

РЕДКОЗЕМЕЛЬНО-РЕДКОМЕТАЛЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ПОЗДНИХ ГРАНИТАХ СЫРОСТАНСКОГО МАССИВА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2015 г. Е. П. Макагонов, В. А. Муфтахов

*Институт минералогии УрО РАН
456317, Челябинская область, г. Миасс
E-mails: mak@mineralogy.ru
mv@mineralogy.ru*

Поступила в редакцию 11.04.2014 г.

В статье приведен полный список минералов Сыростанского массива, насчитывающий 47 минеральных видов. Показано, что редкометалльная и редкоземельная минерализация приурочена к породам поздней жильной фации – гранитным дайкам и пегматитам. Представлено распределение минералов в пегматите. Охарактеризованы морфология и состав новых минералов для массива – фергусонита-(Y), эвксенита-(Y), поликраза-(Y), бреггерита, торогуммита, а также самарскита-(Y), колумбита-(Mn), ильменита, ильменорутила, циркона, цитролита, алланита-(Ce) и др. Ранее было установлено, что в породах основных фаз массива наибольший вклад в баланс РЗЭ вносят алланит и титанит. Проведенные исследования позволяют выделить новую специализацию для массива – Nb-Ta-Ti-Y-РЗЭ-Zr-Th-U, связанную с редкоземельно-редкометалльной ассоциацией минералов жильных гранитов и пегматитов.

Ключевые слова: *Сыростанский массив, редкоземельно-редкометалльная минерализация.*

ВВЕДЕНИЕ

За длительный период изучения Сыростанского массива были рассмотрены вопросы формирования главных магматических фаз, геохимия пород, состав породообразующих и акцессорных минералов (Овчинников и др., 1973; Попов и др., 2001; Тихомирова, 1971; Ферштатер, 2013; Ферштатер и др., 2000; Шагалов, 2002). Вместе с тем практически не отражены вопросы становления и состава заключительных фаз формирования массива, связанных с позднеколлизией стадией. К ним относятся дайки гранитов, лейкогранитов, аплитов и пегматитов с редкометалльной и редкоземельной минерализацией.

Сыростанский гранитный массив вместе с Тургорским и Атянским массивами занимают особое положение в структуре Урала. Они находятся на границе рифейского Центрально-Уральского поднятия и палеозойской Магнитогорской мегазоны. По данным изотопных исследований, становление этих массивов произошло в ранне-среднекаменноугольном периоде, совпадающем по времени с окончанием сдвигов по границе мегазон (Монтеро и др., 1998; Ферштатер, 2013). Возраст цирконов из габброидов и ассоциирующих с ними гранодиоритов, определенный радиоизотопным Pb-Pb методом, составил 334 ± 5 млн лет, прорывающих их гранитов – 327 ± 4 млн лет (Монте-

ро и др., 1998). Ядра некоторых цирконов из массивных гранитов имеют протерозойский возраст – 1816 ± 27 млн лет (предполагается участие в магмогенерации вещества древней континентальной коры). Ar-Ar возраст по биотиту из гранитоидов Сыростанского массива оценивается в 304 ± 6 млн лет (Иванов, 1998).

Для наиболее поздних жильных тел рядом расположенного Тургорского массива (микроклин-альбитовые породы и пегматиты) Л.Н. Овчинниковым с коллегами (1973) приведены следующие значения радиологического возраста: 298 ± 20 (мусковит и микроклин из микроклин-альбитовых пород), 295 ± 13 (мусковит и микроклин из пегматитов).

Представления о механизме формирования массива изменялись. По ранней версии, массив сформировался в три этапа: метасоматоз магматической стадии (фации экзоконтактов); расплавление и интрузивное внедрение гранитной магмы и жильных дериватов (биотитовые плагиограниты и граниты, жильные граниты, пегматиты); постмагматическое замещение с микроклинизацией, альбитизацией, грейзенизацией (Овчинников и др., 1973; Тихомирова, 1971). Е.Н. Граменецкий (1990) предполагает магматическое замещение. Г.Б. Ферштатер и его соавторы (2000, 2007) выделяют группы: субавтохтонную анатектическую с породами гнейсовидной текстуры и интрузивную. В группах одинаковый набор пород: габбро, гранодиорит, гранит,

аплит и пегматит. По представлениям В.С. Попова с коллегами (2011), массив сформировался в результате многократного активного внедрения магматических расплавов в краевую часть Центрально-Уральского поднятия.

Предыдущими исследованиями было установлено, что в гранитоидных породах главными носителями редкоземельных элементов являются алланит и титанит (Попов и др., 2001). Несмотря на многолетнюю историю изучения, за рамками всех перечисленных работ оказались редкоземельно-редкометалльные пегматиты Сыростанского массива, залегающие субмеридионально и секущие все предшествующие магматические образования. Характерной особенностью редкоземельно-редкометалльной минерализации поздних жильных тел является специализация на ниобий, тантал, иттрий, титан, редкие земли, цирконий.

Тантало-ниобиевые минералы в Сыростанском массиве открыты в 1964 г. В 1964–1967 гг. на его площади проведены поисково-разведочные работы отрядом Челябинской геолого-съемочной экспедиции под руководством Н.Г. Климова, во время которых была произведена оценка редкометалльных руд одной из пегматитовых жил урочища Темное Царство¹. В это же время в Уралмеханобре были проведены первичные исследования минерального состава руды на материале технологической пробы, отобранной из отвалов карьера. В дальнейшем редкометалльные минералы не изучались. В настоящее время нами получены новые данные по составу, распределению и взаимоотношению редкометалльных и редкоземельных минералов. Исследование проведено на образцах, собранных авторами, а также предоставленных В.А. Губиным, В.А. Поповым и В.И. Поповой.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение состава минералов проведено в Южно-Уральском центре коллективного пользования по исследованию минерального сырья при Институте минералогии УрО РАН на микрозонде JEOL-733 (аналитики В.А. Муфтахов, Е.И. Чурин), электронных микроскопах TESCAN VEGA3 и РЭММА-202М (аналитики В.А. Котляров, Ю.Д. Крайнев). Рентгеновские спектры получены на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 (аналитики Т.М. Рябухина, П.В. Хворов). Термический анализ проводился на дериватографе Q-1500D при прокаливании от 22 до 980°C (аналитик П.В. Хворов). Рентгеновско-флюоресцентный анализ выполнялся на анализаторе

ре Bruker M1 Mistral в Ильменском государственном заповеднике УрО РАН (ИГЗ УрО РАН) (аналитик М.А. Рассомахин). Часть образцов исследована в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана (г. Москва) на микрозонде JXA-733 JEOL (аналитик В.А. Муфтахов). Гониометрия кристаллов проведена с использованием Федоровского столика СФ-4 Е.П. Макагоновым.

СТРОЕНИЕ СЫРОСТАНСКОГО МАССИВА

Сыростанский массив площадью ~70 км² имеет овальную форму, вытянутую в северо-западном направлении (размеры длинной и короткой осей 12.5 и 6.7 км соответственно), залегает в слюдяно-гранатовых, слюдяно-ставролитовых сланцах, кварцитах и мраморах уйташской и уреньгинской свит рифейского возраста (рис. 1). В северо-восточной части от середины массива к его краю проходит прогиб кровли в направлении 150°, отделяющий северо-восточный блок.

По геофизическим данным предполагается лакколитообразная форма массива. На поверхности его строение концентрически-зональное. По периферии (с юго-западной, северо-западной и северной сторон) развиты габброиды, монцониты, монцодиориты, гранодиориты, кварцевые диориты, диориты. Ширина этой краевой зоны от 50 м до 1.75 км. Ближе к центру с южной стороны располагается зона мелкозернистых биотитовых гранитов и плагиогранитов шириной до 2.5 км. Эта зона продолжается с восточной стороны, дугообразно огибая центральную часть массива.

Внутренние части массива сложены розовыми среднезернистыми и порфиоровидными биотитовыми гранитами. Концентрическое строение центральной части подчеркивается дугообразными зонами шириной до 300–600 м, насыщенными дайками и жилами мелкозернистых биотитовых гранитов, плагиогранитов, гранодиоритов. Кроме того, выделяется серия гранитоидных жил и пегматитов с простиранием 15–20°, расположенная с западной стороны прогиба кровли и косо пересекающая массив. Часть этих тел выходит за пределы массива во вмещающие породы. С этой серией в основном и связана редкометалльная минерализация.

Поздние жилы гранитов, гранит-порфиров, плагиогранит-порфиров образуют сеть параллельных и кулисообразных систем северо-западного и северо-восточного простирания, косо секущих тела пород предшествующих фаз.

