

Морфология и химический состав редкоземельных фосфатов в гематитовых жилах мыса Корабль, Кольский п-ов

Соловьёва А. Н.^{id}, Зозуля Д. Р.^{id}, Савченко Е. Э.^{id}

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, a.soloveva@ksc.ru

Аннотация. В статье приведены данные химического состава и морфология редкоземельных фосфатов гематитовых жил мыса Корабль на Терском берегу Кольского п-ова. Выделены две разновидности редкоземельных фосфатов: монацит-(Ce) и рабдофан-(Ce). Монацит-(Ce) встречается в стяжениях калиевого полевого шпата в виде игольчатых скоплений сноповидной формы. В других случаях монацит-(Ce) заполняет прожилки, или образует ксеноморфные зерна в гематитовой массе жил. Рабдофан-(Ce) образует комковидные агрегаты, а иногда обрастает зёрна узкфилдита-(Ce) в стяжениях калиевого полевого шпата. В околожилных песчаниках рабдофан-(Ce) представлен удлинёнными агрегатами неправильной формы с выраженной пятнистой текстурой в ассоциации с пластинчатым гематитом. По химическому составу рабдофан-(Ce) отличается от монацита-(Ce) значительным дефицитом суммы анализа, пониженными содержаниями La и Nd, повышенными Ca и Y. Распределение REE и анализ парагенетических ассоциаций минералов указывают на то, что рабдофан-(Ce) формировался в значительно более высоких окислительных условиях.

Ключевые слова: редкоземельные фосфаты; монацит; рабдофан; гематитовые жилы; Кольский п-ов.

Morphology and chemical composition of REE phosphates from hematite veins of the Cape Korabl', Kola Peninsula

Solovjeva A. N.^{id}, Zozulya D. R.^{id}, Savchenko E. E.^{id}

Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, a.soloveva@ksc.ru

Abstract. The article presents data on the chemical composition and morphology of rare earth phosphates from hematite veins of the Cape Korabl' in Tersky Coast, Kola Peninsula. Two varieties of rare earth phosphates are distinguished: monazite-(Ce) and rhabdophane-(Ce). Monazite-(Ce) occurs in nodules of potassium feldspar in the form of needle-shaped clusters of a sheaf-like shape. In other cases, monazite-(Ce) fills veinlets or forms anhedral grains in the hematite mass of veins. Rhabdophane-(Ce) forms lumpy aggregates and sometimes overgrows grains of wakefieldite-(Ce) in nodules of potassium feldspar. In wall-vein sandstones, rhabdophane-(Ce) is represented by elongated aggregates of irregular shape with a pronounced spotted texture in association with lamellar hematite. In chemical composition, rhabdophane-(Ce) differs from monazite-(Ce) by a significant deficiency of the analysis sum, lower contents of La and Nd, elevated Ca and Y. Distribution of REE and analysis of paragenetic associations of minerals indicate that rhabdophane-(Ce) was formed in significantly higher oxidizing conditions.

Keywords: rare earth phosphates; monazite; rhabdophane; hematite veins; Kola Peninsula.

Введение

Монацит-(Ce) $[\text{CePO}_4]$ и его водосодержащий аналог рабдофан-(Ce) $[\text{CePO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}]$ являются одними из самых распространенных минералов редкоземельных ортофосфатов. Монацит характерен для изверженных и метаморфических пород, в то время как рабдофан образуется чаще при более низкотемпературных условиях в хемогенных породах и в гидротермальных системах (Smith et al., 2000; Berger et al., 2008). Кроме видообразующих элементов минералы могут содержать значительные примеси других REE, Ca, Sr, Th, U, Si и S. При этом компенсация зарядов в структуре минералов происходит за счёт различных гетеровалентных схем замещения (например, $2\text{REE}^{3+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Th}(\text{U})^{4+}$, $\text{REE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+}$, $\text{REE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ca}(\text{Sr})^{2+} + \text{S}^{6+}$). Одним из важных вопросов генезиса минералов является механизм трансформации монацита в рабдофан, который может указывать на определенные физико-химические условия среды минералообразования (Nagy et al., 2002).

В данной работе изучены парагенезисы, морфология и особенности химического состава монацита-(Ce) и рабдофана-(Ce) из гидротермальных гематитовых жил месторождения Мыс Ко-

рабль, Кольский п-ов. На данном этапе минералы были диагностированы в соответствии с особенностями химического состава, что не исключает в дальнейшем их доизучения структурными методами.

