

УДК 553.22

EDN: BWQSOB

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-1-29-42>



Оригинальная статья

Редкие иттриевые минералы в жилах гранитных пегматитов Полярного Урала

Н. С. Уляшева[✉], А. С. Шуйский, С. И. Исаенко, Т. А. Пономарева

Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Российская Федерация

[✉]nataliaulyashewa@yandex.ru

Аннотация

В жилах гранитных пегматитов Полярного Урала впервые в этом регионе зафиксированы редкие иттриевые минералы: черновит-(Y) и дессауит-(Y), сформировавшиеся на поздних этапах становления пород. Черновит-(Y) представлен изометричными образованиями и агрегатами неправильной формы размерами 2–10 мкм и локализован в зонах повышенной проницаемости гранитов в ассоциации с хлоритом, каолинитом, кварцем, альбитом, ксенотимом, монацитом, As-REE-P гидротермальным цирконом и мышьяковистым пиритом. Минерал представляет собой сложный водосодержащий твердый раствор на основе черновита, иттротриосиликата и ксенотима с ограниченным включением коффинитового, торитового и цирконового компонентов. Парагенезис черновита-(Y) и гидротермального циркона свидетельствует о метасоматическом отложении этого твердого раствора фторсодержащими флюидами, обогащенными As, Y, U, Th, Zr, P, Si, Al, Ca, за счет выщелачивания ранних минералов – ксенотима, циркона и алюмосиликатов. Его отличительной особенностью являются интенсивные, ярко выраженные симметричные полосы в области 890–894 см⁻¹ на спектрах комбинационного рассеяния. Дессауит-(Y) образует изометричные зерна размерами до 20 мкм в ассоциации с рутилом, анкеритом, ксенотимом и кварцем в отдельных участках изометричной и удлиненно-линзовидной формы и относится к безурановой разновидности этого минерала. На КР-спектрах наблюдаются моды 816, 634 и 289 см⁻¹, присущие минералам группы кричтонита. Выделенные минеральные ассоциации указывают на две различные постмагматические среды: высокощелочную фторсодержащую, благоприятную для мобильности As, Y, U, Th, Zr (черновит-(Y) и карбонатно-щелочную, где доминируют Ti, Sr, Pb (дессауит-(Y)). Открытие минералов углубляет понимание Y-REE-минерализации Полярного Урала и подтверждает важность изучения постмагматических процессов в данном районе.

Ключевые слова: иттриевые минералы, Полярный Урал, гидротермальные растворы, пегматитовые жилы

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИГ Коми НЦ УрО РАН «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента» (№ 122040600012-2).

Для цитирования: Уляшева Н.С., Шуйский А.С., Исаенко С.И., Пономарева Т.И. Редкие иттриевые минералы в жилах гранитных пегматитов Полярного Урала. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(1):29–42. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-1-29-42> EDN: BWQSOB

Original article

Rare yttrium minerals in the granite pegmatites veins of the Polar Urals

Natalia S. Ulyasheva[✉], Alexandr S. Schuyski, Sergei I. Isayenko, Tatyana A. Ponomaryeva

Institute of Geology of Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Syktывkar, Russian Federation

[✉]nataliaulyashewa@yandex.ru

Abstract

The rare yttrium minerals chernovite-(Y) and dessauite-(Y) have been identified for the first time in the Polar Urals within granite pegmatite veins. Chernovite-(Y) occurs as 2–10 μm isometric grains and irregular aggregates in zones of increased permeability, associated with chlorite, kaolinite, quartz, albite, xenotime, monazite, As-REE-P hydrated

zircon, and arsenian pyrite. It represents a complex hydrous solid solution based on chernovite, yttriosilicate, and xenotime, with subordinate coffinite, thorite, and zircon components. The paragenesis of chernovite-(Y) with hydrothermal zircon indicates its metasomatic deposition from fluorine-rich fluids enriched in As, Y, U, Th, Zr, P, Si, Al, and Ca, resulting from the leaching of earlier xenotime, zircon, and aluminosilicates. A distinctive feature of this phase is the presence of intense, sharp symmetrical bands at 890–894 cm^{-1} in its Raman spectrum. Dessauite-(Y) forms isometric grains up to 20 μm in size within isolated isometric and elongated-lenticular zones, associated with rutile, ankerite, xenotime, and quartz. It belongs to the uranium-free variety of the species. Its Raman spectrum displays characteristic modes for crichtonite-group minerals at 816, 634, and 289 cm^{-1} . These mineral associations evidently formed under distinct geochemical conditions during the post-magmatic stage: in highly alkaline, fluorine-rich systems enabling the active transport of As, Y, U, Th, and Zr (chernovite-Y), and in carbonate-alkaline environments dominated by Ti, Sr, and Pb (dessauite-Y). These discoveries advance the understanding of Y-REE mineralization in the Polar Urals and underscore the significance of post-magmatic processes in the region's petrogenesis.

Keywords: yttrium minerals, Polar Urals, hydrothermal solutions, pegmatite veins

Funding. This work was supported by the state assignment to the Institute of Geology, Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences titled “Deep structure, geodynamic evolution, interaction of geospheres, magmatism, metamorphism, and isotope geochronology of the Timan–Severouralsk lithospheric segment” (No. 122040600012-2).

For citation: Ulyasheva N.S., Schuyskiy A.S., Isayenko S.I., Ponomareva T.A. Rare yttrium minerals in the granite pegmatites veins of the Polar Urals. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(1):29–42. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-1-29-42> EDN: BWQSOB

Введение

Исследование редкоземельных минералов представляет значительный научный и практический интерес в современной минералогии в связи с растущим глобальным спросом на РЗЭ в высокотехнологичных отраслях и необходимостью поиска новых минеральных источников критически важных элементов. Среди них особую ценность имеют редкие минеральные виды, изучение которых позволяет существенно расширить наши представления о геохимии редких элементов. Они являются индикаторами специфических рудообразующих процессов и несут ценную информацию о редкоземельной специализации процессов породы- и рудообразования. Комплексное изучение таких минералов открывает новые перспективы как для фундаментальной науки, так и для решения практических вопросов поиска и оценки редкометалльных месторождений.

В жилах гранитных пегматитов предположительно позднепалеозойского возраста осевой зоны Полярного Урала, прорывающих амфиболиты харбейского метаморфического комплекса, впервые для этого региона найдены редкие иттриевые минералы – черновит-(Y) и дессауит-(Y).

Редкий арсенат иттрия – черновит-(Y) (YAsO_4), впервые был обнаружен на Приполярном Урале в рифейских риолитовых кварцевых порфирах в составе гнездово-прожилковой кварц-пьемонитовой минерализации и открыт как новый минерал сотрудниками ИГ Коми НЦ УрО РАН Н.П. Юшкиным, М.В. Фишманом и Б.А. Голди-

ным в 1968 году [1]. В этом же районе позднее он был установлен в зоне межформационного контакта уралид и доуралид в кембрийско-нижнеордовикских метаморфитах – гематит-пиррофиллит-серицит-кварцевых сланцах в составе эпидот-кварцевой и «пьемонтит»-спессартин-кварцевой с браунитом минерализаций [2]. К настоящему времени он выявлен на всех континентах. Чаще всего черновит-(Y) встречается в породах кислого состава – гранитах и риолитах и ассоциируется с поздними гидротермальными минералами [3–5], реже в метасоматитах [6].

Дессауит-(Y) $(\text{Sr,Pb})(\text{Y,U})(\text{Ti,Fe}^{3+})_{20}\text{O}_{38}$ – минерал группы кричтонита, представляющего собой сложный оксид с общей формулой $\text{ABT}_2\text{C}_{18}(\text{O})_{38}$, где $\text{A} = \text{Ba, K, Pb, Sr, La, Ce, Na, Ca}$; $\text{B} = \text{Mn}^{2+}, \text{Y, U, Fe}^{2+}, \text{Zr, Ca, Sc}$; $\text{T} = \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Mg, Zn}$; $\text{C} = \text{Fe}^{3+}, \text{Cr, V, Mn}^{3+}, \text{Al, Ti}$. Группа включает порядка 20 утвержденных минеральных видов (mindat.org). Дессауит-(Y) является промежуточным членом между кричтонитом и давидитом [7] и впервые обнаружен в полостях кальцитовых жил в виде пластинчатых и ромбоэдрических, черных, миллиметровых кристаллов на руднике Бука делла Вена, Апуанские Альпы (Тоскана, Италия) [8]. Позднее он был установлен во Франции и Швейцарии. Минерал ассоциируется с дербилитом, гематитом, рутилом, карелианитом, сидеритом, кальцитом [8] и приурочен к карбонатно-щелочным метасоматитам [9].