Помимо интрузивных образований на описываемой площади широко распространены кварцевые жилы, часть из которых содержит флюорит, берилл, молибденит, золото. Наибольшее количество жил отмечается в северо-западной и северной частях массива. Постмагматические преобразования

¹ Климов Н.Г., Черданцев В.В. и др. (1968) Отчет о геолого-разведочных работах по редким металлам, проведенных в 1966–1967 гг. в Центральной части Сыростанского гранитного массива в районе г. Миасс Челябинской области. Челябинск: ТГФ, 134 с.

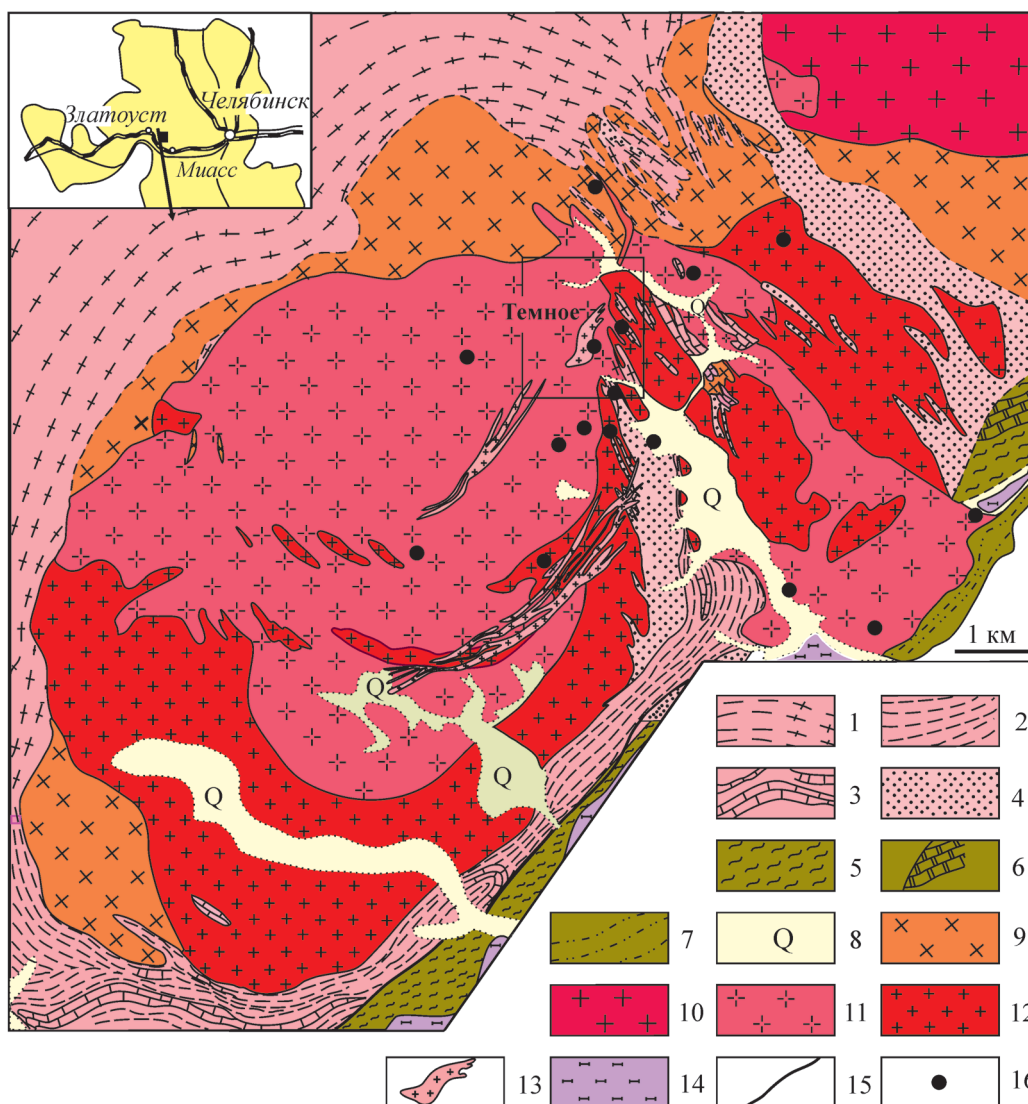


Рис. 1. Геологическое строение Сыростанского гранитного массива (по Н.Г. Климову и др.¹).

1–3 – средний рифей уренгинская свита (R_{2ur_2}): 1 – гнейсы, 2 – слюдяно-кварцевые сланцы, 3 – мраморизованные известняки; 4 – верхний рифей уйташская свита (R_{3ut}), кварциты; 5–7 – нижний палеозой куштымгинская свита (Pz_{1kh}): 5 – глинистые сланцы, 6 – мраморы, 7 – углистые сланцы; 8 – четвертичные отложения, Q; 9 – гранодиориты, кварцевые диориты, диориты; 10 – среднезернистые порфировидные биотитовые граниты; 11 – розовые среднезернистые порфировидные биотитовые граниты; 12 – жильные граниты, плагิโอграниты; 13 – пегматиты; 14 – серпентиниты; 15 – линии разрывных нарушений; 16 – проявления ниобия.

Fig. 1. Geological structure of Syrostan granite massif by (Н.Г. Климов и др.¹):

1–3 – Middle Riphean Urenginskaya suite (R_{2ur_2}): 1 – gneiss, 2 – mica-quartz schist, 3 – marbled limestone; 4 – Upper Riphean Uytashskaya suite (R_{3ut}), quartzites; 5–7 – Lower Paleozoic Kushtumginskaya suite (Pz_{1kh}): 5 – shales, 6 – marble, 7 – carbonaceous shale; 8 – Quaternary sediments, Q; 9 – granodiorite, quartz diorite, diorite; 10 – porphyric biotite granites medium-grained; 11 – pink porphyric biotite granites medium-grained; 12 – veined granite, plagiogranites; 13 – pegmatites; 14 – serpentinites; 15 – tectonic faults; 16 – occurrence of niobium.

незначительны и представлены грейзенизацией, серицитизацией и альбитизацией.

Характерным примером строения редкометалльных жильных тел может служить дайка гранитов в северной части массива, в урочище Темное Царство, содержащая наибольшее количество тантало-ниобатов. Дайка субмеридионального про-

стирания длиной 700 м, мощностью 130 м падает на восток под углами 38–40°. В ней выделяются мелкозернистые и среднезернистые лейкократовые граниты (рис. 2а).

В дайке залегает пегматитовая жила, вскрытая старым карьером, разрабатываемым на кварц. Жила линзообразной формы длиной 260 м. Наиболь-

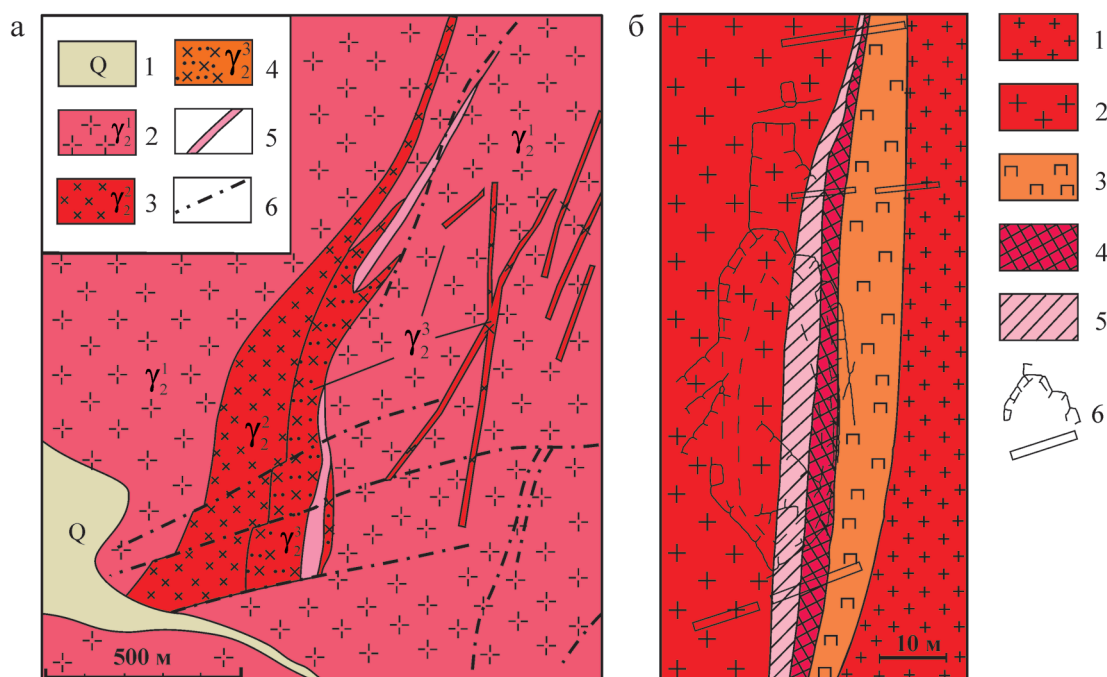


Рис. 2. Геологическое строение участка “Темное царство”, по Н.Г. Климову и др.¹ (а), и строение пегматитовой жилы месторождения Темное царство (б).

