

УДК 549.732

ФЕРГУСОНИТ-(Y) И ПРОДУКТЫ ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ В ГРАНИТНОМ ПЕГМАТИТЕ ЖИЛЫ БЕРЕГОВОЙ ЗЕНКОВСКОГО МАССИВА НА УРАЛЕ

В.И. Попова, Е.И. Чурин, И.А. Блинов, В.А. Губин
Институт минералогии, УрО РАН, Миасс, popov@mineralogy.ru

Исследованы крупные (до 2–5 см) кристаллы и зёрна фергусонита-(Y) состава $(Y_{0.65}REE_{0.23}U_{0.07}Th_{0.04}Ca_{0.01})_{0.98}(Nb_{0.91}Ti_{0.05}Ta_{0.03})_{0.95}O_4$ гидратированные в разной степени и замещённые с периферии агрегатом иттропирохлора-(Y), $(Y_{0.54}REE_{0.23}U_{0.11}Th_{0.05}Ca_{0.08})_{1.01}(Nb_{1.76}Ti_{0.20}Ta_{0.05})_{2.01}O_6(OH) \cdot 3.8H_2O$, а вдоль трещин – броккитом и чералитом. Охарактеризованы вростки и сростки аксессуарных редкоземельно-редкометалльных минералов из ассоциации с фергусонитом-(Y) – ферро- и манганоколумбит, ильменорутил, самарскит-(Y), поликраз-(Y), циркон, ксенотим-(Y), монацит-(Ce), уранпирохлор, бетафит, уранинит, торит.

В статье 3 таблицы, 8 рисунков, список литературы из 14 названий.

Ключевые слова: фергусонит-(Y), продукты изменения, иттропирохлор-(Y), броккит, чералит, уранпирохлор, Зенковский массив, Урал.

В России первый фергусонит $YNbO_4$ был определён Г.П. Черником (1921) в образцах, отобранных Радиевой экспедицией Академии наук в 1913–1914 гг. из гранитного амазонитового пегматита Блюмовской копи на Южном Урале, то есть почти через столетие после открытия этого минерала в пегматитах Гренландии. Наиболее обычен фергусонит-(Y), встречающийся в гранитных пегматитах, аляскитовых гранитах и альбититах разных регионов мира, обычно в виде мелких зёрен и сростков, иногда до 2–3 см и более, в разной степени изменённых с поверхности; продукты изменения слабо изучены (Минералы, 1967).

Крупные кристаллы фергусонита-(Y), значительно изменённые с периферии, обнаружены в гранитном пегматите жилы Береговой на северо-восточном берегу Белоярского водохранилища, в 8 км северо-западнее г. Заречный и в 5 км северо-западнее Белоярской атомной электростанции (БАЭС) (рис. 1). Перед началом строительства БАЭС на этой площади партиями Уральского геологического управления были проведены геологосъёмочные и поисковые работы на керамическое сырьё, и некоторые пегматитовые жилы были вскрыты канавами и шурфами, но минералогия их была мало исследована. В 1972 г. геолог А.С. Таланцев посоветовал одному из нас (В.А. Губину) посетить эту жилу. В дальнейшем (в 1973–75 гг.) при промывке щебня со дна копи были найдены фергусонит-(Y), самарскит-(Y), колумбит, монацит-(Ce) и циркон-ксенотимовые сростки. В 1983–84 гг. жила обследована В.И. Поповой, в 2008 г. – совместно с В.А. Губиным. Первые результаты этих исследований частично опубликованы (Попова и др., 1988; Попова, Губин, 2008). Найденные кристаллы фергусонита-(Y) со

значительными участками их изменения и сопутствующими минералами были доизучены, что и стало предметом данной статьи.

Локализация аксессуарной минерализации в пегматите жилы Береговой

Жила Береговая простиранием 330° ССЗ залегает в сером мелкозернистом аляскитовом граните небольшого (7–5 км) позднепалеозойского Зенковского массива с редкометалльной спецификой, примыкающего с юга к Адуйскому массиву. Считается, что Зенковский массив образовался несколько позднее Адуйского; граниты Зенковского массива по аксессуарной минерализации сходны с поздними лейкократовыми гранитами Адуйского массива (Чашухина, 1975; Морозова, 2006; и др.).

Кварц-двуполювошпатовый пегматит с мусковитом вскрыт двумя копиями – главной южной (длиной 25 м, шириной 4 м, глубиной 4 м) и более мелкой северной в 5 м от неё. Вкрест простирания жила подсечена канавами, и общая длина её около 30 м. Падение жилы $60^\circ \angle 70-80^\circ$ ВСВ. Из южной копи в сторону берега отходят две выездные траншеи, вокруг которых складированы отвалы высотой до метра. От копи до берега первоначально было около 30 м, но теперь, в результате прокладки подводящего гидроканала к строящемуся 4-му блоку БАЭС, свежие отвалы выбранной породы отгородили жилу Береговую на 50 м от уреза воды уже на протяжении 100–120 м вдоль берега. Жила имеет классическую зональность с тем отличием, что в ней не выражена аплитовая оторочка, а сразу от контактов проявлена кварц-двуполювошпатовая графическая зона с геометрическим отбором минералов внутрь жилы, сменяющая-



Рис. 1. Местонахождение жил Береговой и Белоярской (Урал, Россия).