Целью работы является установление зоны локализации, химического состава и условий формирования иттриевых минералов – чернови-

та-(Y) и дессауита-(Y) в жилах гранитных пегматитов Полярного Урала, что позволит расширить знания о механизмах изоморфных замещений и границах устойчивости твердых растворов в сложных оксидных системах, а также охарактеризовать геохимическую специализацию позднепалеозойских метаморфических и метасоматических процессов породы- и рудообразования на севере Урала.

Материалы и методы

Петрографические особенности пород изучены с помощью поляризационного микроскопа БиОптик СР-400. Состав минералов исследован с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA3 LMN с энергодисперсионной приставкой X-MAX50 mm Oxford instruments при ускоряющем напряжении 20 кВ, диаметре зонда 180 нм и области возбуждения до 5 мкм с использованием СЭМ ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM с выдвижным детектором катодoluminesценции RGB с диапазоном обнаружения длин волн 350–850 нм. Калибровка производилась по кобальту (Co). В качестве дополнительных стандартов используются 55 стандартов фирмы Micro-Analysis Consultants ltd. Погрешность измерений, %: SiO₂ до 0,23, MgO до 0,06, ThO₂ до 0,21, ZrO₂ до 0,57, F до 0,20, P₂O₅ до 0,33, Y₂O₃ до 0,37, Al₂O₃ до 0,07, As₂O₃ до 0,17, FeO до 0,08, UO₂ до 0,18, La₂O₃ до 0,23, CeO₂ до 0,33, Pr₂O₃ до 0,29, Nd₂O₃ до 0,37, Gd₂O₃ до 0,29, CaO до 0,06, S до 0,04, Sm₂O₃ до 0,23, Dy₂O₃ до 0,33, Er₂O₃ до 0,31, Yb₂O₃ до 0,34, Ho₂O₃ до 0,24, V₂O₅ до 0,09; Na₂O до 0,05, SrO до 0,12, PbO до 0,05, BaO до 0,10, ZnO до 0,09, K₂O до 0,1, TiO₂ до 0,02, MnO до 0,07. Минералы изучены методом рамановской спектроскопии на КР-спектрометре LabRam HR800. Исследования проводились в ЦКП «Гео-наука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар).

Краткий обзор геологического строения района работ

Район работ представляет собой зону сочленения докембрийских (Центрально-Уральское поднятие) и палеозойских (Тагило-Магнитогорская мегазона) пород соответственно палеоконтинентального и палеоокеанического секторов Полярного Урала.

Жилы гранитных пегматитов располагаются среди амфиболитов и плагиогнейсов харьбейско-

го метаморфического комплекса, занимающего крайне восточное положение в палеоконтинентальной части Полярного Урала в пределах Харьбейско-Марункеуской структурно-формационной зоны [10]. Возраст комплекса по устоявшимся представлениям принимается докембрийским [11, 12]. Изотопно-геохронологические исследования метаморфических минералов амфиболитов, проведенные в последние годы, показали, что высокотемпературный метаморфизм, достигающий верхних уровней амфиболитовой фации повышенных давлений, в результате которого породы приобрели современный облик, проявился в позднем палеозое при коллизионных процессах становления уралид [13, 14]. Гранитные жилы, образующие поле в центральной части харьбейского метаморфического комплекса мощностью около 8–10 км и прорывающие амфиболиты вдоль и поперек направления сланцеватости, по-видимому, являются синметаморфическими позднепалеозойскими образованиями (рис. 1).

Петрографические особенности гранитов и условия нахождения иттриевых минералов

Жилы гранитных пегматитов с мощностями 0,5–1,5 м имеют розовую окраску, массивную текстуру и блоковую, пегматоидную, среднезернистую, иногда катакlastическую структуру. Они сложены кислым плагиоклазом (60–70 %), кварцем (10–30), биотитом (1–10), КППШ (0–10) с примесью мусковита (0–2), карбоната (0–1 %), граната (ед. зерна), магнетита (до 1 %), ильменита (ед. зерна) и др. Граниты альбитизированы (рис. 2, а), в различной степени подвержены катаклазу и наложенным изменениям (рис. 2, б). На границах зерен кварца наблюдаются зоны рекристаллизации. В гранитах имеются участки линзовидной формы, выполненные анкеритом, доломитом, рутилом, пиритом и другими минералами, а также пустоты и прожилки, выполненные халцедоном, анкеритом и оксидами железа (см. рис. 2, б). Кроме того, в ослабленных зонах и в трещинах, в местах развития магматического биотита наблюдается изменение его до хлорита, каолинита и титанистых минералов (рис. 2, в, г).

Черновит-(Y) локализован в зонах повышенной проницаемости пород в местах развития продуктов разложения биотита (рис. 3, 4). Минерал представлен ангедральными и изометричными по форме выделениями в виде включений в гидратированном цирконе; иногда треугольны-

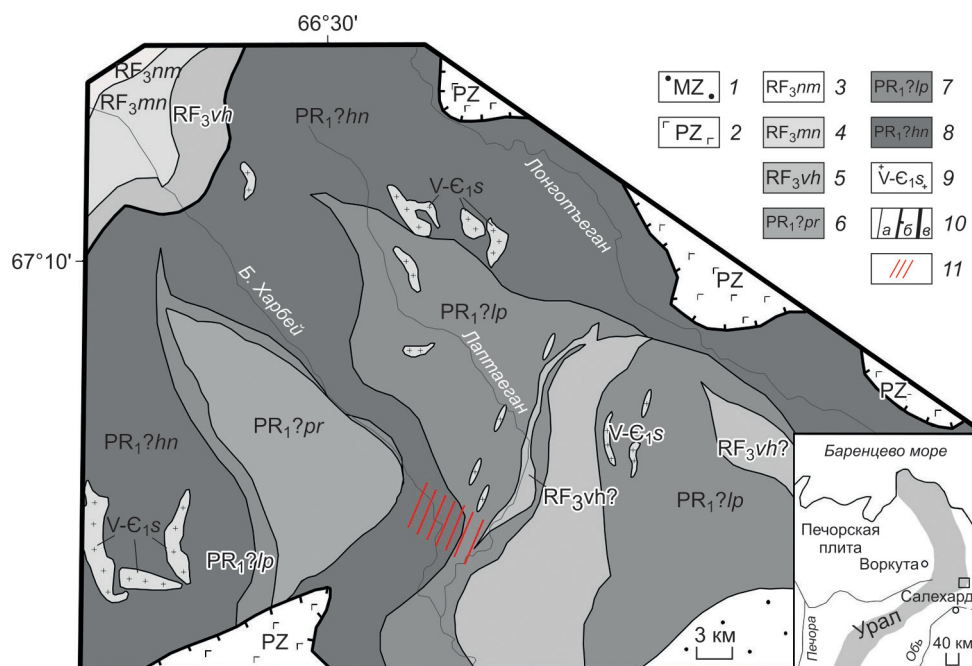


Рис. 1. Схематическая геологическая карта харьбейского метаморфического комплекса (по [10]) с выделением поля развития пегматитовых жил.

1 – мезозойские отложения Западно-Сибирской платформы; 2 – палеозойские образования Тагило-Магнитогорской зоны; 3–5 – зеленосланцевые толщи: 3 – немурьюганская свита, 4 – минисейшорская свита, 5 – верхнехарьбейская свита; 6–8 – харьбейский гнейсо-амфиболитовый комплекс: 6 – париквасьшорская свита, 7 – лаптаюганская свита, 8 – ханмейхойская свита; 9 – гнейсограниты сядатояхинского комплекса; 10 – границы раздела (а – между свитами, б – Главный Уральский разлом, в – Хадатинско-Ханмейский надвиг); 11 – поле гранитных жил

Fig. 1. Schematic geological map of the Kharbey metamorphic complex (according to [10]) highlighting the development field of granite veins.

1 – Mesozoic deposits of the West Siberian Platform; 2 – Paleozoic formations of the Tagil-Magnitogorsk zone; 3–5 – greenschist strata: 3 – Nemuryugan formation, 4 – Miniseyshor formation, 5 – Upper Kharbey formation; 6–8 – Kharbey gneiss-amphibolite complex: 6 – Parikvasshor formation, 7 – Laptayaugan formation, 8 – Khanmeikhoy formation; 9 – gneiss-granites of the Syadatyakhinsky complex; 10 – interface boundaries (a – between formations, б – Main Ural Fault, в – Khadatin-Khanmey thrust); 11 – field of granite veins

ми и четырехугольными срезами, агрегатами неправильной формы, ассоциирующимися с хлоритом, каолинитом и скоплениями титанистых минералов (см. рис. 4). Изредка призматические зерна черновита-(Y) формируют скопления в виде цепочек вокруг измененного циркона (см. рис. 4, ж, и). Размеры минерала варьируют от 2 до 10 мкм. С черновитом-(Y) ассоциируются следующие акцессорные минералы: P-REE-As-содержащий гидратированный циркон [15, 16], мышьяковистый пирит, уранинит, мышьяк-содержащий сульфат ртути, ксенотим, монацит и др.

