Научная статья

https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-4-0
УДК: 549:553.22:552.4 (234.83)

Y-содержащий цирконолит, бадделеит и циркон в магматических породах Полярного Урала (кряж Енганепэ)

О.В. Гракова, К.С. Попвасев

Институт геологии ФИЦ Коми научный центр УрО РАН, ул. Первомайская 54, г. Сыктывкар, 167982 Россия; ovgrakova@geo.komisc.ru

Статья поступила в редакцию 00.00.2026 г., после доработки 00.00.2026 г., принята к печати 00.00.2026 г

Аннотация. В статье представлены результаты минералого-геохимического изучения цирконие-вых минералов в магматических породах кряжа Енганепэ (Полярный Урал). Исследованы слабометаморфизованные риолиты лядгейского комплекса в южной части кряжа и диориты нияюского комплекса в северной. В них установлены Y-содержащий цирконолит, бадделеит и циркон, взаимоотношения которых отражают постмагматическое преобразование Zr-содержащей минерализации. Бадделеит в риолитах содержит 4.21–5.40 мас. % Nb_2O_5 и 0.91–2.10 мас. % HfO_2, в диоритах – 2.46–3.87 мас. % Nb_2O_5 и 0.97–2.02 мас. % HfO_2. Такие содержания не характерны для бадделеита магматических пород нормальной щелочности и могут указывать на участие флюидов, обогащенных высокозарядными элементами. В диоритах впервые обнаружен Y-содержащий цирконолит (6.38 мас. % Y_2O_3, 4.70 мас. % Nb_2O_5, 11.42 мас. % суммы РЗЭ), образующий совместный парагенезис с бадделеитом. Совместное присутствие бадделеита и цирконолита рассматривается как свидетельство образования в локальных кремнедефицитных условиях. На постмагматической стадии при возрастании активности SiO_2 бадделеит и цирконолит замещаются цирконом, образующим реакционные коронарные каймы толщиной 1–5 мкм и прожилки, а по цирконолиту формируется агрегатная кайма циркона и титанита. Новообразованный циркон характеризуется субмикрозернистой, пористой структурой и присутствием неформульных примесей (Ca, Fe, Y, Al, Yb, Nb). Полученные данные позволяют связать последовательную смену Zr-содержащих фаз в ходе постмагматических процессов, прежде всего, с изменением активности SiO_2 во флюидной системе. При относительно низкой активности SiO_2 устойчивы бадделеит и цирконолит, тогда как последующее повышение активности SiO_2 сопровождается их замещением цирконом.

Ключевые слова: циркон, бадделеит, Y-содержащий цирконолит, риолит, диорит, кряж Енганепэ, Полярный Урал.

Финансирование: Исследования выполнены в рамках государственного задания Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, Россия) по темам: «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы» № 122040600012-2 и «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.

Благодарности. Авторы выражают благодарность аналитикам сканирующего электронного микроскопа Е.М. Тропникову и А.С. Шуйскому, а также рецензентам и редакторам журнала за редактирование рукописи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов: О.В. Гракова, К.С. Попвасев – полевые исследования, аналитические исследования, написание рукописного варианта статьи, редактирование рукописи; О.В. Гракова – расчеты кристаллохимических формул, К.С. Попвасев – петрографическое описание шлифов.

Для цитирования. Гракова О.В., Попвасев К.С. Y-содержащий цирконолит, бадделеит и циркон в магматических породах Полярного Урала (кряж Енганепэ). *Минералогия*, 2026, 12(4), 5–27. https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-4-0

Not corrected

Y-bearing zirconolite, baddeleyite and zircon from igneous rocks of the Polar Urals (Enganepe Ridge)

O.V. Grakova, K.S. Popvasev

Institute of Geology, Federal Research Center of the Komi Science Center UB RAS, ul. Pervomayskaya 54, Syktyvkar, 167982 Russia; ovgrakova@geo.komisc.ru

Received 00.00.2026, revised 00.00.2026, accepted 00.00.2026

Abstract. This paper presents the results of mineralogical and geochemical study of Zr minerals of igneous rocks from the Enganepe Ridge (Polar Urals). The study focuses on weakly metamorphosed rhyolite of the Lyadgey complex in the southern part of the ridge and diorite of the Niyayu complex in the northern part. These rocks contain Y-bearing zirconolite, baddeleyite and zircon, the interrelationships of which reflect post-magmatic alteration of Zr-bearing mineralization. Baddeleyite in the rhyolite contains 4.21–5.40 wt. % Nb_2O_5 and 0.91–2.10 wt. % HfO_2, while baddeleyite in the diorite contains 2.46–3.87 wt. % Nb_2O_5 and 0.97–2.02 wt. % HfO_2. These concentrations are atypical of baddeleyite of igneous rocks of normal alkalinity and may indicate the involvement of fluids enriched in high-field-strength elements (HFSEs). The Y-bearing zirconolite (6.38 wt. % Y_2O_3, 4.70 wt. % Nb_2O_5 and 11.42 wt. % ΣREE) was found for the first time in the diorite, where it is associated with baddeleyite. The co-occurrence of baddeleyite and zirconolite is interpreted as evidence of the formation under Si-deficient conditions. During the post-magmatic stage, an increase in SiO_2 activity leads to the replacement of baddeleyite and zirconolite by zircon, which forms the reaction rims 1–5 μm thick and veinlets, whereas zirconolite is surrounded by an aggregate rim consisting of zircon and titanite. The newly formed zircon has a submicrocrystalline porous structure and contains non-stoichiometric trace elements (Ca, Fe, Y, Al, P and light REEs). These findings suggest that the sequential transformation of Zr-bearing phases during the post-magmatic processes is primarily driven by the changes in SiO_2 activity within the fluid system. At the relatively low SiO_2 activity, baddeleyite and zirconolite remain stable, whereas a subsequent increase in SiO_2 activity results in their replacement by zircon.

Keywords: zircon, baddeleyite, Y-bearing zirconolite, rhyolite, diorite, Polar Urals.

Funding. This study was supported by state contracts of the Institute of Geology FRC KMC UB RAS (Syktyvkar, Russia) «Deep Structure, Geodynamic Evolution, Interaction of Geospheres, Magmatism, Metamorphism and Isotope Geochronology of the Timan–Northern Ural Lithospheric Segment» (no. 122040600012-2) and «Evolution of Mineral-Resource Complex of the Timan–Northern Ural–Barents Sea Region Based on Effective Forecasting, Geological Modeling, Geological and Economic Assessment of Resource Potential and New Mineral-Processing Technologies» (no. 122040600011-5).

Acknowledgments. The authors thank E.M. Tropnikov and A.S. Shuisky for scanning electron microscopic studies, as well as the reviewers and editors of the journal for the improvement of the manuscript.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interest related to the manuscript.

Author contributions. O.V. Grakova and K.S. Popvasev – fieldwork, analytical studies, manuscript drafting, manuscript editing; O.V. Grakova – calculation of crystal-chemical formulas; K.S. Popvasev – petrographic description of thin sections.

For citation: Grakova O.V., Popvasev K.S. Y-bearing zirconolite, baddeleyite and zircon from igneous rocks of the Polar Urals (Enganepe Ridge). *Mineralogy*, 2026, 12(4), 5–27. https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-4-0

Оригинал

ВВЕДЕНИЕ

Циркониевые минералы являются информативными индикаторами эволюции магматических и наложенных флюидно-метасоматических процессов, поскольку их устойчивость, состав и парагенетические взаимоотношения чувствительны к активности SiO_2 и составу среды минералообразования. Циркон ($ZrSiO_4$) и бадделеит (ZrO_2) широко используются в петрологии и геохронологии, однако при наложенных метаморфических и метасоматических процессах первичные Zr-содержащие минералы могут частично растворяться, перекристаллизовываться и замещаться новыми фазами, поэтому их морфология, химический состав и парагенетические взаимоотношения требуют совместной интерпретации (Geisler et al., 2007; Putnis, 2009). Особый интерес представляют измененные магматические

комплексы, где сосуществование бадделеита, циркона и цирконолита позволяет проследить смену условий минералообразования.

