
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ

**ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА РУДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ
В РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ ЩЕЛОЧНЫХ ГРАНИТАХ
ЗАШИХИНСКОГО МАССИВА (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ)**© 2021 г. д. чл. **Н. В. Алымова¹, ***, **Н. В. Владыкин¹***¹Институт геохимии им. А.П. Виноградова, Сибирское отделение РАН,
ул. Фаворского, 1а, Иркутск, 664033 Россия***e-mail: alyмова@igc.irk.ru*

Поступила в редакцию 14.10.2020 г.

После доработки 23.10.2020 г.

Принята к публикации 10.12.2020 г.

Зашихинский щелочно-гранитный массив приурочен к позднепалеозойской Восточно-Саянской зоне редкометалльного магматизма и является уникальным Ta–Nb–Zr–REE месторождением. По степени дифференцированности и рудоносности выделены три фациальные разновидности гранитов массива: амфиболсодержащие кварц-микроклин-альбитовые (фация 1), кварц-альбит-микроклиновые (фация 2), кварц-альбитовые, переходящие в альбититы (фация 3). Породы месторождения характеризуются высокими концентрациями тяжелых редкоземельных элементов и повышенным Nb/Ta отношением. Минералами-концентраторами редких элементов в гранитах, определяющих их рудоносный потенциал, являются колумбит, ниобиевый рутил, циркон, ксенотим и гагаринит. Ведущая роль в образовании редкометалльной минерализации принадлежит процессам длительной кристаллизационной дифференциации расплава с закономерным накоплением несовместимых элементов. Обогащение гранитов REE, Zr, Nb и Ta, вплоть до рудных концентраций, подчеркивает исходное обогащение щелочно-гранитных расплавов рудными компонентами. Породы Зашихинского месторождения образованы из магмы “переходного состава” и характеризуются минеральными парагенезисами промежуточными между парагенезисами щелочных агапитовых и литий-фтористых гранитов.

Ключевые слова: колумбит, минералы-концентраторы, редкие элементы, редкометалльные граниты, Зашихинское месторождение, Восточный Саян

DOI: 10.31857/S0869605521010020

Зашихинское тантал-ниобиевое месторождение расположено в Нижнеудинском районе Иркутской области и приурочено к позднепалеозойской Восточно-Саянской редкометалльной зоне (Алымова, 2016). Месторождение характеризуется самыми высокими содержаниями тантала в России (Машковцев и др., 2011). Кроме того, руды месторождения обогащены редкоземельными элементами иттриевой группы.

Вопрос происхождения щелочных гранитов массива является предметом дискуссии. С одной стороны, ряд авторов полагает, что массив сложен щелочными редкометалльными агапитовыми гранитами (Ярмолюк и др., 2011, 2016; Бескин, 2014; Владыкин и др., 2016; Алымова, 2016), а уникальная редкометалльная минерализация связана с процессом длительной кристаллизационной дифференциации расплава с закономерным накоплением несовместимых элементов к конечным продуктам магматического процесса (Зарайский и др., 2009; Ярмолюк, Кузьмин, 2012; Владыкин и др., 2016; Ярмолюк и др., 2016; Gladkochub et al., 2017). С другой стороны, существует и противоположная точка

зрения, согласно которой редкометальное оруденение образовалось в результате постмагматической метасоматической переработки гранитов (Архангельская, Шурига, 1997; Кудрин, Шурига, 1998; Архангельская и др., 2012).

В статье приведены результаты исследования главных минералов-концентраторов редких и редкоземельных элементов в щелочных гранитах Зашихинского массива, характеристики их состава, минеральные ассоциации, генезис.

ПРОБОПОДГОТОВКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности состава рудных минералов изучались на основе мономинеральных фракций. Для их получения проводилось дробление образцов редкометальных гранитов всех фациальных разновидностей, отмывка шлихов на концентрационном столе, разделение шлиховых проб в тяжелой жидкости (бромформе), электромагнитная сепарация концентрата и отбор зерен минералов под бинокулярным микроскопом. Выделенные зерна помещались в заготовки из эпоксидной смолы.

Аналитические работы проводились с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Изотопно-геохимических исследований” Института геохимии им. А.П. Виноградова (Иркутск). Анализы минералов выполнялись с помощью рентгеновского электронно-зондового микроанализатора JXA-8200, Jeol Ltd., Япония (аналитик Л.Ф. Суворова), оснащенного растровым электронным микроскопом высокого разрешения, энергодисперсионным спектрометром (EDS) с SiLi-детектором с разрешением 129 еВ и пятью спектрометрами с волновой дисперсией (WDS).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И СТРОЕНИЕ МАССИВА

Зашихинский массив сложен щелочными гранитами, образующими обособленное тело, которое внедрено в Хайламинский массив гранитоидов среднепалеозойского огнистого комплекса. В плане массив имеет эллипсоидную, вытянутую в северо-западном направлении форму, его площадь составляет около 1.3 км² (рис. 1). Глубина эрозионного среза равна около 300 м.

Граниты Зашихинского массива — это средне- и мелкозернистые породы с массивной текстурой и гипидиоморфнозернистой структурой. Их минеральный состав (об. %): кварц (20–45), микроклин (5–25), альбит (25–70). Кроме того, в породах встречаются щелочной амфибол (арфведсонит), пироксен (эгирин), слюда, флюорит, криолит, циртолит, торит, пироклор, карбонаты и сульфиды. Минералами-концентраторами тантала, ниобия и других редких элементов в породах и рудах массива, представляющими основную практическую ценность при эксплуатации месторождения, являются колумбит, разновидности рутила (стрюверит, ильменорутит), циркон, ксенотим и гагаринит. Рудные минералы образуют мелкую рассеянную вкрапленность, которая, в целом, равномерно распределена в породах массива.