Дессаунит-(Y) образует изометричные зерна размером до 20 мкм и в ассоциации с рутилом, анкеритом, ксенотимом и кварцем локализуется в отдельных участках удлиненно-линзовидной формы (рис. 5).

Черновит-(Y)

Химический состав. Концентрации оксида фосфора в минерале варьируются от значений ниже предела обнаружения до 4,68 мас.% P_2O_5 , что соответствует максимуму 0,18 ф.е. P (табл. 1). Концентрации оксида мышьяка составляют от 32,98 до 17,1 мас.% (0,83–0,47 ф.е. As), оксида кремния – от 12,46 до 3,65 мас.% (0,40–0,15 ф.е. Si). Минерал иногда содержит U (до 1,21 мас.% UO_2), изредка Th (до 0,52 мас.% ThO_2) или оба элемента и Zr (до 3,08 мас.% ZrO_2). Хотя Y остается доминирующим элементом в октаэдрической позиции, наблюдаются значительные вариации в соотношении тяжелых редкоземельных элементов (HREE), изредка в структуру минерала входят низкие концентрации легких редкоземельных элементов (LREE) (до 0,55 мас.%

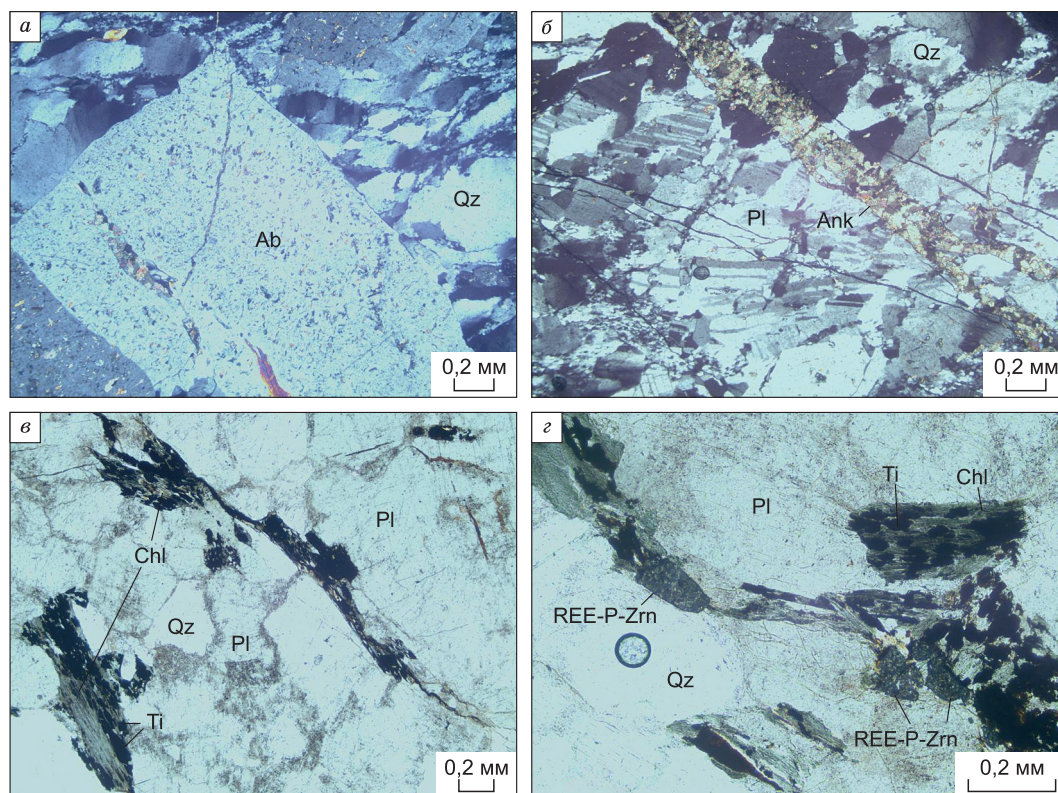


Рис. 2. Альбитизация (а), катаклаз (б) и зоны повышенной проницаемости в гранитах (в, г). Qz – кварц, Ab – альбит, Pl – плагиоклаз, Ank – анкерит, Chl – хлорит, Ti – титанистые минералы, REE-P-Zrn – гидратированный циркон. Фото шлифов с анализатором (а, б) и без (в, г)

Fig. 2. Albitization (а), cataclasis (б) and zones of increased permeability in granites (в, г). Qz – quartz, Ab – albite, Pl – plagioclase, Ank – ankerite, Chl – chlorite, Ti – titanium minerals, REE-P-Zrn – hydrated zircon. Photomicrographs of section cuts taken with (а, б) and without (в, г) the analyzer

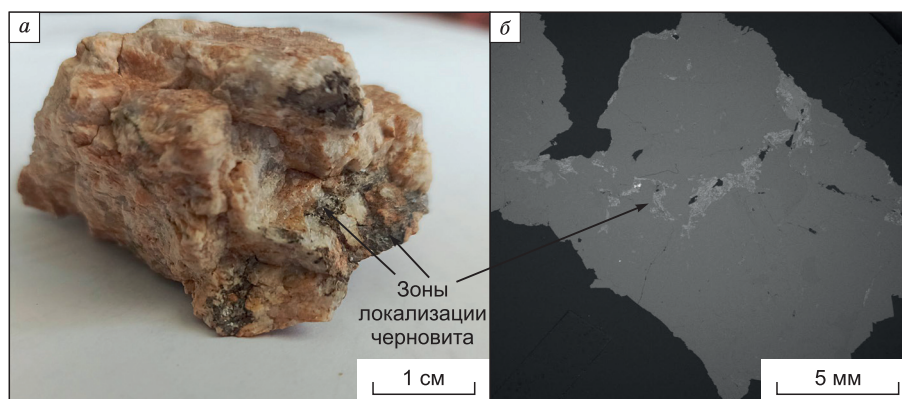


Рис. 3. Зоны локализации черновита-(Y): а – образец гранита, б – полированный аншлиф (BSE-изображение)

Fig. 3. Chernovite-(Y) localization: а – granite sample, б – polished section (BSE image)

Nd₂O₃; до 0,61 мас.% Sm₂O₃). Среди HREE наибольшие содержания демонстрируют Yb (2,67 < Yb₂O₃ < 4,27 мас.%), Er (2,51 < Er₂O₃ < 3,65), Dy (3,07 < Dy₂O₃ < 4,55), Gd (0,95 < Gd₂O₃ < 2,17 мас.%).

Во многих образцах присутствует F (фтор) в низких концентрациях, обычно до 0,75 мас.%. Суммарные результаты анализов в основном находятся в диапазоне от 83,61 до 97,55 мас.%.