Цель настоящей работы – охарактеризовать морфологические и геохимические особенности циркона, бадделеита и Y-содержащего цирконолита в породах лядгейского и нияюского комплексов кряжа Енганепэ и на основе их взаимоотношений определить последовательность постмагматических преобразований. Кряж Енганепэ, расположенный в зоне сочленения Полярного Урала и Печорской плиты, представляет интерес для исследования благодаря пространственному совмещению разновозрастных магматических комплексов, испытавших последующие метаморфические и метасоматические преобразования, но взаимоотношения Zr-содержащих фаз в данном районе ранее не рассматривались.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Стратифицированные образования района включают породы верхнего рифея – раннего палеозоя (Государственная…, 2013а[1], 2013б). Наиболее древними являются породы манюкуяхинской свиты (R_3mj), слагающие ядра изъявожской и манюкуяхинской антиклиналей и представленные метаалевропесчаниками, метаалевролитами, кремнисто-глинистыми и углеродисто-кремнистыми сланцами, фтанитами с подчиненными линзами и маломощными прослоями мраморов и кальцифиров. Выше залегает бедамельская серия (R_3-V_2bd), сложенная основными, средними и кислыми вулканитами, сформированными в условиях зрелой энсиалической островной дуги. Докембрийский разрез завершается енганепэйской свитой (V_3-Є$_2$en), сложенной мелководно-морскими ритмично переслаивающимися песчаниками, алевролитами и аргиллитами. Выше с угловым несогласием залегает манитанырдская серия (Є$_3$-O$_1$mn), представленная позднекембрийско-раннеордовикскими терригенными отложениями (рис. 1).

В истории магматизма кряжа Енганепэ фиксируются байкальский и каледоно-герцинский тектоно-магматических цикла. Лядгейский комплекс (λV_2ld) представлен экструзивно-субвулканическими породами андезибазальт-риолитового состава позднего венда. В южной части кряжа Енганепэ широко развиты риолиты и риодациты. U-Pb (SHRIMP-II) возраст риолитов экструзивно-субвулканической фации составляет 555–547 млн лет. Нияюсский комплекс ($\nu\gamma R_3$nj) объединяет плутонические породы плагиогранит-тоналитовой формации позднего рифея. Интрузии комплекса, представленные, преимущественно, гранодиоритами, диоритами, тоналитами и плагиогранитами, прорывают отложения манюкуяхинской свиты в ядре одноименной антиклинали в северной части кряжа Енганепэ. В тоналитах встречаются ксенолиты серпентинитов более древнего енганепэйского гипербазитового комплекса (ΣRF_3e). U-Pb возраст гранодиоритов, определенный по цирконам, составляет 719 ± 10 млн лет.

Как и стратифицированные породы, рассматриваемые магматические комплексы преобразованы в условиях зеленосланцевой фации, что выражается в их рассланцевании, перекристаллизации первичных магматических минералов и образовании кварца, серицита, эпидота, хлорита и карбонатов. Породы сохраняют реликтовые магматические структуры, поэтому далее мы используем термины риолит и диорит, подразумевая их слабометаморфизованные разности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы риолитов для исследований отобраны в южной части кряжа Енганепэ из элювиальных развалов на правом берегу р. Тампико в области переслаивающихся апоалевролитовых, апоаргиллитовых сланцев манюкуяхинской свиты на границе с магматическими образованиями лядгейского комплекса (рис. 1, обр. ЕН-203). Образцы диоритов отобраны в северной части кряжа из элювия на северном склоне г. Маленькая, в левом притоке р. Янаскевлёкталъба в зоне контакта вулканогенных пород бедамельской серии и магматических пород нияюского комплекса (рис. 1, обр. ЕН-238).

Все аналитические исследования выполнены в Центре коллективного пользования «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, Россия). Химический состав и микрофотографии минералов в обратно-рассеянных электронах (BSE) получены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega 3 LMH с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) Oxford Instruments X-Max 50 мм^2 с исполь-

1 Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Листы Q-41-V, VI. Издание второе, ред. А.И. Водолазский (2013б). М., МФ ВСЕГЕИ, ЗАО «МИРЕКО».

not corrected

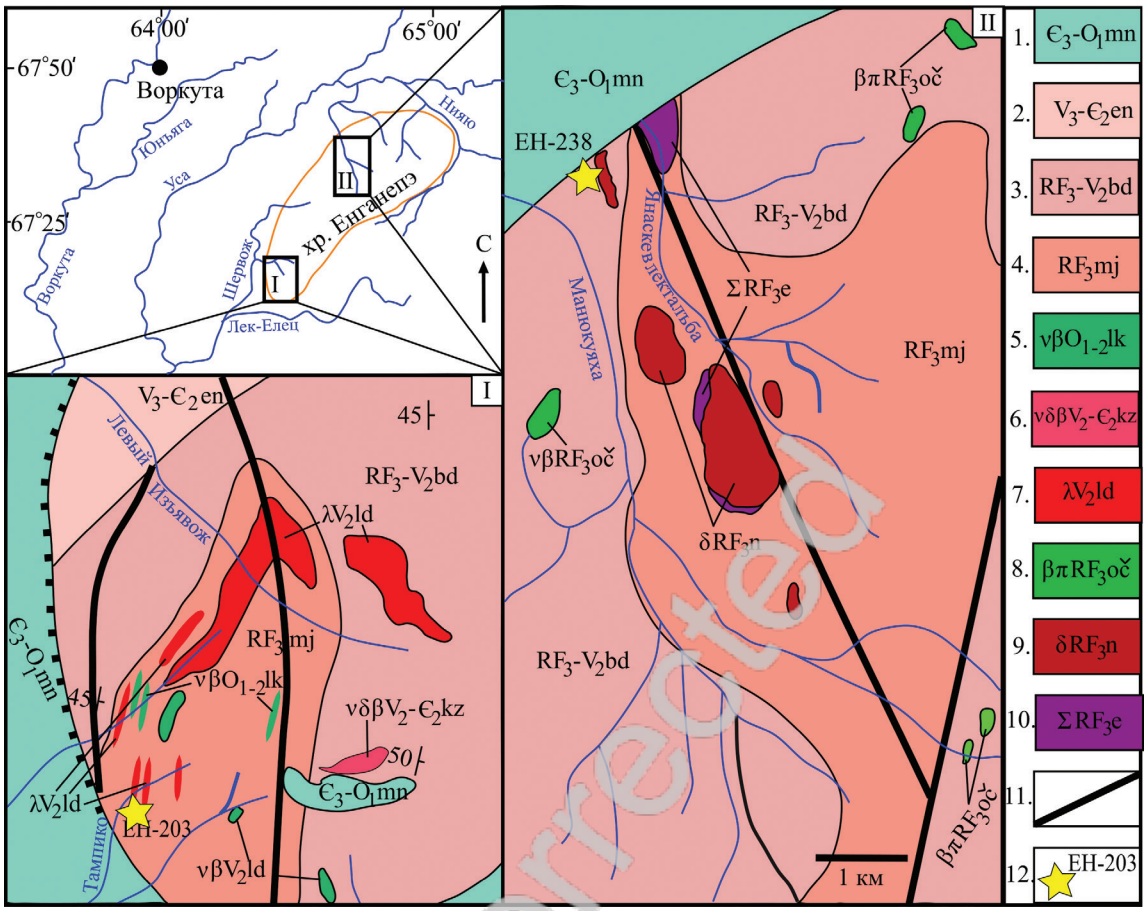


Рис. 1. Схема геологического строения южной (I) и северной (II) частей кряжа Енганепэ, по (Государственная…, 2013а; 2013б).