В пределах Зашихинского массива выделены три фациальные разновидности гранитов:

1) амфиболсодержащие кварц-микроклин-альбитовые граниты (фация 1) — породы с порфировыми выделениями “гороховидного” кварца и удлиненными призмами черного амфибола (арфведсонита). Эти граниты слагают тело в юго-западной приконтактной части Зашихинского массива и являются наиболее ранней фациальной разновидностью слагающих его пород;

2) лейкократовые кварц-альбит-микроклиновые редкометальные граниты (фация 2) — для них характерны как крупные “гороховидные” вкрапленники кварца, так и его мелкие зерна в основной массе породы. Данная фациальная разновидность гранитов наблюдается в центральной части месторождения;

3) лейкократовые кварц-альбитовые граниты, переходящие в альбититы (фация 3) — существенным отличием данной фации является наличие участков мономинеральных альбититов среди кварц-альбитовых образований. Альбит содержит менее 8% анортитового компонента. Эта фациальная разновидность гранитов преобладает в северо-во-

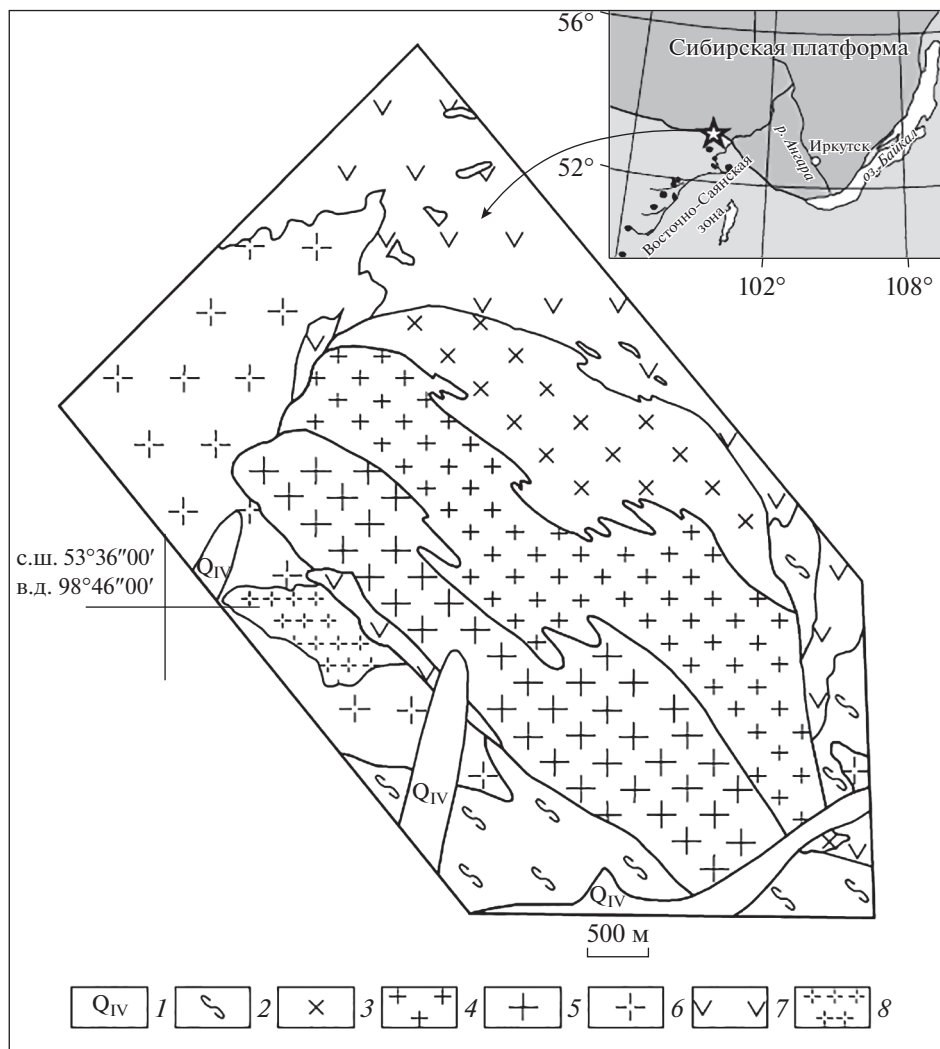


Рис. 1. Схема геологического строения Зашихинского массива (Владыкин и др., 2016).

1 – четвертичные отложения; 2 – раннепротерозойские породы: сланцы, микрогнейсы, амфиболиты бирюсинской свиты (PR1br2); 3–5 – породы Зашихинского массива: 3 – кварц-альбитовые граниты и альбититы (фация 3), 4 – лейкократовые кварц-альбит-микроклиновые граниты (фация 2), 5 – амфиболсодержащие кварц-микроклин-альбитовые граниты (фация 1); 6–8 – среднепалеозойские интрузивные породы: 6 – пегматоидные амфиболовые граниты, 7 – граниты, сиениты, граносиениты огникового комплекса (D_{2og}), 8 – диориты хойто-окинского комплекса (Pz_{1ho}). На врезке показано положение Зашихинского массива (звездочка) в строении Восточно-Саянской зоны редкометалльного магматизма.

Fig. 1. Geological scheme of the Zashikhinsky massif (Vladykin et al., 2016).

сточной части Зашихинского массива и является главным рудным участком месторождения.

Границы между фациями гранитов массива нечеткие, с постепенными переходами. Выделенная последовательность фацialsных разновидностей пород массива связана с магматической дифференциацией щелочно-гранитных расплавов, обогащенных флюидными компонентами.

ПЕТРОХИМИЯ И ГЕОХИМИЯ ГРАНИТОВ

По составу редкометалльные породы Зашихинского месторождения относятся к агапитовым щелочным гранитам и характеризуются высокими содержаниями большинства некогерентных элементов (сумма REE от 3371 до 19762 ppm), повышенными содержаниями щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ до 12.68 мас. %), преимущественно натриевым типом щелочности ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$) (Владыкин и др., 2016). Петрохимические характеристики исследуемых редкометалльных пород и их минеральный состав отвечают гранитам А-типа (Whalen et al., 1987; Frost, Frost, 2011) или щелочно-гранитному геохимическому типу (Коваленко, 1977).

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА РУДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ

Колумбит является главным концентратором тантала и ниобия в рудах. Он образует как крупные (2–5 мм), так и мелкие (менее 0.5 мм) зерна черного цвета, иногда встречается в виде уплощенных вытянутых кристаллов. В щелочных гранитах массива наблюдается в ассоциации с главными породообразующими минералами (кварцем, микроклином, альбитом) и акцессорными — арфведсонитом, эгирином, цирконом, слюдами.

Колумбит характеризуется значительными вариациями содержаний компонентов (мас. %, данные около 40 микрозондовых анализов): MnO 0.38–12.06, $\text{FeO}_{\text{total}}$ 7.19–19.71, Ta_2O_5 1.85–18.94, Nb_2O_5 58.88–75.46 — и представлен полным изоморфным рядом от колумбита-Fe до колумбита-Mn (рис. 2, а). В нем также отмечаются довольно высокие содержания TiO_2 (до 3.26 мас. %), SnO (до 0.41 мас. %) и пониженные концентрации Ce_2O_3 , Nd_2O_3 , Yb_2O_3 , UO_2 и ThO_2 (табл. 1). Широкий диапазон химического состава колумбита, даже в пределах одного массива, характерен для месторождений данного щелочно-гранитного типа. При этом четкой зональности состава зерен колумбита не наблюдается: в некоторых случаях имеются темно-серые участки в центральных зонах и более светлые участки в периферических частях кристаллов (Владыкин и др., 2016). Зональность слабо выраженная, с расплывчатыми контурами. Периферические зоны, вероятно, являются более поздними образованиями, для них характерны высокие содержания Ta_2O_5 (10–19 мас. %) и пониженные концентрации MnO (0.5–7 мас. %).

