



<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-4-1>

УДК: 553.065.3+553.2.022.2

Фосфаты легких редкоземельных элементов из гематитовых жил аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский полуостров): минералогия и условия образования

Д.Р. Зозуля, А.Н. Соловьева, Е.Э. Савченко, А.А. Компанченко, Е.С. Борисенко
Геологический институт КНЦ РАН, ул. Ферсмана 14, Апатиты, 164209 Россия; d.zozulya@knc.ru

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

Аннотация. Фосфаты легких редкоземельных элементов в (LP3Э) из гидротермальных гематитовых жил и вмещающих песчаников аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский полуостров) разделяются на три морфологических типа. Тип 1 развит в жилах и представлен скоплениями сноповидных агрегатов (до 30 мкм) игольчатых кристаллов в агрегатах калиевого полевого шпата, а также прожилками и ксеноморфными выделениями размером до 40 мкм в гематитовой массе. Агрегаты первого типа сложены монацитом-(Ce) и монацитом-(La). Тип 2, развитый в песчаниках, представлен скоплениями округлых или ксеноморфных индивидов рабдофана-(Ce) размером до 100 мкм. К третьему типу отнесены каймы рабдофана-(Ce) вокруг монацита-(Ce) и уэксфилдита-(Ce) в интерстициях кристаллов калиевого полевого шпата и гематита гидротермальных жил. Особенностью состава монацита-(Ce), монацита-(La) и рабдофана-(Ce) является повышенное содержание S (до 4.28, 3.89 и 2.38 мас. % SO₃, соответственно), которая входит в структуру минерала по схеме $P3Э^{3+} + P^{5+} \leftrightarrow (Ca, Sr)^{2+} + S^{6+}$. Необычным в составе фосфатов LP3Э является отсутствие F и присутствие значимого содержания Cl (до 0.20 мас. % в типе 1 и до 0.45 мас. % – в типах 2 и 3), вхождение которого объясняется схемой замещения $(PO_4)^{3-} \leftrightarrow (SiO_3)^{2-} + Cl^-$. Отрицательная аномалия Ce/Ce* в монацитах и редкая схема замещения $2P3Э^{3+} \leftrightarrow Ca^{2+} + Ce^{4+}$ в рабдофане указывают на кристаллизацию минералов в высокоокислительных условиях. Предполагается, что фосфаты LP3Э осаждались из эпигематитовых высоководных Cl- и S-содержащих растворов при переходе от калитовой к гематитовой стадии с повышением кислотности в K-Fe-O системе.

Ключевые слова: фосфаты LP3Э, монацит-(Ce), монацит-(La), рабдофан-(Ce), гематитовые жилы, K-Fe-O гидротермальная система, месторождение Мыс Корабль.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы НИР Геологического института КНЦ РАН № FMEZ-2024-0004 (г. Апатиты, Россия) и проекта № 30-2026-002787 «Модель формирования необычных гематитовых жил с REE-минерализацией» конкурса Мурманской области «Предоставление грантов в форме субсидий из областного бюджета некоммерческим организациям, не являющимся казенными учреждениями, на поддержку научно-исследовательских проектов молодых ученых Мурманской области» от 03.06.2026 г.

Благодарности. Авторы благодарны Л.М. Лялиной за консультации.

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

Вклад авторов. Зозуля Д.Р., Соловьева А.Н. – разработка концепции, исследование, написание рукописи; Савченко Е.Э., Компанченко А.А., Борисенко Е.С. – аналитические работы, визуализация, редактирование финального варианта рукописи. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования. Зозуля Д.Р., Соловьева А.Н., Савченко Е.Э., Компанченко А.А., Борисенко Е.С. Фосфаты легких редкоземельных элементов из гематитовых жил аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский полуостров): минералогия и условия образования. *Минералогия*, 2026, 12(4), 5–27. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-4-1>

Light rare earth element phosphates from hematite veins of the Korabl Cape amethyst deposit (Kola Peninsula): mineralogy and genesis

D.R. Zozulya, A.N. Solovjova, Ye.E. Savchenko, A.A. Kompanchenko, E.S. Borisenko

Geological Institute, Kola Science Centre RAS, ul. Fersmana 14, Apatity, 184209 Russia; d.zozulya@ksc.ru

Received 00.00.2026, revised 00.00.2026, accepted 00.00.2026

Abstract. Light rare earth elements (LREE) phosphates from hydrothermal hematite veins and host sandstones of the Korabl Cape amethyst deposit (Kola Peninsula) are subdivided into three morphological types. Type 1 forms clusters of radial aggregates (up to 30 μm) made up of acicular crystals within K-feldspar aggregates in veins, as well as veinlets and anhedral aggregates up to 40 μm in size in hematite. The phosphate aggregates are composed of monazite-(Ce) and monazite-(La). Rhabdophane-(Ce) (type 2) forms rounded and anhedral aggregates up to 100 μm in size in sandstones. Type 3 also includes rhabdophane-(Ce), which rims monazite-(Ce) and wakefieldite-(Ce) in cavities between K-feldspar and hematite crystals. Monazite-(Ce), monazite-(La) and rhabdophane-(Ce) are characterized by a higher SO_3 content (up to 4.28, 3.89 and 2.38 wt. %, respectively) and S is incorporated according to scheme $\text{REE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow (\text{Ce}, \text{S})^{2+} + \text{S}^{6+}$. The studied LREE phosphates are surprisingly devoid of F, but exhibit a significant Cl content (up to 0.20 wt. % in type 1 and up to 0.45 wt. % in types 2 and 3), the presence of which is explained by $(\text{Cl}, \text{Ca})^{3-} \rightarrow (\text{SiO}_3)^{2-} + \text{Cl}^-$ substitution. The negative Ce/Ce* anomaly in monazite and rare substitution $2\text{REE}^{3+} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Ce}^{4+}$ in rhabdophane indicate the mineral crystallization under highly oxidizing conditions. It is suggested that the LREE phosphates precipitated from epithermal high-aqueous and Cl-, S-bearing fluids during the transition from the K-feldspar to hematite stage and increasing acidity of the K-Fe-O system.

Keywords: LREE phosphates, monazite-(Ce), monazite-(La), rhabdophane-(Ce), hematite veins, K-Fe-O hydrothermal system, Korabl Cape deposit.

Funding. This study was supported by state contract of the Geological Institute, Kola Science Center RAS no. FMEZ-2024-0004 (Apatity, Russia) and project № 30-2026-002787 “Model of the formation of unusual hematite veins with REE mineralization” of the Murmansk region competition “Grants from regional budget to non-profit organizations (non-state institutions) to support research projects of young scientists of the Murmansk region” on June 03, 2026.

Acknowledgements. The authors are grateful to L.M. Lyalina for consultations.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. Zozulya D.R., Solovjeva A.N. – conceptualization, investigation, writing – original draft; Savchenko Ye.E., Kompanchenko A.A., Borisenko E.S. – analytical works, visualization, writing – review & editing. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Zozulya D.R., Solovjova A.N., Savchenko Ye.E., Kompanchenko A.A., Borisenko E.S. Light rare earth element phosphates from hematite veins of the Korabl Cape amethyst deposit (Kola Peninsula): mineralogy and genesis. *Mineralogy*, 2026, 12(4), 5–27. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-4-1>

ВВЕДЕНИЕ

Безводные фосфаты редкоземельных элементов (РЗЭ) входят в группу монацита с общей формулой ABO_4 [$A = \text{РЗЭ}$ (от La^{3+} до Gd^{3+}), Th^{4+} , Ca^{2+} , Bi^{2+} ; $B = \text{P}^{5+}$, As^{5+}], включающую девять минеральных видов, утвержденных Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации (Uher et al., 2025). Среди них фосфаты РЗЭ представлены пятью минеральными видами: монацитом-(Ce), монацитом-(La), монацитом-(Nd), монацитом-(Sm) и монацитом-(Gd). Самый распространенный мине-

рал группы монацит-(Ce) встречается как акцессорный минерал в магматических и метаморфических породах (Clavier et al., 2011), а также образуется в ходе диагенеза (Donnot et al., 1973) и гидротермальных процессов (Spear, Pyle, 2002; Rasmussen et al., 2006; Rasmussen, Muhling, 2007). Кроме РЗЭ другими типичными примесными элементами в монаците являются Ca, Th, U, Sr, Si и S (Uher et al., 2025).

Одной из характерных особенностей гидротермального монацита являются его скопления из нескольких зерен в отличие от индивидуальных кристаллов в магматических породах. Гидротермальный монацит чаще всего имеет поликристал-

лическую, радиально-мозаичную, радиально-волокнистую или коронарную (центральный монокристалл, окруженный мелкими кристаллами) структуру (Donnot et al., 1973; Schandl, Gorton, 2004; Schulz, 2021). Сферические или эллипсоидные (нодулярные) агрегаты гидротермального монацита (Matzko, Overstreet, 1977; Rosenblum, Mosier, 1983; Макеев и др., 2018, 2020) с многочисленными включениями и примесями известны в отечественной литературе как «куларит» (Некрасова, 1983; Лазарева и др., 2018). Химический состав гидротермального монацита характеризуется иногда повышенным содержанием Nd, Sm и Eu (Rosenblum, Mosier, 1983; Макеев и др., 2018, 2020; Taylor et al., 2024). Самой отличительной особенностью гидротермального монацита, наряду с метаморфогенными и диагенетическими, является крайне низкое содержание Th, для большинства местонахождений минерала не превышающее 1 мас. %.

Водосодержащие фосфаты РЗЭ входят в группу рабдофана с общей формулой $ABO_4 \cdot nH_2O$ [$A = PZ^{3+}$, (Th, U) $^{4+}$, (Ca, Pb) $^{2+}$; $B = P^{5+}$ и незначительные S^{6+} , As^{5+} , Si^{4+} ; и $n = 0.5-2$] (Hukuo, Hikichi, 1979; Jones et al., 1996; Strunz, Nickel, 2001). Группа включает семь минеральных видов, среди которых собственно РЗЭ-содержащие представлены рабдофаном-(Ce), рабдофаном-(La), рабдофаном-(Nd) и рабдофаном-(Y). Другие виды представлены брукситом $(Ca, Th, Ce)PO_4 \cdot H_2O$, триграммом $(Ca, U^{4+}, Fe^{3+})(PO_4, SO_4) \cdot 2H_2O$ и грэйтом $(Th, Pb, Ca)(PO_4) \cdot H_2O$. Несмотря на сходный химический состав с монацитом, рабдофан характеризуется пониженной суммой химических анализом за счет присутствия в структуре молекулярной воды.

Рабдофан обычно образуется при низких температурах в результате гипогенного или гидротермального изменения первичных РЗЭ-содержащих минералов, таких как монацит, алланит, апатит, ксенотим и торит (Mariano, 1989; Lottermoser, 1990; Guastoni et al., 2009; Ntiharizwa et al., 2018; Ondrejka et al., 2018; Buyse et al., 2020; Belogub et al., 2021). Чаще всего рабдофан образует массивные и криптокристаллические землистые агрегаты, бугристые округлые формы, корки или псевдоморфозы, но иногда и гексагональные призмы. Трансформация монацита в рабдофан часто зависит от состава гидротермального раствора, например, обогащение Ca и тяжелыми РЗЭ (Nagy et al., 2002) либо Ca, Th, U, Fe и S (Ondrejka et al., 2018). С другой стороны, рабдофан при нагревании до 160 °C теряет воду (Bowles, Morgan, 1984) и уже при тем-

пературе 180 °C в кислых условиях переходит в монацит (Bamforth et al., 2024).

В данной работе изучены минеральные ассоциации, морфология, особенности и разнообразие химического состава фосфатов легких РЗЭ (ЛРЗЭ) из гидротермальных гематитовых жил аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский полуостров, Россия), отражающие изменения физико-химических условий в ходе эволюции низкотемпературной Fe-РЗЭ-Р-О системы.

ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЫС КОРАБЛЬ И ГЕМАТИТОВЫХ ЖИЛ

Аметистовое месторождение Мыс Корабль расположено в южной части Кольского региона на Терском побережье Белого моря. Район сложен аркозовыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами терской свиты. Отложения свиты слагают северный борт Кандалакшского авлакогена (рис. 1а) заложение и развитие которого происходило в раннее (Балуев и др., 2012). Считается, что в палеозойское время породы терской свиты испытали тектоно-термальную активизацию (Балуев и др., 2012; Нерадовский, 2023). Породы залегают субгоризонтально с падением 5–10° в южном направлении. Мощность свиты составляет около 500 м. Характерной особенностью пород свиты является красно-коричневый цвет, обусловленный присутствием железооксидного (гематитового и, возможно, гидрооксидного) пленочного и порового цемента с губчатой и криптокристаллической структурой вокруг зерен кварца и полевых шпатов (рис. 2а). Отдельные зерна пластинчатого гематита во вмещающих породах (рис. 2б) свидетельствуют о воздействии гидротермальных растворов на вмещающий песчаник с перекристаллизацией диагенетических поровых оксидов Fe (Соловьева и др., 2023).

Месторождение Мыс Корабль представляет собой серию минерализованных зон (штокверков), приуроченных к крупному сбросу, ограничивающему с севера Кандалакшский авлакоген (рис. 1а). Минерализованные зоны сложены гидротермальными кварцевыми (аметистовыми), кварц-флюорит-баритовыми и флюорит-кальцитовыми жилами, приуроченными к зонам трещиноватости и брекчирования вмещающих пород.

Недавно в восточной части месторождения Мыс Корабль были открыты гидротермальные гематитовые жилы, которые обнажаются в прилив-

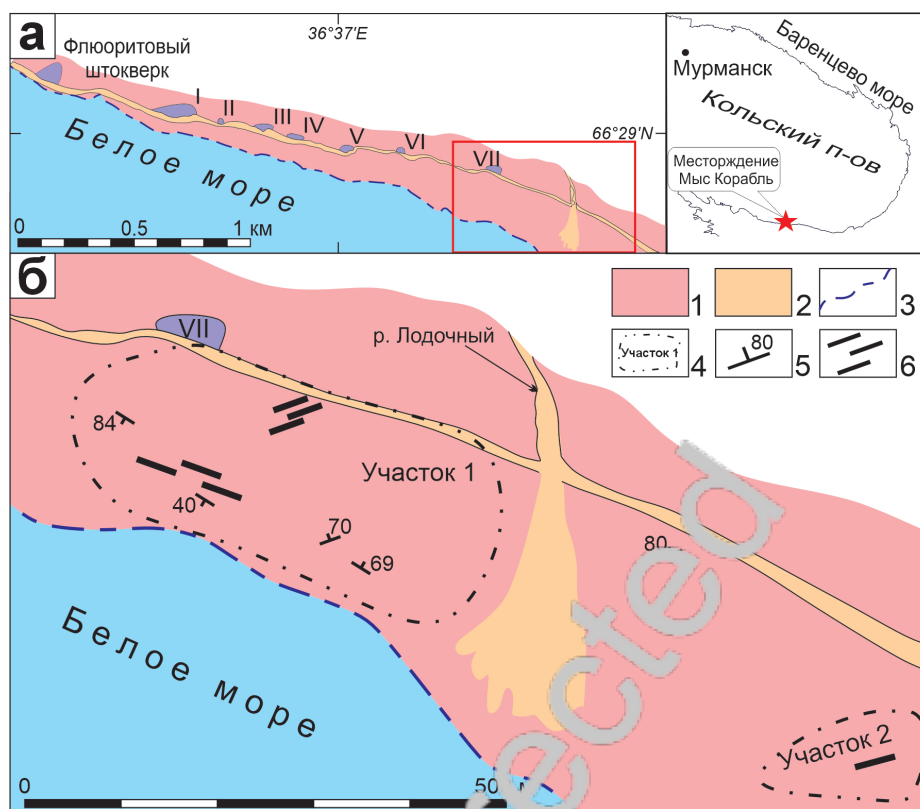


Рис. 1. Геологическая карта-схема месторождения Мыс Корабль с указанием флюоритового штокверка и минерализованных зон (I-VII) и (а) геологическое строение восточной части месторождения (б).