1 – манитанырдская серия: песчаники, гравелиты, конгломераты, алевролиты, в нижней части базальты; 2 – енганапейская свита: метаосадочные породы, линзы песчанистых известняков, туфопесчаники; 3 – бедамельская серия: туфоконгломераты, туфогравелиты, базальты, андезиты, дациты, риолиты, их кластолавы и туфы; 4 – манюкуяхинская свита: метаалевропесчаники, метаалевролиты, фтаниты, линзы мраморов; 5 – леквожский комплекс: оливиновые габбро и долериты; 6 – кызыгейский комплекс габбро-диоритовый плутонический: диориты, гранодиориты, плагиограниты; 7 – лядгейский комплекс вулканический: экструзивно-субвулканические образования кислого состава; 8 – нижнебедамельский (очетывисский) комплекс: экструзивно-субвулканические образования основного состава; 9 – лядгейский комплекс: риолиты, риодациты; 10 – енганепейский комплекс: гранодиориты, тоналиты, плагиограниты; 11 – разломы; 12 – места отбора и номера образцов.

Fig. 1. Geological structure of the southern (I) and northern (II) parts of the Enganepe Ridge, after (State…, 2013a; 2013b).

1 – Manitanyrd Group: sandstone, gravelite, conglomerate, siltstone and basalt in the lower part; 2 – Enganepe Formation: metasedimentary rocks, sandy limestone lenses, tuffaceous sandstone; 3 – Bedamel Group: tuffaceous conglomerate and gravelite, basalt, andesite, dacite, rhyolite and their clastic lava and tuff; 4 – Manyukuyakha Formation: silty metasandstones, metasiltstone, chert, marble lenses; 5 – Lekvozh complex: olivine gabbro, dolerite; 6 – Kyzygey gabbrodiorite plutonic complex: diorite, granodiorite, plagiogranite; 7 – Lyadgey volcanic complex: felsic extrusive and subvolcanic rocks; 8 – Lower Bedamel (Ochetyv) complex: mafic extrusive and subvolcanic rocks; 9 – Lyadgey complex: rhyolite, rhyodacite; 10 – Enganepe complex: granodiorite, tonalite, plagiogranite; 11 – faults; 12 – sampling locations and sample numbers.

зованием программного обеспечения Aztec (аналитики Е.М. Тропников, А.С. Шуйский). Измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, номинальном диаметре пучка 180 нм и области возбуждения до 2–5 мкм. Энергетическая калибровка спектрометра выполнялась по чистому металлическому кобальту.

Для количественного микроанализа циркона, бадделеита и Y-содержащего цирконолита использовался сертифицированный блок стандартов

not corrected

фирмы Micro-Analysis Consultants Ltd. (Registered Standard No. 8399, Universal 55 Standard Block) и калиброванная база данных Oxford Instruments. В качестве стандартов сравнения и аналитических линий использовались: для Zr – чистый металл Zr (линия $L\alpha_1$); Si – SiO_2 (кварц) и волластонит ($K\alpha_1$); Ti, Fe, Nb, Hf и Y – чистые металлы Ti ($K\alpha_1$), Fe ($K\alpha_1$), Nb ($L\alpha_1$), Hf ($M\alpha_1$) и Y ($L\alpha_1$); Ca – волластонит $CaSiO_3$ и CaF_2 ($K\alpha_1$); Al – Al_2O_3 (корунд, $K\alpha_1$); Na – альбит ($K\alpha_1$); K – ортоклаз ($K\alpha_1$); P – GaP ($K\alpha_1$); Ce – CeO_2 ($L\alpha_1$); La – LaB_6 ($L\alpha_1$); Nd, Sm и Yb – калиброванные стандарты лантаноидов ($L\alpha_1$); Th и U – стандартные эталоны Th и U ($M\alpha_1$). Погрешность единичного определения базовых элементов не превышает 1 отн. % (σ = 0.05–0.25 мас. %). Пределы обнаружения элементов (критерий 2σ) составили для петрогенных компонентов – 0.1–0.2 мас. %, для высокозарядных и тяжелых элементов (Nb_2O_5, HfO_2, Y_2O_3, оксидов РЗЭ, ThO_2, UO_3) – 0.2–0.5 мас. %.

Кристаллохимические формулы минералов рассчитывались по методике (Булах и др., 2014). Формулы циркона рассчитаны катионным методом (Si + Al + P + Ti + Nb = 1), бадделеита (O = 2) и цирконолита (O = 7) – кислородным методом. Обозначения минералов на рисунках приняты в соответствии с рекомендациями (Warr, 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Петрографическая характеристика пород

Риолиты имеют массивную текстуру и микролепидогранобластовую структуру основной массы, в которой сохраняются первичные магматические структуры – фельзитовая, микрографичская и сферолитовая (рис. 2а, б). В минеральном составе установлены кварц (~30 %), плагиоклаз (~30 %), калиевый полевой шпат (~30 %) и серицит (~10 %). Полевые шпаты представлены корродированными вкрапленниками с мезопертитовыми структурами распада, а также микролитами и радиально-лучистыми кварц-полевошпатовыми срастаниями. Кварц представлен оплавленными фенокристами и ксеноморфными зернами в интерстициях полевых шпатов. В качестве акцессорных минералов установлены циркон, апатит и ильменит. Апатит представлен удлиненно-призматическими кристаллами размером до 0.1 мм, расположенными в полевошпатовых агрегатах. Ильменит образует мелкие уплощенные и ксеноморфные зерна.

Диориты характеризуются бластокатакластической структурой (рис. 2в, г). Минеральный состав породы представлен амфиболом (~35–40 %), соссюритизированым плагиоклазом альбит-олигоклазового состава ($An_{0–15}$, ~30 %), кварцем (~15 %), хлоритом (~10–15 %) и эпидотом (~5–8 %). Амфибол замещается хлоритом по краям и трещинам. Кварц образует ксеноморфные зерна размером до 0.5 мм в интерстициях между плагиоклазом и амфиболом. Эпидот образует включения в плагиоклазе и прожилковые агрегаты в ассоциации с хлоритом и кальцитом. Акцессорные минералы представлены цирконом, апатитом, титанитом, алланитом, ильменитом, рутилом и калиевым полевым шпатом. Апатит образует короткопризматические кристаллы в амфиболе и плагиоклазе. Титанит представлен в виде ксеноморфных зерен, образующих каймы вокруг циркона. Алланит образует призматические зерна с выраженным коричнево-бурым плеохроизмом. Ильменит присутствует в виде таблитчатых зерен, замещаемых титанитом по периферии, а рутил – в виде мелких призматических кристаллов и зерен неправильной формы. Калиевый полевой шпат встречается в виде редких мелких интерстициальных зерен.

Морфология и химический состав циркониевых минералов

Бадделеит в риолите представлен удлиненными зернами размером 20–40 мкм с неровными границами (рис. 3а). По периферии зерен развиты каймы циркона толщиной 1–5 мкм (рис. 3а–е), который также развивается по трещинам (рис. 3б, г). Зерна бадделеита располагаются среди кварца, полевых шпатов и слюдистых агрегатов. Химический состав минерала близок к стехиометрическому ZrO_2, но содержит Nb, Hf и Fe (табл. 1). В бадделеите из риолита содержание Nb_2O_5 составляет 4.21–5.40 мас. %, HfO_2 – 0.91–2.10 мас. %, FeO – 0.50–0.86 мас. %; TiO_2 определен в части анализов в количестве 0.28–0.49 мас. %; содержание SiO_2 в отдельных анализах может частично отражать вклад окружающих силикатных фаз.