На корреляционных диаграммах наблюдаются четкие линейные зависимости между содержаниями MnO и FeO , Ta_2O_5 и Nb_2O_5 (рис. 2, б, в) и отсутствие корреляций между содержаниями Ta_2O_5 и MnO , Nb_2O_5 и FeO (рис. 2, г, д). Это свидетельствует о том, что для колумбита характерен изовалентный изоморфизм, при котором ионы Fe^{2+} замещаются ионами Mn^{2+} , а ионы Nb^{5+} — ионами Ta^{5+} . Между отношениями $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ta}_2\text{O}_5$ и FeO/MnO , $\text{MnO}/\text{Ta}_2\text{O}_5$ и $\text{FeO}/\text{Nb}_2\text{O}_5$ корреляции не наблюдается (рис. 2, е, ж). С содержанием TiO_2 коррелирует содержание SnO_2 (рис. 2, з).

Циркон выступает характерным акцессорным минералом всех фацialsных разновидностей редкометалльных гранитоидов массива и является концентратором циркония и гафния. Содержание циркона в гранитах массива достигает 7%. Часто циркон образует ограненные кристаллы дипирамидального облика с хорошо развитыми гранями {111} размером до 1 мм, нередко с большим количеством непрозрачных точечных включений в центральной части зерен (рис. 3). Наблюдается в ассоциации со слюдой, криолитом, микроклином, кварцем, колумбитом. Встречаются также мелкие (<0.2 мм) прозрачные ограненные кристаллы этого минерала.

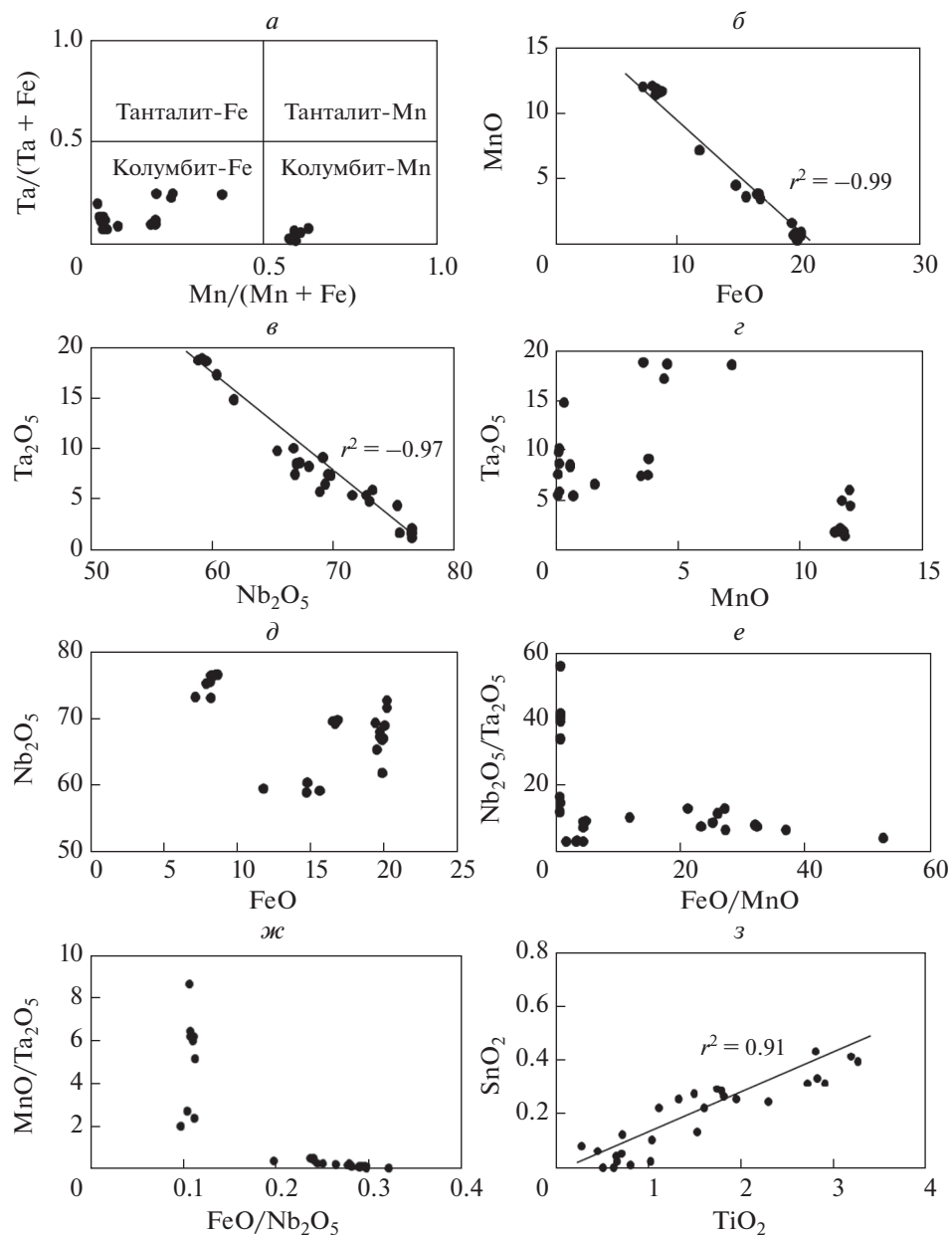


Рис. 2. Вариации состава колумбита (мас. %) из пород Зашихинского массива.

Fig. 2. Variations of columbite compositions (wt %) from rocks of the Zashikhinsky massif.