ся блоковой зоной и затем кварцевым ядром. Выбиралась на шпат наиболее ценная блоковая часть, кварцевое ядро (шириной до 1 м) на дне копи осталось почти нетронутым.

Акцессорные минералы локализованы частично в графическом пегматите (при переходе к блоковой зоне), но в основном — в блоковой зоне жилы. Наиболее часто встречаются мелкие зёрна магнетита, в разной мере гематитизированного и лимонитизированного, а также крупные выделения красновато-коричневого железистого спессартина с содержанием 27.6 мас.% MnO, образующего симплектитовые сростки с альбит-олигоклазом и «перистым» мусковитом, а также кристаллы до 4 см, частью с гранями тетрагонтриоктаэдра {211}, но обычно — с индукционными поверхностями совместного роста с соседними минералами. В ассоциации с ними отмечаются мелкие зёрна гангита, фторопацита и алланита-(Се). Редкоземельно-редкометалльные минералы — фергусонит-(Y), самарскит-(Y), поликраз-(Y), ферро- и манганоколумбиты, ильменорутил, стрюверит, циркон, ксенотим-(Y), монацит-(Се), уранпирохлор, бетафит, уранинит, торит, рабдофан-(Се), брокит — найдены в образцах преимущест-

венно из отвалов и при промывке щебня и крошки из блоковой зоны жилы.

Ещё одна из жил на этом участке — Белоярская, расположенная в 2 км к ССЗ от Береговой и сходная с ней по акцессорной минерализации, найдена только по глыбовому развалу и вскрыта недостаточно; фергусонит в ней пока не встречен.

Методы исследования

Исследования выполнены в лабораториях Института минералогии УрО РАН (г. Миасс). Кристаллы минералов с участками собственных граней исследованы гониометрически с применением фёдоровского столика СФ-4 в качестве гониометра. Идеализированная форма кристаллов вычерчена с использованием программы SHAPE-7.1 и CorelDRAW 11. Рентгенограммы минералов получены на дифрактометре ДРОН-2.0 и идентифицированы по базе ASTM. Аншлафы минералов исследованы с применением оптического микроскопа Olympus BX51. Энерго-дисперсионные спектры (ЭДС), химический состав минералов и распределение элементов в рентгеновском характеристическом излучении исследованы микрондовым рентгеноспектральным анализом (JXA-733 Geol с ЭДС INCA200 и ВДС с тремя кристалл-анализаторами; SEM TESCAN Vega3 с INCA250, РЭММА-202М с ЭДС LZ-5). В качестве стандартов использовались ильменит, колумбит, ортоклаз, хлорапатит, альмандин, ThO₂, UO₂, (REE)P₃O₁₄, (REE)₂O₃, Y₂O₃.

Фергусонит-(Y) и его эпигенетические изменения

Фергусонит-(Y) в жиле Береговой обычно встречается в виде сложных по форме зёрен величиной 5 — 10 мм в агрегатах с другими минералами. Реже наблюдались почти полнотельные остроидипирамидальные кристаллы, размером до 2 — 5 см, с гранями тетрагональных дипирамид $z\{231\}$, $x\{131\}$, $s\{111\}$ и пинакоида $\{001\}$ (рис. 2). Неизменённый фергусонит-(Y) полупрозрачный, тёмно-коричневый (до чёрно-коричневого), в иммерсионных препаратах — коричневый, прозрачный, слабо анизотропный, твёрдость 5.5 (по Моосу). Без прокаливания рентгеноаморфен, а после прокаливании до 800°C мутнеет, приобретает светло-коричневый цвет, и его дифрактограмма содержит отражения (d , Å; h): 3.049 (100), 2.944 (30), 2.750 (25), 2.590 (36), 1.882 (22), 1.794 (5), 1.636 (2), 1.571 (11), более характерные для тетрагональной модифика-

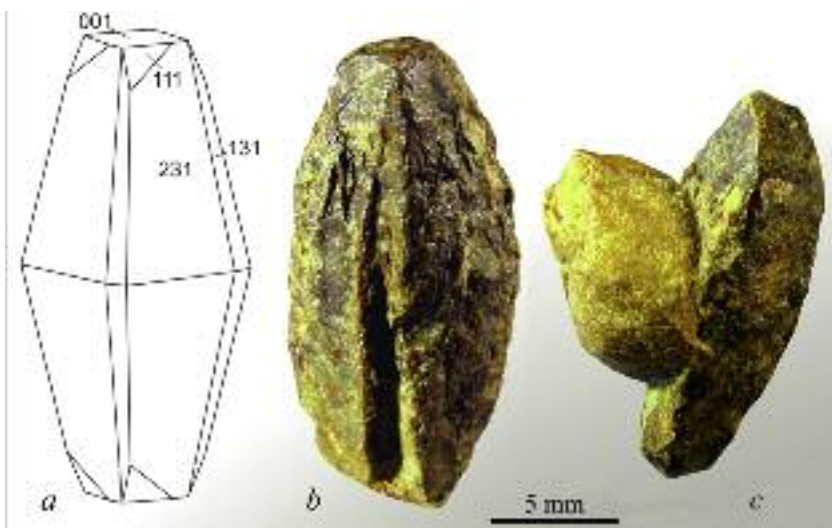


Рис. 2. Форма кристаллов фергусонита-(Y) (a, b) и сросток его с циркон-ксенотимовым «орешком» (c).