Геологическое строение района

Аметистовое месторождение Мыс Корабль находится в южной части Кольского п-ова и представляет из себя серию минерализованных зон, сложенных кварцевыми (в том числе аметистовыми) и кварц-флюорит-баритовыми жилами. Тела пространственно связаны с участками трещиноватости и брекчированием вмещающих красноцветных песчаников терской свиты.

В районе месторождения был открыт новый гидротермальный тип проявлений – анхиноминеральные гематитовые жилы (Зозуля и др., 2021; Соловьёва и др., 2023). Жилы приурочены к двум системам трещин: северо-восточного и субширотного простирания. Наблюдаются два вида гематитовых жил: жилы выполнения, представленные отдельными телами с чёткими контактами с вмещающими песчаниками, указывающие на формирование тел при тектонической разгрузке, и жилы замещения, представленные прожилками неправильной формы с постепенными переходами во вмещающие породы, что указывает на их метасоматическое происхождение. Жилы имеют мощность от 2 до 20 см, при протяжённости от 2 до 15 м. По минеральному составу жилы практически полностью сложены мелкокристаллическим пластинчатым гематитом (5–50 μm), в отдельных случаях пластинки гематита кристаллизуются в миароловых полостях достигая 100 μm . В жилах иногда встречаются тонкие (10–20 μm) кварцевые и баритовые прожилки, а также стяжения калиевого полевого шпата размером 100–200 μm .

Поскольку гематитовые жилы пространственно приурочены к участкам развития мезо-, эпитептермальных кварцевых (аметистовых) и кварц-флюорит-баритовых жил месторождения Мыс Корабль, для них предполагается генезис в сходных условиях (интервал температур 50–200 °С и при давлении не более 1 кбар). На существенную роль эпитептермальных процессов в формировании гематитовых жил указывают находки в последних редких зёрен киновари и минералов группы амальгамы серебра (Соловьёва и др., 2024).

Методы

Химический состав минералов и BSE изображения получены с использованием растрового электронного микроскопа Leo-1450 (Carl Zeiss), оснащённым рентгеновским энергодисперсионным спектрометром UltimMax-100 (Oxford Instruments). Параметры анализа: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 1.6 нА. Эталоны и аналитические линии: AlK α – Y₃Al₅O₁₂, SiK α – волластонит, NaK α – лоренценит, PK α – апатит, SK α – целестин, ClK α – атакамит, KK α – ортоклаз, CaK α – волластонит, FeK α – гематит, SrL α – целестин, YL α – Y₃Al₅O₁₂, LaL α – (La,Ce)S, CeL α – CeS, PrL α – LiPr(WO₄)₂, NdL α – LiNd(MO₄)₂, SmL α – SmFeO₃, GdL α – Gd₃Fe₅O₁₂.

Морфологические особенности и состав редкоземельных фосфатов

Одна из разновидностей редкоземельного фосфата отнесена к монациту-(Ce) и выделена по главной особенности химического состава – сумма оксидов катионов близкая или равна 100 мас. % (табл. 1), то есть минерал характеризуется безводным составом.

По форме выделения зёрен и парагенетическим ассоциациям монацит-(Ce) включает в себя три морфологических типа. Монацит I образует волокнистые агрегаты игольчатых кристаллов сноповидной формы размером от 20 до 60 μm (рис. 1 а) в стяжениях калиевого полевого шпата. Стяжения состоят из субидiomорфных и идиоморфных кристаллов калиевого полевого шпата размером до 100 μm (рис. 1 а). По форме стяжения имеют неправильную форму размером от 100–200 до 1000 μm (рис. 1 б, с). Монацит II наблюдается в виде тонких прожилков (до 10 μm), секущих основную гематитовую массу (рис. 1 с). Вероятно, прожилки являются каналами для поступления поздних гидротермальных растворов, богатых редкоземельными элементами, для последующего отложения редкоземельных фосфатов в стяжениях калиевого полевого шпата. Монацит III встречается в виде небольших агрегатов (до 30 μm) неправильной формы в гематитовой массе (рис. 1 d).