а. 1 – современные аллювиальные отложения, 2 – розовые среднезернистые порфировидные биотитовые граниты (γ_1^1), 3 – мелкозернистые гранодиориты, кварцевые диориты, диориты (γ_2^2), 4 – среднезернистые гранодиориты и плагииграниты (γ_2^3), 5 – пегматитовые жилы, 6 – тектонические нарушения.

б. 1 – граниты мелкозернистые, 2 – граниты среднезернистые, 3 – пегматит графический, 4 – блоковая зона кварц-полевошпатового состава, 5 – кварц, 6 – контуры карьера и канавы.

Fig. 2 The geological structure of the site “Dark Kingdom” by (Н.Г. Климов и др.¹) (а) and the structure of pegmatite of deposits Dark Kingdom (b).

а. 1 – modern alluvial sediments, 2 – pink porphyritic biotite granites medium-grained (γ_1^1), 3 – fine-grained granodiorite, quartz diorite, diorite (γ_2^2), 4 – medium-grained granodiorite and plagiogranites (γ_2^3), 5 – pegmatites, 6 – tectonic faults.

б. 1 – granites fine-grained, 2 – granites medium-grained, 3 – graphic pegmatite, 4 – bloc zone with quartz and feldspar, 5 – quartz, 6 – the outline of pit and ditch.

шая мощность в середине жилы 15 м. Простираение субмеридиональное, падение на восток под углами 40–45°. По падению жила прослежена скважинами почти на 100 м (70 м по глубине). Пегматит разбит поперечными взбросами с простиранием 54–64°, падением на северо-запад под углами 69–75°, смещение по взбросам до 3 м. Южная часть жилы срезается сбросом со смещением на 100 м.

Строение пегматитовой жилы грубозональное: со стороны висячего контакта мелкозернистые граниты при приближении к пегматитовой жиле переходят в среднезернистые. Эндоконтактовая зона сложена крупнозернистыми гранитами графической структуры. Мощность зоны до 8 м. Далее следует блоковая зона кварц-полевошпатового состава мощностью 3 м. Ниже – 4-метровая зона монолитного кварца. Со стороны лежащего бока у пегматита наблюдается оторочка тонкозернистого белого альбита толщиной 20 см. В экзоконтакте лежащего бока пегматита за-

легают среднезернистые лейкократовые граниты (рис. 2б).

Блоковая зона состоит из угловатых пластин и крупноглыбовых обломков полевого шпата, сцементированных кварцем. Простираение границ блоков 0–60°, падение на восток–юго-восток 30–80°. Полевой шпат рассечен системами субпараллельных сколовых трещин и трещин отрыва, выполненных гранатом, биотитом, магнетитом, танталониобатами и другими минералами. Выделяются системы северо-восточного простирания (параллельные взбросам) и субмеридиональные.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ МАССИВА

Сыростанский массив относится к монцодиорит-гранитной формации. Среди массивов этой формации он выделяется повышенным содержанием стронция (Ферштатер и др., 2000). В табл. 1 приведены средние содержания редких и редкоземель-

Таблица 1. Содержание редких и редкоземельных элементов в породах Сыростанского массива (г/т)**Table 1.** The content of rare and rare-earth elements in rocks of Syrostan massif (ppm)

Компонент	1	2	3	4	5	6	7
Sr	1419.7	1545.0	1105.8	897.0	925.6	661.7	764.0
Be	1.9	1.3	1.8	1.0	2.4	2.1	2.7
Zr	166.6	146.8	178.3	107.2	166.8	147.0	145.0
Hf	4.6	4.6	4.7	2.7	4.9	4.4	3.4
Nb	17.7	13.3	16.7	7.6	12.9	13.7	4.6
Ta	1.1	0.9	1.3	0.5	1.1	1.1	0.2
Y	22.7	20.2	16.7	15.3	9.3	10.6	5.4
La	46.0	42.2	34.5	31.9	45.9	31.1	45.4
Ce	96.7	86.9	83.9	67.6	80.0	69.6	78.1
Pr	11.7	10.6	8.7	8.4	7.9	6.1	7.4
Nd	44.7	40.7	32.5	32.9	25.5	20.5	22.8
Sm	7.3	6.7	5.7	5.3	3.5	3.4	2.7
Eu	2.2	1.9	1.5	1.7	0.8	0.6	0.9
Gd	5.6	5.0	4.4	3.9	2.5	2.6	1.7
Tb	0.8	0.7	0.6	0.6	0.3	0.4	0.2
Dy	4.3	3.9	3.3	3.1	1.4	2.1	1.1
Ho	0.9	0.8	0.6	0.6	0.4	0.4	0.2
Er	2.2	2.0	1.6	1.5	0.9	1.1	0.6
Tm	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1
Yb	2.0	1.8	1.4	1.3	0.9	1.0	0.6
Lu	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1
LRE	208.7	189.1	166.8	147.7	163.5	131.2	157.2
TRE	16.4	14.7	12.4	11.3	6.8	7.9	4.5
LRE/TRE	12.7	12.8	13.5	13.0	24.1	16.6	34.9
Количество проб	7	5	5	1	5	11	1

Примечание. 1 – габбро мелкозернистое; 2 – габбро среднезернистое; 3 – диорит; 4 – горнблендит; 5–6 – гранитоиды: 5 – анатектические, 6 – интрузивные; 7 – адамеллит-порфир (Ферштатер и др., 2000).

Note. 1 – gabbro fine-grained; 2 – gabbro middle-grained; 3 – diorite; 4 – hornblendite; 5–6 – granitoids: 5 – anatectic, 6 – intrusive; 7 – adamellite-porphyr (Ферштатер и др., 2000).

ных элементов в породах основных магматических фаз Сыростанского массива, вычисленные по данным опубликованным в (Ферштатер и др., 2000; Ферштатер, 2013). Наименьшее количество Zr, Hf, Be содержится в горнблендитах. Содержание Zr и Hf повышается в диоритах и анатектических гранитах, а затем уменьшается при переходе к интрузивным гранитоидам. Содержание Be возрастает к концу формирования массива. Для остальных элементов, приведенных в табл. 1, наблюдается общая тенденция: снижение содержаний по мере формирования главных магматических фаз массива. Г.Б. Ферштатер с коллегами (2000) отмечают четкие аномалии Nb и Ti в породах основного и среднего состава, низкие содержания РЗЭ, в особенности тяжелых, и четкую отрицательную Eu аномалию. В поздних дифференциатах – гранитных аплитах – наименьшие концентрации РЗЭ и положительная Eu аномалия.

Металлометрические аномалии ниобия расположены в верхней северо-восточной половине массива: от верховьев р. Поперечная до верховьев рек Бобровка и Куштумга. Наибольшее количество аномалий выявлено в верховьях р. Малый Сыро-

стан в урочище Темное Царство (см. рис. 1). Обогащены висячие бока крупных гранитных даек. Максимальные концентрации приурочены к гранитным пегматитам.

В настоящее время в Сыростанском массиве обнаружены следующие минералы: микроклин, ортоклаз, альбит, плагиоклазы, кварц, ферримагнезиальная роговая обманка*, магнезиальная роговая обманка*, эденит, биотит, мусковит, хлорит, каолинит, эпидот, алланит-(Ce), цоизит, циркон (циртолит), титанит, спессартин, шерл (турмалин), берилл, торогуммит**, магнетит, гематит, ильменит, ильменорутит, фергусонит-(Y), поликраз-(Y)***, эвксенит-(Y)***, самарскит-(Y), рутил, колумбит-(Mn), колумбит-(Fe), уранинит**, касситерит, гидрогетит, фторапатит, монацит, ярозит**, кальцит, сидерит, золото, молибденит, пирит, пирротин, халькопирит, марказит, галенит, флюорит. Звездочкой отмечены минеральные виды, рассчитанные по данным в (Ферштатер и др., 2000), двумя звездочками – минералы установленные авторами.