В диорите бадделеит встречается как в виде кристаллов с удлиненными сечениями (рис. 4а), так и в виде ксеноморфных зерен размером 10–40 мкм, окруженных цирконовой каймой толщиной 1–5 мкм (рис. 4б–г). Циркон также развивается вдоль трещин (рис. 4б) и местами почти полностью замещает бадделеит (рис. 4г). По сравнению с бадде-

not corrected

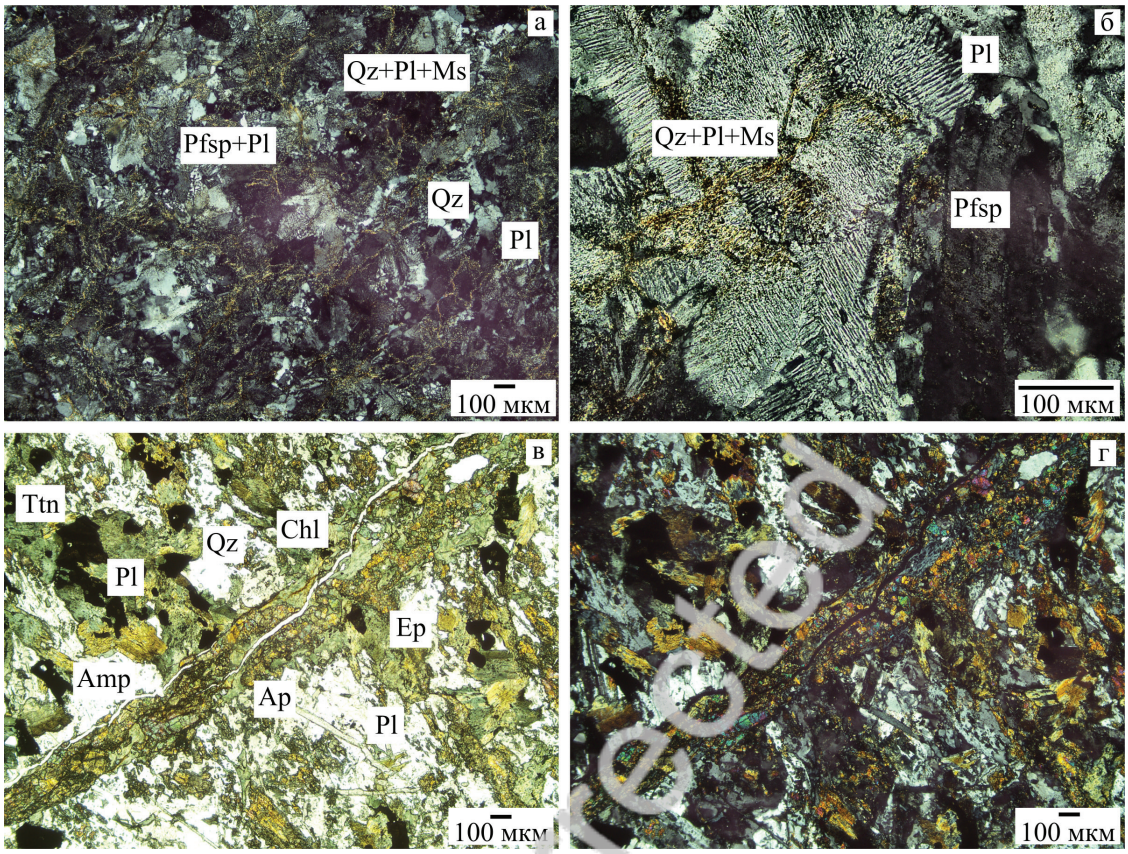


Рис. 2. Структуры изученных образцов риолита (а, б) и диорита (в, г) кряжа Енганепэ: а, б – фенокристы и ксеноморфные зерна кварца, корродированные вкрапленники полевого шпата и радиально-лучистые кварц-полевошпатовые срастания; в, г – соссюритизированный плагиоклаз, амфибол, замещающийся хлоритом, ксеноморфные зерна кварца и эпидот, образующий включения в плагиоклазе и прожилковые агрегаты в ассоциации с хлоритом.

Фото 2а, б, г – с анализатором; 2в – без анализатора.

Fig. 2. Structures of studied rhyolite and diorite samples of the Enganepe Ridge: а, б – phenocrysts and anhedral quartz grains, corroded feldspar phenocrysts and radial quartz-feldspar intergrowths; в, г –saussuritized plagioclase, amphibole replaced by chlorite, anhedral quartz grains and epidote as inclusions in plagioclase and veinlets associated with chlorite.

Figures 2а, б, г – crossed polars; Fig. 2в – parallel polars.

not corrected

леитом из риолита в бадделеите из диорита содержание HfO_2 примерно такое же (0.97–2.02 мас. %), содержание Nb_2O_5 ниже (2.46–3.87 мас. %), а содержание FeO (0.51–1.74 мас. %) и TiO_2 (0.68–2.46 мас. %) выше; в единичных анализах присутствует Y_2O_3 (1.01 мас. %) (табл. 1).

Цирконолит в виде отдельных мелких зерен размером до 30 мкм обнаружен только в диорите (рис. 4и). Вокруг зерен цирконолита установлена кайма циркона толщиной 2–3 мкм и титанита толщиной 1–2 мкм. Химический состав минерала, мас. %: 29.34 ZrO_2, 25.97 TiO_2, 9.08 FeO, 4.7 Nb_2O_5, 3.74 CaO, 6.38 Y_2O_3, 4.6 Ce_2O_3, 1.11 La_2O_3, 4.8 Nd_2O_3, 0.91 Sm_2O_3, 0.96 ThO_2, сумма определенных оксидов составляет около 91.6 мас. %. Повышенное содержание Y позволяет диагностировать минерал как Y-содержащий. Кристаллохимическая формула минерала: $(Ca_{0.30}Y_{0.26}Nb_{0.17}Ce_{0.12}Nd_{0.12}La_{0.04}Sm_{0.04}Th_{0.02})_{1.07}Zr_{1.04}(Ti_{1.43}Fe_{0.57})_{2.00}O_7$.

Циркон в риолите образует коронарные структуры вокруг бадделеита, а также выполняет пространства между его зернами. В единичных случаях ассоциирует с ильменитом (рис. 3б). В диорите отмечаются как коронарные структуры вокруг бадделеита и Y-содержащего цирконолита, так и отдельные трещиноватые кристаллы (рис. 4д) и сильно раздробленные более «гладкие» (рис. 4е) и более трещиноватые – пористые (4з) агрегаты ,а также обрастание кристалла кварца и амфибола (рис. 4ж).

В химическом составе циркона из риолита помимо (мас. %) ZrO_2 (60.09–65.78) и SiO_2 (28.54–34.57) постоянно фиксируются HfO_2 (1.16–1.82), в

