером до 0.5 мм (рис. 3д–е). Основная масса

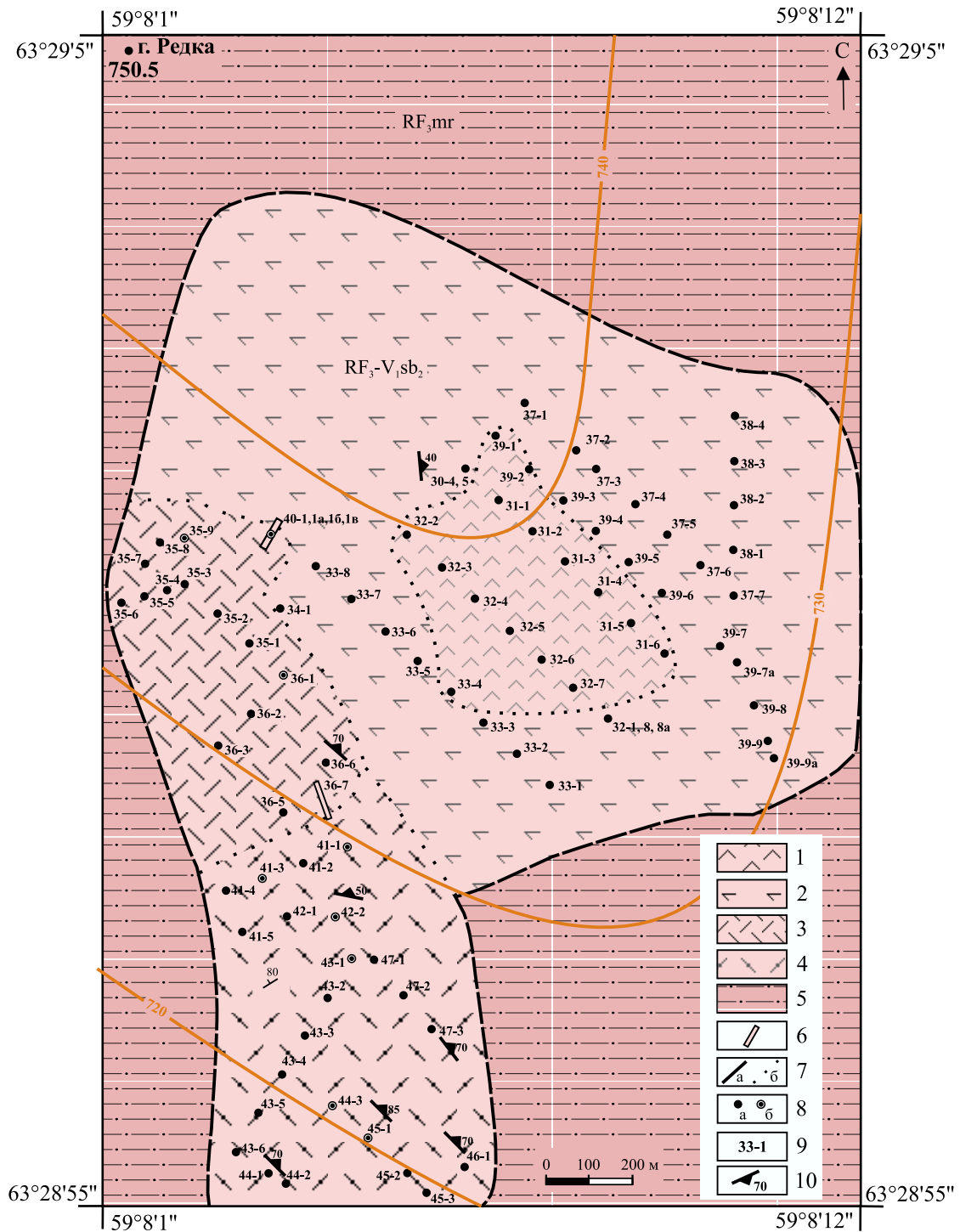


Рис. 2. Схема опробования юго-юго-восточного склона горы Редка.

Верхняя подсвита саблегорской свиты: 1 – дациты, 2 – риодациты, 3 – риолиты, 4 – трахирриолиты; мороинская свита: 5 – алевритовые сланцы, 6 – канавы, 7 – геологические границы предполагаемые (а) и фациальные (б); 8 – точки опробования (а), точки, в которых обнаружены редкометалльно-редкоземельные минералы (б); 9 – номера точек отбора проб; 10 – наклонное залегание сланцеватости.

Fig. 2. Sampling scheme of the south-southeast slope of Mt. Redka.

Upper sub-suite of the Sablegorskaya Formation: 1 – dacites, 2 – rhyodacites, 3 – rhyolites, 4 – trachyrhyolites; Moroinskaya Formation: 5 – aleurolite slates; 6 – trenches; 7 – geological boundaries inferred (a) and facies boundaries (b); 8 – sampling points (a), points where rare-metal and rare-earth minerals were found (b); 9 – sample collection point numbers; 10 – inclined bedding of slaty cleavage.

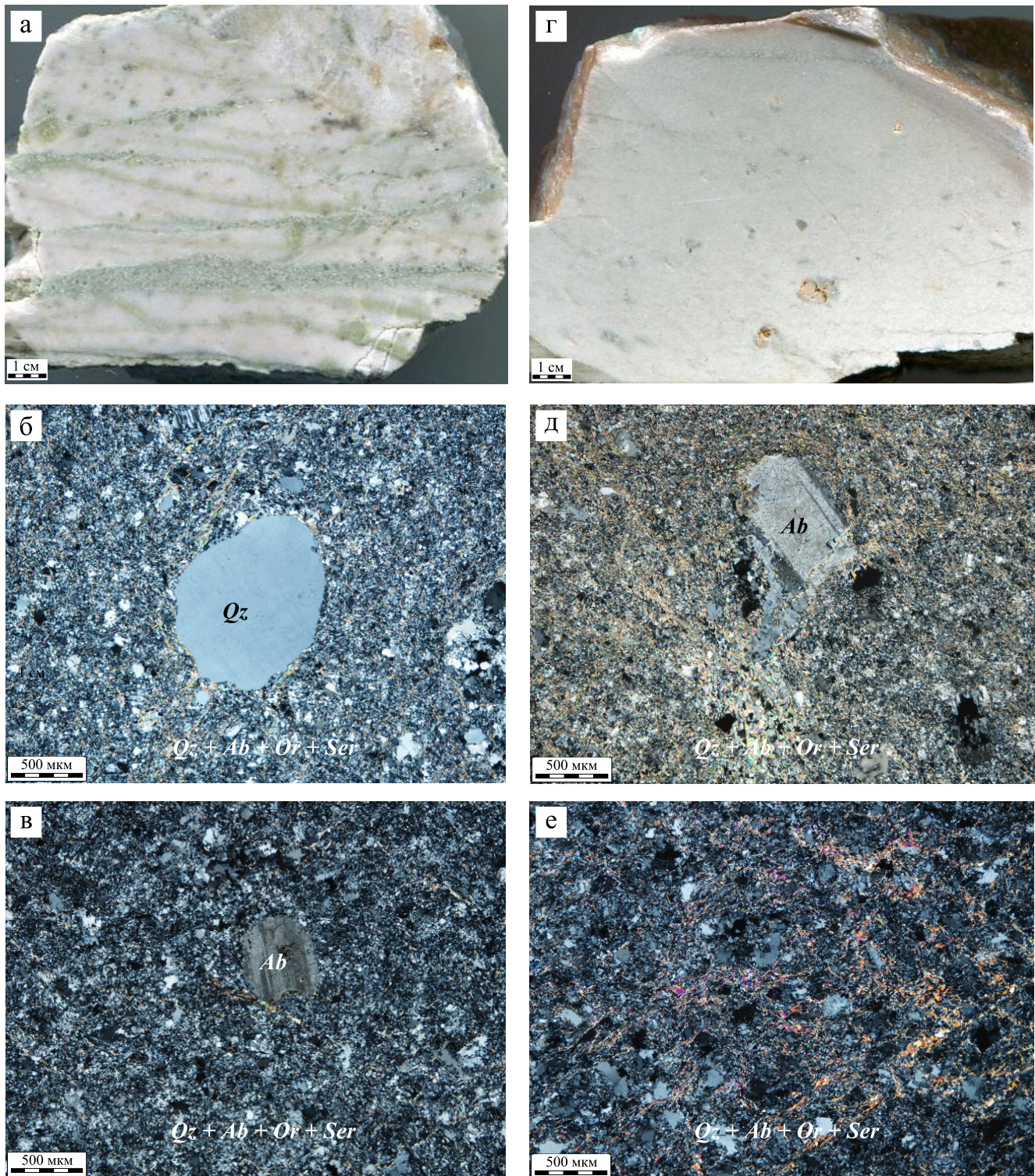


Рис. 3. Примеры макро- и микроструктур риолитов (а–в) и трахириолитов (г–е). б, в, д, е – николи скрещены. Риолиты: а – общий вид породы, б – вкрапленник кварца, в – вкрапленник альбита в кварц-полевошпатовом матриксе. Трахириолиты: г – общий вид породы, д – вкрапленник альбита в серититизированном кварц-полевошпатовом матриксе, е – общий вид матрикса.

Fig. 3. Examples of macro- and microstructures of rhyolites (а–в) and trachyrhyolites (г–е). б, в, д, е – crossed nicols. Rhyolites: а – general appearance of the rock, б – quartz phenocryst, в – albite phenocryst in a quartz-feldspar matrix. Trachyrhyolites: г – general appearance of the rock, д – albite phenocryst in a seritic quartz-feldspar matrix, е – general appearance of the matrix.

представлена кварц-полевошпат-серицитовым агрегатом. Местами отмечается наложенная микрولепидогранобластовая микроструктура, обусловленная присутствием серицита наряду с кварцем и полевыми шпатами, наблюдается кальцит. Акцессорные минералы: циркон, монацит, алланит (Ce), ниобезинит-(Y), ниобиевый рутил, апатит, гадолинит (?).

ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

Кислые вулканиты характеризуются относительно высокими содержаниями кремнезема и суммы щелочей, классифицируются как риолиты и трахириолиты (рис. 4а, табл. 1). Они имеют калиево-натриевую специфику, принадлежат к умеренно-

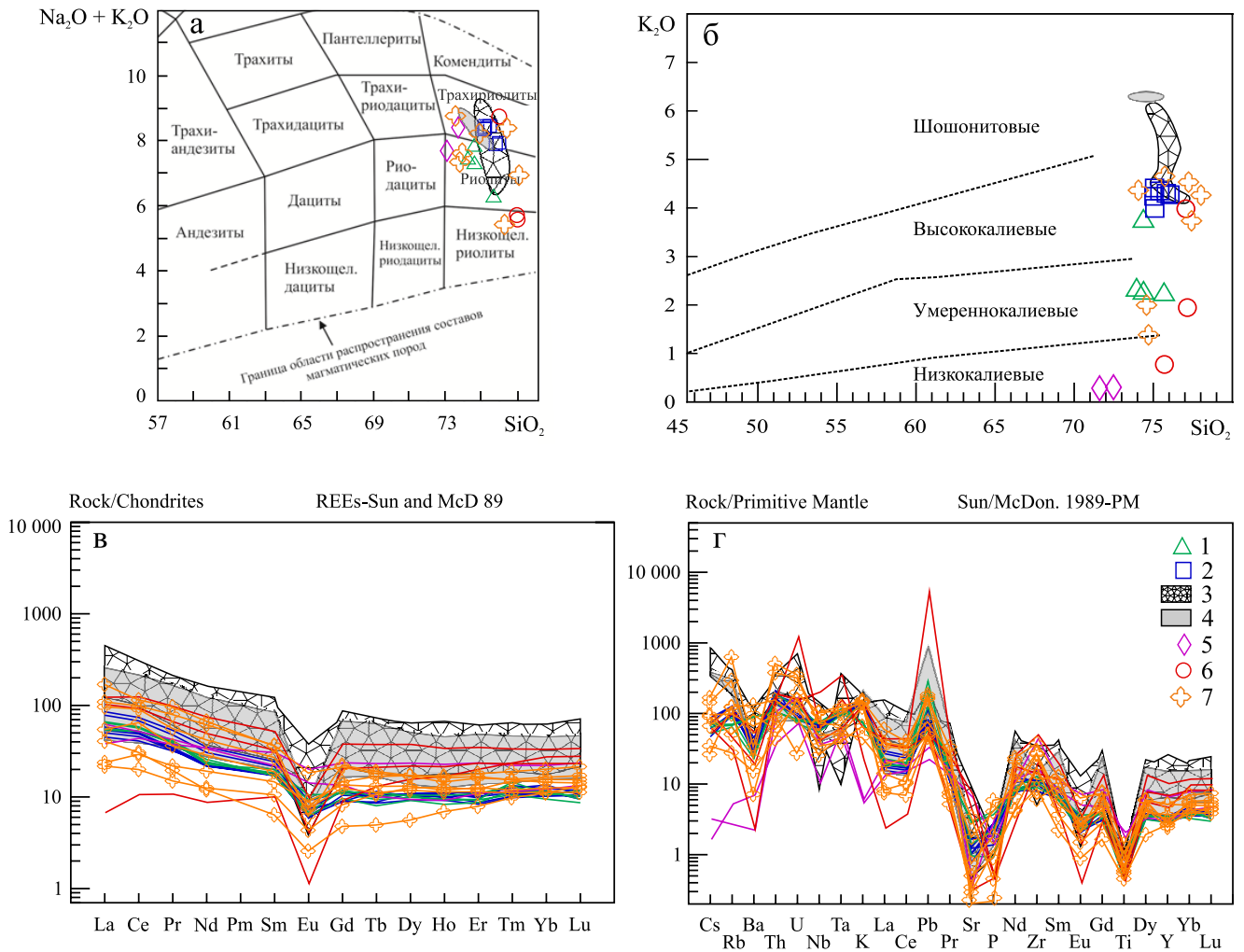


Рис. 4. Классификационные диаграммы для метавулканитов саблегорской свиты.

а – диаграмма $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{-SiO}_2$ (TAS; Петрографический..., 2008); б – диаграмма $\text{K}_2\text{O}\text{-SiO}_2$; в – графики распределения РЗЭ; г – спектры распределения элементов-примесей. 1 – риолиты; 2 – трахириолиты; 3 – риолиты верхнего подкомплекса саблегорской свиты хр. Малдынырд, Приполярный Урал (Соболева, 2004); 4 – риолиты саблегорской свиты хр. Малдынырд, Приполярный Урал (Гракова, Попвасев, 2024); 5 – риолиты саблегорской свиты (Душин и др., 2018); 6 – риолиты саблегорского комплекса (Душин и др., 2018); 7 – риолиты саблегорского комплекса (Ильясова и др., 2017; Холоднов и др., 2022).

Fig. 4. Classification diagrams for metavolcanics of the Sablegorskaya Formation.

а – diagram $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{-SiO}_2$ (TAS; Petrographic..., 2008); б – $\text{K}_2\text{O}\text{-SiO}_2$ diagram; в – REE distribution patterns; г – trace element distribution spectra. 1 – rhyolites; 2 – trachyrhyolites; 3 – rhyolites of the upper subcomplex of the Sablegorskaya Formation, Maldynyrd Ridge, Subpolar Urals (Soboleva, 2004); 4 – rhyolites of the Sablegorskaya Formation, Maldynyrd Ridge, Subpolar Urals (Grakova, Popvasev, 2024); 5 – rhyolites of the Sablegorskaya Formation (Dushin et al., 2018); 6 – rhyolites of the Sablegorsk complex (Dushin et al., 2018); 7 – rhyolites of the Sablegorsk complex (Il'yasova et al., 2017; Kholodnov et al., 2022).

Таблица 1. Химический состав метавулканитов саблегорской свиты, мас. %**Table 1.** Chemical composition of metavolcanics of the Sablegorskaya Formation, wt %

Компонент	№ обр.									
	35-9	36-1	40-1б	40-1в	41-1	41-3	42-2	43-1	44-3	45-1а
	Риолиты				Трахирриолиты					
SiO ₂	75.68	74.38	74.39	73.95	76.06	75.83	75.08	75.10	75.04	75.42
TiO ₂	0.10	0.14	0.22	0.20	0.19	0.19	0.18	0.12	0.12	0.12
Al ₂ O ₃	14.95	13.60	14.99	15.24	13.22	12.97	14.13	13.08	13.03	12.95
FeO	0.15	0.43	0.18	0.25	0.30	0.26	0.26	0.30	0.35	0.34
Fe ₂ O ₃	Н. о.	Н. о.	0.76	0.71	0.71	0.46	0.45	Н. о.	Н. о.	Н. о.
MnO	0.02	0.01	0.10	0.08	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01
MgO	0.34	0.12	0.47	0.57	0.51	0.26	0.52	0.14	0.27	0.20
CaO	0.72	0.45	0.28	0.29	0.28	0.62	0.28	0.45	0.28	0.28
Na ₂ O	4.19	4.05	5.06	5.12	3.68	3.61	3.92	4.37	4.17	4.06
K ₂ O	2.21	3.72	2.24	2.30	4.27	4.30	4.41	3.99	4.24	4.35
P ₂ O ₅	0.02	0.05	0.09	0.08	0.05	0.04	0.03	0.05	0.06	0.06
П. п. п.	1.16	1.50	1.28	1.33	0.94	1.17	1.18	0.86	1.12	0.93
H ₂ O ⁻	0.06	0.32	0.04	0.01	0.33	0.36	0.14	0.25	0.25	0.28
CO ₂	0.08	Н. о.	0.35	0.66	0.05	0.31	0.09	<0.10	Н. о.	<0.10
Сумма	99.68	98.78	100.45	100.79	100.61	100.41	100.69	98.74	98.95	99.01
Na ₂ O + K ₂ O	6.40	7.77	7.30	7.42	7.95	7.91	8.33	8.36	8.41	8.41
Na ₂ O/K ₂ O	1.90	1.09	2.26	2.23	0.86	0.84	0.89	1.10	0.98	0.93
A/CNK	1.33	1.33	1.41	1.2	1.09	1.08	1.10	1.18	1.06	1.18
CIPW										
Qz	40.79	35.32	35.34	34.12	37.10	36.78	34.11	33.20	33.52	34.23
Or	13.06	21.98	13.24	13.59	25.23	25.41	26.06	23.58	25.06	25.71
Ab	35.46	34.27	42.82	43.33	31.14	30.55	33.17	36.98	35.29	34.36
An	3.44	1.91	0.80	0.92	1.06	2.81	1.19	1.91	1.00	1.00
Cor	4.40	2.21	3.95	3.99	2.15	1.35	2.47	0.87	1.22	1.20
Hу	0.99	0.88	1.17	1.42	1.27	0.65	1.30	0.76	1.13	0.94
Mt	0.00	0.00	0.27	0.49	0.48	0.39	0.38	0.00	0.00	0.00
Il	0.19	0.27	0.42	0.38	0.36	0.36	0.34	0.23	0.23	0.23
Hem	Н. о.	Н. о.	0.57	0.37	0.38	0.19	0.19	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Apt	0.05	0.12	0.21	0.19	0.12	0.09	0.07	0.12	0.14	0.14

Примечание. A/CNK = Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O), мол. %. Здесь и далее “Н. о.” – не обнаружено.

Note. A/CNK = molar ratio Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O). Hereinafter “Н. о.” – not found.

и высококалиевым сериям (рис. 4б). Им свойственна насыщенность глиноземом (коэффициент A/CNK составляет 1.23–1.50 в риолитах и 1.10–1.22 в трахириолитах).

Пересчет химических анализов пород методом CIPW (см. табл. 1) показал, что нормативный кварц во всех образцах вулканитов содержится в примерно одинаковом количестве, об. %: 34.1–40.8 – в риолитах и 33.2–37.1 – в трахириолитах, тогда как полевые шпаты имеют разное количественное соотношение. В трахириолитах доля калиевого полевого шпата больше, нежели в риолитах, об. %: 23.6–26.1 против 13.1–22.0, чем и определяется калиевый тип щелочности пород.