В диоритах и гранодиоритах обычен акцессорный циркон, титанит. В гранитах отмечают следующие акцессорные минералы: циркон,

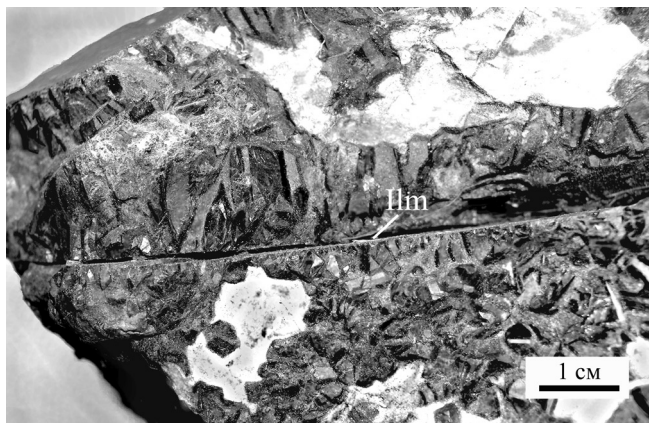


Рис. 3. Щетки спессартина на пластине ильменита.

Fig. 3. Spessartine druse on the plate of ilmenite.

фергусонит-(Y), колумбит-(Mn), ильменит, рутил, ильменорутит, самарскит, пирохлор, монацит. В грейзенизированных гранитах добавляются лейкоксен, золото, берилл. Редкие выделения берилла обнаружены в кварцевых жилах и пегматитах, залегающих в грейзенизированных гранитах.

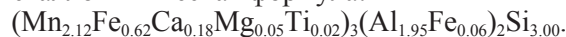
В породах главных фаз массива из минералов, содержащих редкие и редкоземельные элементы, распространен аксессуарный алланит-(Ce). Характеристика аксессуарных минералов из главных магматических фаз приводится в работах (Ферштатер и др., 2000; Ферштатер, 2013).

Основная редкометалльная минерализация приурочена к жильным гранитам и пегматитам. Количество Ta и Nb в гранитах достигает самых высоких пределов среди подобных массивов Урала (14 г/т Ta и 80 г/т Nb) при минимальных содержаниях Ce и La – 12 г/т (Золосев и др., 2004). Незначительно возрастает и содержание Be: в гранодиоритах – 2.9, в гранитах – 3.3 г/т.

В биотитовых гранитах дайки Темное Царство отмечается редкая вкрапленность ниобатов. В лейкократовых жильных гранитах распределение тантало-ниобатов неравномерное, гнездообразное, содержание до 265 г/т.

Химический состав среднезернистого гранита дайки Темное царство (мас. %): SiO_2 – 75.10, TiO_2 – 0.01, Al_2O_3 – 14.11, Fe_2O_3 – 0.13, FeO – 0.75, MnO – 0.02, MgO – 0.18, CaO – 0.93, Na_2O – 4.20, K_2O – 4.84, п.п.п. – 0.62. Сумма – 100.89 (Климов и др.¹). Средний химический состав блоковой части кварц-полевошпатового пегматита: SiO_2 – 65.00, TiO_2 – 0.14, Al_2O_3 – 17.50, Fe_2O_3 – 2.66, FeO – 1.34, MnO – 2.35, MgO – 1.45, CaO – 0.58, Na_2O – 7.00, K_2O – 0.96, P_2O_5 – 0.02, п.п.п. – 1.15. Сумма – 100.15 (Климов и др.¹). Содержание породообразующих минералов (об. %): альбит – 60, плагиоклазы – 9, микроклин – 6, кварц – 12, биотит – 2, спессартин – 7, мусковит – 0.8.

Химический состав спессартина (мас. %): SiO_2 – 37.08, TiO_2 – 0.35, Al_2O_3 – 19.57, Fe_2O_3 – 4.04, FeO – 6.04, MnO – 29.66, MgO – 0.38, CaO – 2.04, Na_2O – 0.31, K_2O – 0.20, H_2O^- – 0.09, P_2O_5 – 0.10, п.п.п. – 0.12. Сумма – 99.89 (аналитик М.Н. Маляренко); кристаллохимическая формула:



Наибольшие содержания ниобатов приурочены к блоковой кварц-полевошпатовой зоне – от 20 до 1200 г/т. Онтогеническими наблюдениями в этой зоне устанавливается неоднократное приоткрывание трещин. Часто первичные тонкие трещины выполнялись биотитом, ильменитом, гематитом и магнетитом. При следующем приоткрывании трещин на пластинки этих минералов и на поверхности полевого шпата нарастали друзовые агрегаты буровато-красного спессартина совместно с выделениями циртолита, тантало-ниобатов, мусковита, магнетита. В основании таких агрегатов четко прослеживаются зоны геометрического отбора (рис. 3).

В дальнейшем происходила цементация ранних минеральных ассоциаций полевыми шпатами и кварцем с выделениями тех же минералов, а также рутила, алланита, магнетита. В поздние стадии остаточные пустотки выполнялись кристаллами и агрегатами пирита. В зоне выветривания сульфиды выщелочены и породы имеют ноздреватый облик и желто-коричневый цвет.

Основной редкометалльный минерал в пегматите – фергусонит-(Y). Он встречается в ассоциации с полевыми шпатами, кварцем, спессартином, поликразом-(Y), эвксенитом-(Y), самарскитом-(Y) и циртолитом. Иногда образует мелкие друзы. Диагностируется по характерной форме тетрагональных кристаллов с гранями форм: дипирамид $z \{152\}$, $s \{011\}$ и базопинакоида $c \{001\}$ (рис. 4а). Величина зерен и кристаллов по оси L_4 – 0.1–5.0 мм. Цвет фергусонита-(Y) от буровато-желтого до темно-бурого и красновато-черного. Кристаллы просвечивают в тонких сколах бурым цветом. Блеск на гранях кристаллов матовый, в изломе сильный смолистый до алмазного. Излом неровный, полураковистый. Поверхность зерен покрыта коричневатыми и белесыми продуктами изменения. В пегматитах среднее содержание фергусонита – 0.10–0.12 об. %.

Фергусонит метамиктный. После прокаливании при 800°C на рентгенограмме проявлены отражения (d, I): 3.23 (5), 2.95 (10), 2.52 (3), 1.89 (10), 1.56 (1).

Внутреннее строение кристаллов неоднородное – в отраженных электронах проявляется петельчатая или брекчиевидная текстура с сетчатым распределением гидратированных участков (рис. 5). Химический состав наименее измененного фергусонита (анализы 1–3) и гидратированного (анализы 4–6) приведен в табл. 2. По данным тер-

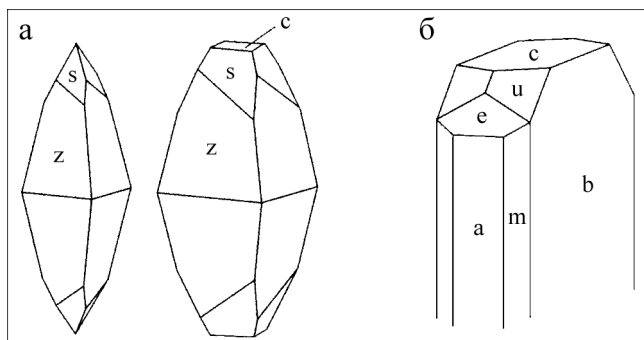


Рис. 4. Кристаллы фергусонита-(Y) и колумбита-(Mn) из пегматитовой жилы “Темное царство”.

а – фергусонит-(Y) с гранями форм $z \{152\}$, $s \{011\}$ и базопинакоида $c \{001\}$; б – колумбит-(Mn) с гранями форм: а $\{100\}$, б $\{010\}$, с $\{001\}$, е $\{201\}$, м $\{110\}$, u $\{111\}$.

Fig. 4. The shape of the crystals of fergusonite-(Y) (a) and columbite-(Mn) (b) of pegmatite veins “Dark Kingdom”.

а – idealized form of crystals with facets forms of dipyramid $z \{152\}$, $s \{011\}$ and pinacoid $c \{001\}$; б – columbite-(Mn) forms: а $\{100\}$, б $\{010\}$, с $\{001\}$, е $\{201\}$, м $\{110\}$, u $\{111\}$.

мического анализа суммарной пробы, потеря массы составила 4.2 мас. % (содержание воды).