1 – красноцветные песчаники терской свиты; 2 – аллювиально-пляжевые отложения; 3 – граница береговой линии; 4 – участки распространения гематитовых жил, включая ореолы рассеяния их обломков; 5 – простирание и падение трещиноватости в песчаниках; 6 – гематитовые жилы (вне масштаба).

Fig. 1. Schematic geological map of the Korabl Cape deposit with fluorite stockwork and mineralized zones (I-VII) (а) and geological structure of the eastern part of the deposit (б).

1 – red sandstones of the Tersky Formation; 2 – alluvial-beach deposits; 3 – coastline boundary; 4 – contours of areas with hematite veins including dispersion halos of their fragments; 5 – strike and dip of fracturing in sandstones; 6 – hematite veins (not to scale).

но-отливной зоне и приурочены к двум основным системам трещин красноцветных песчаников северо-восточного и субширотного простирания (рис. 1б) (Зозуля и др., 2021). Выделяются два основных типа жил: жилы выполнения и замещения (рис. 3а, б). Жилы выполнения имеют субширотное простирание и представляют собой отдельные тела с четкими контактами с вмещающими песчаниками, что указывает на их кристаллизацию из гидротермальных растворов в открытом пространстве. Их мощность составляет 10–20 см и протяженность – до 15 м. Кусты жил замещения имеют преимущественно северо-восточное простирание; отдельные тела сложной формы мощностью 2–10 см могут протягиваться до 2 м. Эти жилы постепенно переходят во вмещающие породы. Иногда сеть жил замещения

настолько сложная и густая, что они приобретают вид брекчии (рис. 3в).

Жилы практически полностью сложены мелкокристаллическим пластинчатым гематитом размером 5–10 мкм. В некоторых частях жил находятся прожилки мощностью до 100 мкм с более крупными хаотично размещенными пластинками гематита размером 10–80 мкм (рис. 2в), интерпретируемые как контракционные трещины (Зозуля и др., 2021; Соловьева и др., 2023), при этом пространство между такими кристаллами гематита пустое. В жилах встречаются тонкие кварцевые прожилки (мощностью до 10–20 мкм) и миароловые пустоты (до 5 мм), стенки которых сложены кварцевыми друзами, а также агрегаты калиевого полевого шпата (КПШ) размером от 100 мкм до

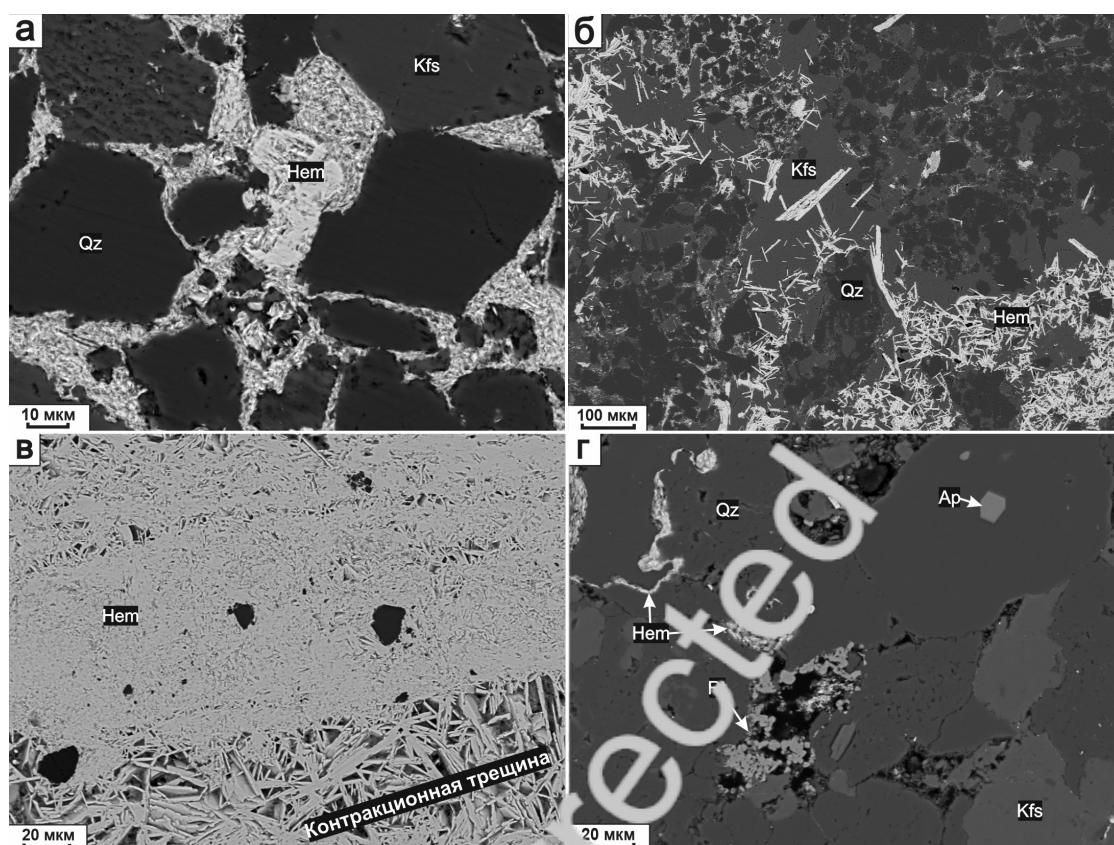


Рис. 2. Структуры вмещающих песчаников и гематитовых жил: а – диагенетический поровый гематит в неизмененном песчанике; б – гидротермальный пластинчатый гематит в песчанике; в – сплошные массы мелкозернистого пластинчатого гематита в гематитовой жиле и контракционная трещина, сложенная крупнозернистыми пластинками гематита с пустотами между кристаллами; г – скопления сферул TiO_2 в пустотах выщелачивания песчаника.

Здесь и на рис. 4, 6, 7а, 7б – BSE фото.

Fig. 3. Structures of host rocks and hematite veins: а – diagenetic pore iron oxide (hematite) in unaltered sandstone; б – hydrothermal lamellar hematite in sandstone; в – massive aggregates of fine-grained lamellar hematite in hematite vein and contraction crack composed of coarse-grained hematite plates with voids between crystals; г – aggregates of TiO_2 spherules in leaching voids of sandstone.

Here and in Figs. 4, 6, 7а, 7б – BSE images.

1 мм. Они обладают субизометричной (100–200 мкм) и чаще сложной морфологией с максимальным размером до 1 мм и с просечками протяженностью до нескольких сотен микрометров и мощностью до 50 мкм (рис. 3а, в). Агрегаты состоят из идиоморфных и субидиоморфных кристаллов КПШ короткопризматического и таблитчатого габитуса размером 10–100 мкм (рис. 3б). КПШ практически соответствует стехиометрическому составу KAlSi_3O_8 (мас. %): 64.38–64.73 SiO_2 , 16.83–17.04 K_2O , 18.26–18.4 Al_2O_3 , 0.33–0.88 FeO , 0.09–0.25 BaO , ≤ 0.07 Na_2O , ≤ 0.05 TiO_2 . Такой состав минерала характерен для КПШ, образующихся в низкотемпературных гидротермальных условиях (Černý, Chapman, 1984; Li et al., 2022) и, с учетом примесей Fe и Ba, отражает

специфический состав гидротермальной системы гематитовых жил месторождения Мыс Корабль.

В некоторых участках жил развивается тонкозернистый серицит. Акцессорные минералы в жилах представлены баритом, а также сульфидами, сульфосолями и сульфоарсенидами Ag, Pb, Sb, As, Hg и Cu, образующимися в пустотах между пластинчатыми кристаллами гематита (Соловьева и др., 2024).

В пустотах выщелачивания вмещающих песчаников присутствуют скопления микронных сферул гидротермальной фазы TiO_2 (рис. 2г), связанные с флюидной переработкой песчаников, т. к. они иногда находятся в парагенезисе с пластинчатым гематитом. На месторождении отмечены единич-

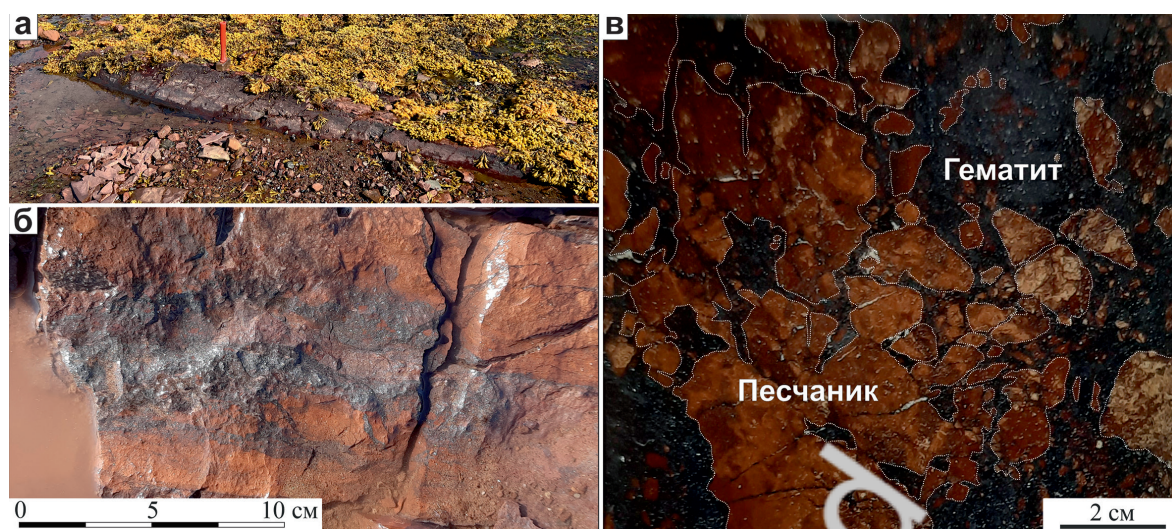


Рис. 3. Гематитовые жилы выполнения (а) и замещения (б) и приполицентрический образец брекчии с гематитовым цементом, с изменениями и дополнениями по (Zozulya et al., 2025).

Длина рукоятки ручки молотка на рис. 3а ~40 см.

Fig. 3. Fissure (a) and replacement (б) hematite veins and polished sample of breccia with hematite cement, modified after (Zozulya et al., 2025).

The hammer shaft in Fig. 3a is ~40 cm long.

ные зерна РЗЭ-содержащих минералов: паризита-(Ce) в сростании с пластинчатым гематитом из вмещающих песчаников, а также бастнезита-(Ce), лопарита-(Ce) и уэксфилдита-(Ce) в пустотах между кристаллами гематита и калиевого полевого шпата из самих жил (Соловьева и др., 2023; Zozulya et al., 2025).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Химический состав минералов. BSE (back-scattered electron) изображения получены с использованием растрового электронного микроскопа Leo-1450 (Carl Zeiss), оснащенного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром UltimMax-100 (Oxford Instruments). Параметры анализа: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 1.6 нА, диаметр пучка – 1 мкм. Эталонные и аналитические линии: $AlK\alpha$ – $Y_3Al_5O_{12}$, $NaK\alpha$ – лоренценит, $KK\alpha$ – ортоклаз, $SiK\alpha$ – волластонит, $PK\alpha$ – апатит, $SK\alpha$ – целестин, $CaK\alpha$ – волластонит, $FeK\alpha$ – гематит, $SrLa$ – целестин, YLa – $Y_3Al_5O_{12}$, $BaLa$ – барит, $ClK\alpha$ – атакамит, $LaLa$ – $(La,Ce)S$, $CeLa$ – CeS , $PrLa$ – $LiPr(WO_4)_2$, $NdLa$ – $LiNd(MoO_4)_2$, $SmLa$ – $SmFeO_3$, $GdLa$ – $Gd_3Fe_5O_{12}$. Пределы обнаружения компонентов приведены в табл. 1 электронного приложения (ЭП). Всего проанализирована 91 точка (табл. 2 ЭП). В работе использовано следующее разделение

РЗЭ на группы: легкие (La, Ce, Pr, Nd), средние (Sm, Eu, Gd) и тяжелые (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y).

Содержания РЗЭ в валовых пробах гематитовых жил и песчаников (табл. 3 ЭП) определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в Центре коллективного пользования «Геоаналитик» УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия). Оборудование и методология представлены на сайте <http://geoanalyst.igg.uran.ru/>.

Рамановские спектры монацита зарегистрированы на неориентированных образцах с использованием рамановского спектрометра EnSpectr R532 на базе оптического микроскопа Olympus BX43 (твердотельный лазер с длиной волны 532 нм, максимальная мощность лазера – 18 мВт, спектральное разрешение – $5\text{--}8\text{ см}^{-1}$, ошибка определения величины рамановского сдвига не превышала $\pm 1\text{ см}^{-1}$, диаметр лазерного луча – 2 мкм), время экспозиции – 100 с, объектив $\times 100$ (NA 0.8), мощность лазера при регистрации – 30 % от максимальной. Для сравнения использовался рамановский спектр монацита R120146 из базы данных RRUFF (Lafuente et al., 2015).

В работе использованы следующие аббревиатуры минералов (Warr, 2021): Ap – апатит; Hem – гематит; Kfs – калиевый полевой шпат; Qz – кварц; Mnz-Ce – монацит-(Ce); Rt – рутил; Wf-Ce – уэксфилдит; REE- PO_4 – фосфат РЗЭ.