Химический состав циркона близок к теоретическому. В качестве примеси он содержит гафний (HfO_2 1.83–4.42 мас. %), изоморфно замещающий цирконий в кристаллической решетке минерала (табл. 2). Отношение ZrO_2/HfO_2 варьирует от 14 до

Таблица 1. Химический состав (мас. %) колумбита из пород Зашихинского массива
Table 1. Chemical composition of columbite (wt %) from rocks of the Zashikhinsky massif

Компонент	1	2	3ц	3к	4	5ц	5к	6
TiO ₂	0.46	1.75	3.19	2.72	0.72	0.67	0.73	3.26
FeO	7.92	14.8	19.71	19.86	8.71	8.2	7.19	19.37
MnO	12.06	4.58	0.62	0.38	11.6	11.42	12	1.64
MgO	<0.01	<0.01	0.17	0.2	0.02	0.05	<0.01	<0.01
Nb ₂ O ₅	75.28	58.9	68.02	61.81	76.5	75.46	73.23	69.36
Ta ₂ O ₅	4.5	18.8	8.32	14.87	2.26	1.85	6.01	6.6
SnO ₂	0.06	0.29	0.41	0.31	0.05	0.02	0.12	0.39
Ce ₂ O ₃	0.06	0.03	<0.01	0.06	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
Nd ₂ O ₃	<0.01	0.28	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.16	0.17
Yb ₂ O ₃	0.01	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	0.06	0.26	<0.01
ThO ₂	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.12	<0.01	0.04
UO ₂	0.03	<0.01	0.01	0.01	<0.01	0.07	<0.01	<0.01
Сумма	100.4	99.4	100.5	100.2	99.9	97.92	99.7	100.9
Коэффициенты в формуле ($R = 3$)								
Ti	0.02	0.07	0.14	0.12	0.03	0.03	0.03	0.14
Fe	0.39	0.71	0.91	0.97	0.41	0.40	0.35	0.91
Mn	0.59	0.20	0.03	0.02	0.55	0.56	0.59	0.08
Mg			0.01	0.02	0.00	0.00		
Nb	1.94	1.66	1.77	1.64	1.97	1.98	1.93	1.77
Ta	0.06	0.34	0.13	0.24	0.03	0.03	0.09	0.10
Sn	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Ce	0.00	0.00		0.00			0.00	0.00
Nd		0.01					0.00	0.00
Yb	0.00	0.00				0.00	0.00	
Th			0.00			0.00	0.00	0.00
U	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00	
Компонент	7	8	9	10	11	12	13	14
TiO ₂	1.34	1.12	1.53	1.61	2.81	1.95	1.05	2.91
FeO	11.81	16.51	16.67	14.79	19.81	19.85	20.16	19.89
MnO	7.21	3.81	3.83	4.46	0.79	0.54	0.96	0.77
MgO	0.03	0.09	0.06	0.07	0.11	0.18	0.12	0.19
Nb ₂ O ₅	59.58	69.76	69.15	60.39	66.85	66.74	72.74	68.91
Ta ₂ O ₅	18.66	7.52	9.21	17.28	7.59	10.13	5.5	5.88
SnO ₂	0.25	0.22	0.13	0.22	0.43	0.25	0.1	0.31
Ce ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.15	<0.01	0.08
Nd ₂ O ₃	<0.01	0.68	<0.01	0.68	1.49	0.42	<0.01	0.92
Yb ₂ O ₃	0.09	<0.01	<0.01	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
ThO ₂	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.07	0.04	0.04	<0.01
UO ₂	<0.01	<0.01	0.06	0.03	0.1	<0.01	<0.01	<0.01
Сумма	98.97	99.71	100.79	99.57	100.1	100.3	100.7	100.0
Коэффициенты в формуле ($R = 3$)								
Ti	0.06	0.05	0.07	0.07		0.08	0.04	0.12
Fe	0.60	0.79	0.80	0.74	0.94	0.95	0.95	0.94
Mn	0.37	0.19	0.19	0.23	0.04	0.03	0.05	0.04
Mg	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
Nb	1.65	1.83	1.80	1.65	1.73	1.74	1.86	1.77
Ta	0.31	0.12	0.14	0.28	0.12	0.16	0.08	0.09
Sn	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
Ce	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	0.00
Nd	0.00	0.01		0.01	0.03	0.01	0.00	0.02
Yb	0.00			0.00	0.00	0.00	0.00	
Th	0.00				0.00	0.00	0.00	
U	0.00		0.00	0.00	0.00			

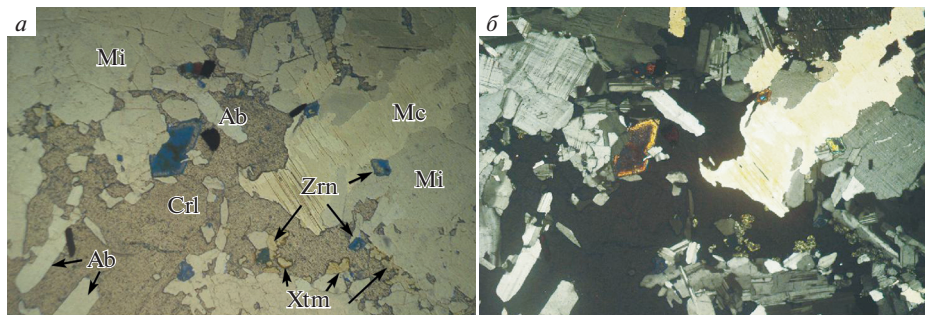


Рис. 3. Циркон из пород Зашихинского массива в проходящем свете (*а* – николи параллельны, *б* – николи скрещены). Объектив 4×. Zrn – циркон, Crl – криолит, Mc – слюда, Ab – альбит, Xtm – ксенотим, Mi – микроклин.

Fig. 3. Zircon from rocks of the Zashikhinsky massif.

36. Для циркона из пород Зашихинского месторождения характерны также несколько повышенные концентрации Y_2O_3 (0.24–2.33 мас. %). С учетом кристаллохимической формулы циркона ABO_4 , где A – Zr, Hf, Th, U, Y, REE, Ca, B – P, Si, Al, обогащение циркона иттрием и гафнием может проходить по схеме: $Zr(Hf)^{4+} + Si^{4+} \rightarrow Y(HREE)^{3+} + P^{5+}$ (Сорохтина и др., 2016). Среди других примесей в цирконе отмечены Yb_2O_3 (от 0.20 до 0.84 мас. %), ThO_2 (до 1.61 мас. %), UO_2 (до 0.14 мас. %), в незначительных количествах присутствуют Nb_2O_5 и Ta_2O_5 (<0.1 мас. %). Вариации состава в пределах зерен незначительны (табл. 2).

Спектры распределения REE в цирконе из гранитов Зашихинского месторождения показаны на рис. 4. В целом, в цирконе отмечается повышенное содержание промежуточных (MREE) и тяжелых (LREE) редкоземельных элементов.

Циртолит – метамиктная разновидность циркона с повышенными содержаниями урана, тория, гафния и переменной концентрацией редкоземельных элементов – имеет сходный с цирконом габитус кристаллов, но отличается непрозрачной бурой окраской. Наблюдается в парагенезисе с торитом и флюоритом. Отличается от кристаллического циркона пониженными концентрациями SiO_2 (25.81–27.58 мас. %) и ZrO_2 (56.13–57.23 мас. %), скорее всего, из-за присутствия H_2O (табл. 2). Для циртолита характерно пониженное содержание HfO_2 (до 2.77 мас. %) и высокие содержания ThO_2 (до 3.07 мас. %), Y_2O_3 (до 3.11 мас. %) и Yb_2O_3 (до 0.61 мас. %). Эти геохимические особенности циртолита, вероятно, обусловлены более поздней его кристаллизацией по сравнению с цирконом и участием в процессах минералообразования флюидной фазы, содержащей F и H_2O .