Кристаллохимические формулы при расчете позиции $B = 1$ (номера формул соответствуют номерам анализов табл. 2):

1) $(Y_{0.65}U_{0.06}Dy_{0.05}Ca_{0.05}Th_{0.04}Gd_{0.03}Yb_{0.03}Er_{0.02}Sm_{0.02}Nd_{0.02}Ho_{0.01})_{0.99}(Nb_{0.93}Ti_{0.05}Ta_{0.02}W_{0.02})_{1.01}O_{4.07}$, примеси Ce, Mn, Pb, Fe;

2) $Y_{0.58}U_{0.09}Th_{0.06}Dy_{0.05}Ca_{0.04}Yb_{0.04}Gd_{0.03}Nd_{0.02}Er_{0.02}Sm_{0.02}Zr_{0.01}Mn_{0.01}Ce_{0.01}Ho_{0.01})_{0.99}(Nb_{0.89}Ti_{0.07}Ta_{0.02}W_{0.02})_{1.01}O_{4.03}$, примеси La, Pb;

3) $(Y_{0.67}Ca_{0.05}Dy_{0.04}U_{0.04}Th_{0.04}Gd_{0.03}Eu_{0.03}Yb_{0.03}Sm_{0.02}Nd_{0.02}Zr_{0.01})_{0.97}(Nb_{0.95}Ti_{0.03}Ta_{0.02}W_{0.02})_{1.03}O_{4.04}$, примеси Ce;

4) $(Y_{0.66}Dy_{0.054}U_{0.07}Th_{0.03}Ca_{0.03}Er_{0.03}Gd_{0.03}Yb_{0.03}Zr_{0.02}Sm_{0.02}Nd_{0.01}Tb_{0.01}Ho_{0.01})_{0.97}(Nb_{0.89}Ti_{0.06}U_{0.03}Ta_{0.01}W_{0.04})_{1.03}O_{4.05}(OH)_2$.

Количество редкоземельных элементов в формулах составляет 17–19 % от суммы катионов. Преобладают средние и тяжелые элементы. Часть кристаллов фергусонита частично или полностью замещена поликраз-эвксенитом.

Эвксенит-(Y) и поликраз-(Y) по рекомендации Международной минералогической ассоциации разделяются по преобладанию ниобия или титана в формульной позиции B . В исследованных минералах отношение Nb к Ti находится в пределах 0.69–1.19, при этом 25% химических анализов формально относятся к фергусониту. Обе разновидности отмечаются в пределах одних и тех же зерен. Поликраз-(Y), по-видимому, является гидратированной разностью эвксенита-(Y), из которой часть Nb была выщелочена, так он отличается большой

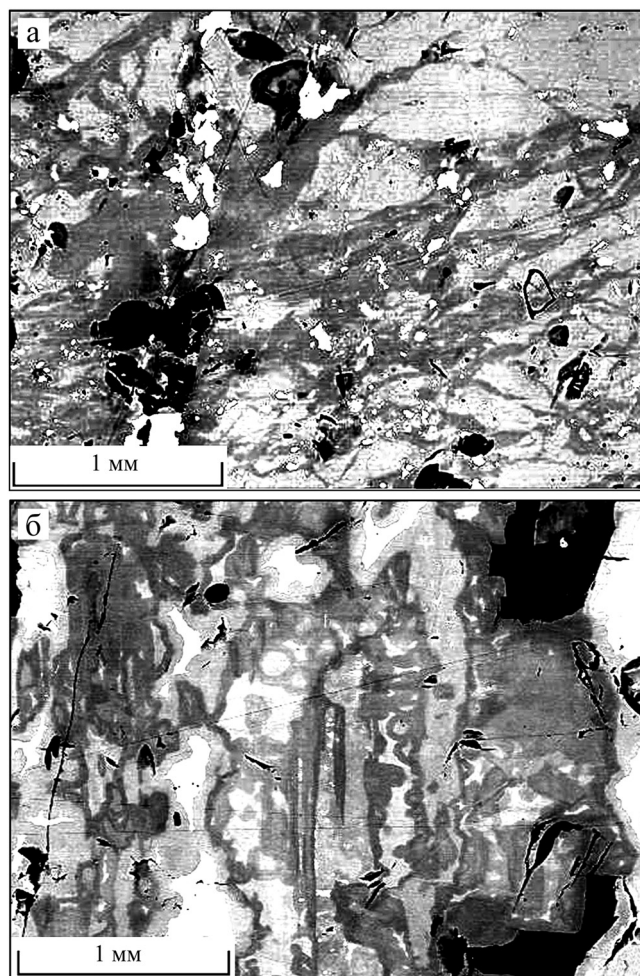


Рис. 5. Внутреннее строение индивидов фергусонита-(Y).

а – брекчиевидное; б – колломорфное (изображение в обратнорассеянных электронах).

Fig. 5. Internal structure of crystals fergusonite.

а – brecciated; б – colloform (BSE image).

степенью гидратации, а в продуктах разрушения отмечаются повышенные содержания Nb_2O_5 .

Эвксенит-поликразы образуют сферолитовые и розетковидные агрегаты до 8 мм, отдельные расщепленные кристаллы и сростки с фергусонитом-(Y). В центральных частях сферолиты черные со смолистым блеском, местами просвечивают темно-красным цветом. Минералы метамиктные, в отраженных электронах выявляется зональная колломорфная текстура.

На кристаллах эвксенит-поликразов-(Y) наиболее развиты грани форм $\{010\}$ и $\{201\}$, менее развиты $\{101\}$, $\{110\}$, $\{102\}$. Химические составы приведены в табл. 2.

Кристаллохимические формулы при расчете позиции $B = 2$ следующие (номера формул соответствуют номерам анализов табл. 2):

Таблица 2. Химические составы фергусонита-(Y) (1–6), эвксенита-(Y) (7–8) и поликраз-а-(Y) (9–11) (мас. %)**Table 2.** Chemical compositions of fergusonite-(Y), euxenite-(Y), polycrase-(Y) (wt %)

Компонент	1	2	3*	4	5	6	7	8	9**	10	11
Nb ₂ O ₅	44.87	42.66	47.27	40.80	41.23	44.82	36.85	37.10	28.05	26.59	26.35
Ta ₂ O ₅	1.84	1.13	1.44	1.13	1.48	0.74	1.52	1.79	2.98	1.56	1.16
TiO ₂	1.46	1.99	0.86	1.54	1.56	1.14	18.85	18.68	19.79	19.26	18.10
Y ₂ O ₃	26.93	23.47	28.01	25.46	24.99	21.11	15.35	15.24	15.00	14.70	15.41
La ₂ O ₃	H/o	0.21	H/o	H/o	0.68	0.12	H/o	H/o	H/o	H/o	0.43
Ce ₂ O ₃	0.24	0.40	—	—	0.59	0.24	—	—	—	—	0.63
Nd ₂ O ₃	1.08	1.33	1.25	0.58	1.03	0.60	0.64	0.83	0.41	0.72	0.27
Sm ₂ O ₃	1.12	1.26	1.41	1.04	1.35	1.04	1.06	0.59	0.81	0.79	0.44
Gd ₂ O ₃	2.25	1.93	2.17	1.83	1.54	1.74	1.12	1.55	1.69	0.87	1.04
Tb ₂ O ₃	H/o	H/o	H/o	0.44	H/o	H/o	0.63	0.41	H/o	H/o	H/o
Dy ₂ O ₃	3.24	3.28	2.99	3.20	2.52	3.13	2.18	2.24	1.76	1.90	1.93
Ho ₂ O ₃	0.82	0.40	H/o	0.45	0.45	0.50	H/o	H/o	H/o	0.66	H/o
Er ₂ O ₃	1.64	1.40	—	1.96	1.60	1.41	1.08	1.66	1.19	0.87	0.75
Yb ₂ O ₃	2.35	2.48	2.10	1.83	1.49	2.08	1.30	1.20	1.50	0.94	1.01
FeO	0.06	H/o	H/o	H/o	H/o	1.00	1.10	1.09	0.93	1.17	1.45
MnO	0.07	0.32	—	—	—	0.76	1.03	0.83	0.44	0.73	0.89
CaO	0.98	0.81	0.95	0.57	0.83	0.74	2.80	2.40	2.82	2.68	2.35
ZrO ₂	H/o	0.60	0.46	0.75	H/o	0.09	0.71	0.69	H/o	0.24	H/o
ThO ₂	3.51	5.87	4.07	2.93	3.50	2.60	2.73	3.03	4.25	2.88	3.23
UO ₂	5.80	8.75	3.72	6.34	6.89	5.59	7.54	7.57	7.77	8.59	9.47
PbO	0.27	0.33	H/o	H/o	0.59	0.51	0.97	0.76	H/o	0.48	0.56
WO ₃	1.49	1.38	1.38	2.83	1.74	1.24	1.74	1.44	0.33	1.10	0.84
Сумма	100.02	100.00	100.19	93.68	94.06	91.20	99.20	99.10	90.37	86.73	86.31

Примечание. *Eu₂O₃ = 2.11 мас. %; **SnO₂ = 0.29, MgO = 0.13, SiO₂ = 0.66 мас. %; н/о – не обнаружено; JXA-733, аналитик В.А. Муфтахов.