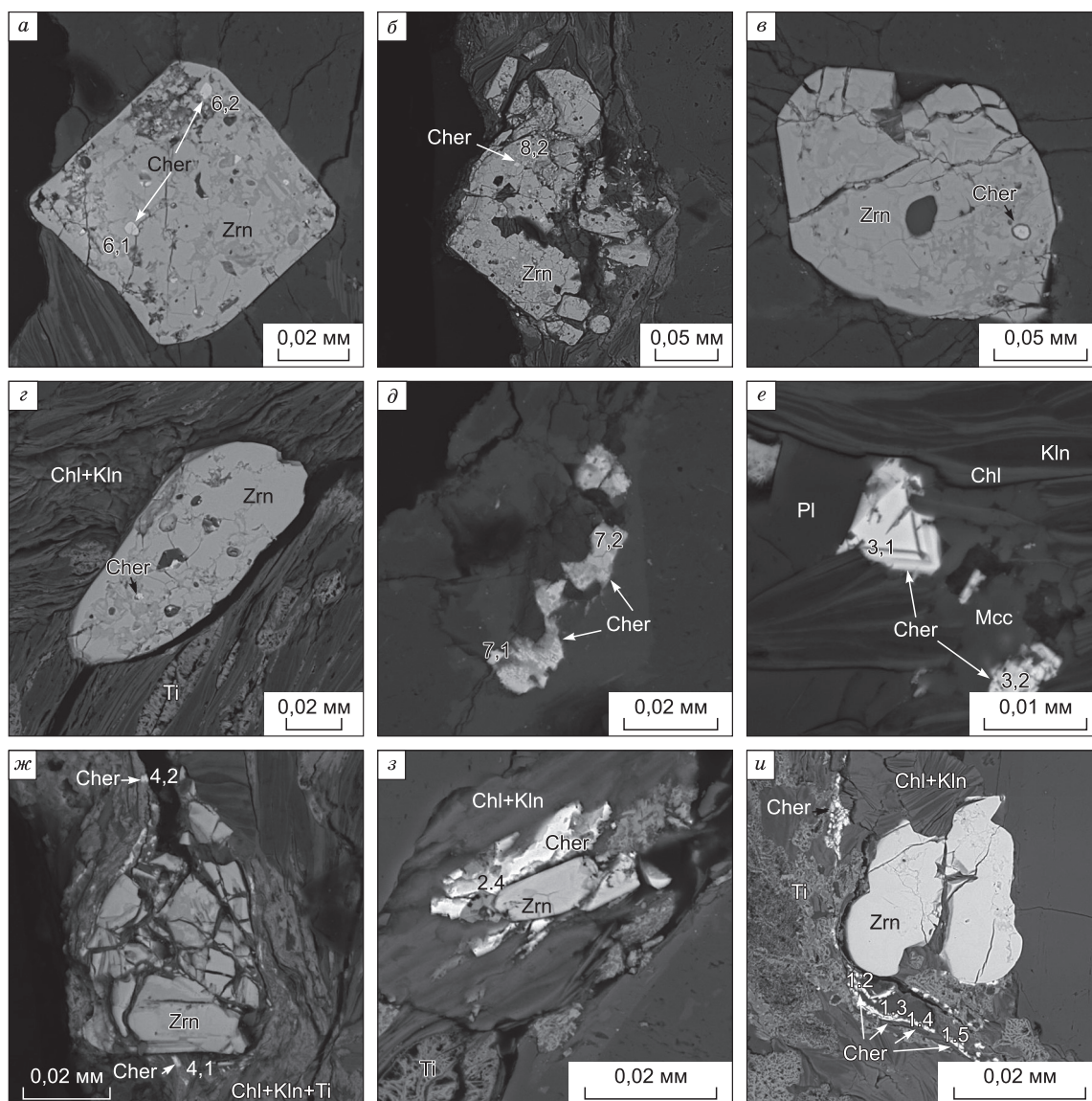


Рис. 4. Выделения черновита-(Y) (а–г – в виде включений в гидратированном цирконе; д, е – отдельные выделения; ж–и – скопления вокруг зерен циркона) (BSE-режим). Cher – черновит-(Y), Zrn – циркон, Kln – каолинит, Mcc – микроклин

Fig. 4. а–г – chernovite-(Y) in the form of inclusions in hydrated zircon; д, е – individual chernovite-(Y) segregations; ж–и – chernovite-(Y) clusters around zircon grains (BSE images). Cher – chernovite-(Y), Zrn – zircon, Kln – kaolinite, Mcc – microcline

В минерале наблюдаются такие элементы, как Al (до 3,14 мас. % Al_2O_3), Fe (до 3 мас. % FeO), Ca (до 0,97 мас. % CaO).

КР-спектры. Методом рамановской спектроскопии были диагностированы отдельные выделения черновита размером до 10 мкм (рис. 6, а, б) и мелкие зерна в виде включений в цирконе (рис. 6, в, г). КР-спектры для четырех проанализированных образцов характеризуются интенсивными ярко выраженными симметричными полосами 890–894 см^{-1} . Не всегда появляются слабые полосы 838–839 см^{-1} . На трех из четырех

спектров наблюдаются широкие моды 621–623 и 506–510 см^{-1} . В одном из включений в гидратированном цирконе (см. рис. 6, г) на спектре имеются полосы, характерные для метамиктного оксида циркония, – 995 и 433 см^{-1} . Разные моды видны на спектре ниже значения 392 см^{-1} и выше – 1043 см^{-1} , которые могут быть связаны с примесными элементами.

Рентгеновская кристаллография. Данные рентгеновской монокристаллической дифракции были получены по одному из анализируемых образцов. Структурно исследуемый мине-

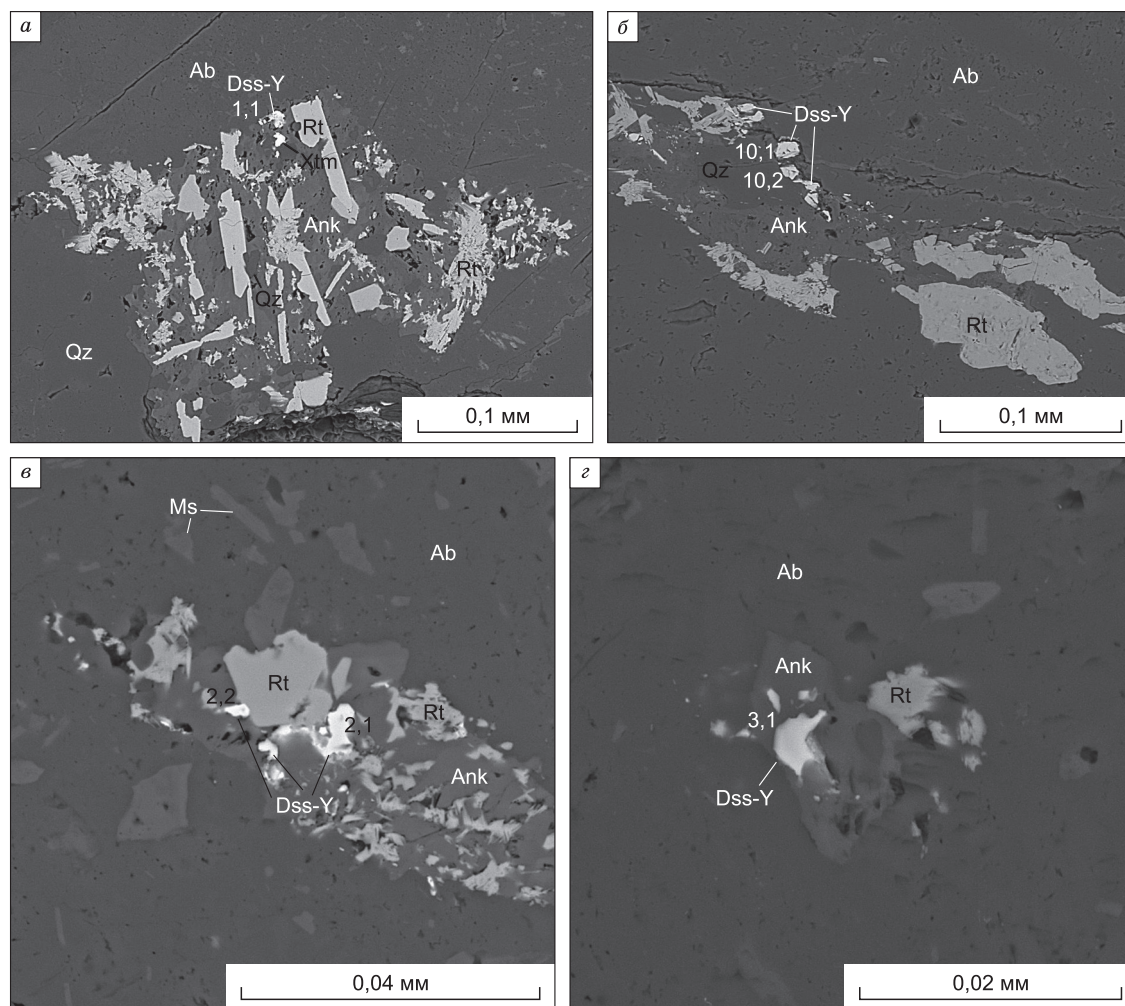


Рис. 5. Дессауит-У в ассоциации с рутилом, анкеритом и ксенотимом (BSE-изображение).

Dss-Y – дессауит-У, Rt – рутил, Ms – мусковит, Xtm – ксенотим

Fig. 5. Dessauite-Y in association with rutile, ankerite, and xentime (BSE images).

Dss-Y – dessauite-Y, Rt – rutile, Ms – muscovite, Xtm – xenotime

рал кристаллизуется в тетрагональной системе (группа Лавэ – 4/mmm) и имеет параметры элементарной ячейки: $a = 6,90$, $b = 6,90$, $c = 6,28$ Å, $\alpha = 90,00$, $\beta = 90,00$, $\gamma = 90,00^\circ$.

Минералы, ассоциирующие с черновитом-(У)

P-REE-As-содержащий гидратированный циркон. В породе встречаются два типа циркона: розовые призматические в основной массе породы, нередко в сростании с ксенотимом, и коричневые длиннопризматические игольчатые зерна с неравномерной блочной, мозаичной и пористой структурами в зонах повышенной проницаемости. В коричневых цирконах наблюдаются повышенные концентрации (в мас. %) P_2O_5 (до 6), Y_2O_3 (до 9), UO_2 (до 4), ThO_2 (до 3),

REE, FeO (до 3), Al_2O_3 (до 3), CaO (до 3), Na_2O (до 1) [16]. Отмечается дефицит суммы (66–93 %). Включения представлены черновитом-У, ксенотимом, монацитом, кварцем, альбитом, анкеритом, мышьяковистым пиритом, сульфатом ртути, уранинитом.