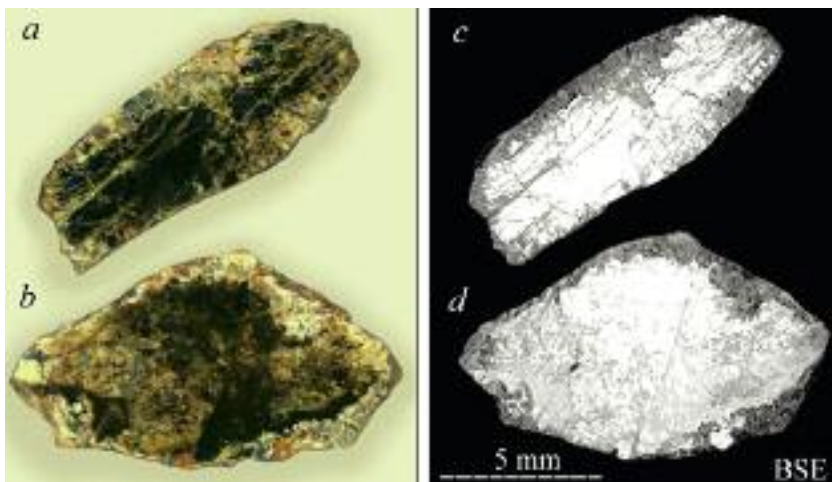


Рис. 3. Участки изменения фергусонита-(Y) в продольном (a, c) и поперечном (b, d) сечениях в косом освещении и в отражённых электронах (BSE).

ции (кроме отражения 1.571). В продольных и поперечных сечениях кристаллов хорошо видны реликты неизменённого фергусонита-(Y), участки его изменения и замещения, а также включения сокристаллизовавшихся с ним минералов (рис. 3). Первичный фергусонит-(Y) содержит 14–16 мас.% редких земель с преобладанием иттриевой группы, 7.2–7.4% UO_2 и 3.5–3.7% ThO_2 (табл. 1, ан. 1, 2; рис. 4a). Наиболее обычные изменения фергусонита-(Y) проявлены в его гидратации – эти участки на снимках в отражённых электронах темнее, в них, очевидно, содержится H_2O (около 0.5 молекул в расчётной формуле) и меньше редких земель (табл. 1, ан. 3). Результатом более интенсивной гидратации (2–5 молекул H_2O в формуле) является осветление окраски фергусонита до жёлто-коричневой и коричнево-жёлтой и уменьшение содержа-

ний иттрия и редких земель (табл. 1, ан. 4, 5). Твёрдость таких участков около 5, зёрна минерала в иммерсии светло-жёлтые, изотропные.

Среди продуктов изменения фергусонита-(Y) выделяются участки замещения его агрегатом зеленовато-желтоватых субизометрических микрозёрен минерала с твёрдостью 4.5 (по Моосу), в иммерсии прозрачных, бледно-жёлтых, изотропных, $n = 1.80–1.81$. Микронзондовый анализ этого минерала удовлетворительно рассчитывается на формулу иттрипирохлора-(Y) (табл. 1, ан. 6), в энерго-дисперсионных спектрах преобладают Y, Nb и U, а примесь Ca в нём больше, чем в фергусоните-(Y) (рис. 4b). После прокаливания при 630°C минерал стал беловато-оранжевым, мутным, с полупрозрачными участками. На дебаграмме проявились только три

Таблица 1. Химический состав (мас.%) фергусонита-(Y) первичного (1–2) и изменённого (3–5) и замещающих его иттропирохлора-(Y) (6) и броккита (7)

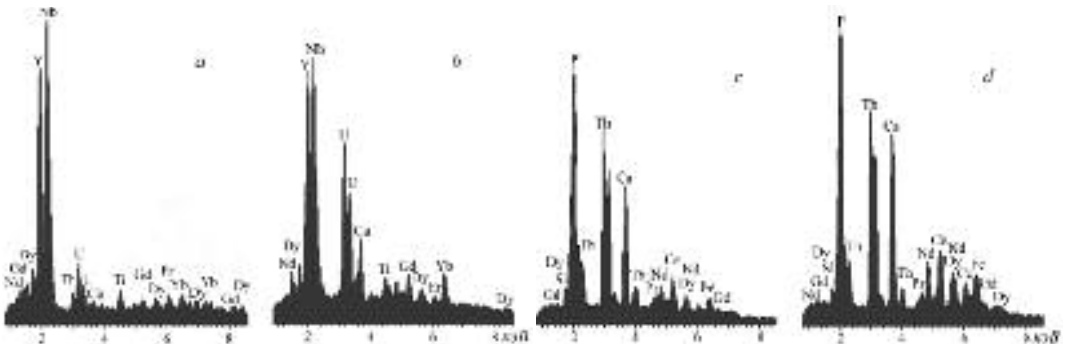
№ ан.	1	2	3	4	5	6	7
Y ₂ O ₃	25.65	26.07	25.97	22.18	18.32	12.65	–
UO ₂	7.20	7.42	7.31	6.42	7.58	5.94	–
ThO ₂	3.54	3.72	4.41	1.66	2.44	2.73	42.44
CaO	0.24	0.13	0.26	0.69	0.39	0.89	9.45
La ₂ O ₃	0.16	–	–	–	–	0.17	0.10
Ce ₂ O ₃	0.43	–	–	–	–	0.42	1.20
Nd ₂ O ₃	1.37	1.23	–	1.31	0.80	0.80	1.04
Sm ₂ O ₃	1.55	1.39	1.51	1.47	0.60	0.52	0.40
Gd ₂ O ₃	2.82	2.48	2.13	1.80	1.28	1.05	0.34
Dy ₂ O ₃	3.83	3.55	3.40	3.19	2.47	2.20	0.48
Tb ₂ O ₃	0.66	–	–	–	–	0.40	–
Er ₂ O ₃	2.19	1.86	1.47	2.03	1.65	1.38	–
Yb ₂ O ₃	2.85	3.32	3.36	2.52	2.30	1.89	0.42
Nb ₂ O ₅	43.67	43.55	42.55	37.95	31.29	48.41	–
Ta ₂ O ₅	2.54	3.31	3.01	3.02	2.33	2.32	–
TiO ₂	1.45	1.75	2.09	1.70	1.60	3.35	–
SiO ₂	–	0.20	–	1.97	1.21	Не опр.	1.20
P ₂ O ₅	–	–	–	–	–	–	23.86
П.п.п.	Не опр.	Не опр.	1.60	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Сумма	99.90	99.98	99.07	87.91	74.26	84.92	81.16
Σ TR	16.04	13.83	11.87	12.32	9.10	7.66	3.88