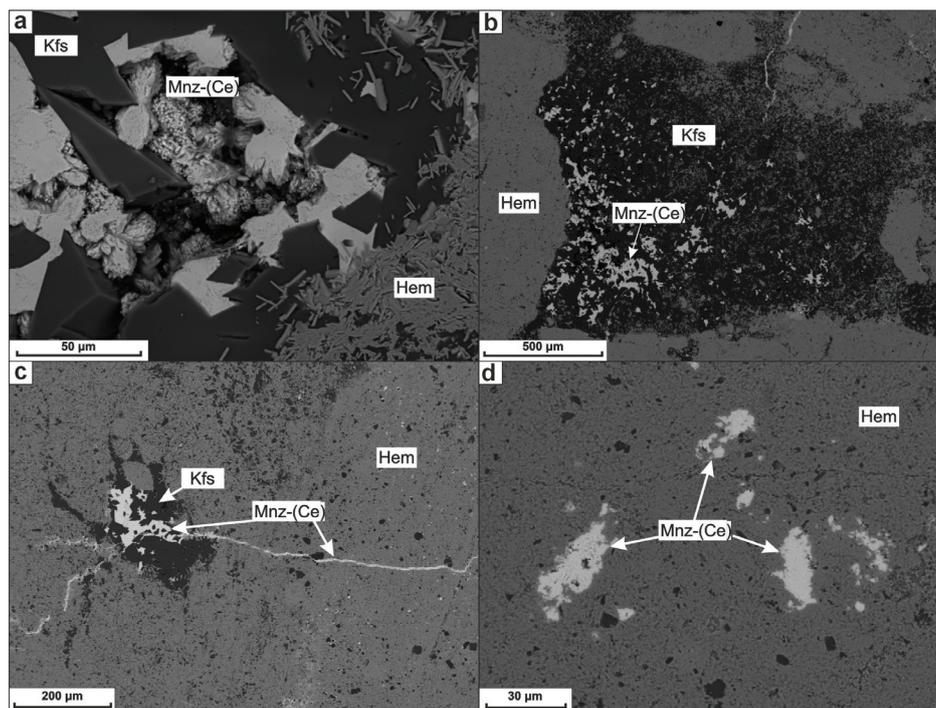


Рис. 1. Формы нахождения и парагенезисы монацита-(Ce) в гематитовых жилах месторождения Мыс Корабль (BSE изображения): а – сноповидные агрегаты игольчатых кристаллов монацита-(Ce) в стяжениях калиевого полевого шпата; б – стяжения калиевого полевого шпата с монацитом-(Ce) в гематитовой массе; в – прожилки монацита-(Ce) в гематитовой массе; д – ксеноморфные агрегаты монацита-(Ce) в гематитовой массе
Fig. 1. Forms of occurrence and parageneses of monazite-(Ce) in hematite veins of the Mys Korabl' deposit (BSE images): a – sheaf-shaped aggregates of needle-shaped monazite-(Ce) crystals in nodules of potassium feldspar; b – nodules of potassium feldspar with monazite-(Ce) in hematite mass; c – veinlets of monazite-(Ce) in hematite mass; d – anhedral aggregates of monazite-(Ce) in hematite mass

Все три морфологических типа монацита-(Ce) однородны по составу (табл. 1) и имеют усреднённую эмпирическую формулу $(\text{Ce}_{0.31}\text{La}_{0.24}\text{Nd}_{0.16}\text{Ca}_{0.14}\text{Pr}_{0.05}\text{Y}_{0.03}\text{Sr}_{0.03}\text{Sm}_{0.02}\text{O}_{0.98})(\text{P}_{0.84}\text{S}_{0.10})\text{O}_{4.7}$. Сумма REE+Y для монацита-(Ce) находится в диапазоне от 0.68 до 0.97 ф. к., тяжёлые REE в монаците-(Ce) отсутствуют. В редких случаях содержание La достаточно высокое (0.30 ф. к.), что позволяет выделить в серии La-доминантный минеральный вид (табл. 1, № ан. 1). В монаците-(Ce) присутствуют следующие примеси: SrO (1.28–1.62 мас. %), FeO (0.21–5.15 мас. %), Cl (0.12–0.16 мас. %). Характерной особенностью минерала является повышенное содержание SO_3 (3.21–4.03 мас. %) и CaO (3.43–3.71 мас. %). Наличие в анализах незначительных примесей калия, натрия, кремнезёма и алюминия вероятно обусловлены влиянием калиевого полевого шпата.

Вторая разновидность редкоземельного фосфата отнесена к рабдофану-(Ce) по особенностям химического состава по аналогии с работами (Халезова, Князева, 1961; Bowles, Morgan, 1984; Berger et al., 2014; Макагонов, Котляров, 2016; Ondrejka et al., 2018; Belogub et al., 2021): 1) неполная сумма оксидов, что указывает на присутствие воды в составе минерала; 2) повышенные содержания CaO, Y_2O_3 и FeO и пониженные La_2O_3 .