Мышьяковистый пирит находится в породе в виде отдельных выделений неправильной формы, развивающихся по трещинкам в породообразующих минералах (рис. 7, а), а также в виде включений в гидратированном цирконе (рис. 7, б). Содержание мышьяка в минерале варьирует от 1,25 до 5,48 мас.%. В пирите также наблюдаются примеси Co (до 3,32 мас.%), Cu (до 0,71 мас.%) и Ni (до 1,22 мас.%). Эмпирическая формула минерала имеет вид: $(Fe_{0,89-0,98}Co_{0-0,07}Cu_{0-0,01}Ni_{0-0,03})_{0,95-0,99}(S_{1,91-1,98}As_{0,02-0,09})_2$.

Таблица 1

Химический состав черновита-(Y) (мас.%) и формульные коэффициенты

Table 1

Chemical composition (wt.%) and empirical formula of chernovite-(Y)

Компо- нент	Номера проб														
	4.1	4.2	6.1	6.2	7.1	7.2	8.2	3.1	3.2	2.4	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
SiO ₂	14,61	7,73	5,6	5,62	6,98	11,32	6,94	3,65	7,77	7	9,75	10,8	10,83	11,81	12,46
Al ₂ O ₃	5,1	—	—	—	—	1,96	—	—	0,73	—	1,5	1,35	1,52	3,14	2,43
FeO	4,66	1,99	—	—	—	—	—	0,79	0,83	1,91	2,45	2,09	2,52	2,78	3
MgO	2,28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,67	1	1,15
CaO	1,44	0,97	—	0,22	0,49	—	—	—	0,33	0,23	0,73	0,77	0,58	0,69	0,7
As ₂ O ₃	19,21	17,1	30,77	30,95	30,42	30,76	28,03	32,98	32,96	26,55	25,76	25,57	24,8	25,98	25,09
Y ₂ O ₃	28,87	17,73	40,95	38,47	40,07	39,35	39,69	37,57	37,17	34	35,01	37,95	35,63	35,8	36,49
Nd ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,55	0,5	—	—	—
Sm ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,58	0,61	0,57	0,69	—
Gd ₂ O ₃	—	—	1,45	1,16	1,17	0,95	1,26	1,86	1,58	1,92	2,06	1,87	2,17	1,99	1,61
Dy ₂ O ₃	—	3,07	3,81	3,89	3,76	3,71	4,49	3,91	3,43	4,55	3,97	3,9	3,94	3,77	3,67
Ho ₂ O ₃	—	—	0,83	—	—	0,91	1,27	—	—	—	0,95	0,81	—	—	—
Er ₂ O ₃	2,8	2,8	3,22	3,4	3,43	3,65	3,29	2,79	2,65	3,37	2,75	2,92	2,51	2,52	2,85
Yb ₂ O ₃	3,26	3,59	4,01	3,97	4,27	4,14	4,03	3,27	3	3,51	3,08	2,72	2,96	2,94	2,67
UO ₂	1,01	1,21	—	—	—	—	—	—	—	—	0,85	1,12	0,57	0,62	0,62
ThO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,52	—	—	0,42
P ₂ O ₅	3,87	4,68	—	—	—	—	—	0,55	—	—	3,82	4,64	—	2,7	3,56
V ₂ O ₅	0,33	—	0,29	0,33	0,33	0,37	0,5	—	—	0,57	0,33	—	—	0,36	—
ZrO ₂	3,51	3,08	—	—	—	—	—	—	—	—	1,67	1,73	—	—	—
F	—	0,59	0,32	—	0,57	0,75	0,26	—	—	—	0,59	0,63	—	—	—
F=O	—	–0,23	–0,13	—	–0,24	–0,32	–0,11	—	—	—	–0,23	–0,27	—	—	—
Сумма	90,95	64,31	91,12	88,01	91,25	97,55	89,65	87,37	90,45	83,61	96,17	100,23	89,27	96,79	96,72
Si	0,49	0,35	0,23	0,23	0,27	0,38	0,29	0,15	0,28	0,30	0,34	0,36	0,42	0,40	0,41
P	0,11	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,11	0,13	0,00	0,08	0,10
As	0,39	0,47	0,77	0,77	0,73	0,62	0,71	0,83	0,72	0,70	0,55	0,51	0,58	0,53	0,50
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Al	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,03	0,00	0,06	0,05	0,07	0,12	0,09
Fe	0,13	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,07	0,07	0,06	0,08	0,08	0,08
Mg	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,05	0,06
Ca	0,05	0,05	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
Y	0,52	0,43	0,90	0,84	0,84	0,70	0,88	0,83	0,71	0,78	0,65	0,67	0,73	0,64	0,63
Nd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Sm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Gd	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
Dy	0,00	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
Ho	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Er	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Yb	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
U	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Th	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
Zr	0,06	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00
Σ	1,16	0,76	1,08	1,02	1,02	0,92	1,08	1,01	0,90	1,06	1,01	0,99	1,10	1,05	1,01
F	0,00	1,61	0,79	0,00	1,35	1,50	0,65	0,00	0,00	0,00	1,24	1,25	0,00	0,00	0,00

Примечание. «—» – ниже предела обнаружения. Номера анализов соответствует номерам на рис. 4.

Note. “—” – below detection limit. Sample numbers correspond to those in Fig. 4.

Дессаунит-(Y)

Химический состав. Аналитические данные минерала представлены в табл. 2. Основные его элементы соответствуют титану ($58,85 < \text{TiO}_2 < 62,37$ мас.%), железу ($19,57 < \text{FeO} < 22,02$), ванадию ($0,8 < \text{V}_2\text{O}_5 < 1,17$), алюминию ($0,21 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 0,34$), иттрию ($3,25 < \text{Y}_2\text{O}_3 < 4,46$), марганцу ($0,22 < \text{MnO} < 1,18$), стронцию ($3,1 < \text{SrO} < 3,93$), свинцу ($3,07 < \text{PbO} < 3,45$), натрию ($0,26 < \text{Na}_2\text{O} < 0,3$ мас.%) и кислороду. В позиции *A* обнаружены примеси калия (до 0,07 мас.% K_2O), кальция (до 3,30 мас.% CaO), церия (до 0,29 мас.% Ce_2O_3) и бария (до 1,23 мас.% BaO), в позиции *B* – кроме иттрия и марганца присутствуют тяжелые редкоземельные элементы (до 1,55 мас.% HREE), а в позициях *T* и *C* – магний (до 1,33 мас.% MgO), цинк (до 0,47 мас.% ZnO) и кремний (до 4,05 мас.% SiO_2). Эмпирическая формула минерала (согласующаяся с членами супергруппы криттонита) имеет вид $(\text{Sr}_{0,54-0,71} \text{Pb}_{0,12-0,29} \text{Na}_{0-0,18} \text{Ca}_{0-0,43} \text{Ba}_{0-0,14} \text{K}_{0-0,07} \text{Ce}_{0-0,03})_{(\Sigma=1,06-1,37)} (\text{Y}_{0,53-0,98} \text{Mn}_{0-0,3} \text{Dy}_{0-0,07} \text{Er}_{0-0,05} \text{Yb}_{0-0,04})_{(\Sigma=0,74-1,03)} (\text{Ti}_{13,92-14,42} \text{Fe}_{4,54-5,65} \text{V}_{0,17-0,36} \text{Al}_{0-0,22} \text{Mg}_{0-0,98} \text{Zn}_{0-0,1})_{(\Sigma=20)} \text{O}_{38}$.

КР-спектры. Основные полосы изучаемого дессаунита-(Y) расположены в области между 200 и 1000 cm^{-1} ; самые интенсивные ярко выраженные моды находятся при 816 и 289 cm^{-1} (рис. 8). Другие более слабые, широкие и множественные видны при 634 , 610 , 417 и 231 cm^{-1} .

Обсуждение

Черновит. Результаты рентгеновской дифракции соответствуют кристаллографической особенности черновита-(Y).

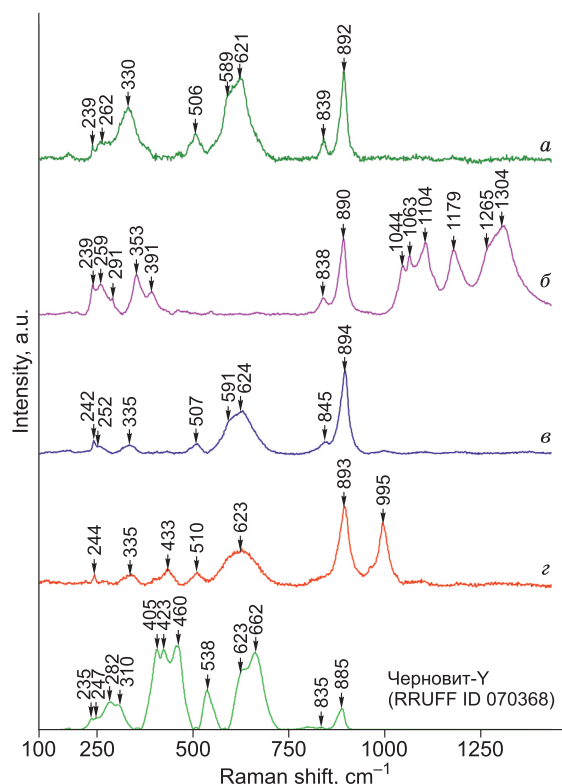


Рис. 6. КР-спектры черновита-(Y). *a–z* см. в тексте

Fig. 6. Raman spectra of chernovit-(Y). *a–z* see in text

Если сравнивать исследуемый черновит с эталоном (см. рис. 6), взятым из базы данных (RRUFF ID 070368, Нью-Мексико, США), то для него наблюдаются рост интенсивности и незначительное смещение основных полос по сравнению с эталонными значениями (887 cm^{-1} и 835 cm^{-1}) в правую сторону ($890–894 \text{ cm}^{-1}$ и $838–839 \text{ cm}^{-1}$).