В вулканитах отмечается в целом низкое содержание суммы редких земель – от 63.49 до 101.11 г/т (табл. 2). Спектры распределения РЗЭ

(рис. 4в) характеризуются V-образным типом с отрицательным наклоном: породы обогащены легкими редкими землями относительно тяжелых. Величина (La/Yb)_N, являющаяся показателем этого обогащения, варьируется от 3.15 до 7.73 (см. табл. 2). В породах в различной степени проявлен дефицит европия. В спектрах распределения РЗЭ наблюдается хорошо проявленный Eu-минимум (Eu/Eu* = 0.41–0.68). В трахириолитах в целом при сохранении типа спектра содержание РЗЭ несколько выше, чем в риолитах. Рассматриваемые породы имеют близкие спектры распределения элементов-примесей (рис. 4г). Наблюдаем обогащение всеми элементами, за исключением Ti, относительно примитивной мантии, наличие максимумов Rb, Th, Ta, K, Pb, Zr и минимумов Nb, La, Ce, Sr, P, Eu, Ti.

Таблица 2. Содержание элементов примесей в метавулканитах саблегорской свиты, г/т

Table 2. Content of impurity elements of metavolcanics of the Sablegorskaya Formation, ppm

Элемент	№ обр.										
	35-9	36-1	40-1б	40-1в	41-1	41-3	42-2	43-1	44-3	45-1а	Кларк
	Риолиты				Грахириолиты						
V	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	42
Cr	2.84	2.31	1.79	1.86	3.69	2.41	2.96	2.84	2.46	2.05	33
Ni	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	1.29	<1.00	<1.00	1.37	<1.00	<1.00	27
Cu	3.19	2.93	<1.00	<1.00	<1.00	5.87	1.09	5.30	6.71	<1.00	28
Pb	20.40	4.17	14.30	8.93	5.68	8.29	4.90	5.63	5.54	5.28	31
Sr	20.30	29.80	60.90	59.70	16.30	34.90	25.90	22.00	21.70	27.20	200
Ba	160.00	178.00	622.00	636.00	201.00	186.00	267.00	228.00	274.00	319.00	690
Be	3.45	3.75	3.00	2.77	3.03	3.13	2.98	3.72	2.79	2.88	3
Y	13.00	15.40	15.40	16.20	14.40	16.00	16.00	15.40	16.40	13.30	53
Ga	16.70	14.80	17.10	17.30	15.00	16.70	17.10	16.70	18.80	15.40	23
Zr	122.00	143.00	101.00	115.00	125.00	89.10	110.00	117.00	129.00	123.00	170
Rb	40.80	55.00	43.00	44.60	80.30	77.60	59.90	64.60	80.90	76.50	130
Cs	0.41	0.54	0.51	0.55	0.57	0.59	0.37	0.48	0.68	0.68	7
Co	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	0.60	<0.50	<0.50	<0.50	9
Cd	0.03	0.02	0.05	0.02	<0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	<0.01	0.3
Ag	0.11	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.11
Li	4.81	4.66	2.93	3.51	5.14	3.71	2.71	2.71	4.30	3.74	26
Sb	0.17	0.14	<0.01	<0.01	0.20	0.17	0.33	0.33	0.16	0.22	5.3
Se	1.71	0.66	1.76	0.99	1.67	1.77	0.78	1.96	1.58	1.91	–
Hf	4.93	5.07	3.81	4.10	4.53	3.98	4.39	4.08	4.89	4.39	7.6
Th	16.10	12.90	9.03	8.87	11.60	15.20	15.30	13.70	17.90	13.80	9.5
U	2.56	1.50	1.64	1.74	1.92	2.63	2.90	2.10	1.72	1.91	–
Nb	50.90	39.10	51.90	53.30	41.90	46.70	46.90	42.20	44.50	47.80	14
Ta	4.06	3.89	4.57	4.72	4.12	4.17	4.55	3.84	4.13	4.06	1.2
Zn	38.90	33.00	40.70	48.30	29.50	32.40	27.00	45.20	29.50	28.80	35
Mo	<0.60	<0.60	<0.60	0.72	<0.60	<0.60	<0.60	<0.60	<0.60	<0.60	1.2
W	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	–
La	15.30	15.70	12.70	13.10	20.20	10.70	11.90	12.70	18.50	13.80	20
Ce	34.60	35.70	31.90	32.00	45.10	25.00	27.90	29.90	41.50	30.90	43
Pr	3.79	3.89	3.67	3.74	5.08	3.01	3.09	3.16	4.53	3.27	3.1
Nd	11.30	12.00	10.80	10.60	16.40	11.10	10.10	10.20	14.30	10.70	11
Sm	2.64	2.62	2.80	3.06	3.72	2.75	2.70	2.61	3.28	2.62	2.7
Eu	0.36	0.39	0.54	0.61	0.53	0.34	0.42	0.36	0.44	0.43	1.3
Gd	1.98	2.44	2.31	2.24	2.33	2.14	1.83	1.83	2.35	1.86	3.9
Tb	0.30	0.38	0.42	0.35	0.37	0.38	0.33	0.43	0.41	0.32	0.68
Dy	2.33	2.66	2.60	2.51	2.79	2.75	2.77	2.59	2.61	2.34	–
Ho	0.47	0.59	0.52	0.54	0.61	0.64	0.56	0.57	0.62	0.52	–
Er	1.44	1.79	1.56	1.54	1.68	1.80	1.78	1.44	1.62	1.38	–
Tm	0.30	0.34	0.37	0.27	0.28	0.32	0.29	0.26	0.34	0.25	–
Yb	2.00	1.77	1.87	1.61	1.76	2.29	1.97	1.94	2.09	1.74	3.8
Lu	0.24	0.30	0.26	0.22	0.26	0.27	0.24	0.28	0.30	0.27	–
Σ PЗЭ	77.05	80.57	72.32	72.39	101.11	63.49	65.88	68.27	92.89	70.40	89.48
(La/Yb) _N	5.16	5.98	4.58	5.49	7.74	3.15	4.07	4.41	5.97	5.35	5.26
Eu/Eu*	10.59	11.43	11.64	12.17	14.04	11.18	10.46	10.23	12.95	10.31	0.40

Примечание. Eu/Eu* = Eu_N/√(Sm_N·Gd_N), где Eu_N, Sm_N, Gd_N – нормализованные по хондриту значения. Кларк в метариолитах (Григорьев, 2009). Прочерк – нет данных.

Note. Eu/Eu* = Eu_N/√(Sm_N·Gd_N), where Eu_N, Sm_N, Gd_N is the chondrite-normalized value. Clark in metarhyolites (Grigor'ev, 2009). Dash – no data.

Приведенные на рис. 4в, г поля точек составов кислых вулканитов саблегорской свиты и саблегорского комплекса, заимствованные из работ предшественников, показывают широкую вариативность составов, но при этом сходные типы спектров.

Нормирование по кларку риолита (в скобках указано нормированное значение) показало превышение кларка в изученных риолитах Ве (до 1.25), Th (до 1.7), Nb (до 3.81), Ta (до 3.93), Zn (до 1.38), Pr (до 1.26), Nd (до 1.09), Sm (до 1.13), в трахириолитах Th (до 1.9), Nb (до 3.42), Ta (до 3.93), Pr (до 1.66), Nd (до 1.49), Sm (до 1.37), содержание остальных элементов на уровне или ниже кларка.

На диаграммах, применяемых для реконструкции геодинамических обстановок магматизма, фигуративные точки составов риолитов и трахириолитов располагаются в поле внутриплитных образований (рис. 5а, б), что подтверждает более ранние исследования вулканитов саблегорской свиты (Соболева, 2004; Ильясова и др., 2017; Душин и др., 2018; Трутнев, 2022; Холоднов и др., 2022). Точки составов, группирующиеся на диаграмме Rb-(Y + Nb) вблизи границы между островодужным и внутриплитным полями, принято также относить к постколлизийным. Следует отметить, что точки составов кислых вулканитов саблегорской свиты более северных районов (Соболева, 2004; Гракова, Попвасев, 2024) расположены в поле постколлизийных образований.

РЕДКОМЕТАЛЛЬНО-РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МИНЕРАЛЫ

По результатам микронзондовых исследований редкометалльно-редкоземельные минералы пород представлены алланитом, монацитом, ксенотим, ниобиевым рутилом и минералами группы эшинита (эшинит-(Y) и ниобозэшинит-(Y)). Ассоциации этих минералов обнаружены как в риолитах, так и в трахириолитах.

Ниобиевый рутил (обр. 35-9а, 41-1а, 44-3, 45-1а, 47-3) представляет среди редкометалльных минералов наибольший интерес. Он наблюдается в виде единичных кристаллов и их агрегатов размером от 50 до 500 мкм (рис. 6), форма удлиненно-призматическая, в сечении – квадрат (см. рис. 6б, г). В сечениях зерен имеет особенную “гребенчатую” структуру, напоминающую псевдоморфозу рутила по ильмениту. Минерал ассоциирует с цирконом, титанитом, алланитом, эшинитом-(Y) и ниобозэшинитом-(Y). В составе содержание Nb₂O₅ варьируется от 2.97 до 11.5 мас. % (табл. 3). На рис. 6в ниобиевый рутил наполняет сложное альбитом эллипсовидное обособление.