Note. *The content of Eu₂O₃ = 2.11 wt. %; **SnO₂ = 0.29, MgO = 0.13, SiO₂ = 0.66 wt %; н/о – not found; JXA-733, analyst V.A. Muf-takhov.

эвксенит-(Y):

7) (Y_{0.50}Ca_{0.18}Mn_{0.05}Dy_{0.04}Th_{0.04}U_{0.08}Yb_{0.02}Gd_{0.02}Sm_{0.02}Er_{0.02}Pb_{0.02}Nd_{0.01}Tb_{0.01})_{1.02}(Nb_{1.01}Ti_{0.86}Fe_{0.06}Ta_{0.03}W_{0.03}U_{0.02})₂O_{6.1};

8) (Y_{0.49}Ca_{0.16}U_{0.08}Mn_{0.04}Dy_{0.04}Th_{0.04}Er_{0.03}Gd_{0.03}Yb_{0.02}Nd_{0.02}Sm_{0.01}Pb_{0.01}Tb_{0.01})_{0.99}(Nb_{1.02}Ti_{0.85}Fe_{0.06}U_{0.08}Ta_{0.03}W_{0.02})₂O_{5.98}(OH)_{0.5};

поликраз-(Y)

9) (Y_{0.53}Ca_{0.20}U_{0.03}Th_{0.06}Yb_{0.03}Mn_{0.05}Er_{0.022}Sm_{0.02}Fe_{0.02}Nd_{0.01}Sn_{0.01})_{0.97}(Ti_{0.98}Nb_{0.83}U_{0.09}Ta_{0.05}Fe_{0.03}W_{0.01})₂O_{5.98}(OH)_{2.3}, без Si, Mg;

10) (Y_{0.52}Ca_{0.16}Th_{0.04}Dy_{0.04}Mn_{0.04}U_{0.10}Gd_{0.02}Yb_{0.02}Sm_{0.02}Er_{0.02}Nd_{0.02}Ho_{0.01}Pb_{0.01}Zr_{0.01})_{0.99}(Ti_{0.97}Nb_{0.81}U_{0.10}Fe_{0.07}Ta_{0.03}W_{0.02})₂O_{5.92}(OH)_{2.5};

11) (Y_{0.56}Ca_{0.17}Mn_{0.05}Th_{0.05}Dy_{0.04}Gd_{0.02}Yb_{0.02}Er_{0.02}Ce_{0.02}La_{0.01}Sm_{0.02}U_{0.01}Pb_{0.01}Nd_{0.01})_{1.01}(Ti_{0.93}Nb_{0.82}U_{0.13}Fe_{0.08}Ta_{0.02}W_{0.01})₂O_{5.97}(OH)_{2.7}.

Количество редких земель в эвксенит-поликраз-ах составляет 0.15–0.17 формульных коэффициентов.

Кроме собственных кристаллов эвксенит-поликраз образует псевдоморфозы по кристаллам фергусонита. Внутреннее строение псевдоморфоз зональное колломорфное. Из фергусонита-(Y) при замещении его поликразом-(Y), выносятся пример-но половина Y с Nb по схеме:

фергусонит – 1.5(Y,REE,...)_A + 1.5(Nb,Ta)_B → поли-краз – 1.0(Y,REE,...)_A + 1.0(Nb,Ta)_B + 1.0Ti_B. Фронт замещения характеризуется повышенной гидрата-цией.

Самарскит-(Y) наблюдается в участках пегма-тита, обогащенного магнетитом, гранатом, ильме-нитом. Форма выделений округлая. Величина зер-рен колеблется в пределах 0.01–10 мм с преобла-данием размеров 0.5 мм. Минерал метамиктный. Цвет самарскита черный, блеск на свежем сколе смолистый, у поверхности зерен – жирный до мато-вого. Характерно наличие корочки бурого и желто-бурого цвета.

Химический состав самарскита-(Y) (мас. %): Nb₂O₅ – 51.34, TiO₂ – 4.07, Ta₂O₅ – 1.60, FeO – 11.28, Y₂O₃ – 10.27, MnO – 3.44, CaO – 0.17, Ce₂O₃ – 0.49, La₂O₃ – 0.51, Nd₂O₃ – 0.96, Sm₂O₃ – 1.84, Eu₂O₃ – 1.05, Gd₂O₃ – 1.92, ThO₂ – 6.48; сумма 95.42 (JXA-733; аналитик Е.И. Чурин).

Колумбит-(Mn) представлен пластинчатыми кристаллами размером от 0.05 до 3 мм. Цвет мине-рала черный с буровато-красными рефлексами, ча-сто в срастании с самарскитом. На кристаллах уста-новлены формы а {100}, b {010}, c, {001} e {201}, m {110} и u {111} (см. рис. 4б). Химический состав (мас. %):

1) $\text{FeO} - 5.85$, $\text{Nb}_2\text{O}_5 - 66.46$, $\text{MnO} - 12.17$, $\text{TiO}_2 - 5.61$, $\text{ZrO}_2 - 1.24$, $\text{Ta}_2\text{O}_5 - 1.79$, $\text{Y}_2\text{O}_3 - 3.36$, $\text{Eu}_2\text{O}_3 - 0.46$, $\text{Sm}_2\text{O}_3 - 0.58$, $\text{La}_2\text{O}_3 - 0.29$, $\text{Gd}_2\text{O}_3 - 0.50$, $\text{Ce}_2\text{O}_3 - 0.19$, $\text{Nd}_2\text{O}_3 - 0.28$, $\text{CaO} - 0.03$, $\text{ThO}_2 - 0.73$; сумма – 99.99;

2) $\text{FeO} - 12.99$, $\text{Nb}_2\text{O}_5 - 69.17$, $\text{MnO} - 12.99$, $\text{TiO}_2 - 4.91$, $\text{ZrO}_2 - 1.50$, $\text{Ta}_2\text{O}_5 - 1.48$, $\text{Y}_2\text{O}_3 - 2.11$, $\text{Eu}_2\text{O}_3 - 0.40$, $\text{La}_2\text{O}_3 - 0.23$, $\text{Ce}_2\text{O}_3 - 0.21$; сумма – 99.84;

3) $\text{FeO} - 9.37$, $\text{Nb}_2\text{O}_5 - 69.17$, $\text{MnO} - 12.99$, $\text{TiO}_2 - 4.89$, $\text{Ta}_2\text{O}_5 - 1.48$, $\text{Y}_2\text{O}_3 - 1.20$, $\text{Eu}_2\text{O}_3 - 0.47$, $\text{Sm}_2\text{O}_3 - 0.36$, $\text{La}_2\text{O}_3 - 0.27$, $\text{Gd}_2\text{O}_3 - 0.24$, $\text{Ce}_2\text{O}_3 - 0.16$; сумма – 99.96 (JXA-733; аналитик Е.И. Чурин).

Химические анализы при позиции $B = 2$ рассчитываются на следующие формулы (номера формул соответствуют номерам анализов):

1) $(\text{Mn}_{0.61}\text{Fe}_{0.25}\text{Y}_{0.08}\text{Zr}_{0.04}\text{Eu}_{0.01}(\text{La}, \text{Ce})_{0.01})(\text{Nb}_{1.72}\text{Ti}_{0.20}\text{Fe}_{0.05}\text{Ta}_{0.02})_2\text{O}_6$;

2) $(\text{Mn}_{0.55}\text{Fe}_{0.38}\text{Y}_{0.05}\text{Eu}_{0.01}\text{La}_{0.02}\text{Sm}_{0.01}(\text{Gd}, \text{Ce})_{0.01})(\text{Nb}_{1.73}\text{Ti}_{0.13}\text{Fe}_{0.06}\text{Ta}_{0.07})_2\text{O}_6$;

3) $(\text{Mn}_{0.57}\text{Fe}_{0.19}\text{Y}_{0.13}\text{Eu}_{0.01}\text{La}_{0.01}\text{Zr}_{0.03}\text{Sm}_{0.01}\text{Nd}_{0.01}\text{Gd}_{0.01}\text{Th}_{0.01})(\text{Nb}_{1.66}\text{Ti}_{0.23}\text{Fe}_{0.08}\text{Ta}_{0.03})_2\text{O}_6$, примесь Ce .