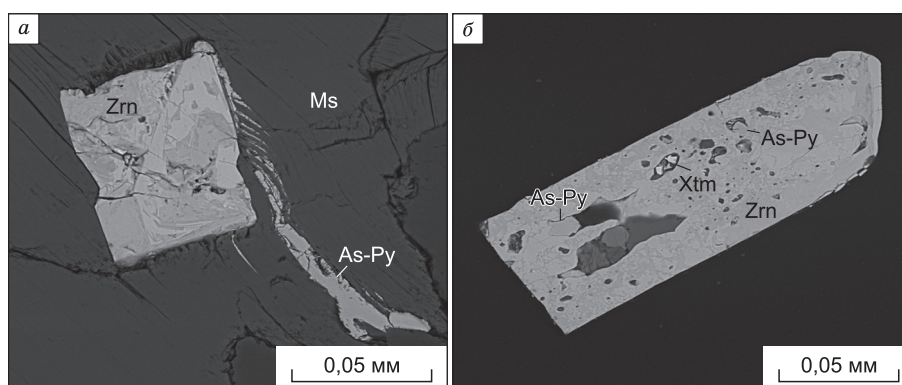


Рис. 7. Мышьяковистый пирит в ассоциации с гидратированным цирконом. As-Py – мышьяковистый пирит. *a, б* см. в тексте

Fig. 7. Arsenian pyrite in association with hydrated zircon. As-Py – arsenian pyrite. *a, б* see in text

Таблица 2
Химический состав дессауита-(Y) (в мас. %)Table 2
Chemical composition of dessauite-(Y) (wt.%)

Компонент	Номера проб					
	10.1	10.2	3.1	1.1	2.1	2.2
Na ₂ O	0,26	0,29	0,3	—	—	—
Al ₂ O ₃	0,21	0,34	0,28	0,55	—	0,79
SiO ₂	0,55	0,7	0,8	0,94	0,85	4,05
CaO	0,27	0,58	3,3	3,57	1,31	3,22
TiO ₂	60,56	62,37	58,85	57,03	62,37	60,18
V ₂ O ₅	1,51	1,17	0,8	1,05	1,27	0,97
MnO	0,64	1,18	0,22	0,25	—	0,17
FeO	22,02	20,46	19,57	18,63	20,73	17,65
SrO	3,93	3,47	3,1	1,65	4,01	3,04
Y ₂ O ₃	4,46	3,25	3,53	2,01	4,55	3,43
BaO	1,23	0,95	—	—	—	—
PbO	3,45	3,29	3,07	5,33	1,52	2,58
MgO	—	—	1,33	0,85	—	2,11
K ₂ O	—	—	0,07	—	—	0,18
ZnO	—	—	0,47	0,62	—	0,35
Ce ₂ O ₃	—	—	0,29	—	—	—
Dy ₂ O ₃	—	—	0,64	—	—	—
Er ₂ O ₃	—	—	0,52	—	—	—
Yb ₂ O ₃	—	—	0,39	—	—	—
Сумма	99,11	98,03	97,54	92,48	96,62	98,72

Примечание. Номера анализов соответствуют номерам на рис. 5.

Note. Sample numbers correspond to those in Fig. 5.

Доказано, что в природе существует система черновита, которую образуют безводные черновит, ксенотим и иттротросиликат, т. е. три ряда бинарных твердых растворов — черновит-ксенотимовый, черновит-иттротросиликатный, ксенотим-иттротросиликатный и один ряд тройного твердого раствора — черновит-ксенотим-иттротросиликатный [2, 17, 18]. Предполагается существование обширного твердого раствора в водной тетрагональной системе черновит-(Y)–ксенотим-(Y)–торит–коффинит [19], как уже было показано для другой тетрагональной системы ксенотим-(Y)–торит–циркон–коффинит [20].

Суммарные результаты анализов по исследуемым образцам в основном ниже 100 %, что указывает на наличие нескольких весовых процентов воды (H₂O) в структуре минерала, т. е. черновит является гидратированным. По химическому составу изучаемый минерал весьма

изменчив по сравнению со стехиометрическим черновитом-(Y). Он охватывает диапазон черновит (65–88 мол.%) – ксенотим (0–28 мол.%) – иттротросиликат (0–31 мол.%), т. е. характеризуется значительной смешиваемостью черновита, иттротросиликата и ксенотима. Спорадическое вхождение в структуру таких элементов, как U, Zr и Th, происходит, скорее всего, преимущественно за счет замещения по типу коффинита, торита и циркона (до 8 мол.% ZrSiO₄). Доказательством этому могут служить обнаруженные коффинит-ксенотимовые наросты (Y_{0,58}U_{0,21}Fe_{0,15}Ca_{0,04})_{0,98}(P_{0,61}Si_{0,36}As_{0,03})O₄ на пирите в доломитовом прожилке, в составе которого обнаружена примесь мышьяка, по-видимому, в виде черновитового компонента. Как и в ассоциирующем с черновитом гидратированном цирконе, такие элементы, как Al, Fe и Ca, входят, вероятно, в структуру минерала по сложным схемам замещения [15]. Таким образом, мы имеем дело со сложным водосодержащим твердым раствором (черновит–иттротросиликат–ксенотим) с ограниченным вхождением в структуру коффинитового, торитового и цирконового компонентов. Гидратированный циркон с высоким содержанием REE является признаком метасоматической переработки пород [21, 22]. Ассоциация гидратированных циркона и черновита указывает на то, что осаждение исследуемого твердого раствора происходило, по-видимому, в результате метасоматических процессов под воздействием фторсодержащих гидротермальных флюидов, пересыщенных такими элементами, как As, Y, U, Th, Zr, P, Si, Al, Ca, выщелоченных и растворенных из ранее существовавших минеральных фаз: ксенотима, циркона, алюмосиликатов и др. Окисляющие жидкости, содержащие мышьяк, вызывали разложение ксенотима ранней генерации, находившегося в сростании с магматическим цирконом, и частичное растворение и переотложение циркона, что в дальнейшем приводило к формированию гидратированного сложного твердого раствора системы черновита в обрамлении и в образовавшихся порах циркона наряду с более поздним ксенотимом, мышьяковистым пиритом, кварцем, альбитом и др., как это происходило, например, в гранитах Чешской Республики [3].

Дессаунит-(Y). Из-за отсутствия рамановских спектров дессаунита-(Y) в базе данных мы сравнили полученный спектр со спектрами некоторых минеральных видов, которые относятся к супергруппе кричтонита, в частности, кричтонита из

базы данных (RRUFF ID 090006) [23]), а также с образцом дессауита-(Y) из Ла-Боме (Улькс, Долина Суза, Пьемонт, Италия) [24]. Наблюдается близкое соответствие между собранными спектрами изучаемых трех минералов в области мод $812\text{--}816\text{ см}^{-1}$, $634\text{--}638\text{ см}^{-1}$, $289\text{--}293\text{ см}^{-1}$. Для изучаемого дессауита-(Y) спектр 816 см^{-1} более интенсивный и асимметричный. Для дессауитов-(Y) в отличие от кричтонита появляются дополнительные спектры $604\text{--}610\text{ см}^{-1}$.

В формуле учтены содержания кальция ниже 1 мас.%, в остальных случаях повышенные содержания этого элемента связаны, скорее всего, с влиянием вмещающих минералов, анкерита. Присутствие кремния в составе минерала, вероятно, произошло из-за поверхностного загрязнения, как предполагают в работе [24]. Не исключено, что кремний входит в позицию M_3 , как представлено в статье [25] для кричтонита и сенайта.

В отличие от установленного ранее в Европе [8] и принятой IMA классификацией дессауита-(Y) позицию M_1 занимают Y, U и Mn. В исследуемых образцах U отсутствует, и минерал можно отнести к безурановой разновидности дессауита-(Y). Его формирование, скорее всего, происходило в результате взаимодействия позднемасштабных (пегматитовых) или гидротермальных (?) флюидов, обогащенных Ti, Y, Sr, Pb и REE, с первичными минералами гранита. Его ассоциация с рутилом и анкеритом указывает на метасоматическое замещение в условиях повышенной активности Ti и CO_2 . Кристаллизация минералов осуществлялась, по-видимому, в микрополостях, что объясняет мелкие изометричные зерна и линзовидные формы дессауит-рутил-анкеритовых скоплений.