Алланит-(Ce) (обр. 41-1а, 42-2, 45-1а, 46-1) в виде одиночных кристаллов до 400 мкм (рис. 7а, б) или их сростков (рис. 7в) заключен в кварц-полевошпатовый, реже – в хлоритовый агрегат. Среди легких редкоземельных элементов в составе минерала преобладает Ce, определяя минераль-

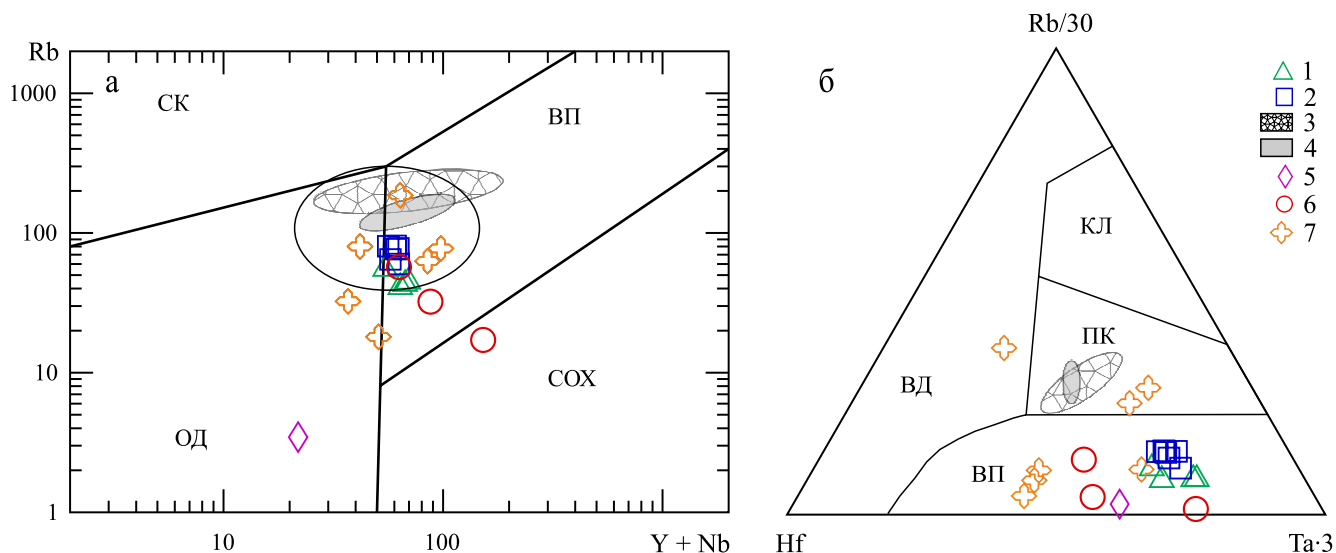


Рис. 5. Дискриминантные диаграммы для кислых метавулканитов саблегорской свиты.

а – Rb-(Y + Ta) (Pearce et al., 1984); б – Rb/30-Hf-Ta·3 (Harris et al., 1986). Поля: СК – синколлизийные граниты, ПК – постколлизийные граниты, ВП – внутриплитные граниты, ОД – островные дуги, СОХ – срединно-океанические хребты. Остальные условные обозначения – см. рис. 4.

Fig. 5. Discrimination diagrams for metavolcanics of the Sablegorskaya Formation.

а – Rb-(Y + Ta) (Pearce et al., 1984); б – Rb/30-Hf-Ta·3 (Harris et al., 1986). Fields: СК – syn-collisional granites, ПК – post-collisional granites, ВП – intraplate granites, ОД – island-arc granites, СОХ – granites of mid-ocean ridges. Symbols – see Fig. 4.

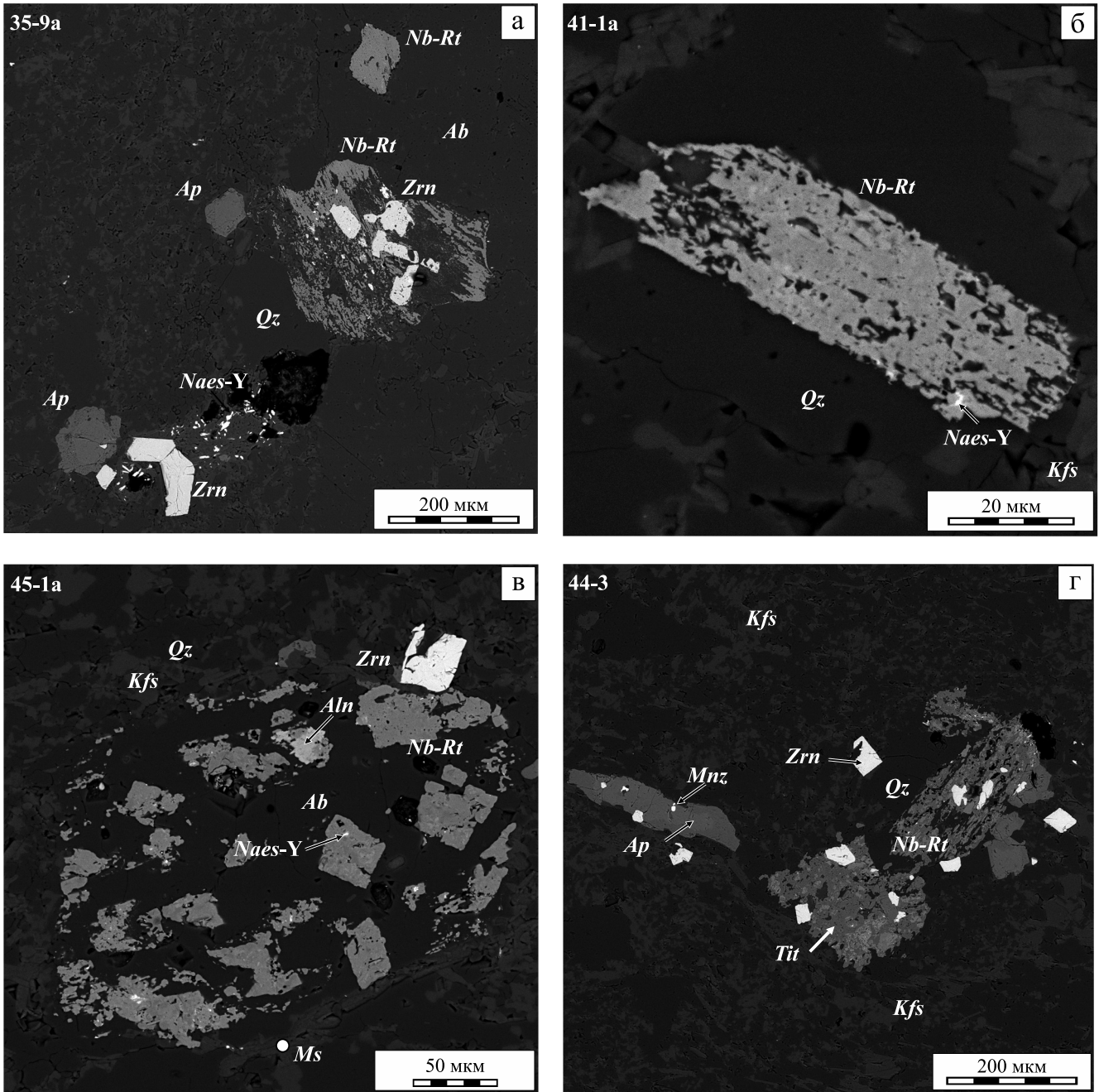


Рис. 6. Примеры агрегатов и кристаллов ниобиевого рутила. Снимки в обратно рассеянных электронах.

а – в риолитах; б–г – в трахириолитах. Здесь и далее в левом верхнем углу снимка приведены номера образцов. Символы минералов – по (Warr, 2021). *Kfs* – калиевый полевой шпат, *Ab* – альбит, *Qz* – кварц, *Ap* – апатит, *Ms* – мусковит, *Ttn* – титанит, *Naes-Y* – ниобозшинит-(Y), *Nb-Rt* – ниобиевый рутил, *Zrn* – циркон, *Mnz* – монацит, *Aln* – алланит.

Fig. 6. Examples of aggregates and crystals of niobium rutile. Images taken using backscattered electrons.

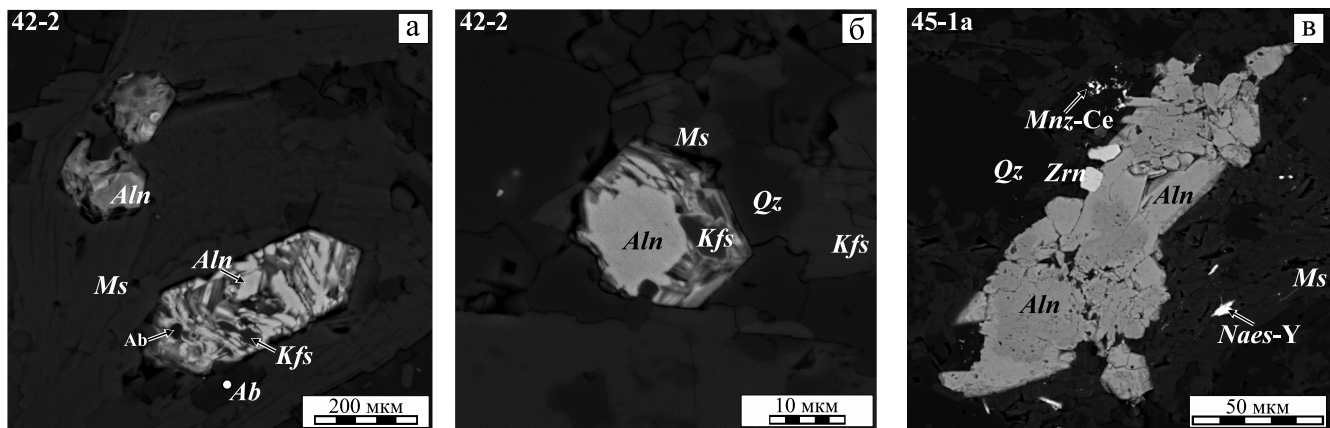
а – in rhyolites; б–г – in trachyrhyolites. Here and below, sample numbers are given in the upper left corner of the image. Mineral symbols according to (Warr, 2021). *Kfs* – potassium feldspar, *Ab* – albite, *Qz* – quartz, *Ap* – apatite, *Ms* – muscovite, *Ttn* – titanite, *Naes-Y* – nioboeschynite-(Y), *Nb-Rt* – niobium rutile, *Zrn* – zircon, *Mnz* – monazite, *Aln* – allanite.

ный вид (рис. 8а). Суммарное содержание РЗЭ достигает 25 мас. % (табл. 4). Наблюдаемая зональность кристаллов обусловлена увеличением суммы

легких РЗЭ от центра к краю. В ассоциации с минералом находятся циркон, монацит-(Ce), эшинит-(Y), ниобозшинит-(Y).