Эмпирические формулы (расчёт на O = 4; ан. 6 – на O = 6.5)

- 1 – (Y_{0.65}REE_{0.23}U_{0.07}Th_{0.04}Ca_{0.01})_{0.98}(Nb_{0.91}Ti_{0.05}Ta_{0.03})_{0.99}O₄;
- 2 – (Y_{0.63}REE_{0.22}U_{0.08}Th_{0.04}Ca_{0.01})_{0.97}(Nb_{0.90}Ti_{0.06}Ta_{0.04}Si_{0.01})_{1.01}O₄;
- 3 – (Y_{0.66}REE_{0.17}U_{0.06}Th_{0.05}Ca_{0.01})_{0.97}(Nb_{0.91}Ti_{0.07}Ta_{0.04})_{1.02}O₄•0.5H₂O;
- 4 – (Y_{0.60}REE_{0.18}U_{0.07}Th_{0.02}Ca_{0.04})_{0.91}(Nb_{0.88}Ti_{0.09}Ta_{0.04}Si_{0.10})_{1.09}O₄•2.4H₂O;
- 5 – (Y_{0.59}REE_{0.18}U_{0.10}Th_{0.03}Ca_{0.03})_{0.93}(Nb_{0.86}Ti_{0.07}Ta_{0.04}Si_{0.07})_{1.04}O₄•5H₂O;
- 6 – (Y_{0.54}REE_{0.23}U_{0.11}Th_{0.05}Ca_{0.08})_{1.01}(Nb_{1.76}Ti_{0.20}Ta_{0.05})_{2.01}O₆(OH)•3.8H₂O;
- 7 – (Ca_{0.48}Th_{0.46}REE_{0.07}Fe_{0.01})_{1.02}(P_{0.95}Si_{0.06})_{1.01}O₄•2.8H₂O.

Примечание: Микрозонд JXA-733 с ЭДС INCA200 (ан. 1, 3–5) и ВДС (ан. 2, 6, 7), аналитик Е.И. Чуринов. В сумму включены (мас. %): Eu₂O₃ 0.18 (ан. 1), FeO 0.32 (ан. 7). В ан. 3 потери при прокаливании (П.п.п.) = H₂O, в других анализах H₂O рассчитана по дефициту суммы. Не опр. – не определялось, прочерк – не обнаружено.

Рис. 4. Энерго-дисперсионные спектры фергусонита-(Y) (а) и замещающих его иттропирохлора-(Y) (б), броккита (с) и чералита (д).



слабых отражения (d , Å): 2.97, 2.79, 2.57, близкие к отражениям иттропирохлора-(Y) («обручевита»).

К более поздним относятся «кружевные» псевдоморфозы бруккита и чералита (рис. 4с, d и рис. 5), замещающие фергусонит-(Y) около секущих трещин. В составе бруккита, кроме преобладающих Th, Ca и P, определены примеси редких земель (3.88 мас.%), Si и Fe (табл. 1, ан. 7). Периферические зонки таких псевдоморфоз на контакте с фергусонитом-(Y) содержат больше редких земель и выделяются на снимке в отражённых электронах (светлее, чем брукит); вероятно, они представлены чералитом. Тонкие прожилочки чералита встречаются и в секущих трещинках среди агрегатов бруккита и иттропирохлора-(Y), что даёт основание отнести их к наиболее поздним продуктам замещения фергусонита-(Y). Потери при прокаливании до 300°C суммарной пробы продуктов изменения вместе с реликтами фергусонита-(Y) составили 6.5 мас.%.
Состав индивидуальных редких земель первичного фергусонита-(Y) характеризуется преобладанием диспрозиевого максимума (близкого типу VI, по А.И. Гинзбургу и др., 1960). Наиболее гидратированная его разновидность несколько отличается относительным увеличением доли тяжёлых REE, что ближе к данным, полученным для псевдоморфного

иттропирохлора-(Y), а в более позднем брукките резко преобладают лёгкие редкие земли (табл. 2).

Акцессорные минералы из ассоциации с фергусонитом-(Y)

В агрегатах с фергусонитом-(Y) и в виде вrostков в нём встречаются как породообразующие минералы (полевые шпаты, кварц, мусковит), так и различные редкометалльные минералы. Наиболее часты колумбиты, самарскит-(Y), поликраз-(Y) и монацит-(Ce), подобно найденным и в жиле Белоярской (рис. 6).