По форме выделения зёрен и парагенетическим ассоциациям данная разновидность редкоземельного фосфата (рабдофан-(Ce)) включает два морфологических типа. Рабдофан I встречается в виде комковидных агрегатов размером 1–10 µm в стяжениях калиевого полевого шпата преимущественно в ассоциации с уэксилдитом-(Ce) $[\text{CeVO}_4]$ (рис. 2 а, б). В отдельных случаях минерал обрастает уэксилдит-(Ce) (рис. 2 с, д). Последний образует призматические и таблитчатые кристаллы размером до 15 µm (рис. 2 а, б, е). Такая ассоциация указывает на тесную парагенетическую связь и последовательность их кристаллизации. Рабдофан II обнаружен в околожилльных песчанниках в виде удлинённых, призматических агрегатов размером 20–100 µm с пятнистой текстурой в ассоциации с пластинчатым гематитом (рис. 2 е, ф).

Таблица 1. Представительные анализы монацита-(Ce) из гематитовых жил Мыс Корабль
 Table 1. Representative analyses of monazite-(Ce) from hematite veins Mys Korabl'

Тип	Монацит I				Монацит II			Монацит III			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
№ ан.											
Al ₂ O ₃	0.14	0.33	0.21	0.23	0.22	0.25	0.17		0.19	0.11	0.20
SiO ₂	0.23	0.55	0.28	0.34	0.30	0.26	0.28	0.52	0.28	0.20	0.24
P ₂ O ₅	27.58	27.09	27.89	27.44	26.38	26.84	27.68	26.29	27.32	27.00	26.75
SO ₃	3.81	3.43	3.91	3.99	3.38	3.60	3.82	3.72	3.21	4.03	3.74
Cl	0.15	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16	0.16	0.12	0.16	0.16	0.15
K ₂ O		0.39		0.22	0.10						
CaO	3.51	3.56	3.51	3.71	3.43	3.51	3.47	3.43	3.52	3.70	3.61
Y ₂ O ₃	1.31	1.52	1.36	1.42	1.20	1.33	1.35	1.47	1.36	1.35	1.23
FeO	0.21	1.62	0.34	0.85	4.07	2.02	2.34	5.15	1.88	2.11	3.22
SrO	1.41	1.38	1.57	1.52	1.29	1.35	1.62	1.50	1.28	1.52	1.34
Ce ₂ O ₃	19.76	29.21	24.31	27.51	27.67	21.37	20.98	23.76	22.07	21.69	19.65
La ₂ O ₃	21.78	14.89	18.72	15.91	15.36	19.34	19.84	16.08	18.98	18.59	18.72
Nd ₂ O ₃	13.53	10.98	12.38	11.96	10.63	13.06	13.23	11.70	13.33	13.6	13.99
Pr ₂ O ₃	3.89	3.13	3.35	3.47	3.09	3.81	3.83	3.46	3.90	3.93	3.91
Sm ₂ O ₃	1.29	1.10	1.28	1.26	1.13	1.18	1.30	1.16	1.28	1.48	1.40
Сумма	99.60	99.33	99.26	99.99	98.40	98.08	100.07	98.36	98.76	99.47	98.15
Коэффициенты формулы, рассчитанные на 4 атома кислорода											
Al	0.006	0.014	0.009	0.010	0.009	0.011	0.007		0.008	0.005	0.009
Si	0.009	0.020	0.010	0.012	0.011	0.010	0.010	0.019	0.010	0.007	0.009
P	0.876	0.829	0.864	0.839	0.810	0.836	0.865	0.800	0.852	0.842	0.834
S	0.107	0.093	0.107	0.108	0.092	0.099	0.106	0.100	0.089	0.111	0.103
Cl	0.009	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.010	0.001	0.002	0.002	0.002
K		0.018		0.010	0.005						
Ca	0.141	0.138	0.138	0.144	0.133	0.138	0.137	0.132	0.139	0.146	0.142
Y	0.026	0.029	0.026	0.027	0.023	0.026	0.027	0.028	0.027	0.026	0.024
Fe	0.007	0.049	0.010	0.026	0.123	0.062	0.072	0.155	0.058	0.065	0.099
Sr	0.031	0.029	0.033	0.032	0.027	0.029	0.035	0.031	0.027	0.032	0.029
Ce	0.271	0.386	0.326	0.364	0.368	0.288	0.284	0.312	0.298	0.292	0.265
La	0.301	0.198	0.253	0.212	0.206	0.263	0.270	0.213	0.258	0.253	0.254
Nd	0.181	0.142	0.162	0.154	0.138	0.172	0.174	0.150	0.175	0.179	0.184
Pr	0.053	0.041	0.045	0.046	0.041	0.051	0.052	0.045	0.052	0.053	0.052
Sm	0.017	0.014	0.016	0.016	0.014	0.015	0.017	0.014	0.016	0.019	0.018
Сумма	2.035	2.002	2.002	2.002	2.002	2.002	2.065	2.001	2.011	2.033	2.025