Таблица 1. Представительные анализы фосфата ЛРЗЭ морфологического типа 1 из гематитовых жил месторождения Мыс Корабль

Table 1. Representative analyses of LREE phosphate of morphological type 1 from hematite veins of the Mys Korabl deposit

№ ан.	S47	S64	S77	S78	S82	S13	S14	S15	S57	S69	S26	S42	S80	S90
Al ₂ O ₃	0.10	0.17	0.17	0.25	0.18	0.21	0.17	0.18	0.20	0.17	0.19	—	0.19	0.17
K ₂ O	—	—	—	—	—	—	0.08	—	—	0.09	—	—	—	—
SiO ₂	0.27	0.26	0.28	0.26	0.24	0.21	0.30	0.31	0.27	0.31	0.26	0.19	0.28	0.27
P ₂ O ₅	26.91	27.35	27.68	26.84	26.99	27.23	27.70	28.06	27.38	27.39	26.98	26.94	27.32	26.87
SO ₃	3.72	3.54	3.82	3.60	3.52	3.90	4.28	3.97	3.61	3.34	3.27	3.93	3.21	3.86
CaO	3.53	3.48	3.47	3.51	3.38	3.58	3.71	3.69	3.43	3.55	3.45	3.64	3.52	3.65
FeO	3.22	3.04	2.34	2.02	2.56	—	—	—	0.47	0.56	2.80	2.68	1.88	2.34
SrO	1.57	1.42	1.62	1.35	1.40	1.45	1.63	1.71	1.44	1.22	1.39	1.46	1.28	1.51
Y ₂ O ₃	1.50	1.38	1.35	1.33	1.37	1.47	1.26	1.66	1.36	1.41	1.44	1.31	1.36	1.41
Cl	0.16	0.14	0.16	0.16	0.13	0.14	0.13	0.12	0.11	0.18	0.15	0.14	0.16	0.17
La ₂ O ₃	21.02	22.28	19.84	19.34	20.60	16.16	16.49	16.11	16.76	16.95	21.50	19.95	18.98	20.02
Ce ₂ O ₃	17.65	16.97	20.98	21.37	20.15	27.32	28.19	28.39	22.47	25.99	17.33	18.33	22.07	18.29
Pr ₂ O ₃	4.02	4.27	3.83	3.81	3.91	3.37	3.21	3.15	3.84	3.52	4.11	4.22	3.90	4.08
Nd ₂ O ₃	13.60	14.01	13.23	13.06	12.98	11.66	11.35	11.42	12.93	12.52	14.35	14.05	13.33	14.20
Sm ₂ O ₃	1.37	1.61	1.30	1.18	1.34	1.32	1.13	1.25	1.16	1.24	1.30	1.45	1.28	1.30
Сумма	98.64	99.92	100.07	98.08	98.75	98.02	99.61	100.02	98.45	98.54	98.52	98.29	98.76	98.14
Формульные коэффициенты (расчет на 4 О)														
Al	—	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	—	0.01	0.01
Si	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
P	0.86	0.86	0.87	0.86	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.85	0.87	0.85
S	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09	0.11	0.09	0.11
Ca	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14	0.15
Fe	0.10	0.10	0.07	0.06	0.08	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.09	0.08	0.06	0.07
Sr	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Y	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Cl	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
La	0.29	0.31	0.27	0.27	0.29	0.23	0.22	0.22	0.27	0.23	0.30	0.28	0.26	0.28
Ce	0.24	0.23	0.28	0.29	0.28	0.38	0.38	0.38	0.31	0.36	0.24	0.25	0.30	0.25
Pr	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06
Nd	0.18	0.19	0.17	0.18	0.18	0.16	0.15	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.18	0.19
Sm	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Сумма катионов	2.08	2.08	2.07	2.07	2.07	2.04	2.03	2.03	2.03	2.03	2.06	2.06	2.05	2.06
Усредненная формула														
Монацит-(Ce) (Ce _{0.32} La _{0.24} Nd _{0.16} Ca _{0.14} Pr _{0.05} Y _{0.03} Sr _{0.03} Sm _{0.02}) _{0.99} (P _{0.85} S _{0.10}) _{0.95} O ₄														
Монацит-(La) (La _{0.30} Ce _{0.26} Nd _{0.19} Ca _{0.14} Pr _{0.05} Y _{0.03} Sr _{0.03} Sm _{0.02}) _{1.02} (P _{0.87} S _{0.10}) _{0.97} O ₄														

Примечание. Анализы S47, S64, S77, S78, S82 – прожилки в гематитовой массе; S13, S14, S15, S57, S69 – сноповидные агрегаты в КППИ; S26, S42, S80, S90 – округлые и ксеноморфные агрегаты в гематитовой массе. Здесь и в табл. 2, прочерк – содержание ниже предела обнаружения.

Note. Analyses S47, S64, S77, S78, S82 – veinlets in hematite; S13, S14, S15, S57, S69 – radial aggregates in K-feldspar; S26, S42, S80, S90 – rounded and anhedral aggregates in hematite. Here and in Table 2, dash – the content is below detection limit.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологические типы и химический состав фосфатов РЗЭ

Фосфаты РЗЭ обнаружены как в самих гематитовых жилах, так и в песчаниках. По типу вмещающей породы, минеральным ассоциациям и морфологии минералы разделены на три морфологических типа.

Тип 1 представлен наиболее широко в гематитовых жилах и образует многочисленные сноповидные агрегаты размером 20–100 мкм, приуроченные к кристаллическим агрегатам КППШ (рис. 4а–в). Сноповидные агрегаты фосфата РЗЭ типа 1 в КППШ состоят из полых столбчатых кристаллов с гексагональным сечением (рис. 4д, е). К этому же морфологическому типу относятся мелкие (5–10 мкм) радиально-лучистые агрегаты фосфата РЗЭ в пустотах между крупными пластинками гематита, характерные для свободного роста (рис. 4г), а также тонкие (до 10 мкм) и прерывистые прожилки фосфатов ЛРЗЭ, пересекающие агрегаты гематита и исходящие от скоплений монацита из КППШ (рис. 4а, 4ж). В гематитовой массе часто наблюдаются ксеноморфные агрегаты фосфата РЗЭ типа 1 размером 10–100 мкм (рис. 4з).

Рамановские спектры фосфатов РЗЭ типа 1 из агрегатов КППШ имеют полосы, соответствующие тем или иным колебаниям тетраэдра $[PO_4]$ (Clavier et al., 2018) в монаците-(Ce) (рис. 5). Наиболее интенсивная полоса 972 см^{-1} соответствует симметричному растяжению, полосы в диапазоне $1000\text{--}1075\text{ см}^{-1}$ – ассиметричному растяжению. Полосы в диапазонах $500\text{--}630\text{ см}^{-1}$ и менее 400 см^{-1} соответствуют ассиметричным деформационным колебаниям, симметричным деформационным колебаниям и колебаниям решетки минерала, соответственно. Полосы в областях 1630 и $3000\text{--}3500\text{ см}^{-1}$, которые соответствуют колебаниям связей О-Н, не наблюдались. Таким образом, гексагональная морфология некоторых монацитов первого типа, скорее всего, является следствием псевдоморфного замещения рабдофана. На возможность трансформации рабдофана в монацит указывают экспериментальные данные в гидротермальной системе апатит-монацит-рабдофан (Bamforth et al., 2024).

В песчаниках и, особенно, в брекчиевом цементе с признаками гидротермального воздействия присутствуют фосфаты РЗЭ, отнесенные к морфо-

логическому типу 2. Они образуют ксеноморфные агрегаты (20–100 мкм) в ассоциации с пластинчатым гематитом (рис. 6а, б) и сложены двумя морфологическими подтипами: мелкими удлиненными зернами размером до 20 мкм и зернистыми скоплениями размером до 10 мкм (рис. 6б).

Морфологический тип 3 представлен мелкими (1–10 мкм) комковидными и зернистыми агрегатами, которые обрастают монацит первого типа и уэйкфилдит-(Ce) в агрегатах КППШ из гематитовых жил (рис. 7).

По химическому составу фосфаты гематитовых жил месторождения Мыс Корабль являются фосфатами ЛРЗЭ. Фосфаты морфологического типа 1 представлены монацитом-(Ce) и монацитом-(La) (рис. 8, табл. 1, 2 ЭП). Фосфаты ЛРЗЭ типов 2 и 3 отличаются пониженной суммой анализов ($84.3\text{--}92.0\text{ мас. \%}$), что указывает на присутствие воды в составе минерала. Это позволяет условно отнести их к рабдофану-(Ce) по аналогии с подобными минералами (Халезова, Князева, 1961; Fowles, Morgan, 1984; Berger et al., 2014; Макагон, Котляров, 2016; Ondrejka et al., 2018; Belogub et al., 2021). Минералы типов 2 и 3 характеризуются $Ce > La$ и $Ce \gg La$, соответственно (рис. 8, табл. 2, 2 ЭП).

Содержания Nd составляют $0.15\text{--}0.21$, $0.11\text{--}0.12$ и $0.06\text{--}0.11$ к.а.ф. (коэффициент атомов на формулу) в фосфатах типов 1, 2 и 3, соответственно; отношение $(La/Nd)_n$ составляет $2.58\text{--}3.58$, $1.75\text{--}2.44$ и $1.45\text{--}2.46$, соответственно. Отношение $(La/Sm)_n$ имеет более фракционированный характер для минералов типов 1 и 2 ($7.8\text{--}13.1$) по сравнению с рабдофаном-(Ce) типа 3 ($3.8\text{--}4.1$). Отношение Ce/Ce^* значительно варьирует от $0.30\text{--}1.00$ в типе 1 до $1.03\text{--}2.15$ в типе 2 и достигает максимальных значений $1.79\text{--}6.37$ в типе 3, что отражается на появлении как отрицательных (тип 1) так и положительных (типы 2 и 3) цериевых аномалий (рис. 9).

Во всех типах фосфатов ЛРЗЭ установлены значимые содержания Ca, Fe, Y, Sr, Ba и S, которые отличаются для разных типов (табл. 1, 2, 2 ЭП). Тип 1 содержит (мас. %) до 2.70 FeO , $3.31\text{--}3.91\text{ CaO}$, $1.30\text{--}1.71\text{ SrO}$, $0.93\text{--}1.66\text{ Y}_2\text{O}_3$ и $3.02\text{--}4.28\text{ SO}_3$. Тип 2 характеризуется повышенным содержанием CaO ($4.92\text{--}5.79\text{ мас. \%}$), Y_2O_3 ($1.79\text{--}2.45\text{ мас. \%}$) и BaO ($0.72\text{--}1.06\text{ мас. \%}$) и пониженным – SO_3 ($0.37\text{--}0.83\text{ мас. \%}$). Тип 3 имеет высокие содержания CaO ($5.09\text{--}6.68\text{ мас. \%}$), Y_2O_3 ($1.86\text{--}2.50\text{ мас. \%}$) и FeO (до $4.9\text{ мас. \%}$), и умеренные SO_3 ($1.31\text{--}2.38\text{ мас. \%}$). Фосфаты всех типов содержат Cl (от $0.09\text{--}0.20\text{ мас. \%}$).

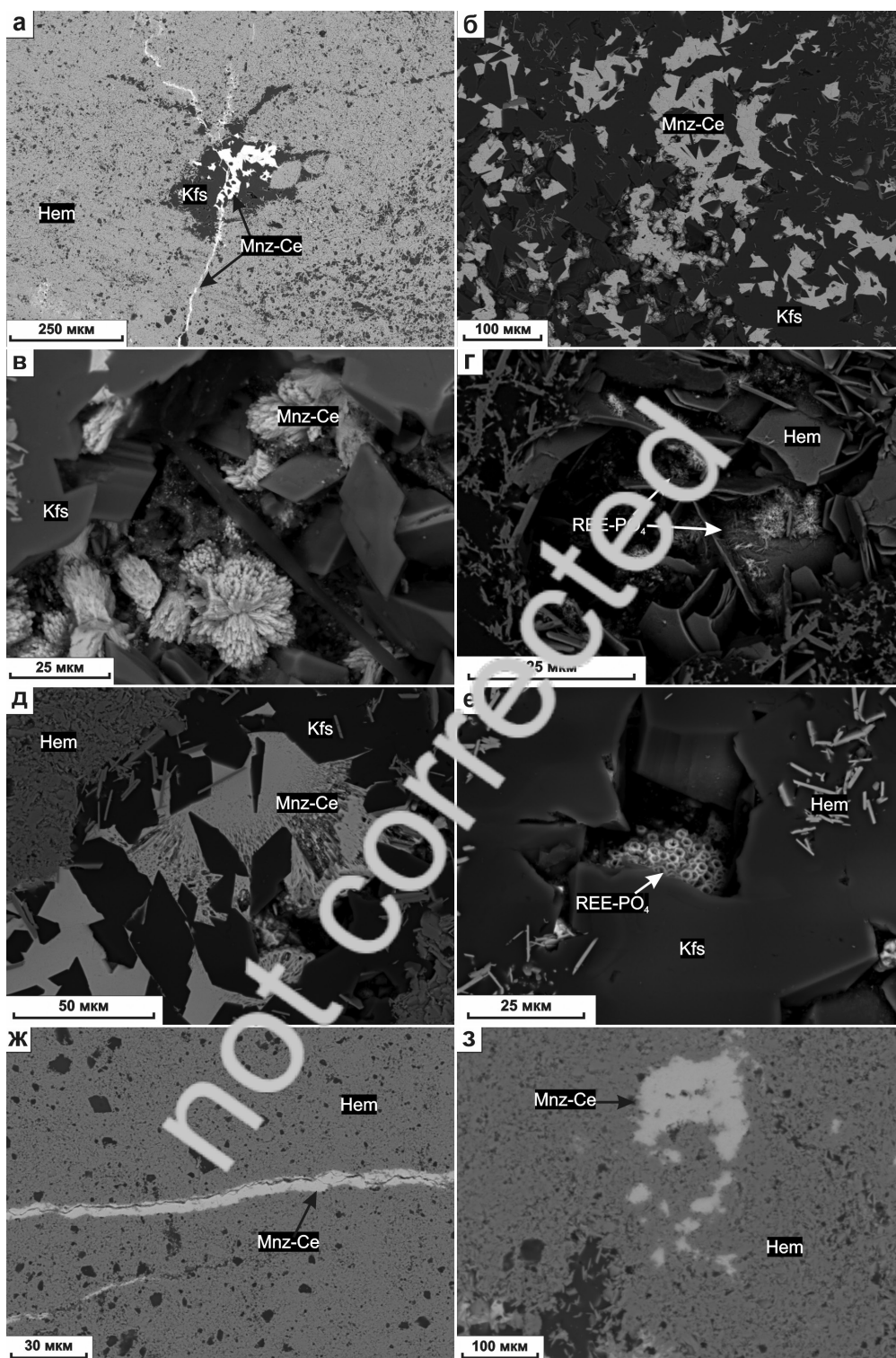


Рис. 4. Морфология и минеральные ассоциации фосфата ЛРЗЭ морфологического типа 1: а – агрегаты КПШ с монацитом-(Ce) в гематите; б – сноповидные агрегаты игольчатых кристаллов монацита-(Ce) в агрегатах КПШ; в – агрегаты игольчатых кристаллов монацита-(Ce) в пустотах между кристаллами КПШ; г – радиально-лучистые сростки фосфата ЛРЗЭ в пустотах между пластинками гематита; д – полые столбчатые кристаллы монацита-(Ce); е – гексагональное сечение столбчатых кристаллов; ж – прожилки монацита-(Ce) в гематите; з – ксеноморфные агрегаты монацита-(Ce) в гематите.