Ильменит вместе с магнетитом, биотитом и другими минералами выполняет трещины в полевом шпате и кварце, образуя пленки и пластинки, часто расположенные кулисообразно. Размер пластинок достигает 8 см по длинной оси. Поверхности пластинок обычно шероховатые, часто волнисто-изогнутые. Изредка на них отмечаются грани форм $\{0001\}$, $n \{22-43\}$ и $r \{10-11\}$. Часто на эти пластинки нарастают друзовые агрегаты спессартина с включениями циртолита и ниобатов. Реже отмечаются отдельные толстотаблитчатые кристаллы размером до 2 мм.

Состав ильменита определен в двух пробах (мас. %):

1) $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 47.77$, $\text{TiO}_2 - 43.75$, $\text{MnO} - 7.12$, $\text{Nb}_2\text{O}_5 - 1.11$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.32$; сумма – 100.07 (JXA-733; аналитик Е.И. Чурин);

2) $\text{FeO} - 49.34$, $\text{TiO}_2 - 41.62$, $\text{MnO} - 7.31$, $\text{Nb}_2\text{O}_5 - 0.57$, $\text{Er}_2\text{O}_3 - 0.56$, $\text{Ce}_2\text{O}_3 - 0.21$, $\text{La}_2\text{O}_3 - 0.20$, $\text{Y}_2\text{O}_3 - 0.11$; сумма – 99.92 (Уралмеханобр).

Кристаллохимические формулы следующие:

1) $\text{Ti}_{0.83}\text{Fe}_{0.70}^{2+}\text{Fe}_{0.30}^{3+}\text{MnO}_{0.15}\text{Nb}_{0.01}\text{Al}_{0.01}\text{O}_3$;

2) $\text{Ti}_{0.94}\text{Fe}_{0.80}^{2+}\text{Fe}_{0.09}^{3+}\text{Mn}_{0.16}\text{Nb}_{0.01}\text{PЗЭ}_{0.01}\text{O}_3$, где $\text{PЗЭ} - \text{Er, Ce, La, Y}$.

Примеси Nb и PЗЭ , возможно, связаны с микро-включениями ильменорутила.

Ильменорутил встречается в виде единичных кристаллов и коленчатых двойников величиной до 3 мм в ассоциации с кварцем, розоватым альбитом, мусковитом, сидеритом и мелкими вросками фергусонита, циркона и монацита. Цвет черный с сероватым оттенком, часто с побежалостью. Качественным анализом в ильменорутиле определена существенная примесь Nb (аналитик М.А. Рассомахин).

Уранинит торийсодержащий (бреггерит) наблюдается в виде тонкой сыпи в фергусоните-(Y).

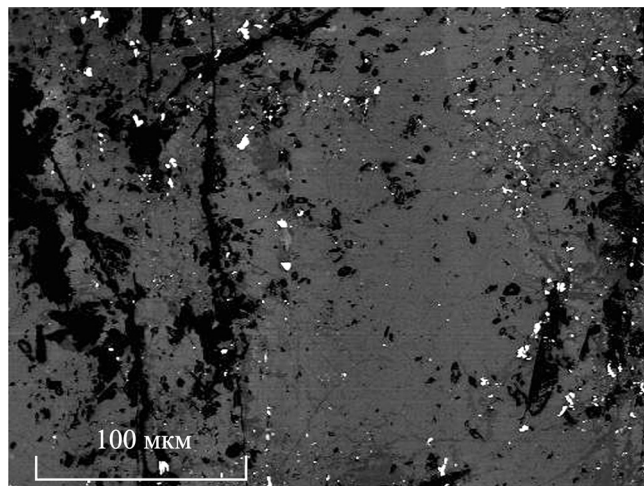


Рис. 6. Распределение бреггерита (белое) в фергусоните-(Y) (серое).

Fig. 6. The distribution of breggerite (white) in fergusonite-(Y) (grey).

Зерна неправильной формы размером сотые доли мм и менее; распределены неравномерно, образуя местами скопления и струи (рис. 6). Участками включения уранинита достигают 3.5 % от объема фергусонита. Состав уранинита (среднее по 4 зернам) (мас. %):

$\text{UO}_3 - 60.43$, $\text{ThO}_2 - 33.10$, $\text{PbO} - 2.93$, $\text{Y}_2\text{O}_3 - 38$, $\text{Ce}_2\text{O}_3 - 0.34$, $\text{Dy}_2\text{O}_3 - 0.14$, $\text{Ho}_2\text{O}_3 - 0.26$, $\text{Ta}_2\text{O}_5 - 0.24$, $\text{Nd}_2\text{O}_3 - 0.24$, $\text{La}_2\text{O}_3 - 0.21$, $\text{Sm}_2\text{O}_3 - 0.19$, $\text{Er}_2\text{O}_3 - 0.17$, $\text{Yb}_2\text{O}_3 - 0.14$, $\text{Eu}_2\text{O}_3 - 0.10$, $\text{Pr}_2\text{O}_3 - 0.16$, $\text{CaO} - 0.08$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0.07$, $\text{Nb}_2\text{O}_5 - 0.05$, $\text{Gd}_2\text{O}_3 - 0.06$; сумма – 99.46 (JXA-733; аналитик В.А. Муфтахов).

Расчет результатов анализа приводит к кристаллохимической формуле

$(\text{U}_{0.57}\text{Th}_{0.34}\text{Pb}_{0.04}\text{Y}_{0.01}\text{PЗЭ}_{0.03})\text{O}_2(\text{OH})_{0.07}$,

где PЗЭ в формульных единицах: $\text{Ce} - 0.006$; $\text{Dy} - 0.005$, $\text{Nd} - \text{Ho} - 0.004$, La , Pr , $\text{Sm} - 0.003$, Eu , $\text{Yb} - 0.002$, $\text{Gd} - 0.001$, примеси: Fe , Ca , Nb , Ta .

Магнетит в качестве акцессорного минерала встречается повсеместно. В блоковой зоне пегматитов наблюдается в виде корочек, пластинчатых выделений совместно с биотитом, ильменитом, а также в виде вкрапленности изометричных зерен размером до 1 см совместно с ниобатами. Микрозондовый анализ показал наличие примеси европия: $\text{Eu}_2\text{O}_3 = 0.79$ мас. %. В магнетите отмечается примесь Nb , Ta , PЗЭ , Ti .

Алланит-(Ce) отмечается почти во всех породах массива. Обычно встречается в виде отдельных зерен размером до 1 мм. Часто обрастает эпидотом. В гранитоидах центральной части содержится в количестве до 0.04 об. %. В кварц-полевошпатовой блоковой зоне пегматита урочища Темное Царство обнаружены кристаллы, удлиненные по оси b размером до 4 см. Качественным анализом в его составе

определены Fe, Ce, Th, Nd, La (РФА Bruker M1 Mistral; аналитик М.А. Рассомахин, ИГЗ УрО РАН).

Циркон – сравнительно широко распространенный минерал в породах Сыростанского массива. Образует призматические кристаллы размером 0.1–1.0 мм. Цвет минерала от красно-бурого до кремового. На кристаллах развиты грани форм {100}, {111}.

В блоковой зоне пегматита, наряду с цирконом, распространен циртолит. Наблюдается в виде одиночных кристаллов, сферокристаллов, радиально-лучистых сростков. Приурочен к спессартиновым агрегатам и часто включен в индивиды граната и ниобатов. Цвет циртолита серовато-желтый, кристаллы длиннопризматические с формами {100}, {111}. Индивиды по оси L_4 достигают 6 мм. Метамиктен. В составе циртолита определены (мас. %): 32.45 SiO_2 , 54.32 ZrO_2 , 6.51 HfO_2 и до 2.25 FeO ; сумма 95.52 (среднее из двух анализов, аналитик Е.И. Чурин). Содержит H_2O в количестве 4.5 мас. %.

Торогуммит (гидроторит) $\text{Th}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$ обнаружен в виде включения округлой формы размером 10 мкм в фергусоните. Состав (мас. %): 58.88 ThO_2 , 5.24 UO_2 , 5.39 Y_2O_3 , 0.59 CaO , 0.24 FeO , 0.15 PbO , 0.07 MnO , 0.81 Ce_2O_3 , 0.21 La_2O_3 , 0.30 Sm_2O_3 , 2.09 Nb_2O_5 , 0.59 Ta_2O_3 , 0.16 TiO_2 , 10.2 SiO_2 , 0.33 P_2O_5 , сумма – 85.25 (JXA-733; аналитик В.А. Муфтахов).