Иногда редкоземельный фосфат, образующий игольчатые агрегаты размером 5–10 μm, находится в пустотах среди крупнопластинчатого гематита (рис. 3). Для него были получены спектры, которые указывают на принадлежность минерала к Ce(REE)-P-O фазе. Однако, минерал по форме выделения подобен рабдофану. Авторы считают, что данный морфологический тип стоит относить к третьему морфологическому типу рабдофана-(Ce).

По химическому составу (табл. 2) рабдофан-(Ce) имеет усреднённую эмпирическую формулу $(\text{Ce}_{0.49}\text{Ca}_{0.25}\text{La}_{0.11}\text{Nd}_{0.11}\text{Y}_{0.05}\text{Sr}_{0.02})_{1.03}(\text{P}_{0.89}\text{S}_{0.04})_{0.93}\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Минерал характеризуется неполной сум-

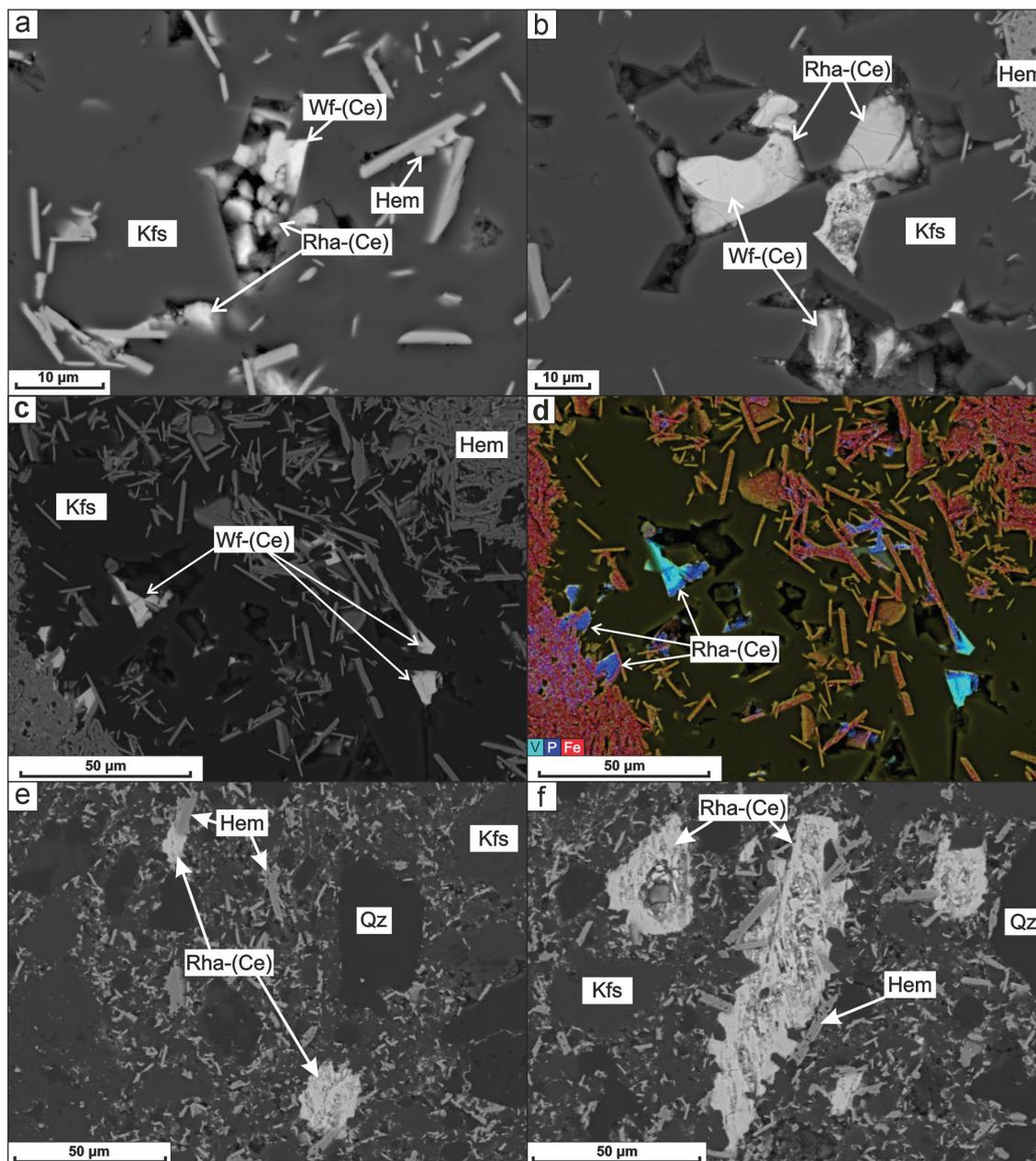


Рис. 2. Формы выделения и парагенезисы рабдофана-(Ce) в гематитовых жилах месторождения Мыс Корабль (BSE изображения): а, б – выделения рабдофана-(Ce) и уэкфилдита-(Ce) в пустотах из стяжений калиевого полевого шпата; с – обрастание уэкфилдита-(Ce) рабдофаном-(Ce); d – сводная элементная карта по V, P, Fe участка на рис. 2 с; e, f – агрегаты рабдофана-(Ce) неправильной и удлинённой формы в околожилных песчаниках

Fig. 2. Forms of rhabdophane-(Ce) occurrences and parageneses in hematite veins of the Mys Korabl' deposit (BSE images): a, b – rhabdophane-(Ce) and wakefeldite-(Ce) segregations in voids from potassium feldspar nodules; c – overgrowth of wakefeldite-(Ce) by rhabdophane-(Ce); d – summary elemental map for V, P, Fe of the site in Fig. 2 c; e, f – rhabdophane-(Ce) aggregates of irregular and elongated shape in wall-vein sandstones