Fig. 4. Morphology and mineral assemblages of LREE phosphate of morphological type 1: а – K-feldspar aggregates with monazite-(Ce) in hematite; б – radial aggregates of acicular monazite-(Ce) crystals in K-feldspar aggregates; в – aggregates

of acicular monazite-(Ce) crystals between K-feldspar crystals; r – radial LREE phosphate crystals between hematite plates; д – empty columnar monazite-(Ce) crystals; e – hexagonal section of columnar crystals; ж – monazite-(Ce) veinlets in hematite; з – anhedral monazite-(Ce) aggregates in hematite.

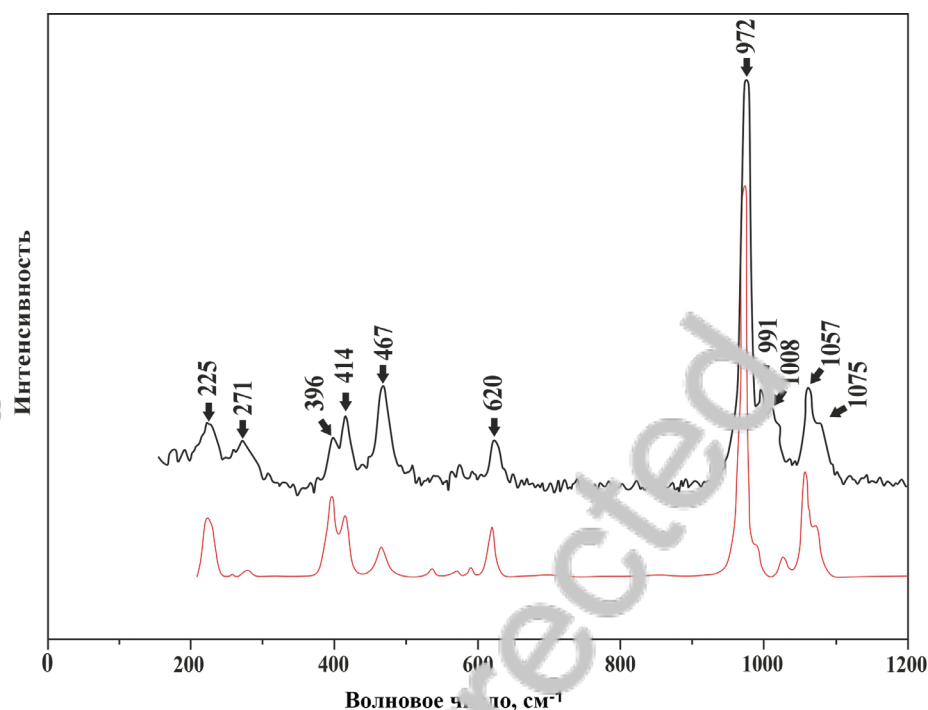


Рис. 5. Рамановские спектры монацита из сноповидных сростков в агрегатах КФС с соответствующими полосами и из базы данных RRUFF № R120146 (показан красным цветом).

Fig. 5. Raman spectra of monazite from radial aggregates in K-feldspar with corresponding bands and from the RRUFF database no. R120146 (shown in red).

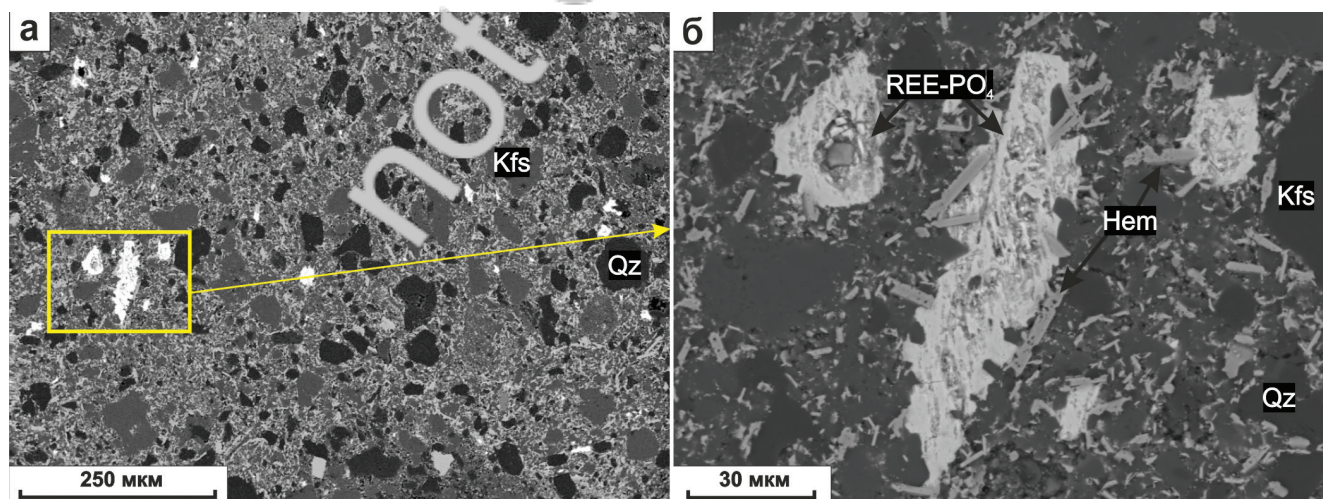


Рис. 6. Морфология и минеральные ассоциации фосфата ЛРЗЭ морфологического типа 2: а – агрегаты фосфатов ЛРЗЭ в песчаниках; б – деталь предыдущего снимка: скопление удлиненных/игольчатых кристаллов и комковидных зерен.

Fig. 6. Morphology and mineral assemblages of LREE phosphate of morphological type 2: a – aggregates of LREE phosphates in sandstones; б – detail of the previous image: an aggregate of elongated/acicular crystals and lumpy grains.

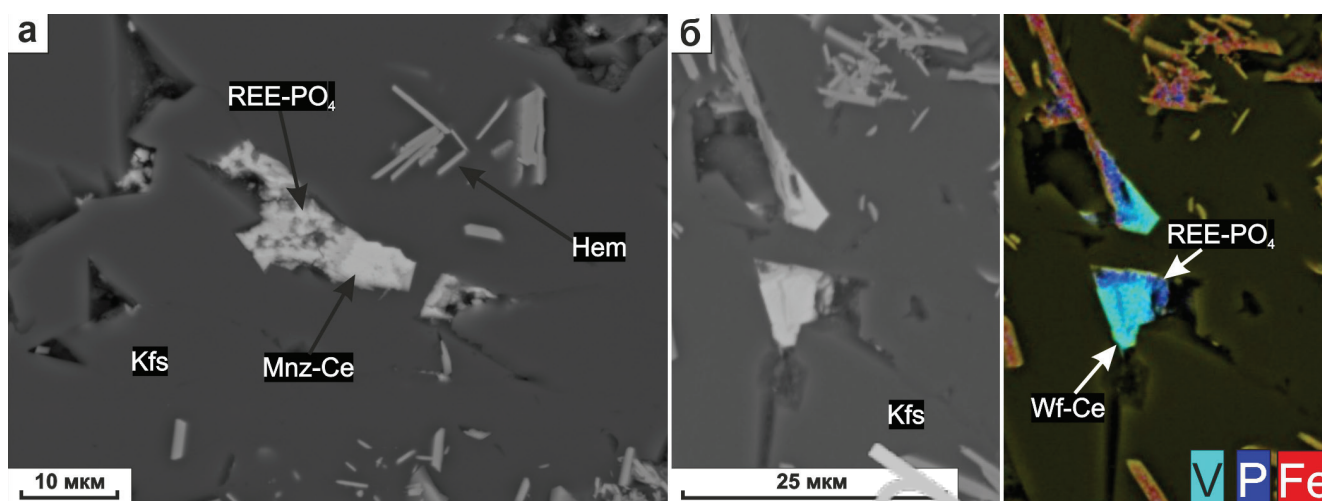


Рис. 7. Морфология и минеральные ассоциации фосфата ЛРЗЭ морфологического типа 3: а – неоднородные зернистые сростки, обрастающие монацит-(Ce) типа 1 в пустотах агрегатах КФШ; б – те же агрегаты, обрастающие уэксфилдит-(Ce), и карта распределения V, P и Fe (с изменениями по Zozulya et al., 2025).

Fig. 7. Morphology and mineral assemblages of LREE phosphate of morphological type 3: а – heterogeneous granular aggregates on type 1 monazite-(Ce) in cavities of K-feldspar aggregates, б – the same aggregates on wakefieldite-(Ce) and distribution map of V, P and Fe (modified after Zozulya et al., 2025).

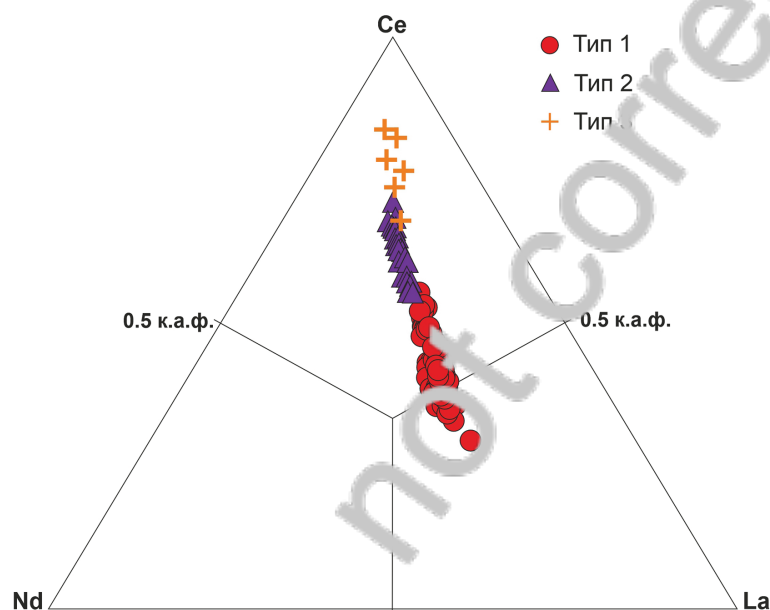


Рис. 8. Классификационная диаграмма La–Ce–Nd для фосфатов ЛРЗЭ морфологических типов 1–3.

Fig. 8. La–Ce–Nd classification diagram for LREE phosphates of morphological types 1–3.

% в типе 1 и до 0.20–0.45 мас. % в типах 2 и 3) и SiO_2 (в основном, до 1 мас. % с повышенным содержанием в минералах типов 2 и 3). Содержания Th и F во всех морфологических типах ниже пределов обнаружения СЭМ-ЭДС анализа.

Изоморфные замещения в фосфатах ЛРЗЭ

Характерной особенностью фосфатов ЛРЗЭ из гематитовых жил месторождения Мыс Корабль является присутствие Ca и S. Считается, что Ca в

монаците является следствием сопряженного замещения РЗЭ чералитовым компонентом $\text{Ca}_{0.5}\text{Th}_{0.5}\text{PO}_4$ (Uher et al., 2025). Для рабдофана возможно замещение тристрамит-броккитовым компонентом (Ondrejka et al., 2018). Действительно, для изученных фосфатов ЛРЗЭ наблюдается в целом отрицательный наклон отношения Ca к ЛРЗЭ (кроме Ce) (рис. 10а, б). Следует отметить, что для некоторых типов слабая отрицательная корреляция между Ca и ЛРЗЭ может быть связана с возможным вхождением Fe и Sr (тип 1) или Ba (тип 2) в структуру минерала.

Таблица 2. Представительные анализы рабдофана-(Ce) морфологических типов 2 и 3 из гематитовых жил месторождения Мыс Корабль

Table 2. Representative analyses of rhabdophane-(Ce) of morphological types 2 and 3 from hematite veins of the Mys Korabl deposit

	Тип 2					Тип 3					
№ ан.	25-1-1a	25-1-4a	25-1-6a	25-1-7a	25-1-9a	S18	S23	S24	S48	S49	S73
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	0.86	0.81	0.32	0.44	—
Na ₂ O	—	—	—	—	—	0.52	—	0.72	0.52	0.84	0.79
K ₂ O	—	—	—	—	—	—	0.63	1.46	0.31	0.37	0.24
SiO ₂	1.33	1.11	0.39	—	0.25	—	2.35	2.92	0.24	0.67	0.34
P ₂ O ₅	24.93	25.18	25.93	26.20	26.05	24.57	20.97	22.99	25.08	27.04	27.35
SO ₃	0.65	0.62	0.74	0.57	0.80	1.47	1.31	1.49	1.34	1.66	2.38
CaO	5.62	5.34	5.69	5.61	5.67	5.99	5.66	5.78	6.46	6.68	5.09
V ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	5.15	—	—	—	—
FeO	—	—	—	—	—	—	1.00	1.18	4.91	2.30	1.13
SrO	—	—	—	—	—	0.63	0.55	0.59	0.47	0.70	0.98
Y ₂ O ₃	2.07	2.33	2.35	2.33	2.25	2.35	1.17	2.08	1.86	2.50	2.06
BaO	0.89	0.77	0.72	0.84	0.86	—	—	—	0.69	—	—
Cl	0.19	0.29	0.32	0.29	0.28	0.42	0.41	0.41	0.29	0.43	0.27
La ₂ O ₃	10.24	8.91	8.41	9.74	9.70	5.01	5.66	6.04	4.60	3.54	9.09
Ce ₂ O ₃	27.48	29.55	28.25	29.10	28.33	37.21	34.35	32.81	37.80	39.64	33.53
Pr ₂ O ₃	2.27	2.16	2.13	2.26	2.03	—	—	—	—	0.64	2.16
Nd ₂ O ₃	8.76	8.45	8.36	8.95	8.71	6.05	6.60	4.81	4.20	4.80	8.15
Sm ₂ O ₃	1.71	1.57	1.62	1.49	1.58	—	—	—	—	0.59	1.43
Gd ₂ O ₃	1.19	1.08	1.16	1.07	1.02	—	—	—	—	—	0.76
H ₂ O*	7.00	7.01	7.00	7.06	7.06	6.87	7.37	7.10	7.27	7.74	7.66
Сумма	94.33	94.37	93.07	95.51	94.66	91.18	96.17	91.19	96.36	100.58	103.41
Формульные коэффициенты (расчет на 4 O)											
Al	—	—	—	—	—	—	0.04	0.04	0.01	0.02	—
Na	—	—	—	—	—	0.04	—	0.05	0.04	0.06	0.06
K	—	—	—	—	—	—	0.03	0.07	0.02	0.02	0.01
Si	0.05	0.04	0.02	—	0.01	—	0.09	0.11	0.01	0.03	0.01
P	0.79	0.80	0.82	0.83	0.83	0.78	0.66	0.73	0.79	0.86	0.87
S	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.07
Ca	0.23	0.21	0.23	0.23	0.23	0.24	0.23	0.23	0.26	0.27	0.20
V	—	—	—	—	—	—	0.13	—	—	—	—
Fe	—	—	—	—	—	—	0.03	0.04	0.15	0.07	0.04
Sr	—	—	—	—	—	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
Y	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04
Ba	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Cl	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02
La	0.14	0.12	0.12	0.13	0.13	0.07	0.09	0.08	0.06	0.05	0.13
Ce	0.38	0.41	0.39	0.40	0.39	0.51	0.47	0.45	0.52	0.54	0.46
Pr	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	—	—	—	—	—	0.03
Nd	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12	0.08	0.09	0.06	0.06	0.06	0.11
Sm	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
Gd	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	—	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Сумма катионов	1.85	1.85	1.84	1.86	1.86	1.85	1.98	1.98	2.03	2.12	2.08
Усредненная формула											
(Ce _{0.42} Ca _{0.23} La _{0.14} Nd _{0.13} Y _{0.05} Pr _{0.03} Sm _{0.02}) _{1.02}						(Ce _{0.54} Ca _{0.26} La _{0.09} Nd _{0.08} Y _{0.05} Sr _{0.02}) _{1.04}					
(P _{0.89} Si _{0.06} S _{0.02}) _{0.97} O ₄ ·H ₂ O						(P _{0.85} S _{0.05} Si _{0.05}) _{0.95} O ₄ ·H ₂ O					

Примечание. * – рассчитано на основе стехиометрии рабдофана, включая одну молекулу H₂O.