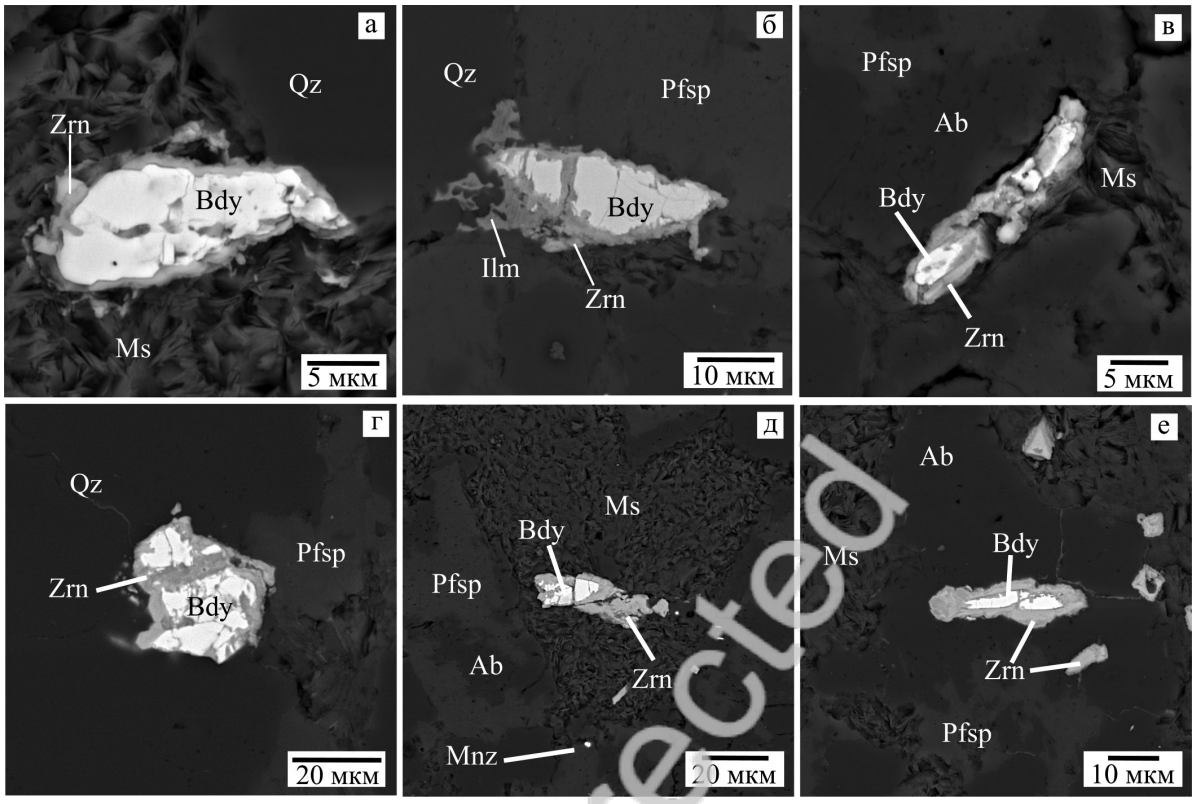


Рис. 3. Морфология бадделеита и циркона в риолите кряжа Енганепэ: а – зерно бадделеита (Bdy) с каймой циркона (Zrn) в кварц (Qz)-мусковитовом (Ms) агрегате; б, г – зерна бадделеита с каймой и прожилками циркона и включениями ильменита (Ilm) (б) в кварц-полевошпатовом матриксе; в, д, е – зерна бадделеита с каймой циркона в ассоциации с мусковитом, калиевым полевым шпатом (Pfsp) и альбитом (Ab) и монацитом (Mnz).

Fig. 3. Morphology of baddeleyite and zircon in rhyolite from the Enganepe Ridge: a – baddeleyite (Bdy) grain with a zircon (Zrn) rim in quartz (Qz)–muscovite (Ms) aggregate; б, г – baddeleyite grains with zircon rims and veinlets and ilmenite (Ilm) inclusions (б) in quartz–feldspar matrix; в, д, е – baddeleyite grains with zircon rims in assemblages with muscovite, K-feldspar (Pfsp), albite (Ab) and monazite (Mnz).

части анализов установлены FeO (0.27–0.75), CaO (0.20), TiO_2 (0.38), Y_2O_3 (2.35–2.43), Al_2O_3 (3.09), Na_2O (0.37), K_2O (0.56) и Yb2O3 (0.85) (табл. 2). В цирконе из диорита помимо основных компонентов (мас. %) ZrO_2 (61.30–63.66) и SiO_2 (31.17–33.27), также постоянно присутствует HfO2 (1.33–1.70). Состав примесей отличается: содержание FeO (0.83–5.59), CaO (0.37–1.82) и TiO_2 (1.04) выше, а Al_2O_3 (1.01) – ниже, здесь также фиксируется Nb_2O_5 (1.17). Для пористых и неоднородных зерен часть этих элементов может быть связана с микровключениями, синтаксическими врастками или вкладом соседних фаз в область возбуждения, поэтому элементы-примеси интерпретируются с осторожностью.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование циркониевых минералов из магматических пород хр. Енганепэ (Полярный Урал) выявило их отличия в парагенезисе, морфологии и составе в зависимости от характера наложенных процессов. Совокупность морфологических и химических характеристик бадделеита, Y-содержащего цирконолита и циркона позволяет предполагать их постмагматическое преобразование. Признаками наложенного преобразования являются каймы и прожилки циркона по более ранним Zr-содержащим фазам; химические различия между отдельными анализами рассматриваются как вспомогательный критерий.

Бадделеит. В обоих типах пород зерна бадделеита, окруженные каймой циркона (рис. 3, 4), указывают на то, что бадделеит существовал до

Not corrected

Таблица 1. Химический состав бадделеита из риолита и диорита кряжа Енганепэ, мас. %
Table 1. Chemical composition of baddeleyite from rhyolite and diorite of the Enganepe Ridge, wt. %

№ ан.	№ пробы	ZrO_2	Nb_2O_5	HfO_2	SiO_2	TiO_2	FeO	Сумма	Кристаллохимическая формула
Бадделеит из риолита									
1	ЕН-203	92.80	4.35	1.76	–	0.28	0.52	99.71	$(Zr_{0.93}Nb_{0.04}Fe_{0.01}Hf_{0.01})_{0.99}O_2$
2	ЕН-203	92.15	4.36	2.03	–	0.46	0.51	99.51	$(Zr_{0.93}Nb_{0.04}Ti_{0.01}Fe_{0.01}Hf_{0.01})_{0.99}O_2$
3	ЕН-203	93.83	4.83	0.91	–	0.49	0.77	100.83	$(Zr_{0.93}Nb_{0.04}Ti_{0.01}Fe_{0.01}Hf_{0.01})_{1.00}O_2$
4	ЕН-203	88.15	4.21	1.91	2.14	0.46	0.68	97.97	$(Zr_{0.88}Nb_{0.04}Si_{0.08}Ti_{0.01}Fe_{0.01}Hf_{0.01}Al_{0.01})_{1.00}O_2$
5	ЕН-203	89.91	4.75	2.05	1.20	0.42	0.50	98.83	$(Zr_{0.90}Nb_{0.04}Si_{0.02}Ti_{0.01}Fe_{0.01}Hf_{0.01})_{1.00}O_2$
6	ЕН-203	92.96	5.40	0.98	–	–	0.69	100.03	$(Zr_{0.93}Nb_{0.05}Fe_{0.01}Hf_{0.01})_{0.99}O_2$
7	ЕН-203	91.29	5.31	2.10	0.57	–	0.86	100.13	$(Zr_{0.91}Nb_{0.05}Fe_{0.01}Hf_{0.01}Si_{0.01})_{1.00}O_2$
Бадделеит из диорита									
8	ЕН-238Б	94.58	2.46	0.97	–	0.68	1.74	100.68	$(Zr_{0.94}Fe_{0.03}Nb_{0.02}Ti_{0.01}Hf_{0.01}Ca_{0.01})_{1.01}O_2$
9	ЕН-238Б	88.87	2.48	2.02	–	2.46	0.48	97.33	$(Zr_{0.91}Ti_{0.04}Nb_{0.02}Fe_{0.01}Hf_{0.01}Y_{0.01})_{1.00}O_2$
10	ЕН-238Б	94.36	2.89	1.47	–	2.12	0.51	101.35	$(Zr_{0.92}Nb_{0.03}Ti_{0.03}Fe_{0.01}Hf_{0.01})_{1.00}O_2$
11	ЕН-238Б	90.36	3.87	1.49	–	2.08	1.25	99.06	$(Zr_{0.90}Nb_{0.04}Ti_{0.03}Fe_{0.02}Hf_{0.01})_{1.00}O_2$
12	ЕН-238Б	95.55	3.24	1.43	–	0.68	0.52	101.43	$(Zr_{0.94}Nb_{0.03}Ti_{0.01}Fe_{0.01}Hf_{0.01})_{1.00}O_2$

Примечание. Бадделеит содержит 0.42 мас. % Al_2O_3 (ан. 4), 0.25 мас. % CaO (ан. 8) и 1.01 мас. % Y_2O_3 (ан. 9).
Note. Baddeleyite contains 0.42 wt. % Al_2O_3 (an. 4), 0.25 wt. % CaO (an. 8), and 1.01 wt. % Y_2O_3 (an. 9).