мой оксидов (83.70–95.75 мас. %). REE+Y составляет 0.75–0.82 ф. к., при этом по распределению лёгких редкоземельных элементов значительно доминирует церий (Ce_2O_3 : 28.25–39.64 мас. %, La_2O_3 : 3.54–9.09 мас. %, Nd_2O_3 : 4.80–8.69 мас. %). В отличие от монацита-(Ce) в рабдофане-(Ce) отмечается повышенное содержание некоторых HREE (например, Gd_2O_3 : 0.76–1.22 мас. %) и Y_2O_3 (1.87–2.50 мас. %). В рабдофане присутствуют значительные примеси CaO (5.09–6.68 мас. %), SrO (0.63–0.98 мас. %), FeO (1.13–2.30 мас. %), Cl (0.27–0.43 мас. %) и SO_3 (0.42–2.38 мас. %).

Таблица 2. Представительные анализы рабдофана-(Ce) из гематитовых жил
 Table 2. Representative analyses of rhabdophane-(Ce) from hematite veins

Тип № ан.	Рабдофан I			Рабдофан II		
	1	2	3	4	5	6
Al ₂ O ₃		0.44				
SiO ₂		0.67	0.34	0.66	0.21	0.39
Na ₂ O	0.52	0.84	0.79			
P ₂ O ₅	24.57	27.04	27.35	25.70	24.38	25.93
SO ₃	1.47	1.66	2.38	0.42	0.69	0.74
Cl	0.42	0.43	0.27	0.43	0.39	0.32
K ₂ O		0.37	0.24			
CaO	5.99	6.68	5.09	5.41	5.79	5.69
FeO		2.30	1.13			
SrO	0.63	0.70	0.98			
Y ₂ O ₃	2.35	2.50	2.06	1.87	2.22	2.35
BaO				0.91	0.82	0.72
La ₂ O ₃	5.02	3.54	9.09	8.93	7.98	8.41
Ce ₂ O ₃	37.29	39.64	33.53	29.35	28.67	28.25
Pr ₂ O ₃		0.64	2.16	2.19	1.87	2.13
Nd ₂ O ₃	6.05	4.80	8.15	8.69	7.92	8.36
Sm ₂ O ₃		0.59	1.43	1.59	1.54	1.62
Gd ₂ O ₃			0.76	1.06	1.22	1.16
Сумма	84.31	92.84	95.75	87.21	83.7	86.07
Коэффициенты формулы, рассчитанные на 4 атома кислорода						
Al		0.020				
Si		0.026	0.013	0.027	0.009	0.016
Na	0.044	0.063	0.059			
P	0.910	0.890	0.890	0.890	0.880	0.900
S	0.048	0.048	0.069	0.013	0.022	0.023
Cl	0.031	0.032	0.020	0.034	0.031	0.025
K		0.018	0.012			
Ca	0.280	0.280	0.210	0.240	0.260	0.250
Fe		0.030	0.014			
Sr	0.016	0.016	0.022			
Y	0.055	0.052	0.042	0.041	0.050	0.051
Ba				0.015	0.014	0.012
La	0.081	0.051	0.129	0.135	0.125	0.127
Ce	0.596	0.562	0.472	0.440	0.447	0.425
Pr		0.009	0.030	0.033	0.029	0.032
Nd	0.094	0.066	0.112	0.127	0.120	0.123
Sm		0.008	0.019	0.022	0.023	0.023
Gd			0.010	0.014	0.017	0.016
Сумма	2.152	2.164	2.122	2.031	2.031	2.025