Note. * – calculated from stoichiometry of rhabdophane including one H₂O molecule.

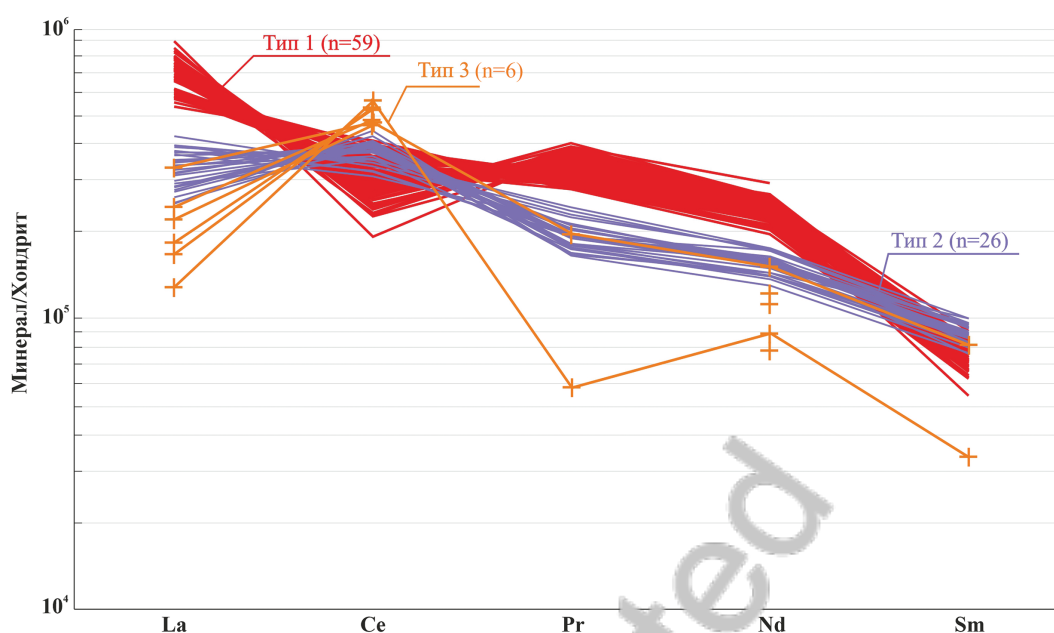


Рис. 9. Спектры распределения РЗЭ для фосфатов ЛРЗЭ, нормированные к хондриту CI (McDonough, Sun, 1995).
Fig. 9. REE patterns for LREE phosphates normalized to CI chondrite (McDonough, Sun, 1995).

Сера (до 11.2 мас. % SO_3), хоть и не является распространенной примесью в фосфатах ЛРЗЭ, обнаружена во вторичных низкотемпературных и гидротермальных монаците-(Ce) и рабдофанах-(Ce), из измененных карбонатитов, кимберлитов, габброидов, гранитов, кварцевых жил и некоторых метаморфических пород, а также из осадочных железорудных месторождений и зон окисления сульфидных руд (Кухаренко и др., 1961; Chakhmouradian and Mitchell, 1999; Belogub et al., 2021; Bulakh et al., 2000; Репина, 2007; Ondrejka et al., 2007; 2016; 2018; Pršek et al., 2010; Krenn et al., 2011; Laurent et al., 2016; Enkhbayar et al., 2015; Prokopyev et al., 2017; Sokol et al., 2020; Nikolenko et al., 2018; Broom-Fendley et al., 2020). Сложно повышенное содержание S в первичном магматическом монаците из гранитоидов Западно-Карпатского массива, вероятно, связано со специфической окисленной средой при его кристаллизации из расплава с более высокой летучестью кислорода ($f\text{O}_2$) и активностью S (Ondrejka et al., 2013). Для вхождения S в структуру монацита предложены схемы гетеровалентного изоморфного замещения с участием Si [$\text{Si}^{6+} + \text{Si}^{4+} \leftrightarrow 2\text{P}^{5+}$] и Th [$2\text{P}_3\text{O}_3^{3+} \leftrightarrow (\text{Ca}, \text{Sr})^{2+} + (\text{Th}, \text{U})^{4+}$] (Williams et al., 2007), а также [$\text{Ce}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}(\text{Sr}^{2+}) + \text{S}^{6+}$] (Кухаренко и др., 1961). Низкие содержания Si и отсутствие Th, положительная корреляция между S и (Ca+Sr) (рис. 10г) и отсутствие отрицательной

корреляции между P и S (рис. 10в) позволяют предположить, что схема замещения (Кухаренко и др., 1961) является наиболее вероятным механизмом вхождения S, а также Ca в состав монацита из гематитовых жил.

Следует отметить, что вхождение Ca^{2+} в структуру монацита может происходить за счет компенсации Ce^{4+} (Орлова и др., 2001; Китаев и др., 2004). В этом случае повышенное содержание Ca в фосфатах ЛРЗЭ является следствием изменения окисленности церия в гидротермальной системе гематитовых жил месторождения Мыса Корабль и возможного проявления гетеровалентной схемы замещения в минерале по схеме $2\text{P}_3\text{O}_3^{3+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Ce}^{4+}$. Положительная корреляция Ca и Ce (слабая в монацитах и значимая в рабдофанах (рис. 10д)) указывают на то, что некоторая часть Ce в монацитах (в рабдофанах – более значительная) является четырехвалентной.

Известно, что монацит-(Ce) может содержать значимые концентрации аниона F^- (чаще не более 1.0 мас. %), входящего в позицию кислорода для сохранения баланса при замещении трехвалентных катионов двухвалентными (Andreoli et al., 1994; Ondrejka et al., 2007; Bowins and Crockett, 2011; Krenn et al., 2011; Catlos, Miller, 2017; Broska, Kubiš, 2018; Broom-Fendley et al., 2020). При этом у F-содержащих монацитов концентрации хлора в

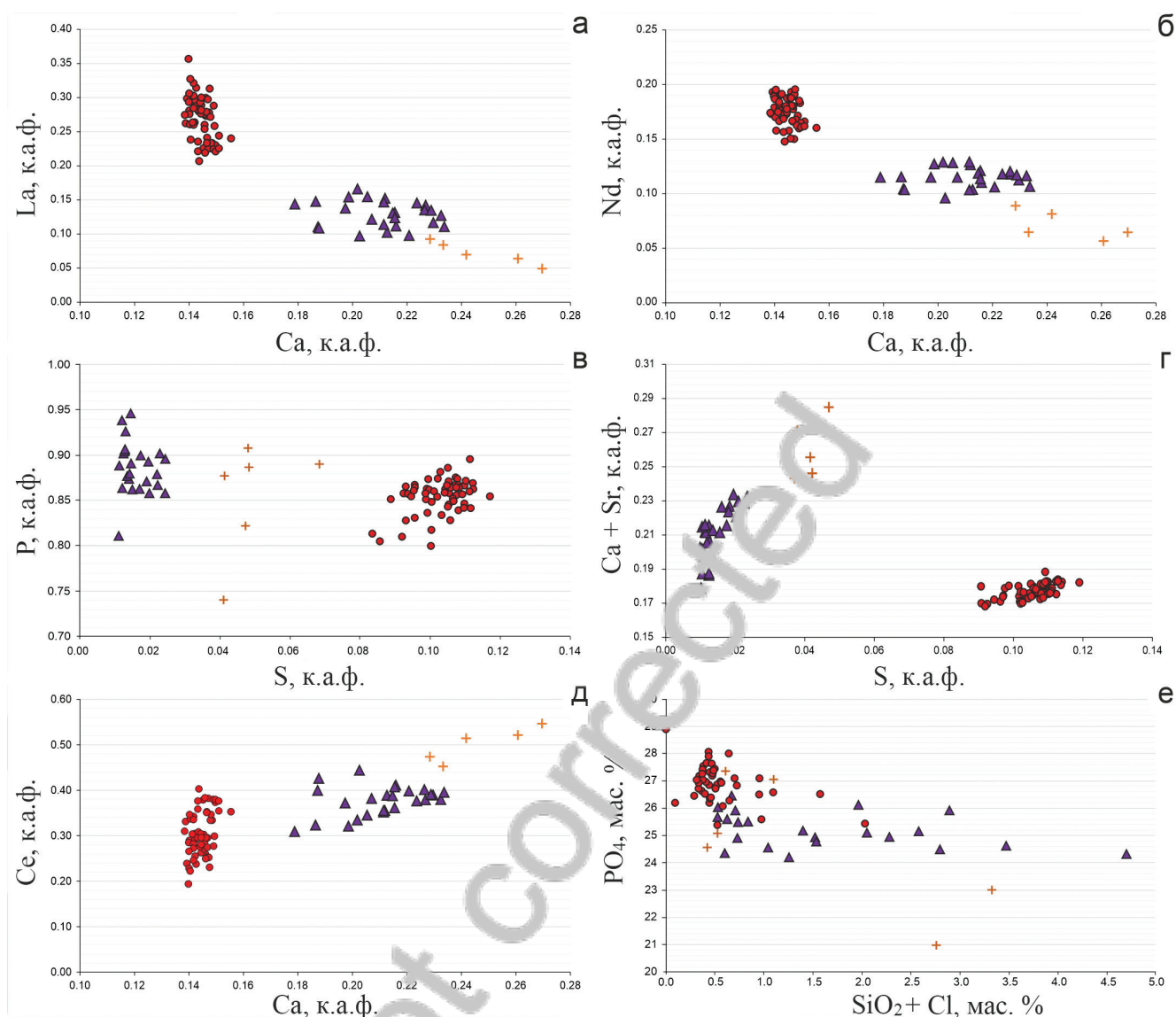


Рис. 10. Соотношения Ca–La (а), Ca–Nd (б), S–P (в), S–(Ca+Sr) (г), Ca–Ce (д) и (SiO₂+Cl)–PO₄ (е) в фосфатах ЛРЗЭ из гематитовых жил Мыса Корабль (условные обозначения см. на рис. 8).

Fig. 10. Ca–La (a), Ca–Nd (b), S–P (v), S–(Ca+Sr) (r), Ca–Ce (d) and (SiO₂+Cl)–PO₄ (e) correlations in LREE phosphates from hematite veins of the Mys Korabl deposit (for symbols, see Fig. 8).

несколько раз меньше или ниже пределов обнаружения. Отличительной особенностью состава фосфатов ЛРЗЭ месторождения Мыс Корабль является отсутствие F и присутствие Cl и Si. При этом следовало бы ожидать, что вхождение хлора в минерал можно объяснить компенсацией зарядов при замещении фосфора кремнеземом ($\text{PO}_4^{3-} \leftrightarrow (\text{SiO}_3)^{2-} + \text{Cl}^-$ (по аналогии с предложенной ранее схемой вхождения F (Williams et al., 2007)), но значимой отрицательной корреляции не наблюдается (рис. 10е).

Генезис фосфатов ЛРЗЭ в гематитовых жилах месторождения Мыс Корабль

Формы нахождения, минеральные ассоциации (агрегаты КПШ в гематитовых жилах и пустоты среди гематита, парагенезис с гидротермальным пластинчатым гематитом во вмещающем песчанике) и морфологические особенности (агрегаты зерен, прожилки, сферулы) изученных фосфатов ЛРЗЭ соответствуют признакам формирования минералов в гидротермальных условиях (см. Введение) и свидетельствуют о формировании РЗЭ-Р минерализации на поздних стадиях становления гема-

титовых жил. Отсутствие Th, примеси S и Cl также указывают на их гидротермальное происхождение.

Минеральные ассоциации изученных жил свидетельствуют о том, что формирование РЗЭ минерализации происходило в ходе эволюции K-Fe-O системы. На примере гигантского Cu-Au-Fe-U-РЗЭ месторождения Олимпик Дам IOCG (iron oxide-copper-gold) типа показано, что калиевая стадия всегда предшествует железистой (Ehrig et al., 2012; Schmandt et al., 2019). Калийсодержащие флюиды вызывают фенитизацию или калишпатизацию вмещающих пород, способствуя образованию сети микротрещин — «путей» для миграции рудоносных растворов. По трещинам поступают растворы, богатые железом, которые откладывают магнетит или гематит. Однако присутствующие в растворах РЗЭ не могут встроиться в кристаллическую решетку оксидов железа, поэтому они «вытесняются» и концентрируются в виде собственных минералов. Переход от калиевой стадии к железистой может быть вызван как падением температуры, так и изменением кислотности в гидротермальной системе. В среде, богатой K, РЗЭ предпочтительно образуют растворимые комплексы (особенно с Cl⁻, OH⁻ и CO₃²⁻ лигандами), что позволяет им перемещаться на значительные расстояния от источника (Henderson, 1984; Di, Ding, 2024). Повышение pH делает комплексы РЗЭ неустойчивыми, а их осаждение из кислых растворов зависит от присутствия лигандов F⁻, CO₃²⁻ и PO₄³⁻ (Williams-Jones et al., 2012). Отсутствие F⁻ и CO₃²⁻ способствует отложению фосфатов РЗЭ. В нашем случае кристаллизация серицита в жилах и псевдоморфное замещение рабдофана монацитом указывает на повышение кислотности среды на этом этапе.

Другой физико-химической особенностью гидротермальной среды образования фосфатов ЛРЗЭ из гематитовых жил месторождения Мыс Корабль является степень окисленности растворов. Наблюдаемые отрицательные аномалии Ce/Ce* в монаците-(Ce) (морфологический тип 1) характерны для окисленных сред, где Ce меняет степень окисления до ⁴⁺ и фракционирует от других трехвалентных легких РЗЭ (Gieré, Sorensen 2004; Starijaš Mayer et al., 2014). Высокоокислительные условия формирования гидротермального и экзогенного рабдофана в ассоциации с гидроксидами Fe показаны в работах (Ondrejka et al., 2018; Belogub et al., 2021). Вхождение Ca в структуру рабдофана-(Ce) из гематитовых жил месторождения Мыс Корабль

(морфологические типы 2 и 3) является следствием последующего роста отношения Ce⁴⁺/Ce³⁺ в гидротермальной системе.