Таблица 3. Химический состав (мас. %) и формульные коэффициенты ниобиевого рутила**Table 3.** Chemical composition (wt %) and formula coefficients of niobium rutile

Компонент	№ обр.									
	35-9a		41-1a			44-3	45-1a		47-3	
	Риолиты		Трахирриолиты							
SiO ₂	0.67	0.39	0.97	0.52	9.63	0.70	Н. о.	Н. о.	0.88	0.57
TiO ₂	85.17	83.51	83.61	90.53	78.7	92.04	90.03	83.93	84.6	83.37
FeO	3.88	4.10	3.90	3.01	3.86	1.79	3.21	4.36	3.96	4.17
CaO	Н. о.	Н. о.	0.16	Н. о.	Н. о.	0.97	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
K ₂ O	Н. о.	Н. о.	0.21	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Y ₂ O ₃	Н. о.	Н. о.	0.86	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
SrO	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.79	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Nb ₂ O ₅	10.28	11.46	9.02	5.29	7.73	2.97	6.16	8.26	8.46	8.48
Ta ₂ O ₅	Н. о.	Н. о.	0.89	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.87	Н. о.	Н. о.
Сумма	100.40	99.97	99.62	99.35	99.92	100.10	99.40	97.42	98.55	96.59
Формульные коэффициенты										
Si	0.01	0.01	0.01	0.01	0.13	0.01	Н. о.	Н. о.	0.01	0.01
Ti	0.91	0.91	0.90	0.94	0.80	0.94	0.94	0.92	0.91	0.91
Fe ²⁺	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04	0.02	0.04	0.05	0.05	0.05
Ca	Н. о.	Н. о.	0.00	Н. о.	Н. о.	0.01	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
K	Н. о.	Н. о.	0.00	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Y	Н. о.	Н. о.	0.00	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Sr	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.01	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Nb	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03
Ta	Н. о.	Н. о.	0.01	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.01	Н. о.	Н. о.

**Рис. 7.** Примеры агрегатов и кристаллов алланита в трахирриолитах (а–в). Снимки в обратно рассеянных электронах.*Mnz(Ce)* – монацит-Ce.**Fig. 7.** Examples aggregates and crystals of allanite in trachyrhyolites (a–b). Backscattered electron images.*Mnz(Ce)* – monazite-Ce.

Монацит-(Ce) (обр. 35-9а, 36-1, 40-1в, 41-3, 47-3) диагностируется в виде мелких зерен (до 30 мкм) неправильной формы, сопровождаемых апатитом, цирконом, ниобозинитом-(Y) (рис. 9а–в). В составе монацита преобладает Ce (33.5–37.4 мас. %), сумма легких РЗЭ – 61.1–67.8 мас. % (табл. 5).

Ксенотим (обр. 40-1, 41-1а, 46-1) формирует небольшие по размерам кристаллы, сростаю-

щиеся с цирконом (рис. 9г), “губчатые” выделения (рис. 9д), вытянутые агрегаты (рис. 9е). Он заполняет пространство между минеральными индивидуумами по типу пойкилобласт и при росте захватывает кварц и мусковит, которые находятся в виде пойкилитовых включений. Содержание Y₂O₃ составляет 43.0, сумма тяжелых РЗЭ – 18.7 мас. % (см. табл. 5).

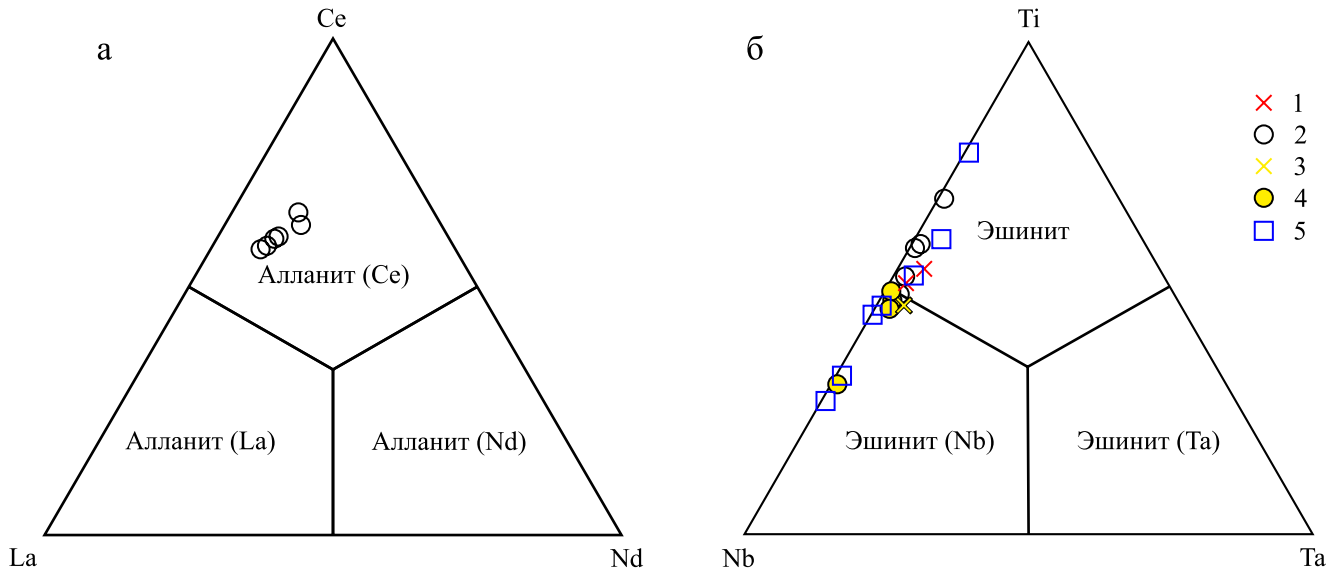


Рис. 8. Диаграммы составов РЗЭ минералов.

а – La-Ce-Nd для алланитов, по (Yavuz, Yildirim, 2018); б – Nb-Ti-Ta для минералов группы эшинита, по (Bermanec et al., 2008). 1, 2 – эшинит-(Y): 1 – из риолитов, 2 – из трахириолитов; 3–5– ниобоэшинит-(Y): 3 – из риолитов, 4 – из трахириолитов, 5 – из аннит-полевошпатовых агрегатов, по (Попова и др., 2019).

Fig. 8. Diagrams of the composition of rock-forming and accessory minerals.

а – La-Ce-Nd for allanites, according to (Yavuz, Yildirim, 2018); б – Nb-Ti-Ta minerals of the aeshinite group, according to (Bermanec et al., 2008). 1, 2 – aeshinite-(Y): 1 – from rhyolite, 2 – from trachyrhyolites; 3–5 – nioboaeshinite-(Y): 3 – from rhyolite, 4 – from trachyrhyolites, 5 – from annite-feldspathic aggregates, according to (Popova et al., 2019).

Таблица 4. Химический состав (мас. %) и формульные коэффициенты алланита

Table 4. Chemical composition (wt %) and formula coefficients of allanite

Компонент	№ обр.						
	41-1a	42-2	45-1a			46-1	
	Трахириолиты						
SiO ₂	31.22	31.77	31.17	30.32	30.52	30.89	30.78
TiO ₂	Н. о.	Н. о.	Н. о.	2.67	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Al ₂ O ₃	16.32	16.58	15.83	15.38	14.88	16.17	16.87
FeO	13.64	13.92	14.00	13.21	14.59	13.05	12.08
MnO	Н. о.	0.61	0.95	1.10	1.11	0.76	0.89
CaO	10.39	10.03	9.64	10.67	10.69	10.06	10.28
La ₂ O ₃	5.93	5.60	6.86	7.30	6.97	6.85	6.00
Ce ₂ O ₃	14.70	14.91	14.76	12.72	12.82	14.31	14.13
Pr ₂ O ₃	1.55	1.51	0.94	Н. о.	Н. о.	0.93	1.24
Nd ₂ O ₃	2.99	2.92	2.54	1.95	2.11	2.59	2.98
Сумма	96.74	97.85	96.69	95.32	93.69	95.61	95.25
	Формульные коэффициенты						
Si	3.22	3.23	3.23	3.12	3.19	3.22	3.20
Ti	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.21	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Al	1.98	1.98	1.93	1.86	1.83	1.99	2.07
Fe ³⁺	1.17	1.18	1.21	1.13	1.27	1.14	1.05
Mn	Н. о.	0.05	0.08	0.10	0.10	0.07	0.08
Ca	1.15	1.09	1.07	1.17	1.20	1.12	1.14
La	0.11	0.10	0.13	0.14	0.13	0.13	0.11
Ce	0.28	0.28	0.28	0.24	0.24	0.27	0.27
Pr	0.03	0.03	0.02	Н. о.	Н. о.	0.02	0.02
Nd	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.06