Заключение

В жилах гранитных пегматитов осевой зоны Полярного Урала, прорывающих амфиболиты харьбейского метаморфического комплекса, впервые для региона обнаружены редкие иттриевые минералы – черновит-(Y) и дессауит-(Y).

Черновит-(Y) образуется в ассоциации с продуктами разложения биотита, P-REE-As-содержащим гидратированным цирконом, мышьяковистым пиритом, кварцем, альбитом и др. Его состав отражает сложный водосодержащий твердый раствор на основе черновита, иттротрихита и ксенотима с примесью коффинитового, торитового и цирконового компонентов. Формирова-

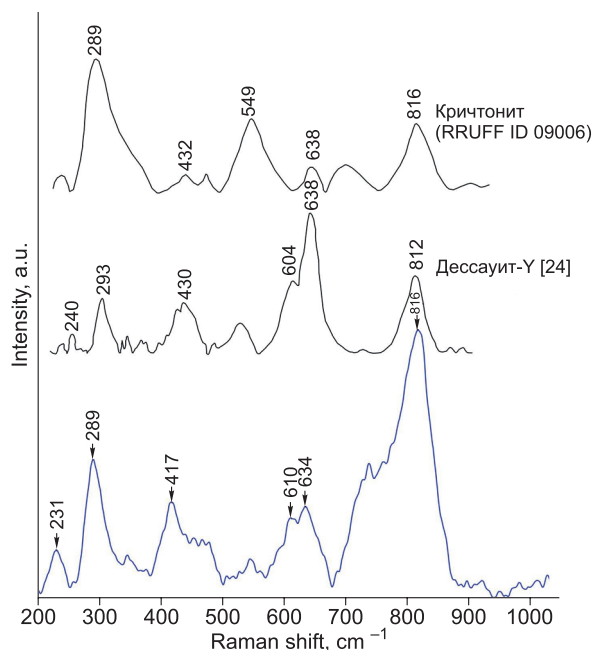


Рис. 8. КР-спектр дессауита-(Y)

Fig. 8. Raman spectrum of dessauite-(Y)

ние минерала происходило под воздействием фторсодержащих щелочных растворов, обогащенных As, Y, U, Th, Zr, P, Si, Al и Ca.

Дессауит-(Y) ассоциирует с рутилом, анкеритом и кварцем, представлен безурановой разновидностью. Его образование связано с воздействием щелочно-карбонатных флюидов, обогащенных Ti, Y, Sr, Pb и REE, в изолированных полостях породы.

Установленные минеральные ассоциации отражают различные геохимические обстановки постмагматического этапа – высокощелочные фторсодержащие системы с активным транспортом As, Y, U, Th и Zr (для черновита-(Y)) и карбонатно-щелочные среды с преобладанием Ti, Sr и Pb (дессауита-(Y)). Выявление этих минералов расширяет представления о минерагении Y-REE-специализации Полярного Урала и подчеркивает перспективность дальнейших исследований постмагматических процессов в регионе.

Список литературы / References

1. Голдин Б.А., Юшкин Н.П., Фишман М.В. Новый иттриевый минерал — черновит. *Записки Всесоюзного минералогического общества* 1967;96(6):699–704.
Goldin B.A., Yushkin N.P., Fishman M.V. A new yttrium mineral, chernovite. *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo Obshchestva*. 1967;96(6):699–704. (In Russ.)
2. Козырева И.В., Швецова И.В., Юдович Я.Э. Новые находки черновита на Приполярном Урале. *Доклады Академии наук*. 2003;390(4):517–521. EDN: QQNYCZ

- Kozyreva I.V., Shvetsova I.V., Yudovich Ya.E. New findings of chernovite in the Near-Polar Urals. *Doklady Earth Sciences*. 2003;390(4):597–600. EDN: OQNYCZ
3. Breiter K., Copjakova R., Skoda R. The involvement of F, CO₂ and As in the alteration of Zr-Th-REE bearing accessory minerals in the Hora Svate Kateriny A type granite, Czech Republic. *The Canadian Mineralogist*. 2009;47:1329–1357. <https://doi.org/10.3749/canmin.47.6.1375> EDN: NAGFYB
4. Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Черновит-(Y) и другие мышьяковые минералы в редкометалльных гранитах и грейзенах Дальнего Востока. *Записки Российского минералогического общества*. 2012;6:118–125 EDN: PIDKHB
- Alekseev V.I., Marin Y.B. A Tribute to Nicolai Pavlovich Yushkin, one of the discoverers of chernovite. Chernovite-(Y) and other arsenic minerals in rare-metal granites and greisens of the Far East. *Geology of Ore Deposits*. 2013;55:601–606. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1075701513070039> EDN: PIDKHB
5. Ondrejka M., Uher P., Prsek J., Ozdin D. Arsenian monazite-(Ce) and xenotime-(Y), REE arsenates and carbonates from the Tisovec-Rejkovo rhyolite, western Carpathians, Slovakia: composition and substitutions in the (REE,Y)XO₄ system (X = P, As, Si, Nb, S). *Lithos*. 2007;95(1-2):116–129. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.07.019>
6. Гореликова Н.В., Коростелев П.Г., Семеняк Б.И. и др. Редкие арсенаты РЗЭ черновит-(Y) и гапсартит-(Ce) в Sn-W грейзеновых месторождениях Карадубского рудного пояса (Хинган-Олонойский район, Приамурье, Россия). *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021;501(1):18–25. <https://doi.org/10.31857/S2686739721110062> EDN: TMAKY
- Gorelikova N.V., Taskaev V.I., Bortnikov N.S., Korostelev P.G., et al. Rare arsenates of REEs and Y in ores of the Verkhnee Greisen deposit within the Khingan-Olonoiiskii district (Primorye, Russia). *Doklady Earth Sciences*. 2021;501(1):912–918. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22330017> EDN: BWGHS
7. Расцветова Р.К. Кричтонит и его семейство: открытие двух новых минералов. *Природа*. 2020;1260(8):39–47. <https://doi.org/10.7868/S0032874X20080049> EDN: CFLLHQ
- Rastsvetova R.K. Crichtonite and its family: the story of the discovery of two new minerals. *Природа*. 2020;8:39–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032874X20080049> EDN: CFLLHQ
8. Orlandi P., Pasero M., Duchy G., Olmi F. Dessauite, (Sr,Pb)(Y,U)(Ti,Fe³⁺)₂₀O₃₈, a new mineral of the crichtonite group from Buca della Vena mine, Tuscany, Italy. *American Mineralogist*. 1997;82(7):807–811. <https://doi.org/10.2138/am-1997-7-819>
9. Савельева В.Б., Базарова Е.П., Демонтерова Е.И., Иванов А.В. Карбонатно-щелочные метасоматиты уранового проявления Песчаное (Западное Прибайкалье): минералогическая и изотопно-геохимическая характеристика. *Геология рудных месторождений*. 2021;63(1):62–87. <https://doi.org/10.31857/S0016777020060064> EDN: NLLTTV
- Savelyeva V.B., Bazarova E.P., Demonterova E.I., Ivanov A.V. Carbonate-alkaline metasomatites of the Peschanoe uranium occur (Western Baikal Region): mineral-geochemical and isotope-geochemical characteristics. *Geology of Ore Deposits*. 2021;63(1):54–78. <https://doi.org/10.1134/S1075701520060069> EDN: WQNNTL
10. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 200000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-42-VII, VIII. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ; 2014. 384 с.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000. Second edition. Polar-Ural Series. Sheet Q-42-VII, VIII. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI; 2014. 384 p. (In Russ.)
11. Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). Екатеринбург: Уралгеолком; 1993. 152 с.
- Stratigraphic schemes of the Urals (Precambrian, Paleozoic)*. Ekaterinburg: Uralgeolkom Publ.; 1993. 152 p. (In Russ.)
12. Краснобаев А.А. Циркон как индикатор геологических процессов. М.: Наука; 1986. 152 с.
- Krasnobaev A.A. *Zircon as an indicator of geological processes*. Moscow: Nauka; 1986. 152 p. (In Russ.)
13. Уляшева Н.С., Серов П.А., Травин А.В. Sm/Nd и ⁴⁰Ar/³⁹Ar-изотопно-геохронологические исследования амфиболитов ханмейхойской свиты харбейского метаморфического комплекса (Полярный Урал). *Доклады Российской академии наук. Науки о земле*. 2022;506(2):194–201. <https://doi.org/10.31857/S2686739722601016> EDN: ZVYEFM
- Ulyasheva N.S., Serov P.A., Travin A.V. Sm/Nd and ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotope-geochronological studies of amphibolite of the kharbei formation of the kharbei metamorphic complex (Polar Urals). *Doklady Earth Sciences*. 2022;506(2):761–767. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22600517> EDN: ZVYEFM
14. Уляшева Н.С., Шуйский А.С., Хубанов В.Б. Харбейский амфиболит-гнейсовый комплекс (Полярный Урал): Р-Т-эволюция и результаты U-Pb LA-ICP-MS-изотопных исследований метаморфического циркона. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2024;518(1):97–107. <https://doi.org/10.31857/S2686739724090103> EDN: EVZUOJ
- Ulyasheva N.S., Shuyskiy A.S., Khubanov V.B. The Kharbei amphibolite-gneiss complex (Polar Urals): P-T evolution and results of U-Pb LA-ICP-MS isotopic study of metamorphic zircon. *Doklady Earth Sciences*. 2024;518(1):1489–1497. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24602761> EDN: TNXNUO
15. Уляшева Н.С. (Y+P+As) — обогащенный циркон в пегматитах Полярного Урала. В кн.: *Минералы: строение, свойства, методы исследования. Материалы XIII Всероссийской молодежной научной конференции, г. Екатеринбург, 29 мая – 02 июня 2023 г.* Екатеринбург: Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН; 2023. С. 272–273. EDN: SXZOLJ
- Ulyasheva N.S. (Y+P+As) — enriched zircon in pegmatites of the Polar Urals. In: *Minerals: structure, properties, research methods: Proceedings of the 13th All-Russian youth scientific conference, Ekaterinburg, 29 May – 02 June, 2023*. Ekaterinburg: Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS; 2023, pp. 272–273. (In Russ.). EDN: SXZOLJ
16. Уляшева Н.С. As-P-REE-содержащий циркон в гранитных пегматитах осевой зоны Полярного Урала. *Литосфера*. 2025;25(3):471–484. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-471-484>
- Ulyasheva N.S. As-P-REE-containing zircon in granite pegmatites of the axial zone of the Polar Urals. *Lithosphere (Russia)*. 2025;25(3):471–484. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-471-484>
17. Силаев В.И., Филиппов В.Н., Хазов А.Ф. и др. Система черновита: новый взгляд через полвека после открытия минерала. *Известия Коми НЦ УрО. Серия «Науки о Земле»*. 2020;41(1):69–79. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2020-1-69-79>
- Silaev V.I., Filippov V.N., Khazov A.F., et al. Black system: a new view in 50 years after the discovery of the mineral. *Pro-*