Информативным геохимическим индикатором состава флюидов при формировании гидротермальных РЗЭ минералов (главным образом, монацита и РЗЭ-фторкарбонатов) является отношение (La/Nd)_n. Фракционирование La и Nd зависит от содержания CO₂ в минералообразующих растворах, что влияет на соотношение (La/Nd)_n в РЗЭ минералах: >4 для раствора, богатого CO₂, и <4 для раствора, богатого H₂O (Smith et al., 2000). В монаците и рабдофанах из гематитовых жил отношение (La/Nd)_n составляет 2.6–3.6 и 1.5–2.5, соответственно, что указывает на их формирование из высоководных растворов при низком давлении и содержании CO₂.

Гематитовые жилы месторождения Мыс Корабль являются единственным нам известным проявлением, где фосфаты ЛРЗЭ содержат Cl вместо F. Существенная роль Cl в составе гидротермальных растворов при формировании гематитовых жил месторождения показана нами ранее (Zozulya et al., 2025) на примере узкфилдита-(Ce) [CeVO₄]: хлориды и оксихлориды ванадия, в отличие от фторидов, легко растворяются в воде (Борисенко, 1973).

Формирование РЗЭ-Р минерализации гематитовых жил происходило при повышенной активности серы, на что указывают примесь SO₃ в минералах и присутствие в гематитовых жилах месторождения Мыс Корабль минералов халькофильных элементов (киноварь, гр. амальгамы серебра).

Источник РЗЭ для образования фосфатов в гематитовых жилах месторождения Мыс Корабль

В валовых пробах гематитовых жил суммарное содержание РЗЭ (ΣРЗЭ) составляет 12–40 г/т (среднее 28 г/т). При этом сумма РЗЭ в некоторых образцах, в которых обнаружены изученные фосфаты РЗЭ, достигает 430–580 г/т (Zozulya et al., 2025; табл. 3 ЭП). Вмещающие песчаники содержат от 10 до 66 г/т ΣРЗЭ (среднее 38 г/т). И жилы, и песчаники имеют сходные индикаторные отношения La/Nd_n (1.6–2.3 и 1.2–2.2) и La/Sm_n (1.6–3.8 и 1.6–3.6), соответственно, поэтому песчаники терской свиты могли быть источником не только Fe для гематитовых жил, но и РЗЭ. Последние могли перераспределяться в ходе переноса гидротермальными растворами и локально концентрироваться в породах с образованием РЗЭ-Р минерализации.

Красноцветные песчаники терской свиты можно условно отнести к окисленной высокожелезистой системе. Классическими примерами таких систем с попутной РЗЭ минерализацией являются месторождения железа осадочного происхождения (например, Керченское (Некипелова и др., 2021, 2022; Sokol et al., 2020), Бакчар, Лисаковское, Синара-Теча и другие в Западной Сибири (Новоселов и др., 2018; Rudmin et al., 2019)). Для подобных систем показано, что первоначально РЗЭ элементы сорбируются на поверхности гидроксидов Fe^{3+} (Yang et al., 2017), а в процессе диагенеза формируют самостоятельную РЗЭ-Р минерализацию. При этом происходит избирательное накопление в системе средних РЗЭ (СРЗЭ). В случае месторождения Мыс Корабль отношения $(\text{La}/\text{Sm})_n$ в фосфатах РЗЭ в четыре раза превышает значения в валовых пробах жил и песчаников (при сохранении соотношений ЛРЗЭ на примере $(\text{La}/\text{Nd})_n$), что свидетельствует о фракционировании СРЗЭ и их возможном вхождении в структуру других пороодообразующих минералов. Так, установлено, что магнетит и гематит из месторождения Олимпик Дам могут содержать до 900 и 70 г/т $\Sigma\text{РЗЭ}$, соответственно (Cook et al., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В гематитовых жилах месторождения Мыс Корабль (Кольский полуостров) установлены три морфологических типа фосфатов ЛРЗЭ. Тип 1 представлен монацитом-(Ce) и монацитом-(La); образует сноповидные агрегаты в агрегатах калиевого полевого шпата, и исходящие прожилки в гематите. Тип 2 присутствует в виде агрегатов зрен во вмещающих песчаниках в ассоциации с гидротермальным гематитом. Тип 3 развивается по монациту-(Ce) и уэксфилдиту-(Ce) в пустотах между кристаллами гематита и калиевого полевого шпата. Исходя из особенностей химического состава фосфаты типов 2 и 3 отнесены к рабдофану-(Ce).

2. Фосфаты ЛРЗЭ характеризуются повышенными содержаниями S и Ca, входящих в структуру минералов по схеме $\text{Ce}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}(\text{Sr}^{2+}) + \text{S}^{6+}$. Исходя из минеральной ассоциации гематитовых жил и отличия в распределении церия в сравнении с другими редкоземельными элементами фосфаты ЛРЗЭ кристаллизуются в высокоокислительных условиях с последовательным ростом $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ от 1-го к 3-му типам.

3. Фосфаты ЛРЗЭ осаждаются из растворов при переходе от «калиевой» к «железистой» стадии

с повышением кислотности среды. Состав гидротермальных растворов характеризуется отсутствием фтора и карбонатов при относительно высокой активности серы и хлора.

4. Источником редкоземельных элементов в гематитовых жилах Мыса Корабль являются вмещающие красноцветные песчаники терской свиты. В ходе переноса гидротермальными растворами и последующего формирования РЗЭ-Р минерализации происходит фракционирование средних РЗЭ.

ЛИТЕРАТУРА

- Балуев А.С., Бурлачев В.А., Терехов Е.Н., Пржижловский Е.С. (2012) Тектоника Белого моря и прилегающих территорий. Объяснительная записка к «Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий» масштаба 1:1 500 000. М., ГЕОС, 104 с.
- Борисенко Л.Ф. (1973) Ванадий: минералогия, геохимия и типы эндогенных месторождений. М., Недра, 192 с.
- Бондарь Д.Р., Соловьёва А.Н., Чикирёв И.В. (2021) Уникальные гематитовые жилы Терского побережья, Кольский регион: состав, структурно-текстурные особенности и генезис. *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, 18, 177–182.
- Китаев Д.Б., Волков Ю.Ф., Орлова А.И. (2004) Ортофосфаты четырехвалентных Ce, Th, U, Np и Pu со структурой монацита. *Радиохимия*, 46 (3), 195–200.
- Кухаренко А.А., Булах А.Г., Бакланова К.А. (1961) Сульфат-монацит из карбонатитов Кольского полуострова. *Записки Всесоюзного минералогического общества*, 90 (4), 373–381.
- Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Прокопьев А.В., Карманов Н.С., Сергеев А.И. (2018) Нодулярный монацит из россыпей Куларского Кряжа (Арктическая Сибирь, Россия) – состав, оценки возраста. *Геология и геофизика*, 59 (10), 1658–1679. <https://doi.org/10.15372/GiG20181010>
- Макагонов Е.П., Котляров В.А. (2016) Редкоземельная минерализация в щелочных и субщелочных породах Балбукского комплекса (Южный Урал). *Минералогия*, (2), 34–43.
- Макеев А.Б., Борисовский С.Е., Красоткина А.О. (2020) Химический состав и возраст монацита и куларита из титановых руд Пижемского и Ярегского месторождений (Средний и Южный Тиман). *Георесурсы*, 22 (1), 22–31. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.22-31>
- Макеев А.Б., Скублов С.Г., Красоткина А.О., Борисовский С.Е., Томсен Т.Б., Серре С.Х. (2020) Возраст монацита из рудопроявления Ичегью, Средний Тиман (CHIME и LA-ICP-MS методы). *Записки Российского минералогического общества*, 149 (1), 76–95. <https://doi.org/10.31857/S0869605520010086>

- Некипелова А.В., Сокол Э.В., Кох С.Н., Хворов П.В. (2021) Редкоземельные фосфаты в Керченских икряных рудах. *Геология и геофизика*, 62(10), 1447–1471. <https://doi.org/10.15372/GiG2021135>
- Некипелова А.В., Сокол Э.В., Кох С.Н., Филиппова К.А. (2022) Керченские осадочные железные руды – нетрадиционный источник Nd и MREE: особенности и перспективы. *Руды и металлы*, 1, 106–120. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10006>
- Некрасова Р.А., Некрасов И.Я. (1983) Куларит – аутигенная разновидность монацита. *Доклады Академии наук СССР*, 268 (3), 688–693.
- Нерадовский Ю.Н. (2023) Реконструкция условий формирования красноцветных песчаников Терского берега на основе сравнительного анализа структуры древних и современных отложений (Кольский полуостров). *Вестник МГТУ*, 26 (2), 180–190. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-180-190>
- Новосёлов К.А., Белогуб Е.В., Котляров В.А., Филиппова К.А., Садыков С.А. (2018) Минералогические и геохимические особенности оолитовых железняков Синаро-Теченского месторождения (Курганская обл., Россия). *Геология рудных месторождений*, 60(3), 301–314. <https://doi.org/10.7868/S001677701803005X>
- Орлова А.И., Китаев Д.Б., Волков Ю.Ф., Петьков В.И., Куражковская В.С., Спиридонова М.Л. (2001) Двойные фосфаты церия (IV) и некоторых одно- и двухвалентных элементов. *Радиохимия*, 43 (3), 202–205.
- Репина С.А. (2007) Монацит как индикатор условий образования кварцевых жил месторождения Хеланное (Приполярный Урал). *Записки Российской минералогического общества*, 136 (4), 81–96.
- Соловьева А.Н., Зозуля Д.Р., Савченко Е.Э. (2023) Гидротермальные гематитовые жилы и брекчии с редкоземельной минерализацией аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский регион). *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*, 4, 75–90. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/75-90>
- Соловьева А.Н., Зозуля Д.Р., Савченко Е.Э., Борисенко Е.С. (2024) Халькофильная минерализация в гематитовых жилах аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский полуостров): следствия для формирования Fe(Cu,Ag)-S-O парагенезисов. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*, 3, 48–59. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/48-59>
- Халезова Е.Б., Князева Д.Н. (1961) Рабдофанит Вишневых гор. *Труды Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана*, 12, 235–238.
- Andreoli M.A.G., Smith C.B., Watkeys M., Moore J.M., Ashwal L.D., Hart R.J. (1994) The geology of the Steenkampskraal monazite deposit, South Africa; implications for REE-Th-Cu mineralization in charnockite-granulite terranes. *Economic Geology*, 89, 994–1016. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.5.994>
- Bamforth T.G., Xia F., Putnis A., Brugger J., Hu S.-Y., Roberts M.P., Suvorova A., Pring A. (2024) Hydrothermal mineral replacement in the apatite-rhabdophane-monazite system: Experiments, reaction mechanisms and geological implications. *Chemical Geology*, 666, 122307. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122307>
- Belogub E.V., Shilovskikh V.V., Novoselov K.A., Blinov I.A., Filippova K.A. (2021) Authigenic rhabdophane from brown iron ore of the oxidation zone of the Babaryk massive sulfide occurrence (South Urals): scanning electron microscope (SEM) and electron backscattered diffraction (EBSD) study. *European Journal of Mineralogy*, 33, 605–620. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-605-2021>
- Berger A., Janots E., Gnos E., Frei R., Bernier F. (2014) Rare earth element mineralogy and geochemistry in a laterite profile from Madagascar. *Applied Geochemistry*, 41, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.12.013>
- Bowen K.L., Crocket J.H. (2011) Monazite, xenotime and REE mineral in Archean banded iron-formation from the Sherman and Adams mines, Ontario, Canada. *The Canadian Mineralogist*, 49, 749–763. <https://doi.org/10.3749/canmin.49.3.749>
- Bowen K.L., Morgan D.J. (1984) The composition of rhabdophane. *Mineralogical Magazine*, 48 (346), 146–148. <https://doi.org/10.1180/minmag.1984.048.346.23>
- Broom-Fendley S., Smith M.P., Andrade M.B., Ray S., Banks D.A., Loyer E., Atencio D., Pickles J.R., Wall F. (2020) Sulfur-bearing monazite-(Ce) from the Eureka carbonatite, Namibia: oxidation state, substitution mechanism, and formation conditions. *Mineralogical Magazine*, 84, 1–14. <https://doi.org/10.1180/mgm.2019.79>
- Broska I., Kubiš M. (2018) Accessory minerals and evolution of tin-bearing S-type granites in the western segment of the Gemeric Unit (Western Carpathians). *Geologica Carpathica*, 69, 483–497. <https://doi.org/10.1515/geoca-2018-0028>
- Buyse F., Dewaele S., Decrée S., Mees F. (2020) Mineralogical and geochemical study of the rare earth element mineralization at Gakara (Burundi). *Ore Geology Reviews*, 124, 103659. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103659>
- Catlos E.J., Miller N.R. (2017) Speculations linking monazite compositions to origin: Llallagua tin ore deposit (Bolivia). *Resources*, 6, 36. <https://doi.org/10.3390/resources6030036>
- Černý P., Chapman R. (1984) Paragenesis, chemistry and structural state of adularia from granitic pegmatites. *Bulletin de Minéralogie*, 107 (3-4), 369–384.
- Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H. (1999) Niobian ilmenite, hydroxylapatite and sulfatian monazite: alternative hosts for incompatible elements in calcite kimberlite from International'naya, Yakutia. *The Canadian Mineralogist*, 37, 1177–1189.
- Clavier N., Podor R., Dacheux N. (2011) Crystal chemistry of the monazite structure. *Journal of the European Ceramic Society*, 31, 941–976. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.12.019>