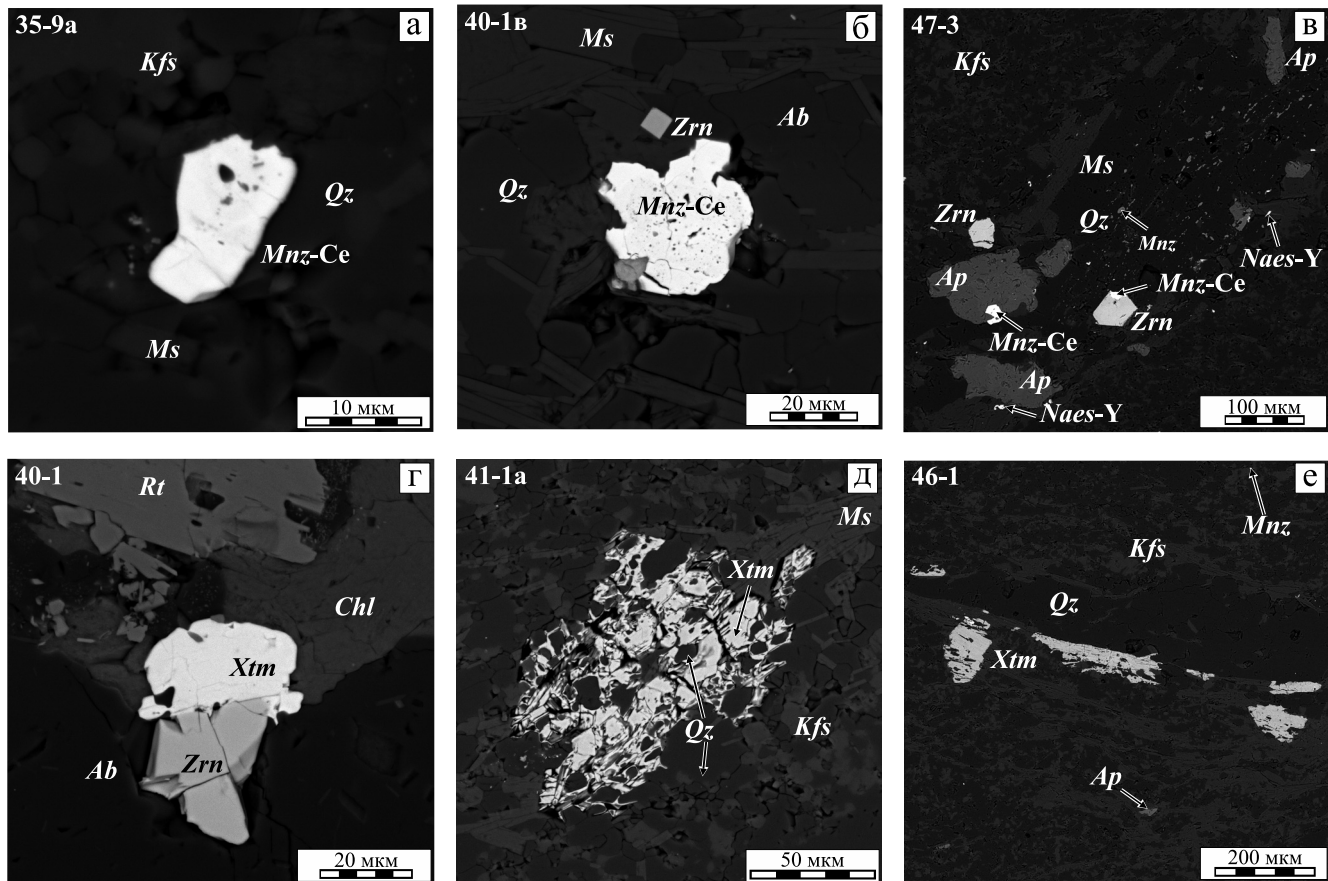


Рис. 9. Примеры агрегатов и кристаллов монацита в риолитах (а–б) и трахириолитах (в) и ксенотима в трахириолитах (г–е). Снимки в обратно рассеянных электронах.

Rt – рутил, *Xtm* – ксенотим.

Fig. 9. Examples of aggregates and crystals of monazite in rhyolites (a–б) and in trachyrhyolites (в) and xenotime in trachyrhyolites (г–е). Backscattered electron images.

Rt – rutile, *Xtm* – xenotime.

Эшинит-(Y) (35-9а, 36-1, 41-3, 45-1а, 46-1, 47-3; рис. 10а–д) и *ниобозэшинит-(Y)* (36-1, 45-1а, 46-1, 47-3; см. рис. 7в, 9в, 10е) наблюдаются в виде мелких игольчатых (до 10 мкм) или более сложной формы (до 50 мкм) выделений в основной массе риолитов и трахириолитов. Ассоциируют с ниобиевым рутилом либо формируют самостоятельные выделения в мусковите.

В эшините-(Y) содержание TiO_2 варьируется от 11 до 29 мас. %, Nb_2O_5 – от 21 до 41 мас. %, концентрация Y_2O_3 – от 8 до 22 мас. %, торий и уран находятся в одинаковых количествах (ThO_2 – 0–8 мас. %, UO_2 – 0–9 мас. %). Содержание суммы редких земель (преимущественно средних и тяжелых) – от 5 до 18 мас. % (табл. 6, см. рис. 8б). В ниобозэшините-(Y) содержание TiO_2 меняется от 19 до 27 мас. %, а Nb_2O_5 – от 26 до 33 мас. %, концентрация Y_2O_3 достигает 16–19 мас. %, торий и уран находятся в равных концентрациях (ThO_2 – 2–3 мас. %, UO_2 – 1–4

мас. %). Содержание суммы редких земель (преимущественно средних и тяжелых) составляет от 9 до 11 мас. % (см. табл. 6, рис. 8б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С учетом изложенного формирование редкометалльно-редкоземельной минерализации в риолитах и трахириолитах саблегорской свиты стало возможно в результате вулканического процесса или метаморфических и метасоматических преобразований. В пользу одного и другого варианта имеются доводы.

Признаки магматического (вулканического) генезиса минерализации: 1) минерализация обнаружена только в риолитах и трахириолитах, отсутствует в риодацитах, дацитах и перекрывающих эти породы кварцитопесчаниках (Никулова, Удотрина, 2021); 2) повышенные кларки редких эле-

Таблица 5. Химический состав (мас. %) и формульные коэффициенты монацита и ксенотима

Table 5. Chemical composition (wt %) and formula coefficients of monazite and xenotime

Компонент	№ обр.						
	35-9а	36-1	40-1в	41-3	47-3	(Xtm) 46-1	
	Риолиты			Трахириолиты			
SiO ₂	0.68	1.13	Н. о.	3.44	1.51	P ₂ O ₅	33.62
TiO ₂	Н. о.	Н. о.	1.73	Н. о.	Н. о.	FeO	0.51
Al ₂ O ₃	Н. о.	Н. о.	Н. о.	1.05	Н. о.	Y ₂ O ₃	42.97
CaO	0.35	Н. о.	0.26	Н. о.	0.79	Gd ₂ O ₃	3.38
P ₂ O ₅	29.77	27.27	28.18	27.76	27.23	Tb ₂ O ₃	1.04
La ₂ O ₃	18.24	16.20	16.62	14.53	18.44	Dy ₂ O ₃	6.97
Ce ₂ O ₃	35.89	36.33	35.16	37.43	33.45	Ho ₂ O ₃	1.17
Pr ₂ O ₃	2.81	3.39	3.19	3.20	2.17	Er ₂ O ₃	3.55
Nd ₂ O ₃	9.18	10.41	9.77	10.57	7.07	Yb ₂ O ₃	2.60
Sm ₂ O ₃	1.50	1.46	1.11	Н. о.	Н. о.	Сумма	95.81
ThO ₂	0.92	2.51	0.96	1.76	4.91	Н. о.	Н. о.
Сумма	99.34	98.70	96.98	99.74	95.57	Н. о.	Н. о.
	Формульные коэффициенты						
Si	0.03	0.04	Н. о.	0.12	0.06	P	1.00
Ti	Н. о.	Н. о.	0.05	Н. о.	Н. о.	Fe	0.01
Al	0.00	Н. о.	0.00	0.04	0.00	Y	0.80
Ca	0.01	Н. о.	0.01	Н. о.	0.03	Gd	0.04
P	1.05	0.99	1.02	0.95	1.01	Tb	0.01
La	0.25	0.23	0.23	0.19	0.26	Dy	0.08
Ce	0.48	0.51	0.49	0.49	0.47	Ho	0.01
Pr	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	Er	0.04
Nd	0.12	0.14	0.13	0.14	0.10	Tm	0.00
Sm	0.02	0.02	0.01	Н. о.	Н. о.	Yb	0.03
Th	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	Н. о.	Н. о.

ментов относительно среднемировых риолитов; 3) отсутствует положительная корреляция Y, Nb, Th, LREE с легкоподвижными петрохимическими компонентами (с Na₂O и K₂O); 4) равномерное распределение и малые размеры рудных минералов.

Признаки метаморфического или метасоматического генезиса: 1) изученные породы изменены в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации и рассланцованы; 2) некоторые рудные минералы локализованы в серицитовых прожилках (маркирующие плоскости рассланцевания); 3) развитие ксенотима в исследованных породах, его можно рассматривать как более позднее, связанное с метаморфизмом; 4) приуроченность пород к разломной зоне с развитыми в ней метасоматитами, несущими U-Th оруденение (аномалии Редка I, II).

Учитывая изложенные выше фактические материалы, можно утверждать, что наличие минералов РЭ и РЗЭ в вулканитах саблегорской свиты обусловлено их связью с веществом плюма, что отражается в обогащении расплавов РЭ, а также степенью фракционной кристаллизации, обуславливающих появление таких фаз, как алланит-(Ce), монацит-(Ce). Последующие процессы зеленокаменного метаморфизма вулканитов могли приводить к перераспределению элементов с образова-

нием новых минеральных фаз, это – эшинит, рутил, ксенотим. Важно отметить, что миграция флюидов в разломных зонах способна вызывать мобилизацию редких и редкоземельных элементов из данных пород с формированием аномалий и рудопроявлений, таких как Редка I и II.

ВЫВОДЫ

Кислые метавулканиты саблегорской свиты, изученные в районе горы Редка на Северном Урале, представлены риолитами, трахириолитами нормальной и субщелочной серий. Они имеют плюм-зависимую природу. Породы изменены в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации и рассланцованы в процессе динамометаморфизма.

Впервые в этих породах установлены минеральные формы нахождения ниобия и редкоземельных элементов: Nb – ниобиевый рутил, Y и HREE – ксенотим, эшинит-(Y), ниобозэшинит-(Y), LREE – алланит, монацит.

Формирование тонковкрапленной и тонкорасеянной минерализации в метавулканитах рассматривается в связи с магматической кристаллизацией, постмагматическим преобразованием пород, метаморфизмом.