Ксенотим-(Y) встречается во всех фациальных разновидностях гранитов Зашихинского месторождения в виде мелких желтовато-зеленоватых кристаллов с совершенной спайностью (рис. 5). Обнаружены зональные кристаллы минерала со светлыми, темными и серыми полосами (возможно, полисинтетические двойники).

Содержания Y_2O_3 (41.31–43.42 мас. %) и P_2O_5 (36.03–38.94 мас. %) в ксенотиме-(Y) отвечают теоретической формуле. Он характеризуется высокими концентрациями лантаноидов иттриевой подгруппы (Gd–Lu), суммарное содержание которых достигает 17.76 мас. % (табл. 3, рис. 6). Вариации содержаний легких лантаноидов (Ce–Eu) незначительны (<1 мас. %). В спектрах REE, нормированных относительно C1 хондрита (McDonough, Sun, 1995), отмечаются отрицательные аномалии Ce и Eu и в целом положительный наклон графика в области MREE и HREE (рис. 6). Кроме редко-

Таблица 2. Химический состав циркона (мас. %) из пород Зашихинского массива
Table 2. The composition of zircons (wt %) from rocks of the Zashikhinsky massif

Компоненты	Циркон							Циртолит	
	1ц	1к	2	3	4ц	4к	5	6	7
SiO ₂	31.41	31.63	31.69	30.71	31.76	30.99	31.31	30.37	30.70
TiO ₂	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00
FeO	0.07	0.03	0.05	0.06	0.05	0.03	0.01	0.02	0.03
MnO	0.00	0.03	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
MgO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
CaO	0.00	0.00	0.01	0.07	0.01	0.04	0.01	0.01	0.00
Na ₂ O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
K ₂ O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
SrO	0.13	0.09	0.07	0.04	0.09	0.07	0.16	0.09	0.10
ZrO ₂	64.39	64.56	64.33	62.16	63.41	62.55	66.38	62.43	61.39
HfO ₂	3.11	3.44	3.46	2.73	3.93	4.42	1.83	2.74	2.71
Nb ₂ O ₅	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Ta ₂ O ₅	0.00	0.04	0.06	0.00	0.05	0.08	0.00	0.00	0.03
P ₂ O ₅	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Y ₂ O ₃	0.54	0.27	0.68	1.30	0.34	1.38	0.24	1.80	2.33
La ₂ O ₃	0.02	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
Ce ₂ O ₃	0.12	0.08	0.13	0.05	0.00	0.09	0.15	0.00	0.16
Nd ₂ O ₃	0.09	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Sm ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Eu ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Gd ₂ O ₃	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05
Dy ₂ O ₃	0.06	0.03	0.01	0.12	0.04	0.08	0.00	0.19	0.26
Er ₂ O ₃	0.11	0.09	0.09	0.18	0.06	0.12	0.05	0.20	0.19
Yb ₂ O ₃	0.29	0.24	0.28	0.84	0.20	0.20	0.14	0.82	0.63
ThO ₂	0.00	0.01	0.04	0.89	0.00	0.67	0.06	1.12	1.61
UO ₂	0.05	0.00	0.00	0.11	0.04	0.00	0.00	0.14	0.13
PbO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
F	0.03	0.01	0	0	0.03	0.08	0.02	0.08	0.03
Сумма	100.65	100.74	101.04	99.39	100.11	100.95	100.50	100.17	100.45
Коэффициенты в формуле ($R = 2$)									
Si	0.97	0.98	0.98	0.97	0.99	0.97	0.97	0.96	0.97
Zr	0.97	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	1.00	0.96	0.94
Hf	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02
Y	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00	0.03	0.04
Yb	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Th	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01

земельных элементов, в минерале присутствуют примеси ThO₂ (0.05–1.52 мас. %), UO₂ (0.02–0.24 мас. %), PbO (0.17–0.31 мас. %).

Ниобиевый рутил — концентратор тантала, ниобия и титана. Образует изометричные ограненные кристаллы с сильным алмазным блеском. Встречается во всех фациальных разновидностях редкометалльных гранитов Зашихинского массива. По химическому составу является промежуточной разновидностью между ильменорутилом и стрюверитом (табл. 3) при небольшом преобладании содержаний ниобия над танталом; сумма содержаний этих элементов превышает 25 мас. %. Кроме того, в рутиле отмечены повышенные концентрации олова (до 1.5 мас. %).

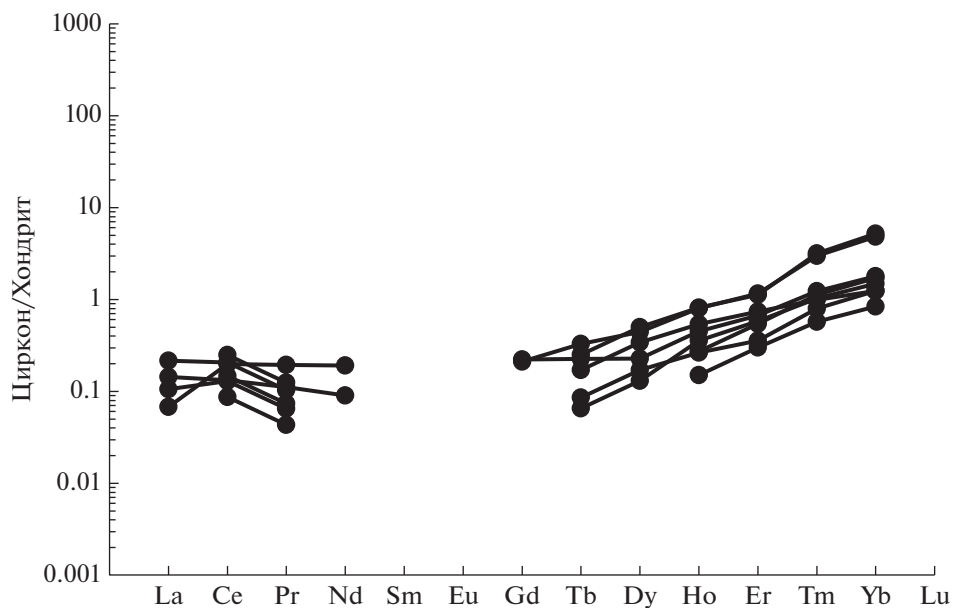


Рис. 4. Спектр REE в цирконе из редкометалльных гранитов Зашихинского массива. Нормировка содержания выполнена относительно C1 хондрита (McDonough, Sun, 1995).