- Clavier N., Mesbah A., Szenknect S., Dacheux N. (2018) Monazite, rhabdophane, xenotime & churchite: Vibrational spectroscopy of gadolinium phosphate polymorphs. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 205, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.07.016>
- Cook N.J., Ciobanu C.L., Ehrig K., Slattery A.D., Gilbert S.E. (2022) Micron- to atomic-scale investigation of rare earth elements in iron oxides. *Frontiers in Earth Sciences*, 10, 967189. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.967189>
- Di J., Ding X. (2024) Complexation of REE in hydrothermal fluids and its significance on REE mineralization. *Minerals*, 14, 531. <https://doi.org/10.3390/min14060531>
- Donnot M., Guigues J., Lulzac Y., Magnien A., Parfenoff A., Picot P. (1973) Un nouveau type de gisement d'euporium: la monazite grise à europium en nodules dans les schistes paléozoïques de Bretagne. *Mineralium Deposita*, 8, 7–18. <https://doi.org/10.1007/BF00203346>
- Ehrig K., McPhie J., Kamenetsky V. (2012) Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam iron oxide Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia. *Economic Geology Special Publication*, 16, 237–267. <https://doi.org/10.5382/SP.16.11>
- Enkhbayar D., Sea J., Choi S.-G., Lee Y.J., Batmunkh E. (2016) Mineral Chemistry of REE-rich apatite and sulfur-rich monazite from the Mushgai Khudag, Alkaline Volcanic-Plutonic Complex, South Mongolia. *International Journal of Geosciences*, 7, 20–31. <https://doi.org/10.4236/ijg.2016.71003>
- Gieré R., Sorensen S.S. (2004) Allanite and other REE-rich epidote-group minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56, 431–493. <https://doi.org/10.2138/gsrmg.56.1.431>
- Guastoni A., Nestola F., Giaretta A. (2009) Mineral chemistry and alteration of rare earth element (REE) carbonates from alkaline pegmatites of Mount Malosa, Malawi. *American Mineralogist*, 94, 1210–1222. <https://doi.org/10.2138/am.2009.3185>
- Henderson P. (1984) General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam, Elsevier, 1–32.
- Hukuo K., Hikichi Y. (1979) Syntheses of rare-earth orthophosphates ($\text{RPO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, R = La–Yb, n = 0–2). *Bulletin of the Nagoya Institute of Technology*, 31, 175–182.
- Jones A.P., Wall F., Williams C.T. (1996) Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits. London, Chapman & Hall, Mineralogical Society Series, 7.
- Krenn E., Putz H., Finger F., Paar W.H. (2011) Sulfur-rich monazite with high common Pb in ore-bearing schists from the Schellgaden mining district (Tauern Window, Eastern Alps). *Mineralogy and Petrology*, 102, 51–62. <https://doi.org/10.1007/s00710-011-0170-x>
- Lafuente B., Downs R.T., Yang H., Stone N. (2015) The power of databases: the RRUFF project. *Highlights in Mineralogical Crystallography*. Berlin, W. De Gruyter, 1–30.
- Laurent A.T., Seydoux-Guillaume A.-M., Duchene S., Bingen B., Bosse V., Datas L. (2016) Sulphate incorporation in monazite lattice and dating the cycle of sulphur in metamorphic belts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171, 94. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1301-5>
- Li S., Li L., Li S., Santosh M., Song Y. (2022) Geochemical and cathodoluminescence properties as discriminators to characterize K-feldspar in different genetic settings. *The Canadian Mineralogist*, 60 (6), 1027–1043. <https://doi.org/10.3749/canmin.2200004>
- Lottermoser B.G. (1990) Rare-earth element mineralisation within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia. *Lithos*, 24, 151–167. [https://doi.org/10.1016/0024-4077\(90\)90022-S](https://doi.org/10.1016/0024-4077(90)90022-S)
- Mariano A.N. (1989) Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks. *Carbonatites: Genesis and Evolution*. London, Unwin, 149–176.
- Mazko J., Overstreet W.C. (1977) Black monazite from Taiwan. *Geological Society of Taiwan Proceedings*, 20, 16–35.
- McDonough W.F., Sun S.S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Nagy G., Draganits E., Demény A., Pantó G., Árkai P. (2002) Genesis and transformations of monazite, florencite and rhabdophane during medium grade metamorphism: examples from the Sopron Hills, Eastern Alps. *Chemical Geology*, 191, 25–46. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00147-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00147-X)
- Nikolenko A.M., Redina A.A., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Rafozin A.L., Vladykin N.V. (2018) The origin of magnetite–apatite rocks of Mushgai–Khudag Complex, South Mongolia: mineral chemistry and studies of melt and fluid inclusions. *Lithos*, 320–321, 567–582. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.08.030>
- Ntiharirizwa S., Boulvais P., Poujol M., Branquet Y., Morelli C., Ntunganwayo J., Midende G. (2018) Geology and U–Th–Pb dating of the Gakara REE deposit, Burundi. *Minerals*, 8, 394. <https://doi.org/10.3390/min8090394>
- Ondrejka M., Bačík P., Sobocký T., Uher P., Škoda R., Mikuš T., Luptáková J., Konečný P. (2018) Minerals of the rhabdophane group and the alunite supergroup in microgranite: products of low-temperature alteration in a highly acidic environment from the Velence Hills, Hungary. *Mineralogical Magazine*, 82 (6), 1277–1300. <https://doi.org/10.1180/mgm.2018.137>
- Ondrejka M., Broska I., Uher P., Kohút M., Putiš M., Konečný P. (2013) Accommodation of S and As by primary magmatic monazite in Western Carpathian granitic rocks: the role of minor element substitutions and redox conditions of parental melt. *International Workshop on the Geology and Metallogeny of Critical Metals (CM2013)*. Ulaanbaatar, Mongolia, 18.

- Ondrejka M., Putiš M., Uher P., Schmiedt I., Pukančík L., Konečný P. (2016) Fluid-driven destabilization of REE-bearing accessory minerals in the granitic orthogneisses of North Veporic basement (Western Carpathians, Slovakia). *Mineralogy and Petrology*, 110, 561–580. <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0432-8>
- Ondrejka M., Uher P., Pršek J., Ozdín D. (2007) 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*, 95, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.07.019>
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A., Ponomarchuk A.V., Sergeev S.A. (2017) Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia). *Ore Geology Reviews*, 81, 296–308. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.012>
- Pršek J., Ondrejka M., Bačík P., Budzyń B., Uher P. (2010) Metamorphic-hydrothermal REE minerals in the Bacúch magnetite deposit, Western Carpathians, Slovakia: (Sr,S)-rich monazite-(Ce) and Nd-dominant hingganite. *The Canadian Mineralogist*, 48, 81–94. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.1.81>
- Rasmussen B., Muhling J.R. (2007) Monazite begets monazite: evidence for dissolution of detrital monazite and reprecipitation of syntectonic monazite during low-grade regional metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154, 675–689. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0216-6>
- Rasmussen B., Sheppard S., Fletcher I.R. (2000) Testing ore deposit models using in situ U–Pb geochronology of hydrothermal monazite: Paleoproterozoic gold mineralization in northern Australia. *Geology*, 34, 77–80. <https://doi.org/10.1130/G22058.1>
- Rosenblum S., Mosier E.L. (1983) Mineralogy and occurrence of europium-rich dark monazite. Reston, U.S. Geological Survey, 67 p.
- Rudmin M., Reva I., Sokol E., Abdullayev E., Ruban A., Kudryavtsev A., Tolkachev O., Mironov A. (2020) Minerals of Rare Earth Elements in High-Phosphorus Ooidal Ironstones of the Western Siberia and Turgai Depression. *Minerals*, 10(1), 11. <https://doi.org/10.3390/min10010011>
- Schandl E.S., Gorton M.P. (2004) A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 99 (5), 1027–1035. <https://doi.org/10.2113/99.5.1027>
- Schmandt D.S., Cook N.J., Ciobanu C.L., Ehrig K., Wade B.P., Gilbert S., Kamenetsky V.S. (2019) Rare earth element phosphate minerals from the Olympic Dam Cu–U–Au–Ag deposit, South Australia: recognizing temporal-spatial controls on REE mineralogy in an evolved IOCG system. *The Canadian Mineralogist*, 57 (1), 3–24. <https://doi.org/10.3749/canmin.1800043>
- Schulz B. (2021) Monazite microstructures and their interpretation in petrochronology. *Frontiers in Earth Science*, 9, 668566. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.668566>
- Smith M.P., Henderson P., Campbell L.S. (2000) Fractionation of the REE during hydrothermal processes: constraints from the Bayan Obo Fe–REE–Nb deposit, Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 3141–3160. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00416-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00416-6)
- Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Nekipelova A.V., Rudmin M., Khvorov P.V., Artemyev D.A. (2020) Geochemistry and mineralogy of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones: A case study of the Kamysht-Burun deposit (Azov–Black Sea iron province). *Ore Geology Reviews*, 127, 103827. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103827>
- Spear F.S., Pyle J.M. (2002) Apatite, monazite, and xenotime in metamorphic rocks. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48, 293–335. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.7>
- Starčijaš M., Krenn E., Finger F. (2014) Microcrystals of Th-rich monazite (La) with a negative Ce anomaly in metadiorite and their role for documenting Cretaceous metamorphism in the Slavonian Mountains (Croatia). *Mineralogy and Petrology*, 108, 231–243. <https://doi.org/10.1007/s00710-013-0298-y>
- Strunz H., Nickel E.H. (2001) Strunz mineralogical tables: chemical-structural mineral classification system. Stuttgart, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 870 p.
- Taylor R.D., Graham G.E., Lowers H.A. (2024) Hydrothermal monazite and xenotime chemistry as genetic discriminators for intrusion related and orogenic gold deposits: implications for an orogenic origin of the Pogo gold deposit, Alaska. *Mineralium Deposita*, 59, 949–967. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01240-5>
- Uher P., Hatert F., Ondrejka M., Bačík P., Sejkora J., Škoda R., Števkó M. (2025) Nomenclature of the monazite supergroup minerals. *Mineralogical Magazine*, 1–39. <https://doi.org/10.1180/mgm.2025.10178>
- Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85(3), 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Williams M.L., Jercinovic M.J., Hetherington C.J. (2007) Microprobe monazite geochronology: understanding geologic processes by integrating composition and chronology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 137–175. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140228>
- Williams-Jones A.E., Migdisov A.A., Samson I.M. (2012) Hydrothermal mobilisation of the rare earth elements – a tale of “Ceria” and “Yttria”. *Elements*, 8, 355–360. <https://doi.org/10.2113/gselements.8.5.355>
- Yang J., Torres M., McManus J., Algeo T.J., Hakala A., Verba C. (2017) Controls on rare earth element distributions in ancient organic-rich sedimentary sequences: Role of post-depositional diagenesis of phosphorus phases. *Chemical Geology*, 466, 533–544. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.07.003>

Zozulya D.R., Solovjova A.N., Savchenko Y.E., Borisenko E.S. (2025) New genetic type of wakefieldite-(Ce) from hydrothermal hematite veins of the Mys Korabl' amethyst deposit, Kola Peninsula. *Mineralogy and Petrology*, 120, 127–139. <https://doi.org/10.1007/s00710-025-00952-y>

REFERENCES

- Andreoli M.A.G., Smith C.B., Watkeys M., Moore J.M., Ashwal L.D., Hart R.J. (1994) The geology of the Steenkampskraal monazite deposit, South Africa; implications for REE-Th-Cu mineralization in charnockite-granulite terranes. *Economic Geology*, 89, 994–1016. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.5.994>
- Baluev A.S., Zhuravlev V.A., Terekhov E.N., Przhiyaglovskiy E.S. (2012) Tectonics of the White Sea and adjacent areas. Moscow, GEOS, 104 p. (in Russian)
- Bamforth T.G., Xia F., Putnis A., Brugger J., Hu S.-Y., Roberts M.P., Suvorova A., Pring A. (2024) Hydrothermal mineral replacement in the apatite-rhabdophane-monazite system: Experiments, reaction mechanisms and geological implications. *Chemical Geology*, 666, 122307. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122307>
- Belogub E.V., Shilovskikh V.V., Novoselov K.A., Blinov I.A., Filippova K.A. (2021) Authigenic rhabdophane from brown iron ore of the oxidation zone of the Babaryk massive sulfide occurrence (South Urals): scanning electron microscope (SEM) and electron backscattered diffraction (EBSD) study. *European Journal of Mineralogy*, 33, 605–620. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-605-2021>
- Berger A., Janots E., Gnos E., Frei R., Bernier F. (2014) Rare earth element mineralogy and geochemistry in a laterite profile from Madagascar. *Applied Geochemistry*, 41, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.12.013>
- Borisenko L.F. (1973) Vanadium: mineralogy, geochemistry and types of endogenic deposits. Moscow, Nedra, 192 p. (in Russian)
- Bowins R.J., Crockett J.H. (2011) Monazite, xenotime and REE minerals in Archean banded iron-formation from the Sherman and Adam mines, Ontario, Canada. *The Canadian Mineralogist*, 49, 749–763. <https://doi.org/10.3749/canmin.49.3.749>
- Bowles J.F.W., Morgan D.J. (1984) The composition of rhabdophane. *Mineralogical Magazine*, 48 (346), 146–148. <https://doi.org/10.1180/minmag.1984.048.346.23>
- Broom-Fendley S., Smith M.P., Andrade M.B., Ray S., Banks D.A., Loye E., Atencio D., Pickles J.R., Wall F. (2020) Sulfur-bearing monazite-(Ce) from the Eureka carbonatite, Namibia: oxidation state, substitution mechanism, and formation conditions. *Mineralogical Magazine*, 84, 1–14. <https://doi.org/10.1180/mgm.2019.79>
- Broska I., Kubiš M. (2018) Accessory minerals and evolution of tin-bearing S-type granites in the western segment of the Gemeric Unit (Western Carpathians). *Geologica Carpathica*, 69, 483–497. <https://doi.org/10.1515/geoca-2018-0028>
- Buyse F., Dewaele S., Decrée S., Mees F. (2020) Mineralogical and geochemical study of the rare earth element mineralization at Gakara (Burundi). *Ore Geology Reviews*, 124, 103659. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103659>
- Catlos E.J., Miller N.R. (2017) Speculations linking monazite compositions to origin: Llallagua tin ore deposit (Bolivia). *Resources*, 6, 36. <https://doi.org/10.3390/resources6030036>
- Černý P., Chapman R. (1984) Paragenesis, chemistry and structural state of adularia from granitic pegmatites. *Bulletin de Minéralogie*, 107 (3-4), 369–384.
- Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H. (1999) Niobian ilmenite, hydroxylapatite and sulfatian monazite: alternative hosts for incompatible elements in calcite kimberlite from International'naya Yakutia. *The Canadian Mineralogist*, 37, 1177–1189.
- Clavier N., Podor R., Dacheux N. (2011) Crystal chemistry of the monazite structure. *Journal of the European Ceramic Society*, 31, 941–976. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.12.019>
- Clavier N., Mesbah A., Szenknect S., Dacheux N. (2018) Monazite, rhabdophane, xenotime & churchite: Vibrational spectroscopy of gadolinium phosphate polymorphs. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 205, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.07.016>
- Cook N.J., Ciobanu C.L., Ehrig K., Slattery A.D., Gilbert S.E. (2022) Micron- to atomic-scale investigation of rare earth elements in iron oxides. *Frontiers in Earth Sciences*, 10, 967189. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.967189>
- Di J., Ding X. (2024) Complexation of REE in hydrothermal fluids and its significance on REE mineralization. *Minerals*, 14, 531. <https://doi.org/10.3390/min14060531>
- Donnot M., Guigues J., Lulzac Y., Magnien A., Parfenoff A., Picot P. (1973) Un nouveau type de gisement d'euprium: la monazite grise à europium en nodules dans les schistes paléozoïques de Bretagne. *Mineralium Deposita*, 8, 7–18. <https://doi.org/10.1007/BF00203346>
- Ehrig K., McPhie J., Kamenetsky V. (2012) Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam iron oxide Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia. *Economic Geology Special Publication*, 16, 237–267. <https://doi.org/10.5382/SP.16.11>
- Enkhbayar D., Sea J., Choi S.-G., Lee Y.J., Batmunkh E. (2016) Mineral Chemistry of REE-rich apatite and sulfur-rich monazite from the Mushgai Khudag, Alkaline Volcanic-Plutonic Complex, South Mongolia. *International Journal of Geosciences*, 7, 20–31.
- Gieré R., Sorensen S.S. (2004) Allanite and other REE-rich epidote-group minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56, 431–493. <https://doi.org/10.2138/gsrmg.56.1.431>
- Guastoni A., Nestola F., Giaretta A. (2009) Mineral chemistry and alteration of rare earth element (REE)

carbonates from alkaline pegmatites of Mount Malosa, Malawi. *American Mineralogist*, 94, 1216–1222. <https://doi.org/10.2138/am.2009.3185>

Henderson P. (1984) General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam, Elsevier, 1–32.