Таблица 6. Химический состав (мас. %) и формульные коэффициенты ниобэшинита-(Y) и эшинита-(Y)
Table 6. Chemical composition (wt %) and formula coefficient of niobaeschynite-(Y) and aeschynite-(Y)

Компонент	№ обр.														
	Ниобэшинит-(Y)					Эшинит-(Y)									
	36-1	45-1a	46-1	47-3	47-3	35-9a	35-9a	36-1	41-1a	41-3	45-1a	46-1	46-1	46-1	47-3
	Риолиты					Риолиты					Трахириолиты				
SiO ₂	1.49	8.57	3.92	Н. о.	1.52	3.57	1.33	Н. о.	1.22	Н. о.	1.24	8.66	0.93	Н. о.	3.12
Al ₂ O ₃	Н. о.	1.54	0.72	Н. о.	0.45	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.78	Н. о.	Н. о.	1.43
K ₂ O	0.26	0.53	Н. о.	0.16	Н. о.	Н. о.	0.17	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.19	Н. о.	Н. о.	0.57
CaO	2.11	1.92	2.38	0.91	1.09	1.65	1.03	1.3	1.33	1.44	0.61	1.99	2.28	2.29	1.09
MnO	0.88	Н. о.	0.56	Н. о.	Н. о.	0.68	0.61	1.17	0.73	Н. о.	Н. о.	0.89	Н. о.	0.79	Н. о.
ThO ₂	2.69	4.98	Н. о.	1.94	1.89	2.16	3.39	3.42	1.04	4	6.32	3.17	7.91	3.44	3.92
UO ₃	1.34	2.74	0.89	0.44	0.64	2.82	3.06	3.74	2.98	8.73	3.41	1.49	Н. о.	1.6	1.59
Y ₂ O ₃	18.57	9.56	16.73	21.97	20.24	16.39	18.36	18.41	19.56	17.51	14.29	12.41	7.8	16.34	18.55
Ce ₂ O ₃	Н. о.	2.21	1.06	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	1.07	4.35	Н. о.	Н. о.
Nd ₂ O ₃	0.76	0.87	1.17	0.35	0.39	Н. о.	Н. о.	0.46	1	Н. о.	0.99	1.15	7.26	1.34	0.6
Sm ₂ O ₃	1	0.42	1.32	0.79	0.8	Н. о.	0.72	0.98	0.79	Н. о.	0.91	0.75	2.5	1.12	1.12
Gd ₂ O ₃	1.83	1.08	2.39	2.19	1.31	1.28	1.85	1.7	1.55	Н. о.	2.11	1.47	2.07	1.54	1.36
Dy ₂ O ₃	1.94	1.89	2.85	3.26	3.2	2.43	2.75	3.51	2.6	2.32	5.06	2.28	1.34	2.03	2.45
Er ₂ O ₃	1.69	0.95	1.59	1.52	2.1	Н. о.	1.36	2.44	2.21	1.89	1.95	1.52	Н. о.	1.34	1.49
Yb ₂ O ₃	1.46	1.16	0.9	1.52	2.04	1.26	1.47	1.4	1.88	2.53	1.33	1.16	Н. о.	1.53	1.41
TiO ₂	18.79	14.75	11.31	21.89	21.07	19.13	21.85	26.77	24.97	28.88	27.92	16.35	24.83	20.43	21.57
Nb ₂ O ₅	32.73	26.68	41.25	36.79	36.7	28.46	27.63	25.67	29.01	21.23	27.09	27.34	27.76	32.92	31
Ta ₂ O ₅	5.08	2.43	0.95	1.4	2.24	2.94	5.1	Н. о.	1.32	1.38	Н. о.	2.67	2.27	1.98	3.31
Fe ₂ O ₃	1.64	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	1.55	1.56	1.41	1.02	1.72	1.51	0.36	Н. о.	1.01	1.38
BaO	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	1.28	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Сумма А	94.26	82.28	89.99	95.13	95.68	84.32	92.24	92.38	93.21	91.63	94.74	86.98	91.3	89.7	95.96
Si	0.09	0.5	0.24	Н. о.	0.09	0.22	0.08	Н. о.	0.07	Н. о.	0.07	0.49	0.06	Н. о.	0.17
Al	Н. о.	0.11	0.05	Н. о.	0.03	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.05	Н. о.	Н. о.	0.09
Fe	0.07	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.07	0.07	0.06	0.04	0.08	0.06	0.02	Н. о.	0.05	0.06
Mg	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
K	0.01	0.02	Н. о.	0.01	Н. о.	0.11	0.07	0.08	0.08	0.09	0.04	0.12	Н. о.	0.15	0.06
Ca	0.14	0.12	0.16	0.06	0.07	0.04	0.03	0.06	0.04	Н. о.	Н. о.	0.04	Н. о.	0.16	0.04
Mn	0.05	Н. о.	0.03	Н. о.	Н. о.	0.04	0.03	0.06	0.04	Н. о.	Н. о.	0.04	Н. о.	0.04	Н. о.
Y	0.6	0.3	0.55	0.7	0.61	0.53	0.6	0.6	0.61	0.56	0.43	0.37	0.25	0.55	0.53
Ba	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.03	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Ce	Н. о.	0.05	0.02	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.02	0.1	Н. о.	Н. о.
Nd	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	Н. о.	Н. о.	0.01	0.02	Н. о.	0.02	0.02	0.16	0.03	0.01
Sm	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	Н. о.	0.02	0.02	0.02	Н. о.	0.02	0.01	0.05	0.02	0.02
Gd	0.04	0.02	0.05	0.04	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	Н. о.	0.04	0.03	0.04	0.03	0.02
Dy	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.09	0.04	0.03	0.04	0.04
Er	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	Н. о.	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	Н. о.	0.03	0.03
Yb	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.02	0.02	Н. о.	0.03	0.02
Pb	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Th	0.04	0.07	Н. о.	0.03	0.02	0.03	0.05	0.05	0.01	0.06	0.08	0.04	0.11	0.05	0.05
U	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.05	0.04	0.11	0.04	0.02	Н. о.	0.02	0.02
Сумма А	1.20	1.33	1.28	1.00	1.02	1.14	1.12	1.11	1.08	1.04	0.94	1.36	0.95	1.05	1.14
Ti	0.86	0.65	0.53	0.98	0.9	0.88	1	1.23	1.1	1.32	1.18	0.7	1.14	0.97	0.88
Nb	0.9	0.71	1.16	0.99	0.95	0.78	0.76	0.71	0.77	0.58	0.69	0.7	0.77	0.94	0.76
Ta	0.08	0.04	0.02	0.02	0.03	0.05	0.08	Н. о.	0.02	0.02	Н. о.	0.04	0.04	0.03	0.05
Сумма В	1.84	1.4	1.71	1.99	1.88	1.71	1.84	1.94	1.89	1.92	1.87	1.44	1.95	1.94	1.69
O	5.92	5.39	5.96	5.92	5.78	5.54	5.69	5.91	5.8	3.1	5.61	5.42	5.49	5.83	5.49

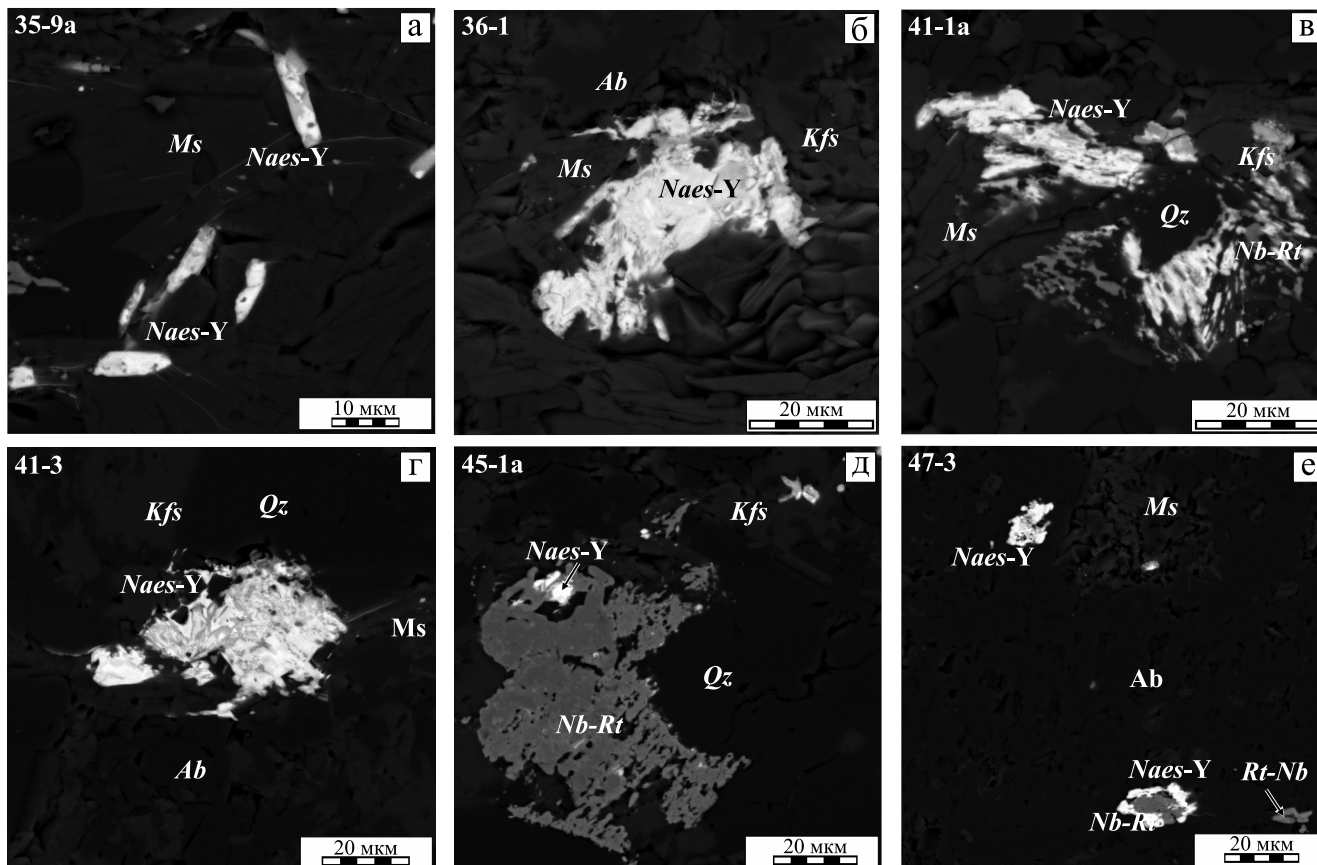


Рис. 10. Формы выделений эшинита-(Y) (а–д) и ниобозэшинита-(Y) (е) в риолитах и трахириолитах (в–е). Снимки в обратно рассеянных электронах.