В жиле Береговой (а также и в Белоярской) среди акцессорных минералов преобладают марганцовистые ферроколумбиты (табл. 3, ан. 1), периферические зоны которых нередко являются железистыми манганоколумбитами с небольшим повышенным содержанием Ta₂O₅ (табл. 3, ан. 2). При этом микровключения ферроколумбита приурочены к внутренним частям кристаллов фергусонита-(Y), а вrostки манганоколумбита – к периферическим. В колумбите отмечаются вrostки ильменорутила.

Самарскит-(Y) и в отдельных кристаллах, и во вrostках в фергусоните-(Y) содержит много Fe и U (табл. 3, ан. 3), часто образует агрегаты с ферроколумбитом и поликразом-(Y)

Рис. 5. Агрегаты бруккита (Br) и чералита (Cher) вдоль трещин в фергусоните-(Y). BSE-снимок.

Рис. 6. Ферроколумбит (а), самарскит-(Y) (b) и монацит-(Ce) (с) из жилы Белоярской.

Рис. 7. Участки изменения самарскита-(Y) (а, с – BSE, b, d – Si K α_1).

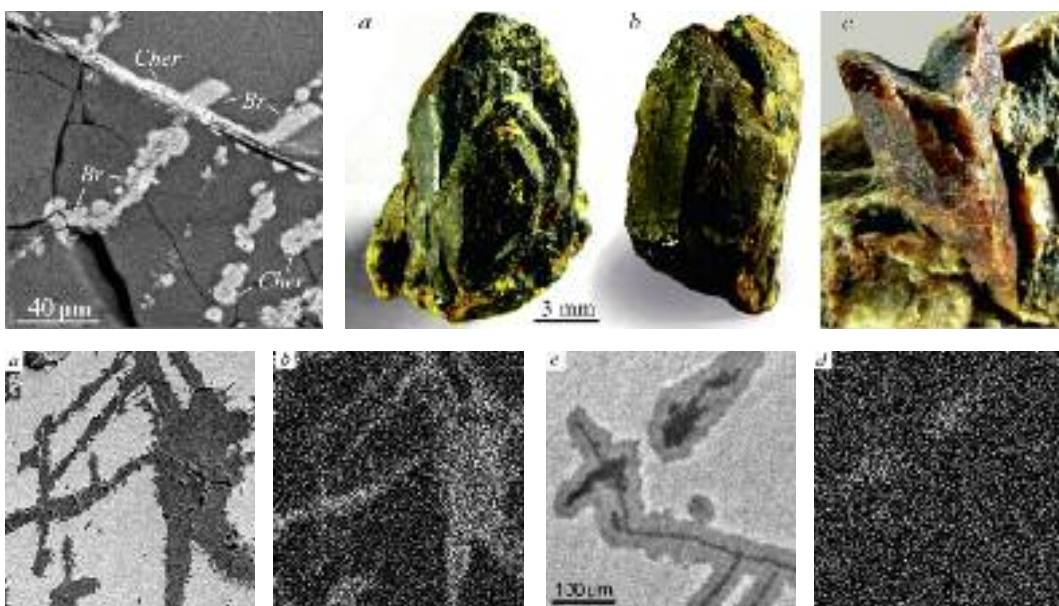


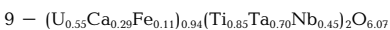
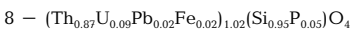
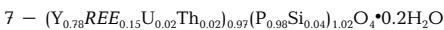
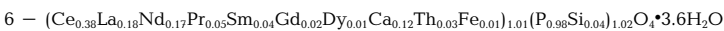
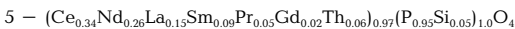
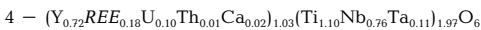
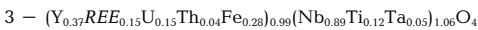
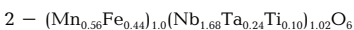
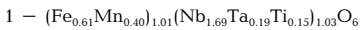
Таблица 2. Состав редких земель (% от $\Sigma TR = 100$) в фергусоните-(Y) (1), его наиболее гидратированной разности (2) и псевдоморфных иттропирохлоре-(Y) (3) и брокките (4)

Оксиды	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Tb	Er	Yb	TR, мас.%
1	1.00	2.68	8.54	9.56	1.12	17.58	23.88	4.12	13.66	17.77	16.04
2	—	—	8.79	6.59	—	14.07	27.14	—	18.13	25.28	9.10
3	2.22	5.48	10.49	6.79	—	13.71	28.72	1.22	18.02	24.67	7.66
4	2.58	30.93	26.89	10.31	—	8.76	12.37	—	—	10.82	3.88

Таблица 3. Химический состав (мас.%) редкометалльных минералов из ассоциации с фергусонитом-(Y)