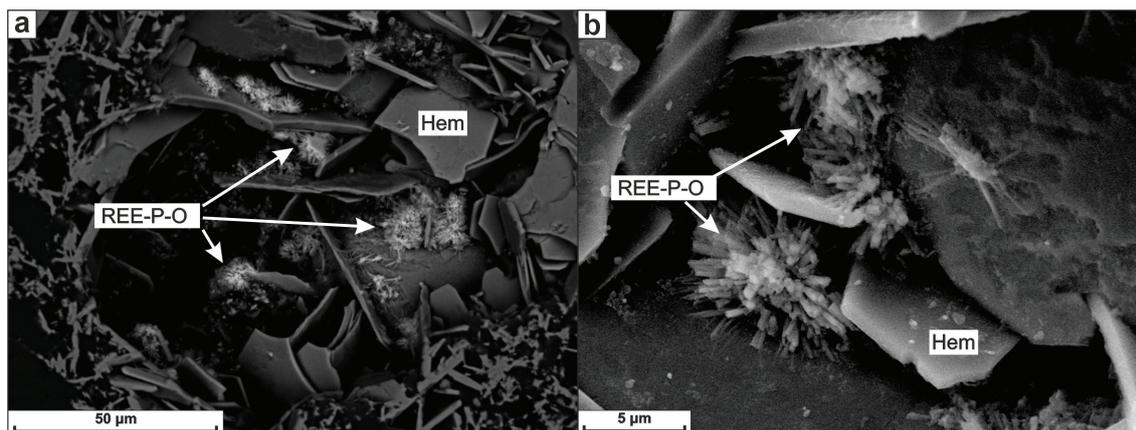


Рис. 3. Игольчатые скопления редкоземельного фосфата в пустотах жил в ассоциации с крупно-пластинчатым (до 20 μm) гематитом (BSE изображение)

Fig. 3. Needle-shaped aggregates of rare earth phosphate in vein voids in association with coarse-plate (up to 20 μm) hematite (BSE image)

Вхождение Са и S в кристаллическую структуру монацита-(Ce) и рабдофана-(Ce) можно предположить за счёт следующей схемы изоморфизма: $Ce^{3+}P^{5+} \leftrightarrow Ca(Sr)^{2+}S^{6+}$ (Кухаренко и др., 1961; Ondrejka et al., 2018; Belogub et al., 2021).

Ряд исследователей указывали на вхождение Ca^{2+} в структуру монацита за счёт возможной компенсации Ce^{4+} (Orlova et al., 2001; Kitaev et al., 2004). Для исследованного рабдофана-(Ce) может быть предложена следующая схема замещения $2REE^{3+} \leftrightarrow Ca^{2+} + Ce^{4+}$. Предполагаемое присутствие Ce^{4+} в рабдофане-(Ce) в совокупности с наблюдаемой парагенетической ассоциацией минерала с узкфилдитом-(Ce) указывают на высокоокислительные условия кристаллизации рабдофана-(Ce). При этом минерал мог образоваться либо путём изменения и гидратации монацита в гидротермально изменённых песчаниках (рабдофан II), либо путём полной мобилизации и осаждения редкоземельных элементов из гидротермальных растворов в самих гематитовых жилах (рабдофан I).