ceedings of the Komi Science Center Ural Branch Russian Academy of Sciences. 2020;1(41):69–79. (In Russ.)

18. Pagliaro F., Lotti P., Guastoni A., et al. Crystal chemistry and miscibility of chernovite-(Y), xenotime-(Y), gasparite-(Ce) and monazite-(Ce) from Mt. Cervandone, Western Alps, Italy. *Mineralogical Magazine*. 2022;86:150–167. <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.5> EDN: YHJCFA

19. Förster H.J., Ondrejka M., Uher P. Mineralogical responses to subsolidus alteration of granitic rocks by oxidizing Asbearing fluids: REE arsenates and Asrich silicates from the Zinnwald granite, eastern Erzgebirge, Germany. *The Canadian Mineralogist*. 2011;49(4):913–930. <https://doi.org/10.3749/canmin.49.4.913> EDN: PGTNPL

20. Förster H. J. Composition and origin of intermediate solid solutions in the system thorite – xenotime – zircon – coffinite. *Lithos*. 2006;88(1-4):35–55. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.08.003>

21. Зозуля Д.Р., Скублов С.Г., Левашова Е.В., Лялина Л.М. Особенности уникальной высоко-Y-HREE-F пегматитовой системы на основе геохимии циркона (Плоскогорское амазонитовое месторождение, Кольский Полуостров). *Минералогия*. 2025;11(1):43–63. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-1-4>

Zozulya D.R., Skublov S.G., Levashova E.V., Lyalina L.M. Features of a unique high-Y-HREE-F pegmatite system based on zircon geochemistry (Ploskogorsk Amazonite Deposit, Kola Peninsula). *Mineralogy*. 2025;11(1):43–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-1-4>

22. Левашева Е.В., Зозуля Д.Р., Морозова Л.Н. и др. Циркон как индикатор магмато-гидротермального перехода

в эволюции редкометалльных пегматитов (на примере литиевых месторождений Колмозерское и Полмостундровское, Кольский полуостров, Россия). *Геология и геофизика*. 2024;65(11):1552–1572. <https://doi.org/10.15372/GIG2024134>

Levashova E.V., Zozulya D.R., Morozova L.N., et al. Zircon as an indicator of magmatic-hydrothermal transition in the evolution of raremetal pegmatite (using the example of the Kolmozero and Polmostundra lithium deposits, Kola Peninsula, Russia). *Russian Geology and Geophysics*. 2024;65(11):1–18. <https://doi.org/10.2113/RGG20244758>

23. Laetsch T., Downs R.T. Software for identification and refinement of cell parameters from powder diffraction data of minerals using the RRUFF project and American Mineralogist Crystal Structure Databases. In: *Proceedings of the 19th General Meeting of the International Mineralogical Association, Kobe, Japan, July 2006*.

24. Bittarello E., Ciriotti E.M., Costa E., Gallo L.M. “Mohsite” of Colomba: Identification as Dessauite-(Y). *International Journal of Mineralogy*. 2014;287069. <https://doi.org/10.1155/2014/287069>

25. Карпов С.М., Волошин А.В., Компанченко А.А. и др. Минералы группы кричтонита в колчеданных рудах и рудных метасоматитах протерозойских структур Кольского региона. *Записки Российского минералогического общества*. 2016;145(5):39–56.

Karpov S.M., Voloshin A.V., Kompanchenko A.A., et al. Crichtonite group minerals in massive sulfide ores and ore metasomatites of the Proterozoic structures of the Kola region. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*. 2016;145(5):39–56. (In Russ.)

Об авторах

УЛЯШЕВА Наталия Сергеевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория региональной геологии, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-5744-0478>, ResearcherID: AAP-1401-2021, Scopus Author ID: 57194233882, SPIN: 2693-4969, e-mail: nataliaulyashewa@yandex.ru

ШУЙСКИЙ Александр Сергеевич, младший научный сотрудник, лаборатории петрографии, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-6928-9354>, ResearcherID: AAC-4431-2022, Scopus Author ID: 5721240694, SPIN: 7922-8101, e-mail: self88@yandex.ru

ИСАЕНКО Сергей Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория минералогии алмаза, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2050-3310>, ResearcherID: L-2060-2018, Scopus Author ID: 6603239739, SPIN: 9489-7424, e-mail: s.i.isaenko@gmail.com

ПОНОМАРЕВА Татьяна Анатольевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория региональной геологии, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-6895-5450>, ResearcherID: AAC-3074-2022, SPIN: 9286-8209, e-mail: taponomareva@inbox.ru

Вклад авторов

Уляшева Н.С. – разработка концепции, проведение исследования, создание черновика рукописи; **Шуйский А.С.** – проведение исследования, визуализация, редактирование рукописи; **Исаенко С.И.** – ресурсное обеспечение исследования; **Пономарева Т.А.** – проведение исследования, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ULYASHEVA, Natalia Sergeevna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, Laboratory of Regional Geology, Institute of Geology, Komi Science Center, the Ural Branch of the RAS, Syktyvkar, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5744-0478>, ResearcherID: AAP-1401-2021, Scopus Author ID: 57194233882, SPIN: 2693-4969, e-mail: nataliaulyashewa@yandex.ru

SHUYSKI, Alexander Sergeyevich, Junior Researcher, Laboratory of Petrography, Institute of Geology, Komi Science Center, Ural Branch of the RAS, Syktyvkar, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6928-9354>, ResearcherID: AAC-4431-2022, Scopus Author ID: 5721240694, SPIN: 7922-8101, e-mail: self88@yandex.ru

ISAYENKO, Sergey Ivanovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, Laboratory of Diamond Mineralogy, Institute of Geology, Komi Science Center, the Ural Branch of the RAS, Syktyvkar, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2050-3310>, ResearcherID: L-2060-2018, Scopus Author ID: 6603239739, SPIN: 9489-7424, e-mail: s.i.isaenko@gmail.com

PONOMAREVA, Tatyana Anatolyevna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, Laboratory of Regional Geology, Institute of Geology, Komi Science Center, the Ural Branch of the RAS, Syktyvkar, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-6895-5450>, ResearcherID: AAC-3074-2022, SPIN: 9286-8209, e-mail: taponomareva@inbox.ru

Authors' contribution

Ulyasheva N.S. – conceptualization, investigation, writing – original draft; **Shuyski A.S.** – investigation, visualization, writing – review & editing; **Isayenko S.I.** – resources; **Ponomareva T.A.** – investigation, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 03.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 05.02.2026

Принята к публикации / Accepted 17.02.2026