№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Y ₂ O ₃	—	—	14.62	22.36	0.12	—	42.59	—	—
UO ₂	—	—	14.66	7.35	0.46	—	2.25	7.22	28.38
ThO ₂	—	—	3.67	0.60	6.22	2.96	2.60	70.74	Не опр.
PbO	—	—	Не опр.	Не опр.	—	—	—	1.43	Не опр.
FeO	12.35	8.82	7.18	—	—	0.22	—	0.35	1.54
MnO	8.14	11.13	—	—	—	—	—	—	—
CaO	—	—	—	0.37	0.25	2.35	—	—	3.15
La ₂ O ₃	—	—	—	—	10.16	10.30	—	—	Не опр.
Ce ₂ O ₃	—	—	—	—	23.43	22.12	—	—	Не опр.
Pr ₂ O ₃	—	—	—	—	3.56	3.06	—	—	Не опр.
Nd ₂ O ₃	—	—	—	—	18.12	10.21	—	—	Не опр.
Sm ₂ O ₃	—	—	1.05	—	6.31	2.78	1.12	—	Не опр.
Gd ₂ O ₃	—	—	1.86	1.37	1.64	1.53	2.71	—	Не опр.
Dy ₂ O ₃	—	—	2.59	2.76	0.25	0.90	4.28	—	Не опр.
Er ₂ O ₃	—	—	1.79	2.07	—	—	2.07	—	Не опр.
Yb ₂ O ₃	—	—	1.94	2.10	—	—	4.07	—	Не опр.
Nb ₂ O ₅	63.90	61.97	41.60	27.97	—	—	—	—	11.60
Ta ₂ O ₅	11.60	14.73	4.02	6.77	—	—	—	—	29.80
TiO ₂	3.30	2.30	3.25	24.24	—	—	—	—	13.04
P ₂ O ₅	—	—	—	—	28.10	24.93	33.87	1.15	—
SiO ₂	—	—	—	—	1.26	0.94	1.11	17.60	—
Σ	99.29	98.95	98.23	98.97	99.88	82.30	96.67	98.49	87.51

Эмпирические формулы (ан. 1, 2, 4 – расчёт на O = 6; ан. 3, 5–8 – на O = 4; ан. 9 – на (Ti,Ta,Nb) = 2)



Примечание: 1 – ферроколумбит, 2 – манганоколумбит, 3 – самарскит-(Y), 4 – поликраз-(Y), 5 – монацит-(Ce), 6 – рабдофан-(Ce), 7 – ксенотим-(Y), 8 – торит, 9 – бетафит. Микрозонг JXA-733 с ЭДС INCA200 (ан. 1, 2, 8, 9) и ВДС (ан. 3–7), анализ Е.И. Чуриной. В ан. 4 Но 0.91 мас. %. H₂O – расчётная (по дефициту суммы, ан. 6, 7). Не опр. – не определялось, прочерк – не обнаружено.

и включает микрозёрна ильменита и магнетита. Вдоль трещин в самарските-(Y) проявлены различные изменения. Наиболее обычна гидратация разной степени, сопровождающаяся некоторым выносом Y, Fe, U и привносом Si. На снимках в отражённых электронах участки слабого изменения самарскита-(Y) чуть темнее, а в существенно изменённых участках содержание SiO_2 достигает 6–8 мас. % (рис. 7а, б), Ta_2O_5 — 8–10 мас. % при почти полном выносе Y и U. Другой тип изменения самарскита-(Y) представляет собой зональные метасоматические жилки вдоль трещин (рис. 7с, д); центральная часть жилок содержит SiO_2 , а промежуточная зона, по сравнению с самарскитом-(Y), почти вдвое обеднена Nb_2O_5 , но обогащена Ta_2O_5 (~20 мас. %) и P_2O_5 (~6.7 мас. %); краевая микрizona, контактирующая с самарскитом-(Y) (и по сравнению с ним более светлая в отражённых электронах), вероятно, обогащена редкими землями. Эти продукты изменения самарскита-(Y) пока не удалось идентифицировать.

Включения поликраза-(Y), ильменорутила и монацита-(Ce) встречаются в периферических участках зёрен фергусонита-(Y). Зёрна поликраза-(Y) обычно сложной формы, величиной до 5 мм, зональны по составу и изменены с периферии и около трещин со сменой первичной чёрной и коричнево-чёрной окраски на жёлто- и зеленовато-коричневую, иногда содержат вроски ильменита, манганокolumбита и самарскита-(Y). Химический состав одного из наименее изменённых внутренних участков поликраза-(Y) чёрного цвета приведён в таблице 3 (ан. 4). Участки изменения поликраза исследованы ранее. Они проявлены в гидратации (потери при прокаливании до 10–20 мас. %) с уменьшением в составе минерала доли Y, Ti и REE (Попова, 2009). Состав ильменорутила (мас. %): TiO_2 53.10; Nb_2O_5 19.14; Ta_2O_5 15.55; FeO 1.8; Fe_2O_3 10.34 (по данным ЯГРС); расчётная (на O = 2) формула $(\text{Ti}_{0.63}\text{Fe}_{0.15}\text{Nb}_{0.14}\text{Ta}_{0.07})_{0.99}\text{O}_2$.

Вроски монацита-(Ce) величиной до 0.7 мм характеризуются существенной примесью Th и незначительной — Ca (табл. 3, ан. 5). Некоторые зёрна частично замещены агрегатом гидратированного рабдофана-(Ce), отличающегося, по сравнению с монацитом-(Ce), почти вдвое меньшими содержаниями ThO_2 , Nd_2O_3 и Sm_2O_3 , но на порядок более высокими — CaO (табл. 3, ан. 6).