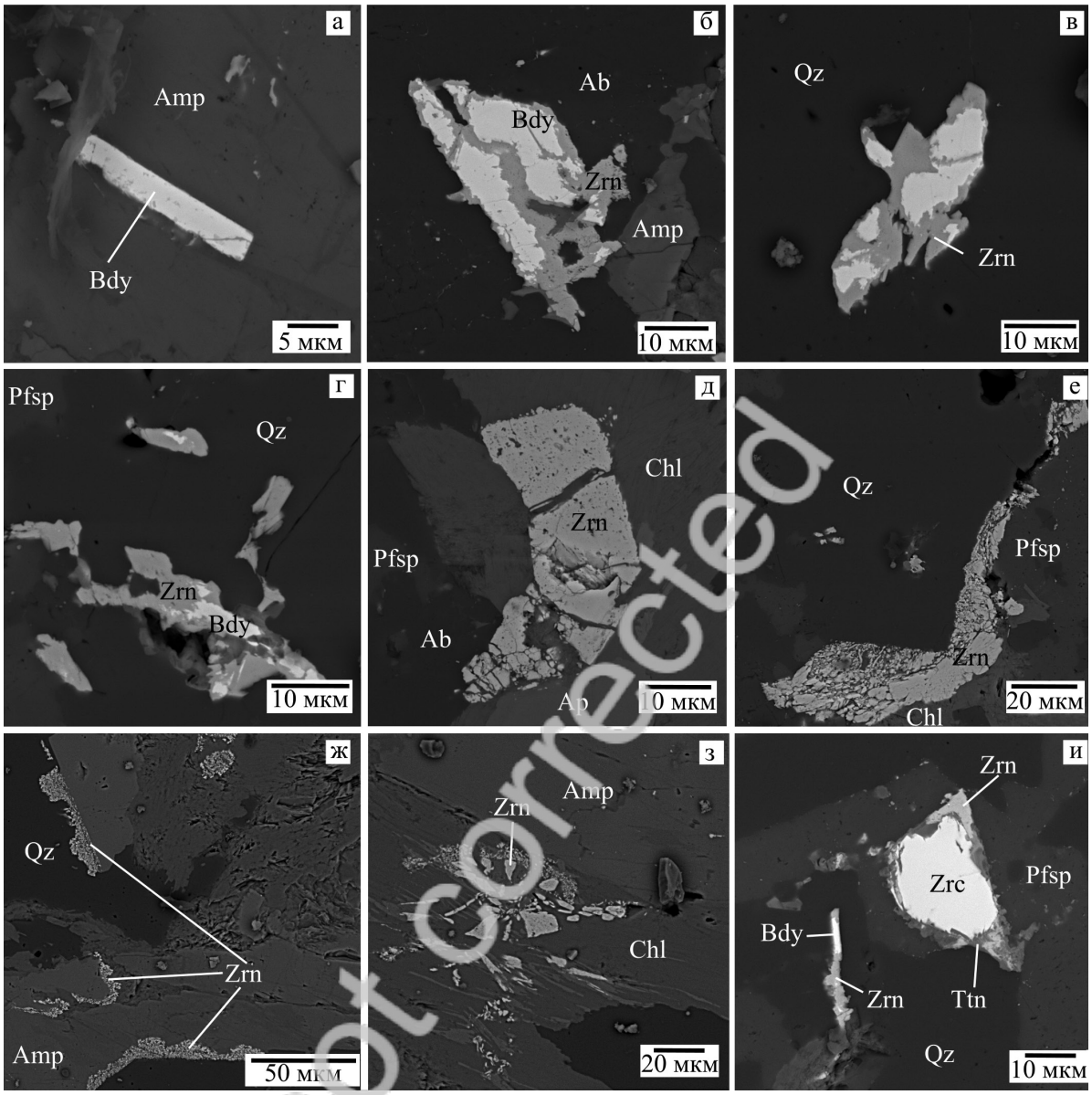
Таблица 2. Химический состав циркона из риолита и диорита кряжа Енганепэ, мас. %
Table 2. Chemical composition of zircon from rhyolite and diorite of the Enganepe Ridge, wt. %

№ ан.	№ пробы	ZrO_2	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	FeO	Y_2O_3	HfO_2	Сумма	Кристаллохимическая формула
Циркон из риолита												
1	ЕН-203	60.09	28.54	3.09	0.56	0.20	0.38	0.75	2.43	1.16	98.41	$(Zr_{0.90}Y_{0.04}K_{0.02}Fe_{0.02}Ca_{0.01}Na_{0.01}Hf_{0.01}Yb_{0.01})_{1.02}[(Si_{0.88}Al_{0.06}Ti_{0.01})_{0.94}O_4]$
2	ЕН-203	62.91	34.57	–	–	–	–	0.27	–	1.40	99.15	$(Zr_{0.89}Fe_{0.01}Hf_{0.01})_{0.91}[Si_{1.00}O_4]$
3	ЕН-203	63.12	31.54	–	–	–	–	0.38	2.35	1.82	99.22	$(Zr_{0.98}Y_{0.04}Fe_{0.01}Hf_{0.02})_{1.05}[Si_{1.00}O_4]$
4	ЕН-203	65.78	32.20	–	–	–	–	–	–	1.20	99.18	$(Zr_{0.99}Hf_{0.01})_{1.00}[Si_{1.00}O_4]$
Циркон из диорита												
5	ЕН-238Б	63.59	33.27	–	–	0.37	–	–	–	1.50	98.74	$(Zr_{0.93}Ca_{0.01}Hf_{0.01})_{0.95}[Si_{1.00}O_4]$
6	ЕН-238Б	63.66	32.10	–	–	–	–	1.09	–	1.40	98.24	$(Zr_{0.97}Fe_{0.03}Hf_{0.01})_{1.01}[Si_{1.00}O_4]$
7	ЕН-238Б	61.52	31.17	–	–	–	–	5.59	–	1.70	101.15	$(Zr_{0.95}Fe_{0.14}Y_{0.05}Hf_{0.02})_{1.11}[(Si_{0.98}Nb_{0.02})_{1.00}O_4]$
8	ЕН-238Б	61.30	32.60	1.01	–	1.82	1.04	0.83	–	1.33	99.93	$(Zr_{0.86}Ca_{0.06}Fe_{0.02}Hf_{0.01})_{0.95}[(Si_{0.94}Al_{0.02}\ Ti_{0.02})_{0.98}O_4]$

Примечание. Циркон содержит 0.37 мас. % Na_2O и 0.85 мас. % Yb_2O_3 (ан. 1) и 1.17 мас. % Nb_2O_5 (ан. 7).
Note. Zircon contains 0.37 wt. % Na_2O and 0.85 wt. % Yb_2O_3 (an. 1) and 1.17 wt. % Nb_2O_5 (an. 7).