Корочки на ниобатах представляют собой продукты их разложения, в которых наряду с реликтами измененных первичных минералов отмечаются участки весьма неоднородного строения и химического состава (мас. %): 12–34 SiO_2 , 25–62 Nb_2O_5 , 4–26 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$), 1.5–8 TiO_2 , 3–12 H_2O . В сумме эти компоненты составляют 82–95 мас. %. Постоянные примеси Th, U, Ca, Ta, Y, Pb и др.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В валовых составах главных фаз интрузивных пород и аксессуарных минералов Сыростанского массива ранее было определено, что наибольший вклад в баланс РЗЭ вносят алланит и титанит (Попов и др., 2001). Для основных и кислых интрузивных пород отмечалось обогащение Ba, Sr, Zr, легкими РЗЭ.

Геохимический фон и минеральный состав аксессуариев резко изменился при формировании поздних жильных фаз массива. Настоящим исследованием установлено, что в Сыростанском гранитном массиве максимальные концентрации ниобия, иттрия, редкоземельных и радиоактивных элементов приурочены к породам жильной фации – гранитным дайкам и пегматитам. Основными минералами-концентраторами этих элементов являются фергусонит-(Y), эвксенит-(Y), поликраз-(Y), ильменит, ильменорутит, колумбит-(Mn), самарскит-(Y), циртолит, циркон, магнетит.

Наиболее ранними из аксессуарных минералов пегматитов являются магнетит, циркон, ильменит, гематит, алланит-(Ce). Позднее кристаллизовались спессартин, циртолит, фергусонит-(Y), мусковит; затем эвксенит-(Y), поликраз-(Y), самарскит-(Y) и на конечных стадиях – алланит-(Ce), рутит, магнетит. Содержание ниобия в процессе формирования пегматитов уменьшается: минералы ниобия замещаются и сменяются минералами титана. Состав редких земель в минералах разных стадий в основном сходен – преобладают средние лантаноиды: европий, гадолиний, диспрозий и иттербий.

Изученная редкоземельная минеральная ассоциация и ее химические особенности позволяют выделить характерную Nb-Ta-Ti-Y-РЗЭ-Th-U-Zr специализацию пегматитов Сыростанского массива.

Сыростанский массив находится в пределах широтной Челябинско-Уфалейской структуры, к которой приурочено большинство редкометалльных проявлений Урала (Левин и др., 1997; Золотов и др., 2004). К этой структуре приурочены и пегматиты Ильменских гор, которые вместе с пегматитами массивов Сыростано-Тургорской группы объединены в позднепермско-раннетриасовый блюмовский комплекс (Петров и др., 2004)². Основанием для объединения поздних жильных пород в один комплекс послужило сходство состава пород и редкометалльной минерализации. Радиологический возраст пегматитов Ильмен определяется в интервале 290–240 млн лет (сводка данных и литература в работе (Попова и др., 1982)). Время формирования заключительных интрузивных фаз Сыростанского массива датируется концом карбона–началом перми (Ферштатер и др., 2007). Пегматитовые тела Сыростанского массива занимают секущее положение относительно ранее выделенных фаз; встречаются не только внутри массива, но и за его пределами, что указывает на их более позднее образование, совпадающее со временем формирования пегматитов Ильмен.

Кроме того Сыростанские пегматиты находятся на продолжении субмеридиональной полосы с металлогеническими аномалиями ниобия и редких земель, простирающейся вдоль восточной окраины уфалейского комплекса, вблизи Главного Уральского разлома. В этой полосе известны жилы гранитных пегматитов с фергусонитом, самарскитом-(Y), иттроколумбитом, циртолитом и др., формирование которых также связывается со временем проявления поздней коллизии (C_3 –P) (Огородников и др., 2007; Коротеев и др., 2010).

² Петров В.И., Шалагинов А.Э., Пунегов Б.Н. и др. (2004) Отчет о результатах работ по объекту Геологическая съемка, геологическое доизучение масштаба 1 : 200 000 листа N-41-VII (новая серия). Миасская площадь. Челябинск: ТГФ, 709 с.

Таким образом, Сыростанский массив находится на пересечении меридиональной и широтных структур, что, по-видимому, послужило одним из основных контролирующих факторов локализации в нем редкометалльной минерализации.

Авторы благодарны сотрудникам Института минералогии УрО РАН за выполнение анализов, В.А. Губину – за предоставленные образцы, В.А. Попову и В.И. Поповой – за ценные замечания и консультации. Особую благодарность выражаем сотрудникам Минералогического музея им. акад. А.Е. Ферсмана: Л.А. Паутову, А.А. Агаханову и В.Ю. Карпенко, за помощь, оказанную при проведении аналитических работ.

Исследования выполнены при финансовой поддержке интеграционного проекта УрО РАН № 12-И-5-2068.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Граменецкий Е.Н. (1990) Механизм магматического замещения (на примере контактовой зоны Сыростанского массива на Южном Урале). *Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология*. (3), 62-77.
- Золотов К.К., Левин В.Я., Мормиль С.И. (2004) Минерогения и месторождения редких металлов, молибдена, вольфрама Урала. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, УГСЭ, 336 с.
- Иванов К.С. (1998) Главный Уральский глубинный разлом как палеозона субдукции Заварицкого – Беньюфа: тектоника и петрогенезис важнейших породных комплексов. *Проблемы петрогенезиса и рудообразования: тез. докл. науч. конф. Чтения А.Н. Заварицкого*. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 75-78.
- Коротеев В.А., Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. (2010) Минералогия шовных зон Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 416 с.
- Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С. (1997) Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 274 с.
- Монтеро Л., Беа Ф., Ферштатер Г.Б., Шардакова Г.Ю., Чашухина В.А., Гердес А. (1998) Изотопное датирование Сыростанского гранитоидного массива: вклад в изучение истории развития зоны Главного Уральского глубинного разлома (предварительные данные). *Проблемы петрогенезиса и рудообразования: тез. докл. науч. конф. Чтения А.Н. Заварицкого*. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 106-107.
- Овчинников Л.Н., Тихомирова Н.И., Вороновский С.Н. (1973) Длительность и этапы становления Сыростанского гранитного массива (Южный Урал). *Докл. АН СССР*. 211(3), 665-667.
- Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. (2007) Минерогения шовных зон Урала. Ч. 3. Уфалейский гнейсово-амфиболитовый комплекс (Ю. Урал). Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, УГГУ, 187 с.
- Попов В.С., Никифорова Н.Ф., Богатов В.И., Ляпунов С.М., Тихомиров П.Л. (2001) Мультиплетная габбро-гранитная интрузивная серия Сыростанского плутона, Южный Урал: геохимия и петрология. *Геохимия*. (8), 812-828.
- Попова В.И., Попов В.А., Поляков В.О., Щербакова Е.П. (1982) Пегматиты Ильменских гор. Свердловск: УНЦ АН СССР, 50 с.
- Тихомирова Н.И. (1971) Редкие и рассеянные элементы в процессе гранитизации (на примере Сыростанско-Тургорского массива, Ю. Урал). *Геохимия*. (2), 144-154.
- Ферштатер Г.Б. (2013) Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 368 с.
- Ферштатер Г.Б., Краснобаев А.А., Беа Ф., Монтеро П., Бородин Н.С., Холоднов В.В., Зинькова Е.А., Шардакова Г.Ю., Прибавкин С.В. (2007) Этапы палеозойского интрузивного магматизма Уральского орогена и их геохимическая интерпретация. *Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование*. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 88-120.
- Ферштатер Г.Б., Шагалов Е.С., Беа Ф., Монтеро П. (2000) Тургорско-Сыростанская группа гранитоидных массивов зоны Главного Уральского глубинного разлома. *Магматические и метаморфические образования Урала и их металлогения*. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 129-158.
- Шагалов Е.С. (2002) Петрология и геохимия пород Сыростанско-Тургорской группы гранитоидных массивов (Южный Урал). Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 30 с.

Рецензент Е.С. Шагалов

Rare-earth and rare-metal mineralization in late granite of Syrostan massif (Southern Urals)

E. P. Makagonov, V. A. Muftahov

Institute of Mineralogy, Urals Branch of RAS

The article provides a complete list of Syrostan massif minerals, which includes 47 mineral species. It is shown that the rare-metal and rare-earth mineralization is confined to the late vein facies – granite dykes and pegmatites. Characteristic morphology and composition of new minerals of the massif: fergusonite-(Y), euxenite-(Y), polycrase-(Y), broggerit, thorogummite, and minerals already known: samarskite-(Y), columbite-(Mn), ilmenite, ilmenorutile, zircon, cyrtolite, allanite-(Ce) are given. Previously, it was found that allanite and titanite make the largest contribution to the balance of REE in the rocks of the main phases of the massif. These studies let to distinguish the new specialization for the massif – Nb-Ta-Ti-Y-REE-Zr-Th-U, connected with the rare-earth-rare-metal minerals association of vein granites and pegmatites.

Keywords: *Syrostan massif, rare-earth and rare-metal mineralization.*