Наиболее эффектны сростки фергусонита-(Y) с эллипсоидальными циркон-ксенотимовыми «орешками» (см. рис. 2с) с общей четверной осью симметрии (рис. 8). Ксенотим-(Y) в них образует сферокристаллы-«двухлистники» со сменой цвета от желтовато-коричневатого (в центре) до коричневатого-зеленоватого в краевых зонах. В составе его около 2.2 мас. % UO_2 и 2.6% ThO_2 (табл. 3, ан. 7). На снимке (метод автордиографии) сечения такого «орешка» ксенотим-(Y) проявляется повышенной радиоактивностью по сравнению с цирконом. Отдельные участки в ксенотиме-(Y) изменены, содержат меньше оксидов Y, P, REE, U, но обогащены Ca, Fe и Th, сумма анализа 75.92 мас. % (Попова и др., 2010). Допускаемая содержание H_2O около 22 мас. %, формула изменённого ксенотима-(Y) $(\text{Y}_{0.57}\text{Ca}_{0.15}\text{Fe}_{0.10}\text{Th}_{0.05}\text{Yb}_{0.04}\text{Dy}_{0.03}\text{Er}_{0.03}\text{Gd}_{0.02}\text{U}_{0.02})_{1.01}(\text{P}_{0.92}\text{Si}_{0.08})_{1.00}\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ при расчёте на O = 4 близка к формуле природного и синтетического «гидро-ксенотима» (Семёнов, 2001). Циркон (циртолит) из «орешков» содержит (мас. %): ZrO_2 57.18; HfO_2 6.53; UO_2 0.8; ThO_2 1.40; Y_2O_3 0.20; SiO_2 29.55; сумма 95.66; расчётная (на O = 4) формула $(\text{Zr}_{0.93}\text{Hf}_{0.06}\text{Th}_{0.01}\text{U}_{0.01})_{1.01}\text{Si}_{0.99}\text{O}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$. Внутри некоторых «орешков» есть буровато-белые порошковатые зёрна, ещё сохраняющие первичный брусковидный облик, со средним составом (мас. %): SiO_2 38.42; TiO_2 0.46; Al_2O_3 27.16; FeO 6.91; MnO 9.32; MgO 1.20; CaO 0.91; Ce_2O_3 0.35; сумма 84.73; расчёт на 11 катионов даёт формулу типа кордиерита $(\text{Mn}_{0.99}\text{Fe}_{0.73}\text{Mg}_{0.23}\text{Ca}_{0.12})_2(\text{Al}_{2.91}\text{Fe}_{0.09})_3(\text{Si}_{4.84}\text{Al}_{1.12}\text{Ti}_{0.04})_6\text{O}_{17.91}$, но изменённого и с необычно высоким содер-

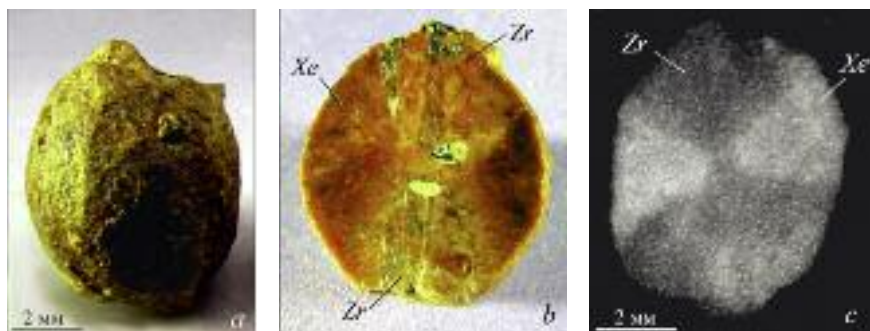


Рис. 8. Циркон-ксенотимовый сросток (а) и его сечение (б — косое освещение, с — автордиография).

жанием MnO (вероятно, это смесь вторичных минералов).

Микровключения уранинита величиной 1 – 10 мкм выявлены в участках почти неизменённого фергусонита-(Y) при микрозондовых исследованиях. В составе уранинита определены (мас.%): UO₂ 74.70; ThO₂ 18.62; PbO 2.27; сумма 95.59, что указывает на частичное окисление урана. Вростки торита в фергусоните-(Y) содержат небольшие примеси U, Pb, Fe и P (табл. 3, ан. 8). Часть зёрен торита существенно гидратирована (до торогуммита). Содержание оксидов Th, Si, U в них, как и сумма анализов (75 – 80 мас.%), ниже, чем в неизменных зёрнах, и отмечаются примеси FeO (до 2 – 4 мас.%) и CaO (1 – 2 мас.%).

В поликразе-(Y) из агрегата с фергусонитом-(Y) были встречены микрозёрна изотропного минерала, отличающегося высоким содержанием Ta₂O₅ (29.8 мас.%), отсутствием Y и по составу близкого к бетафиту с небольшим дефицитом катионов в позиции А (табл. 3, ан. 9), но редкие земли в нем не анализированы.