образования замещающего его циркона. Содержание Nb_2O_5 достигает 5.40 мас. % в бадделеите из риолита и 3.87 мас. % – в бадделеите из диорита, а содержание HfO_2 составляет 2.10 и 2.02 мас. %, соответственно. Магматический бадделеит из пород нормальной щелочности обычно содержит 0.1–1.3 мас. % Nb (Здорик, 1989; Баянова, 2006), поэтому повышенные содержания Nb в бадделеите могут указывать на постмагматические метасоматические изменения с привносом высокозарядных элементов (Zr, Nb и других).

not corrected



not corrected

Рис. 4. Морфология и ассоциации циркониевых минералов в диорите кряжа Енганепэ: а – призматический кристалл бадделеита в ассоциации с амфиболом (Amp); б – зерно бадделеита с каймой и прожилками циркона в амфибол-альбитовом матриксе; в, г – зерна бадделеита, почти полностью замещенные цирконом в кварце; д – трещиноватое зерно циркона с неравномерной внутренней структурой в ассоциации с хлоритом (Chl), альбитом, апатитом (Ap) и калиевым полевым шпатом; е – «гладкие» сильно раздробленные агрегаты циркона в хлорит-полевошпатовом матриксе; ж – обрастание кристалла кварца и амфибола цирконом; з – трещиноватые пористые агрегаты циркона в хлорит-амфиболовом матриксе; и – зерно Y-содержащего цирконолита (Zrc) с каймой циркона и титанита (Ttn) в полевошпат-кварцевом матриксе.

Fig. 4. Morphology and assemblages of Zr minerals in diorite of the Enganepe Ridge: a – prismatic baddeleyite crystal associated with amphibole (Amp); б – baddeleyite grain with zircon rim and veinlets in amphibole-albite matrix; в, г – baddeleyite grains almost completely replaced by zircon in quartz; д – fractured zircon grain with heterogeneous inner structure in assemblage with chlorite (Chl), apatite (Ap) and K-feldspar; e – “smoother” highly fragmented zircon aggregates in chlorite-feldspar matrix; ж – zircon overgrowing quartz and amphibole crystals; з – fractured porous zircon aggregates in chlorite-amphibole matrix; и – Y-bearing zirconolite (Zrc) grain with zircon and titanite (Ttn) rim in feldspar-quartz matrix.

Цирконолит – типичный минерал магматических, метаморфических и метасоматических пород (Williams, Gieré, 1996; Gieré et al., 1998). В первом случае цирконолит встречается в ультраосновных, основных и карбонатитовых комплексах с низкой активностью кремнезема, например, в островодужных габброидах массива Аю-Даг в Крыму (Спиридонов и др., 2018) и расслоенных базит-гипербазитах Южного Урала (Ковалев, Ковалев, 2023). Метасоматический цирконолит описан в мраморизованных скарнах контактового ореола Бергелля на границе Швейцарии и Италии (Gieré, 1986), Y-содержащий – в минеральных ассоциациях свинцово-цинкового месторождения Коберга (Швеция) (Zakrzewski et al., 1992), а также в сапфириновом гранулите Восточной Антарктиды (Harley, 1994).

На Урале цирконолит установлен в щелочных пегматитах Вишнёвых гор (Попов и др., 2018), а Y-обогащенный цирконолит описан в жилах карбонатит-пегматитов и слюдит-пегматитов ультрамафитового тела копи № 97 Ильменских гор (Попов и др., 2020). В ультрамафитах Уфалейского блока охарактеризованы продукты преобразования бадделеита, включающие циркон и цирконолит (Белковский, Нестеров, 2016). В скарнах и связанных с ними породах Шишимских копей описаны парагенезисы с участием цирконолита, бадделеита и циркона в тесной ассоциации с титанитом, перовскитом и ильменитом (Попов, Рассомахин, 2023).

Условия образования минералов Zr. Формирование Y–РЗЭ-обогащенного цирконолита в дифференцированных кислых породах возможно в условиях резкого падения локальной активности SiO_2 при сохранении подвижности Ca, Ti и HFSE (Belkin, Macdonald, 2021). Бадделеит и Y-содержащий цирконолит в породах кряжа Енганепэ образовались одновременно из растворов, содержащих Zr, Ti, Ca, Y, Nb и РЗЭ.

Ключевым параметром, определяющим устойчивость различных Zr-содержащих фаз, является активность SiO_2. В природных магматических системах изменение активности SiO_2 может сопровождаться закономерной сменой бадделеита и цирконолита цирконом (Belkin, Macdonald, 2021). На ранней (магматической) стадии относительно низкая активность SiO_2 могла создавать благоприятные условия для образования Zr–Ti-содержащих фаз, включая цирконолит. Формирование локальной кремнедефицитной среды могло быть связано с взаимодействием флюидов с вмещающими породами. Последующее изменение условий характеризуется увеличением активности SiO_2, что привело к образованию циркона по реакции $ZrO_2 + SiO_2 = ZrSiO_4$ (Wingate, 2001; Баянова, 2006; Harlov, 2015), который замещает бадделеит и цирконолит (рис. 3, 4). В исследованных породах это фиксируется каймами и прожилками циркона по бадделеиту и каймой циркона по Y-содержащему цирконолиту (рис. 3, 4). Такие текстуры согласуются с механизмом растворения–переотложения на границе минерал–флюид (Putnis, 2009).

Таким образом, образование циркона в исследованных породах можно интерпретировать как продукт поздней гидротермальной переработки более ранних минералов Zr. Важно отметить, что замещение бадделеита и Y-содержащего цирконолита протекало синхронно. В обоих случаях циркон характеризуется присутствием неформульных элементов (Fe, Ca, Y и др.), микропористой текстурой и дефицитом сумм анализов, что может быть связано с присутствием воды (OH-групп) в его структуре (Hoskin, Schaltegger, 2003; Geisler et al., 2007).

ВЫВОДЫ

Исследование циркониевой минерализации в магматических породах кряжа Енганепэ (Полярный Урал) выявило ее полистадийное образование. Эволюция флюидной системы определяла состав, парагенетические взаимоотношения и морфологические особенности Zr-содержащих минералов. В риолитах и диоритах установлен бадделеит, химический состав и текстурные взаимоотношения которого позволяют предполагать его постмагматическое, возможно, метасоматическое происхождение. В диоритах также установлен Y-содержащий цирконолит. Парагенетические взаимоотношения бадделеита и Y-содержащего цирконолита с цирконом свидетельствуют о смене условий минералообразования, в частности, возможном увеличении активности SiO_2 на постмагматической стадии. Каймы и прожилки циркона по бадделеиту, а также кайма циркона и титанита по Y-содержащему цирконолиту фиксируют реакционное взаимодействие исходных минералов с флюидом. Наиболее конкретным индикатором эволюции системы является последовательность бадделеит/Y-содержащий цирконолит – циркон.

not corrected

ЛИТЕРАТУРА

Баянова Т.Б. (2006) Бадделеит – перспективный геохронометр щелочного и базитового магматизма. *Петрология*, 14(2), 203–216.

Белковский А.И., Нестеров А.Р. (2016) Бадделеитовая минерализация ультрамафитовых пород Главного уральского коллизионного шва (Уфалейский метаморфический блок, Средний Урал). *Минералогия*, (2), 44–52.

Булах А.Г., Золотарёв А.А., Кривовичев В.Г. (2014) Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов. СПб, СПбГУ, 133 с.

Здорик Т.Б. (1989) Бадделеит / Типоморфизм минералов: справочник. М., Недра, 62–68.

Ковалев С.Г., Ковалев С.С. (2023) Первые данные о Th–REE минерализации в магматических породах основного-ультраосновного состава западного склона Южного Урала. *Георесурсы*, 25(1), 95–107. https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.10

Попов В.А., Попова В.И., Блинов И.А., Котляров В.А. (2018) Цирконолит из щелочных пегматитов Вишнёвых гор: первые находки на Южном Урале. *Минералогия*, 4(3), 3–7.

Попов В.А., Рассомахин М.А. (2023) Парагенезисы минералов в скарнах Шишимской копи на Южном Урале. *Минералогия*, 9(1), 23–44. https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-1-2

Попов В.А., Рассомахин М.А., Колисниченко С.В. (2020) Уникальное проявление поляковита-(Ce) в Ильменских горах, Южный Урал – новые находки. *Минералогия*, 6(1), 17–32. https://doi.org/10.35597/2313-545X-2020-6-1-2

Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Семиколенных Е.С., Коротаева Н.Н., Кривицкая Н.Н. (2018) Цирконолит, бадделеит, циркон и торит островодужных кварцевых габбро-норит-долеритов интрузива Аю-Даг (Горный Крым). *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*, (5), 70–78.