Fig. 4. Chondrite-normalized (McDonough, Sun, 1995) REE distribution patterns of zircons from rare-metal granites of the Zashikhinsky massif.

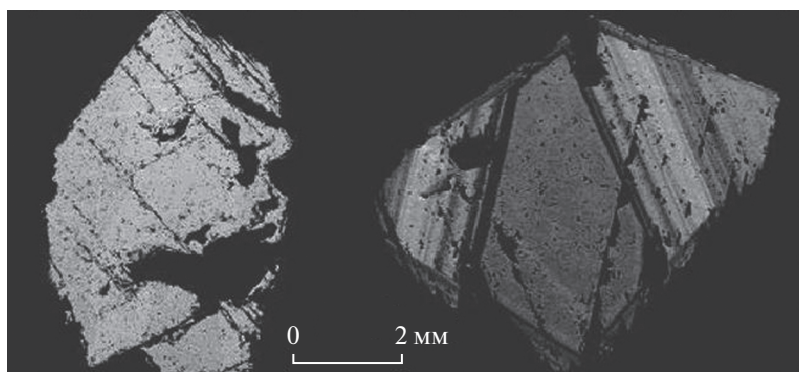


Рис. 5. Ксенотим из пород Зашихинского массива.

Fig. 5. Xenotime from rocks of the Zashikhinsky massif.

Гагаринит-(Y) — редкий фторид, содержащийся в щелочных гранитах и концентрирующий заметную долю иттрия и редкоземельных элементов. Кроме Зашихинского массива, гагаринит встречен в редкометалльных гранитах Катугинского массива, Забайкалье (Архангельская и др., 2012; Gladkochub et al., 2017), Улуг-Танзек, Восточная Тыва (Гречищев и др., 2010), Верхнее Эспе, Казахстан (Степанов, Северов, 1961; Байсалова, 2018), Питинга, Бразилия (Bastos, Pereira, 2009), Стрейндж-Лейк, Канада (Salvi, Williams-Jones, 1991).

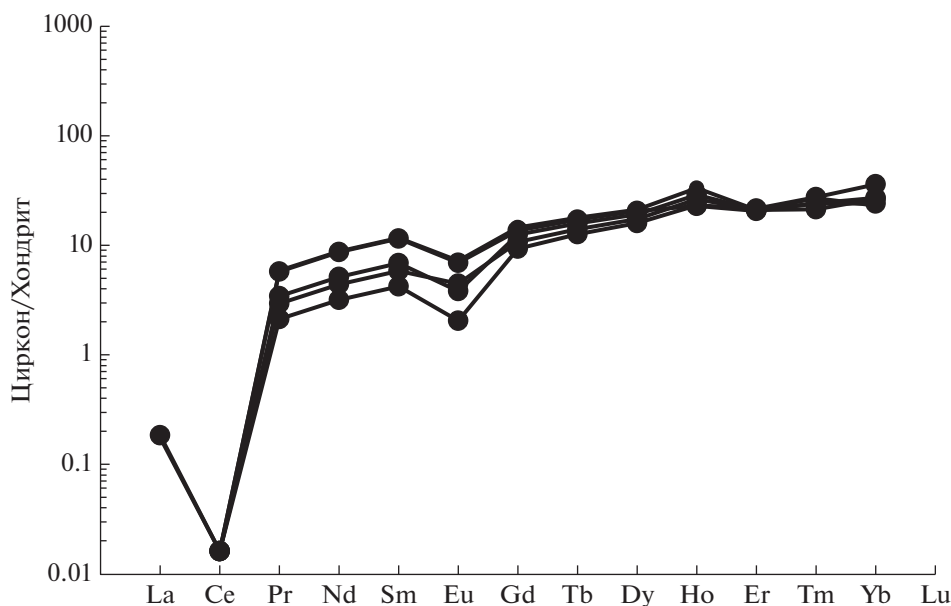


Рис. 6. Спектр REE в ксенотиме из редкометалльных гранитов Зашихинского массива. Нормировка содержаний выполнена относительно C1 хондрита (McDonough, Sun, 1995).

Fig. 6. Chondrite-normalized (McDonough, Sun, 1995) REE distribution patterns of xenotime from rare-metal granites of the Zashikhinsky massif.

По данным микроскопических наблюдений гагаринит приурочен к межзерненным границам породообразующих минералов и образует вкрапленность зерен удлиненной и неправильной формы (рис. 7). В шлифах гагаринит отличается высоким положительным рельефом и сильным двупреломлением. В гранитах массива минерал находится в ассоциации с криолитом, флюоритом, колумбитом, слюдами. Его содержание в породе не превышает 0.01%.

По сравнению с теоретической формулой (Степанов, Северов, 1961), гагаринит из гранитов Зашихинского массива отличается несколько пониженным содержанием CaO (8.65–11.62 мас. %) и повышенными содержаниями Na_2O (10.41–10.64 мас. %) и Y_2O_3 (40.87–44.00 мас. %) (табл. 3). Помимо значительной концентрации иттрия, для этого минерала характерны повышенные содержания MREE и HREE: Gd (1.49–1.70 мас. %), Dy (2.98–4.05 мас. %), Er (1.45–2.65 мас. %), Yb (0.52–1.64 мас. %), благодаря чему спектры редкоземельных элементов имеют положительный наклон (рис. 8).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описанный парагенезис редкометалльных минералов характерен для всех фациальных разновидностей гранитов, возникших при последовательной дифференциации магмы: от ранней амфиболсодержащей кварц-микроклин-альбитовой фации до завершающей кварц-альбитовой. В этом ряду наблюдаются отличия только в содержаниях редкометалльных минералов.

По содержаниям Ta, Li, Rb, Be, F руды месторождения приближаются к плюмазитовым танталоносным литий-фтористым гранитам (Владыкин, 1983). Как известно, в состав Li-F гранитов с коэффициентом агапитности (Ka), не превышающим 1.0, входят колумбит (главный минерал-концентратор тантала и ниобия), топаз (основной концентратор фтора), литиевые слюды (концентраторы лития). На поздних этапах

Таблица 3. Химический состав рудных минералов (мас. %) из пород Зашихинского массива
Table 3. Composition of ore minerals (wt %) from rocks of the Zashikhinsky massif