Обсуждение результатов и выводы

Изменения фергусонита-(Y) в пегматите жилы Береговой проявлены в его метамиктизации и гидратации и в развитии псевдоморфных агрегатов иттропирохлора-(Y) и фосфатов (броккита и чералита). Отчасти подобные изменения отмечались и ранее. Так, А.В. Волошин (1993) кратко обобщил имевшиеся на то время данные о фергусоните-(Y) из пегматитов Кольского полуострова: разными методами было выявлено, что при слабой начальной гидратации фергусонита-(Y) состав его мало меняется, а при более значительной гидратации уменьшается содержание в нём иттрия и редких земель при увеличении количества кальция. Это же проявлено и в фергусоните-(Y) жилы Береговой. В образцах с Кольского полуострова отмечалось замещение фергусонита-(Y) пирохлором (Лунц, 1972) и агрегатами плумбопирохлора с манганоколумбитом и ксенотимом (Волошин, 1993). В отличие от указанных образцов, в жиле Береговой ферроколумбит и ксенотим-(Y), как и другие акцессорные минералы – самарскит-(Y), поликраз-(Y), монацит-(Ce), циркон, торит, бетафит – сократились с фергусонитом-(Y), а не замещали его.

А.В. Волошин (1993) отмечал, что в участках изменения фергусонита-(Y) с Кольского полуострова увеличивается содержание Ti и Ca, что проявлено и в наших образцах из жилы Береговой.

Весьма интересно сообщение о замещении микрозёрен (до 0.1 мм) фергусонита-(Y) в альбититах месторождения Арыскан в Туве самарскитом-(Y), но с существенной примесью Si и Zr (Григорьев, Сергеева, 1993), вероятно, обусловленной микровключениями циркона и гадолинита, характерных для руд этого месторождения. Наша попытка «исключить» возможную долю циркона и гадолинита в анализе и последующий расчёт на (Nb,Ta,Ti) = 2 даёт формулу (Y_{0.32}REE_{0.19}Fe_{0.21}Ca_{0.17}Th_{0.05}U_{0.02}Pb_{0.02})_{0.98}(Nb_{1.68}Ti_{0.26}Ta_{0.06})₂O_{6.21}, близкую к формуле железистого иттропирохлора. Отмечавшиеся ранее разными исследователями продукты изменения фергусонита-(Y) (адельфолит, арренит, кохелит) представляют собой, очевидно, смесь минералов (Кривовичев, 2008). Упомянутый уранил-карбонат (рёзерфордит) как новообразование в фергусоните-(Y) (Гинзбург и др., 1960) в наших образцах пока не встречен. В целом можно заключить, что, кроме гидратации, развитие вторичных минералов группы пирохлора и фосфатов редких земель довольно типично для фергусонита-(Y).

Авторы благодарны сотрудникам Института минералогии УрО РАН Т.М. Рябухиной и Е.Д. Зенович за съёмку рентгенограмм и В.А. Котлярову – за анализ энерго-дисперсионных спектров минеральных включений в ряде образцов фергусонита-(Y).

Работа выполнена по интеграционному проекту Уральского отделения РАН № 12-И-5-2068.

Литература

- Волошин А.В. Танталониобаты. Систематика, кристаллохимия и эволюция минералообразования в гранитных пегматитах. СПб.: Наука. **1993**. 298 с.
- Гинзбург А.И., Горжевская С.А., Ерофеева Е.А., Сидоренко Г.А. О химическом составе тетрагональных титано-тантало-ниобатов // Геохимия. **1960**. № 1. С. 11 – 30.
- Григорьев А.В., Сергеева В.В. О замещении самарскитом фергусонита в альбититах редкометального месторождения Арыскан // Зап. ВМО. **1993**. № 5. С. 36 – 39.
- Минералы: Справочник. Т. 2. Вып. 3. М.: Наука, **1967**. 675 с.
- Лунц А.Я. Минералогия, геохимия и генезис редкоземельных пегматитов Северо-Запада СССР. М.: Наука. **1972**. 176 с.
- Кривовичев В.Г. Минералогический словарь. СПб: Изд-во С.-Петербур. ун-та. **2008**. 554 с.
- Морозова А.В. Геохимия гранитов Среднего и Южного Урала, продуктивных на W-Мо и

- Be-W-Mo-оруденение // Литосфера. **2006**. № 3. С. 171 – 177.
- Попова В.И., Губин В.А., Попов В.А., Баженова Л.Ф.* К характеристике некоторых акцессорных минералов пегматитов Зенковского и Адуйского гранитных массивов // Материалы к минералогии рудных районов Урала. Свердловск: УрО АН СССР. **1988**. С. 67 – 73.
- Попова В.И., Губин В.А.* Минералогия гранитных керамических пегматитов Адуйского, Соколовского и Зенковского массивов на Среднем Урале // Уральский минералогический сборник № 15. Миасс-Екатеринбург: УрО РАН. **2008**. С. 61 – 74.
- Попова В.И.* Радиационно-эпигенетические изменения поликразы в гранитных пегматитах Адуйского и Зенковского массивов на Среднем Урале // Литосфера. **2009**. № 6. С. 90 – 94.
- Попова В.И., Губин В.А.* Ксенотим-(Y) из керамических пегматитов Адуйского массива // Уральский минералогический сборник № 17. Миасс-Екатеринбург: УрО РАН. **2010**. С. 125 – 130.
- Семёнов Е.И.* Оруденение и минерализация редких земель, тория и урана (лантанидов и актинидов). М.: Геос. **2001**. 307 с.
- Чащухина В.А.* Акцессорные минералы гранитоидов Мурзинско-Адуйского плутона // Вопросы петрологии и геохимии гранитоидов Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР. **1975**. С. 51 – 58.
- Черник Г.П.* Химический состав уральской разновидности фергусонита // Изв. АН СССР. **1921**. № 15. С. 419 – 424.