Hukuo K., Hikichi Y. (1979) Syntheses of rare-earth orthophosphates ($\text{RPO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, R = La–Yb, n = 0–2). *Bulletin of the Nagoya Institute of Technology*, 31, 175–182.

Jones A.P., Wall F., Williams C.T. (1996) Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits. London, Chapman & Hall, Mineralogical Society Series, 7.

Khalezova E.B., Knyazeva D.N. (1961) Rhabdophane of the Vishnevyy Mountains. *Trudy Mineralogicheskogo muzeya im. A.E. Fersmana (Proceedings of the A.E. Fersman Mineralogical Museum)*, (12), 235–238. (in Russian)

Kitaev D.B., Volkov Y.F., Orlova A.I. (2004) Orthophosphates of tetravalent Ce, Th, U, Np, and Pu with the monazite structure. *Radiochemistry*, 46, 211–217.

Krenn E., Putz H., Finger F., Paar W.H. (2011) Sulfur-rich monazite with high common Pb in ore-bearing schists from the Schellgaden mining district (Tauern Window, Eastern Alps). *Mineralogy and Petrology*, 102, 51–62. <https://doi.org/10.1007/s00710-011-0170-x>

Kukharensko A.A., Bulakh A.G., Baklanova K.A. (1961) Sulfate-monazite from carbonatites of the Kola Peninsula. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva (Proceedings of the All-Union Mineralogical Society)*, 90 (4), 373–381. (in Russian)

Lafuente B., Downs R.T., Yang H., Stone N. (2015) The power of databases: the RRUFF project. *Highlights in Mineralogical Crystallography*. Berlin, W. De Gruyter, 1–30.

Laurent A.T., Seydoux-Guillaume A.-M., Duchene S., Bingen B., Bosse V., Datas L. (2016) Sulphate incorporation in monazite lattice and dating the cycle of sulphur in metamorphic belts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171, 94. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1301-5>

Lazareva E.V., Zhmodi S.M., Prokopiev A.V., Karmanov N.S., Sergeenko A.I. (2018) Nodular monazite from placers in the Kular Ridge (Arctic Siberia, Russia): Composition and age. *Russian Geology and Geophysics*, 59 (10), 1330–1347. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.09.010>

Li S., Li L., Li S., Santosh M., Song Y. (2022) Geochemical and cathodoluminescence properties as discriminators to characterize K-feldspar in different genetic settings. *The Canadian Mineralogist*, 60 (6), 1027–1043. <https://doi.org/10.3749/canmin.2200004>

Lottermoser B.G. (1990) Rare-earth element mineralisation within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia. *Lithos*, 24, 151–167. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(90\)90022-S](https://doi.org/10.1016/0024-4937(90)90022-S)

Makagonov E.P., Kotlyarov V.A. (2016) Rare earth mineralization in alkaline and subalkaline rocks of the Balbuk complex (Southern Urals). *Mineralogiya (Mineralogy)*, (2), 34–43. (in Russian)

Makeev A.B., Borisovskiy S.E., Krasotkina A.O. (2020) Chemical composition and age of monazite and kularite from Ti ores of the Pizhem and Yareg deposits (Middle and Southern Timan). *Georesursy (Georesources)*, 22 (1), 22–31. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.22-31> (in Russian)

Makeev A.B., Skublov S.G., Krasotkina A.O., Borisovskiy S.E., Thomsen T.B., Serre S.H. (2020) Age of monazite from the Ichet'yu ore occurrence, Middle Timan (CHIME and LA-ICP-MS methods). *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 149 (1), 76–95. (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1075701520080103>

Mariano A.N. (1989) Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks. *Carbonatites: Genesis and Evolution*. London, Unwin, 149–176.

Matzko J.J., Overstreet W.C. (1977) Black monazite from Taiwan. *Geological Society of Taiwan Proceedings*, 20, 16–35.

McDonough W.F., Sun S.S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)

Maróti G., Draganits E., Demény A., Pantó G., Árkai P. (2003) Genesis and transformations of monazite, florencite and rhabdophane during medium grade metamorphism: examples from the Sopron Hills, Eastern Alps. *Chemical Geology*, 191, 25–46. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00147-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00147-X)

Nekipelova A.V., Sokol E.V., Kokh S.N., Khvorov P.V. (2021) Rare earth phosphates in the Kerch caviar ironstones. *Russian Geology and Geophysics*, 62 (10), 1189–1207. <https://doi.org/10.2113/rgg20214359>

Nekipelova A.V., Sokol E.V., Kokh S.N., Filippova K.A. (2022) Kerch ironstones as unconventional Nd and MREE source: features and prospects. *Rudy i metally (Ores and Metals)*, 1, 106–120. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10006> (in Russian)

Nekrasova R.A., Nekrasov I.Ya. (1983) Kularite – an authigenic variety of monazite. *Doklady Akademii nauk SSSR (Doklady Academy of Sciences USSR)*, 268 (3), 688–693. (in Russian)

Neradovskiy Yu.N. (2023) Reconstruction of the formation conditions of red sandstones of the Tersky coast from comparative analysis of structure of ancient and modern sediments (Kola Peninsula). *Vestnik MGTU (Bulletin of the Murmansk State Technical University)*, 26 (2), 180–190. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-180-190> (in Russian)

Nikolenko A.M., Redina A.A., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Rafozin A.L., Vladyskin N.V. (2018) The origin of magnetite–apatite rocks of Mushgai–Khudag Complex, South Mongolia: mineral chemistry and studies of melt and fluid inclusions. *Lithos*, 320–321, 567–582. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.08.030>

Novoselov K.A., Belogub E.V., Kotlyarov V.A., Filippova K.A., Sadykov S.A. (2018) Mineralogical and

- geochemical features of oolitic ironstones from the Sinara–Techa deposit, Kurgan district, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 60 (3), 265–276. doi:10.1134/s1075701518030066
- Ntiharirizwa S., Boulvais P., Poujol M., Branquet Y., Morelli C., Ntungwanayo J., Midende G. (2018) Geology and U–Th–Pb dating of the Gakara REE deposit, Burundi. *Minerals*, 8, 394. <https://doi.org/10.3390/min8090394>
- Ondrejka M., Bačík P., Sobocký T., Uher P., Škoda R., Mikuš T., Luptáková J., Konečný P. (2018) Minerals of the rhabdophane group and the alunite supergroup in microgranite: products of low-temperature alteration in a highly acidic environment from the Velence Hills, Hungary. *Mineralogical Magazine*, 82 (6), 1277–1300. <https://doi.org/10.1180/mgm.2018.137>
- Ondrejka M., Broska I., Uher P., Kohút M., Putiš M., Konečný P. (2013) Accommodation of S and As by primary magmatic monazite in Western Carpathian granitic rocks: the role of minor element substitutions and redox conditions of parental melt. *International Workshop on the Geology and Metallogeny of Critical Metals (CM2013)*. Ulaanbaatar, Mongolia, 18.
- Ondrejka M., Putiš M., Uher P., Schmiedt I., Pukančík L., Konečný P. (2016) Fluid-driven destabilization of REE-bearing accessory minerals in the granitic orthogneisses of North Veporic basement (Western Carpathians, Slovakia). *Mineralogy and Petrology*, 110, 561–580. <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0432-8>
- Ondrejka M., Uher P., Pršek J., Ozdín D. (2007) 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*, 95, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.07.019>
- Orlova A.I., Kitaev D.B., Volkov V.F., Pet'kov V.I., Kurazhkovskaya V.S., Spiridonova M.L. (2001) Double phosphates of Ce(IV) and some trivalent and bivalent elements. *Radiochemistry*, 43, 215–228. <https://doi.org/10.1023/A:1012844121536>
- Prokopyev I.R., Doroshlevich A., Ponomarchuk A.V., Sergeev S.A. (2017) Mineralogy, age and genesis of apatite–dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia). *Ore Geology Reviews*, 81, 296–308. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.012>
- Pršek J., Ondrejka M., Bačík P., Budzyń B., Uher P. (2010) Metamorphic-hydrothermal REE minerals in the Bacúch magnetite deposit, Western Carpathians, Slovakia: (Sr,S)-rich monazite-(Ce) and Nd-dominant hingganite. *The Canadian Mineralogist*, 48, 81–94. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.1.81>
- Rasmussen B., Muhling J.R. (2007) Monazite begets monazite: evidence for dissolution of detrital monazite and reprecipitation of syntectonic monazite during low-grade regional metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154, 675–689. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0216-6>
- Rasmussen B., Sheppard S., Fletcher I.R. (2006) Testing ore deposit models using in situ U–Pb geochronology of hydrothermal monazite; Paleoproterozoic gold mineralization in northern Australia. *Geology*, 34, 77–80. <https://doi.org/10.1130/G22058.1>
- Repina S.A. (2007) Monazite as an indicator of formation conditions of quartz veins at the Zhelannoe Deposit, the Subpolar Urals. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 136 (4), 81–96. (in Russian)
- Rosenblum S., Mosier E.L. (1983) Mineralogy and occurrence of europium-rich dark monazite. Reston, U.S. Geological Survey, 67 p.
- Rudmin M., Reva I., Sokol E., Abdullayev E., Ruban A., Kudryavtsev A., Tolkachev O., Mazurov A. (2020) Minerals of Rare Earth Elements in High-Phosphorus Ooidal Ironstones of the Western Siberia and Turgai Depression. *Minerals*, 10(6), 1000. <https://doi.org/10.3390/min10010011>
- Schmidt E.S., Gorton M.P. (2004) A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 99 (5), 1027–1035. <https://doi.org/10.2113/99.5.1027>
- Schmandt D.S., Cook N.J., Ciobanu C.L., Ehrig K., Vele P.P., Gilbert S., Kamenetsky V.S. (2019) Rare earth element phosphate minerals from the Olympic Dam Cu–U–Au–Ag deposit, South Australia: recognizing temporal-spatial controls on REE mineralogy in an evolved IOCG system. *The Canadian Mineralogist*, 57 (1), 3–24. <https://doi.org/10.3749/canmin.1800043>
- Schulz B. (2021) Monazite microstructures and their interpretation in petrochronology. *Frontiers in Earth Science*, 9, 668566. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.668566>
- Smith M.P., Henderson P., Campbell L.S. (2000) Fractionation of the REE during hydrothermal processes: constraints from the Bayan Obo Fe–REE–Nb deposit, Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 3141–3160. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00416-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00416-6)
- Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Nekipelova A.V., Rudmin M., Khvorov P.V., Artemyev D.A. (2020) Geochemistry and mineralogy of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones: A case study of the Kamysh-Burun deposit (Azov–Black Sea iron province). *Ore Geology Reviews*, 127, 103827. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103827>
- Solovjova A.N., Zozulya D.R., Savchenko E.E. (2023) Hydrothermal hematite veins and breccias with rare earth mineralization of the Mys Korabl' amethyst deposit (Kola region). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya (Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology)*, (4), 75–90. (in Russian). <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/75-90>
- Solovjova A.N., Zozulya D.R., Savchenko E.E., Borisenko E.S. (2024) Chalcophile mineralization in hematite veins of the Mys Korabl' amethyst deposit (Kola Peninsula): implications for the formation of Fe(Cu,Ag)-

S-O parageneses. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya (Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology)*, (3), 48–59. (in Russian). <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/48-59>

Spear F.S., Pyle J.M. (2002) Apatite, monazite, and xenotime in metamorphic rocks. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48, 293–335. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.7>

Starijaš Mayer B., Krenn E., Finger F. (2014) Microcrystals of Th-rich monazite (La) with a negative Ce anomaly in metadiorite and their role for documenting Cretaceous metamorphism in the Slavonian Mountains (Croatia). *Mineralogy and Petrology*, 108, 231–243. <https://doi.org/10.1007/s00710-013-0298-y>

Strunz H., Nickel E.H. (2001) Strunz mineralogical tables: chemical-structural mineral classification system. Stuttgart, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 870 p.

Taylor R.D., Graham G.E., Lovers H.A. (2024) Hydrothermal monazite and xenotime chemistry as genetic discriminators for intrusion related and orogenic gold deposits: implications for an orogenic origin of the Pogo gold deposit, Alaska. *Mineralium Deposita*, 59, 949–967. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01240-5>

Uher P., Hatert F., Ondrejka M., Bačík P., Sejkora J., Škoda R., Števko M. (2025) Nomenclature of the monazite supergroup minerals. *Mineralogical Magazine*, 1–39. <https://doi.org/10.1180/mgm.2025.10178>

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

Williams M.L., Jercinovic M.J., Hetherington C.J. (2007) Microprobe monazite geochronology: understanding geologic processes by integrating composition and chronology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 137–175. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140228>

Williams-Jones A.E., Migdisov A.A., Samson I.M. (2012) Hydrothermal mobilisation of the rare earth elements – a tale of “Ceria” and “Yttria”. *Elements*, 8, 355–360. <https://doi.org/10.2113/gselements.8.5.355>

Yang J., Torres M., McManus J., Algeo T.J., Hakala A., Verba C. (2017) Controls on rare earth element distributions in ancient organic-rich sedimentary sequences: Role of post-depositional diagenesis of phosphorus phases. *Chemical Geology*, 466, 533–544. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.07.003>

Zozulya D.R., Solovjova A.N., Chikirev I.V. (2021) Unique hematite veins of the Tersky coast, Kola region: composition, structural and textural features and genesis. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN (Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences)*, (18), 177–182. (in Russian)

Zozulya D.R., Solovjova A.N., Savchenko Y.E., Borisenko E.S. (2025) New genetic type of wakefieldite-(Ce) from hydrothermal hematite veins of the Mys Korabl' metamorph deposit, Kola Peninsula. *Mineralogy and Petrology*, 120, 127–139. <https://doi.org/10.1007/s00710-025-00952-y>

Информация об авторах

Зозуля Дмитрий Ростиславович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия; d.zozulya@ksc.ru

Соловьева Анна Николаевна – инженер, аспирант, Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия; a.soloveva@ksc.ru

Савченко Евгений Эланович – научный сотрудник, Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия; ye.savchenko@ksc.ru

Компанченко Алёна Аркадьевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия; a.kompanchenko@ksc.ru

Борисенко Елена Сергеевна – главный специалист, Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия; e.borisenko@ksc.ru

Information about the authors

Dmitry R. Zozulya – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Leading Researcher, Geological Institute, Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia; d.zozulya@ksc.ru

Anna N. Solovjova – Engineer, Postgraduate Student, Geological Institute, Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia; a.soloveva@ksc.ru

Yevgeny E. Savchenko – Researcher, Geological Institute, Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia; ye.savchenko@ksc.ru

Alena A. Kompanchenko – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Senior Researcher, Geological Institute, Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia; a.kompanchenko@ksc.ru

Elena S. Borisenko – Chief Specialist, Geological Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia; e.borisenko@ksc.ru