Выводы

Полученные данные о морфологии и особенностях химического состава редкоземельных фосфатов гематитовых жил позволяют выделить две разновидности: монацит-(Ce) и рабдофан-(Ce).

Текстурные взаимоотношения редкоземельных фосфатов с гематитом, калиевым полевым шпатом, узкфилдитом-(Ce) указывают на следующую последовательность образования минералов: гематит → КПШ → монацит-(Ce) → узкфилдит-(Ce) → рабдофан-(Ce).

Вхождение Са и S в кристаллическую структуру монацита-(Ce) и рабдофана-(Ce) можно предположить за счёт следующих схем изоморфизма: $Ce^{3+}P^{5+} \leftrightarrow Ca(Sr)^{2+}S^{6+}$ и/или $2REE^{3+} \leftrightarrow Ca^{2+} + Ce^{4+}$.

Рабдофан-(Ce) мог образоваться либо путём изменения монацита, либо путём полной мобилизации и осаждения редкоземельных элементов из гидротермальных растворов.

Благодарности

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 22-17-20002).

Литература

1. Зозуля Д. Р., Соловьёва А. Н., Чикирёв И. В. Уникальные гематитовые жилы Терского побережья, Кольский регион: состав, структурно-текстурные особенности и генезис // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. № 18. С. 177–182.
2. Кухаренко А. А., Булах А. Г., Бакланова К. А. Сульфат-монацит из карбонатитов Кольского полуострова // Записки всесоюзного минералогического общества. 1961. Ч. 90. № 4. С. 373–381.
3. Макагонов Е. П., Котляров В. А. Редкоземельная минерализация в щелочных и субщелочных породах Балбукского комплекса (Южный Урал) // Минералогия. 2016. № 2. С. 34–43.

4. Соловьёва А. Н., Зозуля Д. Р., Савченко Е. Э. Гидротермальные гематитовые жилы и брекчии с редкоземельной минерализацией аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский регион) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2023. № 4. С. 75–90.
5. Соловьёва А. Н., Зозуля Д. Р., Савченко Е. Э., Борисенко Е. С. 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. 2024. № 3. С. 48–59.
6. Халезова Е. Б., Князева Д. Н. Рабдофанит Вишневых гор // Труды Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана. 1961. № 12. С. 235–238.
7. Belogub E. V., Shilovskikh V. V., Novoselov K. A., Blinov I. A., Filippova K. A. 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 // Eur. J. Mineral. 2021. V. 33. P. 605–620. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-605-2021>.
8. Berger A., Gnos E., Janots E., Fernandez A., Giese J. Formation and composition of rhabdophane, bastnasite and hydrated thorium minerals during alteration: implications for geochronology and low-temperature processes // Chemical Geology. 2008. V. 254 (3). P. 238–248.
9. Berger A., Janots E., Gnos E., Frei R., Bernier F. Rare earth element mineralogy and geochemistry in a laterite profile from Madagascar // Applied Geochemistry. 2014. No. 41. P. 218–228.
10. Bowles J. F. W., Morgan D. J. The composition of rhabdophane // Mineralogical Magazine. 1984. V. 48, No. 1. P. 146–148.
11. Kitaev D. B., Volkov Y. F., Orlova A. I. Orthophosphates of tetravalent Ce, Th, U, Np, and Pu with the monazite structure // Radiochemistry. 2004. V. 46. P. 211–217.
12. Nagy G., Draganits E., Demény A., Pantó G., Arkai P. Genesis and transformations of monazite, florencite and rhabdophane during medium grade metamorphism: examples from the Sopron Hills, Eastern Alps // Chem Geol. 2002. V. 191. P. 25–46.
13. Ondrejka M., Bačík P., Sobocký T., Uher P., Škoda R., Mikuš T., Luptáková J., Konečný P. 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. 2018. V. 82, No. 6. P. 1277–1300.
14. Orlova A. I., Kitaev D. B., Volkov Y. F., Pet'kov V. I., Kurazhkovskaya V. S., Spiridonova M. L. Double phosphates of Ce(IV) and some mono and bivalent elements // Radiochemistry. 2001. V. 43. P. 225–228.
15. Smith M. P., Henderson P., Campbell L. S. Fractionation of the REE during hydrothermal processes: constraints from the Bayan Obo Fe–REE–Nb deposit, Inner Mongolia, China // Geochimica and Cosmochimica Acta. 2000. V. 64. P. 3141–3160.