Более светлые участки отвечают большему обогащению Nb_2O_5 .

Fig. 10. Forms segregations of aeshinite-(Y) (а–д) and niobaeshinite-(Y) (е) in rhyolites and trachyrhyolites (в–е). Backscattered electron images.

Lighter areas correspond to greater enrichment of Nb_2O_5 .

Высказывается предположение о возможности мобилизации Th, U, Y, Nb, РЗЭ из риолитов и трахириолитов в тектонически активных зонах с формированием соответствующих рудопроявлений.

Благодарности

Авторы благодарны ведущему геологу лаборатории петрографии В.А. Капитановой за помощь в оформлении графического материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белякова Л.Т. (1972) Геосинклинальный рифей Севера Урала. Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 27 с.
- 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>
- Григорьев Н.А. (2009) Распределение химических эле-

ментов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 382 с.

- Душин В.А., Сердюкова О.П., Малюгин А.А., Козьмин В.С. и др. (2018) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:200 000 (издание второе). Сер. Северо-Уральская. Лист Р-40-VI (г. Тельпос-Из). Объяснит. записка. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 216 с.

- Душин В.А., Козьмин В.С., Сердюкова О.П., Бурмако П.Л. (2017) Рудоносность Маньхамбовского блока (Приполярный Урал). *Геология и полезные ископаемые Урала и Сибири*. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 196 с.

- Иванов В.Н., Кузенков Н.А., Курзанов И.Ю. и др. (1995) Геологическое доизучение масштаба 1:50 000 Торгово-Патокской площади на территории листов Q-40-131-A, Б, В, Г, 143-A (а, б), Б (а, б) с общими поисками. Комингеолфонд.

- Ильясова Г.А., Останин С.Ю., Михалева Е.Н. и др. (2017). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Изд-е второе. Сер. Северо-Уральская. Лист Р-40-XVIII (Лоп-

- сия). Объяснит. записка. М.: Моск. фил. ФГБУ ВСЕГЕИ, 148 с.
- Кориневский Е.В. (2010) PetroExplorer – новая компьютерная программа для хранения и расчета химических анализов минералов и горных пород. *Тезисы докладов VI Международной школы по наукам о Земле им. Л.Л. Перчука*. Одесса, 63-66.
- Никулова Н.Ю., Удоратина О.В. (2021) Геохимические особенности нижнеордовикских отложений верховья р. Подчерем (Северный Урал). *Вестн. геонаук*, **12**(324), 29-37. <https://doi.org/10.19110/geov.2021.12.3>
- Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импульсные образования. (2008) СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 200 с.
- Попова В.И., Попов В.А., Касаткин А.В., Кузнецов А.М. (2019) Минералы группы эшинита из Вишневых гор (Южный Урал). *Минералогия*, **5**(3), 16-25. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2019-5-3-16-25>
- Соболева А.А. (2004) Вулканиды и ассоциирующие с ними гранитоиды Приполярного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 146 с.
- Сорока Е.И., Рябинин В.Ф., Сазонов В.Н., Червяковский С.Г. (1995) Трансформация пород Малдинского липаритового комплекса под воздействием многоэтапной коллизии. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 142, 97-100.
- Трутнев А.К. (2022) Петрохимические особенности кислотомагматизма саблегорского комплекса (Приполярный Урал). *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении*. Науч. чт. памяти П.Н. Чирвинского: сб. науч. ст. Пермь: ПГНИУ, 265-270.
- Удоратина О.В., Вовчина Т.А., Шуйский А.С., Варламов Д.А. (2022) Ниобозшинит-(Y) в метариолитах саблегорской свиты (Северный Урал). *Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2022)*. Мат-лы Рос. конф. с междунар. уч. Сыктывкар: ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 158-160.
- Холоднов В.В., Шардакова Г.Ю., Душин В.А., Коровко А.В., Шагалов Е.С. (2022) Рифей-венд-кембрийский магматизм Маньхамбовского блока (Приполярный Урал): геохимическая типизация, корректировка геодинамических представлений, роль плюм-литосферного взаимодействия. *Петрология*, **30**(4), 404-431.
- Червяковский С.Г., Иванов В.Н., Курзанов И.Ю. и др. (1992) О возрастной позиции Малопадокского массива гранитоидов на Приполярном Урале и его формационной принадлежности. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 139, 71-74.
- Bermanec V., Tomasic N., Kniewald G., Back M.E., Zagger G. (2008) Nioboaeschninite-(Y), a new member of the aeschninite group from the Bear Lake diggings, Haliburton County, Ontario, Canada. *Canad. Miner.*, **46**(2), 395-402. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.2.395>
- Harris N.B.W., Pearce J.A., Tindle A.G. (1986). Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *Collision Tectonics. Spec. Publ. Geol. Soc.*, 67-81.
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, **25**, 956-983.
- Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineral. Mag.*, **85**(3), 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Yavuz F., Yildirim D. (2018) A Windows program for calculation and classification of epidote-supergroup minerals. *Periodico di Mineralogia*, **87**(3), 269-285.

REFERENCES

- Belyakova L.T. (1972) Geosynclinal Riphean of the Northern Urals. Abstr. of the cand. geol. and min. sci. diss. Moscow, 27 p. (In Russ.)
- Bermanec V., Tomasic N., Kniewald G., Back M.E., Zagger G. (2008) Nioboaeschninite-(Y), a new member of the aeschninite group from the Bear Lake diggings, Haliburton County, Ontario, Canada. *Canad. Miner.*, **46**(2), 395-402. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.2.395>
- Chervyakovskii S.G., Ivanov V.N., Kurzanov I.Yu. (1992) On the Age Position of the Malopatoksky Massif of Granitoids in the Subpolar Urals and Its Formation Affiliation. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 139, 71-74. (In Russ.)
- Dushin V.A., Serdyukova O.P., Malyugin A.A., Koz'min V.S. (2018) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200 000 (Ed. 2nd.). Ser. North Ural. Sheet P-40-VI (Telpos-Iz). Explanatory letter. St.Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory, 216 p. (In Russ.)
- Dushin V.A., Koz'min V.S., Serdyukova O.P., Burmako P.L. (2017) Ore potential of the Man'khambo block (Pripolyarny Urals). *Geology and Mineral Resources of the Urals and Siberia*. Ekaterinburg, UGU Publ., 196 p. (In Russ.)
- Grakova O.V., Popvasev K.S. (2024) Rare-earth minerals in Precambrian rocks of the northern part of the Lyapin anticlinorium (Polar Ural). *Lithosphere (Russia)*, **24**(4), 661-674. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-661-674>
- Grigor'ev N.A. (2009) Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 382 p. (In Russ.)
- Harris N.B.W., Pearce J.A., Tindle A.G. (1986) Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *Collision Tectonics. Spec. Publ. Geol. Soc.*, 67-81.
- Il'yasova G.A., Ostanin S.Yu., Mikhaleva E.N., et al. (2017) State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Second edition. North Ural series. Sheet R-40-XVIII (Lopsiya). Explanatory note. Moscow, Branch of the Federal State Budgetary Institution VSEGEI, 148 p. (In Russ.)
- Ivanov V.N., Kuzenkov N.A., Kurzanov I.Yu. (1995) Geological additional study on a scale of 1:50 000 of the Tortovo-Patokskaya area in the territory of sheets Q-40-131-A, B, C, D, 143-A (a, b), B (a, b) with general searches. Komigeolfond. (In Russ.)
- Kholodnov V.V., Shardakova G.Yu., Dushin V.A., Kоровко А.В., Shagalov E.S. (2022) Riphean-Vendian-Cambrian magmatism of the Man'khambo Block (Polar Urals): geochemical typification, refinement of geodynamic interpretations, role of plume-lithosphere interaction. *Petrologiya*, **30**(4), 404-431. (In Russ.)
- Korinevskii E.V. (2010) PetroExplorer – a new computer program for storing and calculating chemical analyzes of minerals and rocks. *Abstracts of the VI Int. School of Geosciences named after. L.L. Perchuk*. Odessa, 63-66. (In Russ.)
- Nikulova N.Yu., Udoratina O.V. (2021) Geochemical fea-

- tures of the Lower Ordovician deposits at the Podchere-rem River source (Northern Urals). *Vestnik Geonauk*, **12**(324), 29-37. (In Russ.) <https://doi.org/10.19110/geov.2021.12.3>
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, **25**, 956-983.
- Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact rock-assemblages. (2008) St.Petersburg, VSEGEI Publ., 200 p. (In Russ.)
- Popova V.I., Popov V.A., Kasatkin A.V., Kuznetsov A.M. (2019) Aeschynite group minerals from Vishnevye Mountains (South Urals). *Mineralogy*, **5**(3), 16-25. (In Russ.) <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2019-5-3-16-25>
- Soboleva A.A. (2004) Volcanites and associated granitoids of the Polar Ural. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 146 p. (In Russ.)
- Soroka E.I., Ryabinin V.F., Sazonov V.N., Chervyakovskii S.G. (1995) Transformation of rocks of the Maldinsky liparite complex under the influence of a multi-stage collision). *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 142, 97-100. (In Russ.)
- Udoratina O.V., Vovchina T.A., Shuiskii A.S., Varlamov D.A. (2022) Niobeshinite-(Y) in metarhyolites of the Sablegorskaya Formation (Northern Urals). *Modern Problems of Theoretical, Experimental and Applied Mineralogy (Yushkin Readings – 2022)*. Proc. of Russian conference with international participation. Syktyvkar, IG FITs Komi NTs UrO RAN Publ., 158-160. (In Russ.)
- Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Miner. Mag.*, **85**(3), 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Yavuz F., Yildirim D. (2018) A Windows program for calculation and classification of epidote-supergroup minerals. *Periodico di Mineralogia*, **87**(3), 269-285.