Belkin H.E., Macdonald R. (2021) Zirconium-bearing accessory minerals in UK Paleogene granites: textural, compositional, and paragenetic relationships. *European Journal of Mineralogy*, 33(5), 537–570. https://doi.org/10.5194/ejm-33-537-2021

Geisler T., Schaltegger U., Tomaschek F. (2007) Re-equilibration of zircon in aqueous fluids and melts. *Elements*, 3(1), 43–50. https://doi.org/10.2113/gselements.3.1.43

Gieré R. (1986) Zirconolite, allanite and hoegbomite in a marble skarn from the Bergell contact aureole: implications for mobility of Ti, Zr and REE. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 93, 459–470. https://doi.org/10.1007/BF00371716

Gieré R., Williams C.T., Lumpkin G.R. (1998) Chemical characteristics of natural zirconolite. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 78(3), 433–459. https://doi.org/10.5169/seals-59299

Harley S.L. (1994) Mg-Al yttrian zirconolite in a partially melted sapphirine granulite, Vestfold Hills, East Antarctica. *Mineralogical Magazine*, 58(391), 259–269. https://doi.org/10.1180/minmag.1994.058.391.08

Harlov D.E. (2015) Fluids and geochronometers: charting and dating mass transfer during metasomatism and metamorphism. *Journal of the Indian Institute of Science*, 95, 109–124.

Hoskin P.W.O., Schaltegger U. (2003) The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 27–62. https://doi.org/10.2138/rmg.2003.53.2

Putnis A. (2009) Mineral replacement reactions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 70(1), 87–124. https://doi.org/10.2138/rmg.2009.70.3

Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85(3), 291–320. https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43

Williams C.T., Gieré R. (1996) Zirconolite: a review of localities worldwide, and a compilation of its chemical compositions. *Bulletin of the Natural History Museum, Geology Series*, 52, 1–24.

Wingate M.T.D. (2001) SHRIMP baddeleyite and zircon ages for an Umkondo dolerite sill, Nyanga Mountains, Eastern Zimbabwe. *South African Journal of Geology*, 104, 13–22. https://doi.org/10.2113/104.1.13

Zakrzewski M.A., Lustenhouwer W.J., Nugteren H.J., Williams C.T. (1992) Rare-earth minerals yttrian zirconolite and allanite-(Ce) and associated minerals from Koberg mine, Bergslagen, Sweden. *Mineralogical Magazine*, 56(382), 27–35. https://doi.org/10.1180/minmag.1992.056.382.03

REFERENCES

Bayanova T.B. (2006) Baddeleyite: a promising geochronometer for alkaline and basic magmatism. *Petrology*, 14(2), 187–200. https://doi.org/10.1134/S0869591106020032

Belkin H.E., Macdonald R. (2021) Zirconium-bearing accessory minerals in UK Paleogene granites: textural, compositional, and paragenetic relationships. *European Journal of Mineralogy*, 33(5), 537–570. https://doi.org/10.5194/ejm-33-537-2021

Belkovsky A.I., Nesterov A.R. (2016) Baddeleyite in ultramafic rocks from the Main Urals collisional suture (Ufaley metamorphic block, Central Urals). *Mineralogiya (Mineralogy)*, (2), 44–52. (in Russian)

Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G. (2014) Structure, isomorphism, formulas and mineral classification. St. Petersburg: SPbGU, 133 p. (in Russian)

Geisler T., Schaltegger U., Tomaschek F. (2007) Re-equilibration of zircon in aqueous fluids and melts. *Elements*, 3(1), 43–50. https://doi.org/10.2113/gselements.3.1.43

Gieré R. (1986) Zirconolite, allanite and hoegbomite in a marble skarn from the Bergell contact aureole:

Not corrected

implications for mobility of Ti, Zr and REE. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 93, 459–470. https://doi.org/10.1007/BF00371716

Gieré R., Williams C.T., Lumpkin G.R. (1998) Chemical characteristics of natural zirconolite. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 78(3), 433–459. https://doi.org/10.5169/seals-59299

Harley S.L. (1994) Mg-Al yttrian zirconolite in a partially melted sapphirine granulite, Vestfold Hills, East Antarctica. *Mineralogical Magazine*, 58(391), 259–269. https://doi.org/10.1180/minmag.1994.058.391.08

Harlov D.E. (2015) Fluids and geochronometers: charting and dating mass transfer during metasomatism and metamorphism. *Journal of the Indian Institute of Science*, 95, 109–124.

Hoskin P.W.O., Schaltegger U. (2003) The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 27–62. https://doi.org/10.2138/rmg.2003.53.2

Kovalev S.G., Kovalev S.S. (2023) First data on Th–REE mineralization in mafic-ultramafic igneous rocks of the western slope of the Southern Urals. *Georesursy (Georesources)*, 25(1), 95–107. https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.10 (in Russian)

Popov V.A., Popova V.I., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. (2018) Zirconolite of alkali pegmatites of the Vishnevye Mountains: the first findings in the South Urals. *Mineralogiya (Mineralogy)*, 4(3), 3–7. (in Russian)

Popov V.A., Rassomakhin M.A. (2023) Mineral assemblages of the Shishim mine in the Southern Urals. *Mineralogiya (Mineralogy)*, 9(1), 23–44. https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-1-2 (in Russian)

Popov V.A., Rassomakhin M.A., Kolisnichenko S.V. (2020) A unique locality of polyakovite-(Ce) in the Ilmeny Mountains, South Urals – new finds. *Mineralogiya (Mineralogy)*, 6(1), 17–32. https://doi.org/10.35597/2313-545X-2020-6-1-2 (in Russian)

Putnis A. (2009) Mineral replacement reactions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 70(1), 87–124. https://doi.org/10.2138/rmg.2009.70.3

Spiridonov E.M., Filimonov S.V., Semikolennykh E.S., Korotaeva N.N., Krivitskaya N.N. (2018) Zirconolite, baddeleyite, zircon and thorite of island-arc quartz gabbronorite-dolerites of the Ayu-Dag intrusion (Crimean Mountainous). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya (Moscow University Geology Bulletin)*, (5), 70–78. (in Russian)

Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85(3), 291–320. https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43

Williams C.T., Gieré R. (1996) Zirconolite: a review of localities worldwide, and a compilation of its chemical compositions. *Bulletin of the Natural History Museum, Geology Series*, 52, 1–24.

Wingate M.T.D. (2001) SHRIMP baddeleyite and zircon ages for an Umkondo dolerite sill, Nyanga Mountains, Eastern Zimbabwe. *South African Journal of Geology*, 104, 13–22. https://doi.org/10.2113/104.1.13

Zakrzewski M.A., Lustenhouwer W.J., Nugteren H.J., Williams C.T. (1992) Rare-earth minerals yttrian zirconolite and allanite-(Ce) and associated minerals from Koberg mine, Bergslagen, Sweden. *Mineralogical Magazine*, 56, 27–35. https://doi.org/10.1180/minmag.1992.056.382.03

Zdorik T.B. (1989) Baddeleyite. In: Typomorphism of Minerals: a Handbook. Moscow, Nedra, 62–68. (in Russian)

not corrected

Информация об авторах

Гракова Оксана Васильевна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии ФИЦ Коми научный центр УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия; ovgrakova@geo.komisc.ru

Попвасев Константин Степанович – младший научный сотрудник, Институт геологии ФИЦ Коми научный центр УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия; kspopvasev@geo.komisc.ru

Information about the authors

Oksana V. Grakova – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Scientific Researcher, Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia; ovgrakova@geo.komisc.ru

Konstantin S. Popvasev – Junior Researcher, Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia; kspopvasev@geo.komisc.ru