Компоненты	Ксенотим					Ниобиевый рутил		Гагаринит	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	0.11	0.16	0.14	0.06	0.01	—	—	0.04	0.02
TiO ₂	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	61.90	64.77	0.00	0.01
Al ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.05	0.08	0.00	0.00
FeO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	7.73	7.92	0.19	0.10
MnO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
MgO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
ZnO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	—	—	—	—
CaO	0.03	0.07	0.03	0.03	0.03	—	—	8.65	11.62
Na ₂ O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	—	—	10.64	10.41
K ₂ O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	—	—	0.12	0.13
BaO	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00
SrO	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	—	—	0.00	0.03
PbO	0.27	0.28	0.23	0.21	0.27	—	—	0.29	0.36
P ₂ O ₅	36.68	36.70	37.09	37.15	37.43	—	—	—	—
SnO ₂	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	1.44	1.22	—	—
Nb ₂ O ₅	0.02	0.08	0.02	0.00	0.01	15.01	17.74	—	—
Ta ₂ O ₅	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	13.54	8.41	—	—
Y ₂ O ₃	43.07	41.77	41.47	43.18	43.03	—	—	40.87	44.00
La ₂ O ₃	0.00	0.00	0.04	0.00	0.04	—	—	0.32	0.23
Ce ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	—	—	1.37	0.43
Nd ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	—	—	0.90	0.70
Sm ₂ O ₃	0.87	1.72	1.74	1.02	0.63	—	—	0.71	0.76
Eu ₂ O ₃	0.25	0.39	0.41	0.22	0.12	—	—	—	—
Gd ₂ O ₃	2.15	2.74	2.90	2.51	1.86	—	—	1.49	1.70
Dy ₂ O ₃	4.31	5.08	5.24	4.74	3.94	—	—	4.05	2.98
Ho ₂ O ₃	1.44	1.26	1.83	1.59	1.27	—	—	1.04	0.96
Er ₂ O ₃	3.39	3.31	3.39	3.37	3.48	—	—	2.65	1.45
Tm ₂ O ₃	0.60	0.60	0.67	0.53	0.68	—	—	0.23	0.16
Yb ₂ O ₃	4.39	3.91	3.72	4.31	5.84	—	—	1.64	0.52
HfO ₂	0.22	0.12	0.16	0.28	0.11	—	—	—	—
ThO ₂	0.72	0.46	0.40	0.14	0.48	—	—	0.10	0.07
UO ₂	0.13	0.08	0.10	0.04	0.07	—	—	—	—
F	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	—	—	36.91	37.79
Сумма	98.57	98.57	99.43	99.28	98.55	99.93	100.18	112.21	114.43
F = O	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	—	—	15.54	15.91
Сумма*	98.82	98.81	99.72	99.63	98.90	—	—	96.67	98.52

Таблица 3. Окончание

Компоненты	Ксенотим					Ниобиевый рутил		Гагаринит	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коэффициенты в формуле									
Si	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.73	0.00	0.00
Al						0.00	0.00		0.00
Fe						0.10	0.10	0.01	0.00
Mn						0.00	0.00		
Mg						0.00		0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.49	0.62
Na								1.08	1.01
K								0.01	0.01
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00
P	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05				
Sn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01		
Nb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.12		
Ta						0.06	0.03		
Y	0.76	0.74	0.73	0.76	0.75			1.15	1.18
La	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.01	0.00
Ce								0.03	0.01
Nd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.02	0.02
Sm	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01			0.01	0.01
Eu	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00				
Gd	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02			0.03	0.03
Dy	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04			0.07	0.05
Ho	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01			0.02	0.02
Er	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04			0.04	0.02
Tm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01			0.00	0.00
Yb	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06			0.03	0.01
F	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03			6.14	5.98

Примечание. * Сумма с пересчетом F = O. Коэффициенты в формулах рассчитаны на 2 катиона (ксенотим) и 3 катиона (ниобиевый рутил, гагаринит).

становления массивов подобных гранитов в небольших количествах кристаллизуется пироксид. В отличие от вышеописанных гранитов, породы Зашихинского массива представляют собой щелочные агапитовые граниты, в которых главным рудным минералом также является колумбит, находящийся в ассоциации с цирконом, арфведсонитом, эгирином, гагаринитом, криолитом. Арфведсонит и эгирин – типоморфные

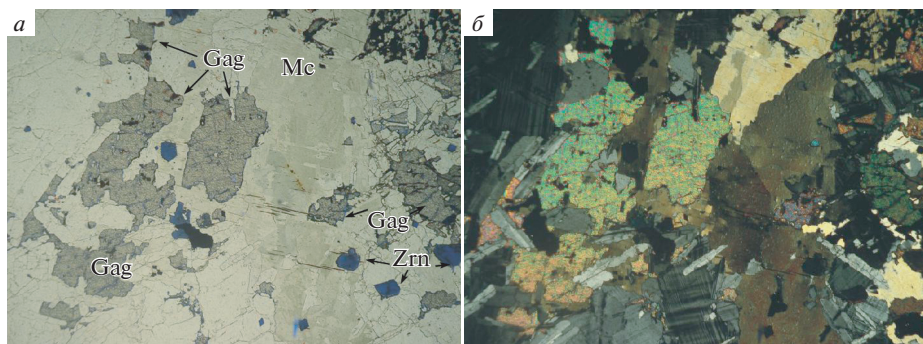


Рис. 7. Гагаринит из пород Зашихинского массива в проходящем свете (*а* — николи параллельны, *б* — николи скрещены). Объектив 4×. Gag — гагаринит, Zrn — циркон, Mc — слюда.

Fig. 7. Gagarinite from rocks of the Zashikhinsky massif.

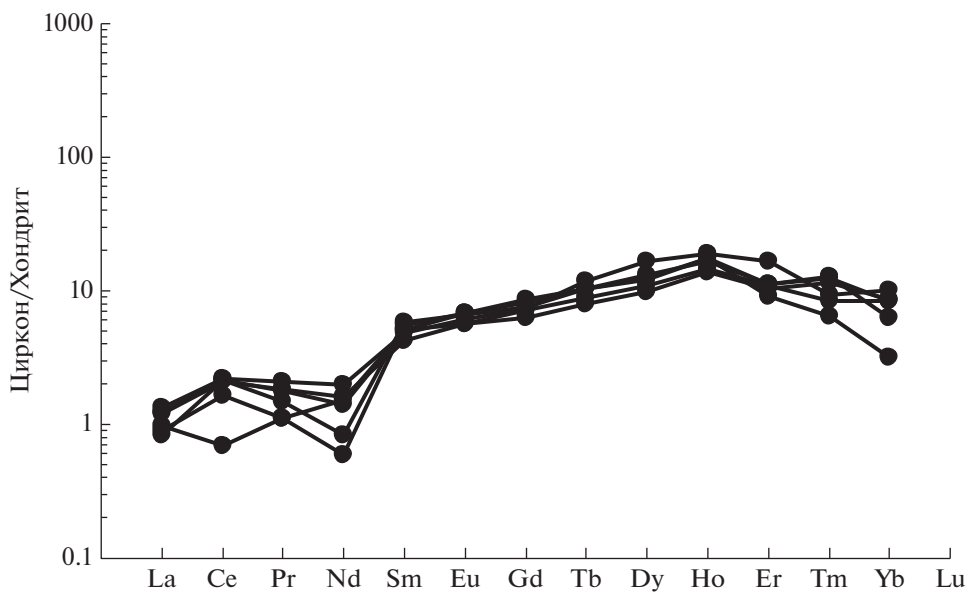


Рис. 8. Распределение REE в гагарините из редкометалльных гранитов Зашихинского массива. Нормировка содержаний выполнена относительно C1 хондрита (McDonough, Sun, 1995).

Fig. 8. Chondrite-normalized (McDonough, Sun, 1995) REE distribution patterns of gagarinite from rare-metal granites of the Zashikhinsky massif.

минералы щелочных пород, которые могут образовываться только в условиях высокой апгаитности при $Ka > 1.0$ (Владыкин, 1983). Известно, что для щелочных гранитов с $Ka > 1.0$ ведущая роль концентратора тантала и ниобия принадлежит пироксору, который находится в ассоциации с цирконом, арфведсонитом, гагаринитом и алюмофторидами (например, криолитом). Подобный минеральный состав характерен для апгаитовых гранитов Катугинского массива, близкого по рудно-формационному типу. В породах Зашихинского месторождения помимо слюд, характерных для апгаито-

вых щелочных гранитов (полилитонита, литиевого лепидомелана), обнаружены мусковит, лепидолит, протолитонит (Архангельская и др., 2012), то есть типичные минералы литий-фтористых гранитов. Также в экзоконтактовых зонах Зашихинского месторождения найдены онгонитоподобные дайки (Дергачев, Анникова, 1993). Как известно, онгониты выступают субвулканическими аналогами литий-фтористых гранитов (Коваленко, Коваленко, 1976; Владыкин, 1983).

Таким образом, по минералогическим и геохимическим особенностям пород Зашихинского месторождения массив сложен гранитами, близкими по минеральным ассоциациям как к щелочным агапитовым разновидностям, так и к гранитам Li-F типа. По мнению В.И. Коваленко (1977), агапитовые и Li-F граниты кристаллизуются из гранитовых магм разных геохимических типов. Эти две разновидности гранитов не встречаются в пределах одного редкометалльного массива. На основе приведенных данных можно заключить, что Зашихинское месторождение образовано из магмы “переходного состава”, характеризующейся минеральными парагенезисами, промежуточными между парагенезисами щелочных агапитовых и литий-фтористых гранитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зашихинский массив сложен щелочными редкометалльными агапитовыми гранитами. Образование уникальной редкометалльной минерализации связано с процессами длительной кристаллизационной дифференциации расплава и закономерным накоплением несовместимых элементов. Главные рудные минералы: колумбит и ниобиевый рутил (концентраторы тантала и ниобия), циркон и циртолит (концентраторы циркония, иттрия, гафния), гагаринит и ксенотим (концентраторы элементов иттриевой группы) — характеризуются высокими содержаниями редких и редкоземельных элементов, демонстрируют спектры REE — типичные для минералов магматического происхождения, встречаются во всех фациальных разновидностях щелочных гранитов Зашихинского месторождения. Петрохимические и минералогические особенности пород Зашихинского массива свидетельствуют о том, что они образовались из магмы “переходного состава” и характеризуются минеральными парагенезисами, промежуточными между парагенезисами щелочных агапитовых и литий-фтористых гранитов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00261_а, гранта РНФ № 21-17-00015, интеграционного проекта ИНЦ СО РАН (блок 1.4), государственного задания по проекту IX.129.1.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алымова Н.В. Металлогеническая специализация и рудоносность щелочных редкометалльных гранитов Зашихинского месторождения (Иркутская область) // Изв. Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. **2016.** № 2(55). С. 9–20.

Архангельская В.В., Рябцев В.В., Шурига Т.Н. Геологическое строение и минералогия месторождений тантала России. М.: ВИМС, **2012.** 191 с.

Архангельская В.В., Шурига Т.Н. Геологическое строение, зональность и оруденение Зашихинского тантал-ниобиевого месторождения // Отечественная геология. **1997.** № 5. С. 7–10.

Байсалова А.О. Особенности метасоматических процессов редкометалльных проявлений гранитного массива Акжайлутас и сопредельных районов. Дисс. ... докт. философ. (Ph.D.). Казахстан: Алматы, **2018.** 164 с.

Бескин С.М. Геология и индикаторная геохимия тантал-ниобиевых месторождений России (редкометалльные граниты). Москва: Научный мир, **2014.** 112 с.

Владыкин Н.В. Минералого-геохимические особенности редкометалльных гранитоидов Монголии. Новосибирск: Наука, **1983.** 200 с.

Владыкин Н.В., Алымова Н.В., Перфильев В.В. Геохимические особенности редкометалльных гранитов Зашихинского массива, Восточный Саян // Петрология. **2016.** Т. 24. № 5. С. 554–568.

Гречищев О.К., Жмодик С.М., Шербов Б.Л. Редкометалльное месторождение Улуг-Танзек (Тува, Россия). Новосибирск: Академическое издательство “Гео”, **2010.** 195 с.

Дергачев В.Б., Анникова И.Ю. Онгонитоподобные дайки Зашихинского месторождения (Восточные Саяны) // Доклады РАН. **1993.** Т. 332. № 5. С. 614–616.

Зарайский Г.П., Аксюк А.М., Девятова В.Н., Удоратина О.В., Чевычелов В.Ю. Цирконий-гафниевый индикатор фракционирования редкометалльных гранитов // Петрология. **2009**. Т. 17. № 1. С. 28–50.

Коваленко В.И. Петрология и геохимия редкометалльных гранитоидов. Новосибирск: Наука, **1977**. 205 с.

Коваленко В.И., Коваленко Н.И. Онгониты – субвулканические аналоги редкометалльных литий-фтористых гранитов. Труды совместной Советско-Монгольской экспедиции, **1976**. Вып. 15. 128 с.

Кудрин В.С., Шурига Т.Н. Российский опыт открытия уникальных и крупных комплексных редкометалльных (Ta, Nb, Y, TR, Zr) месторождений в щелочных кварц-альбит-микроклиновых метасоматитах и пути его реализации в современных условиях / Мат. конф. “Крупные и уникальные месторождения редких и благородных металлов”. Санкт-Петербург: Горный институт, **1998**. С. 79–84.

Машковцев Г.А., Быховский Л.З., Рогожин А.А., Темнов А.В. Перспективы рационального освоения комплексных ниобий-тантал-редкометалльных месторождений России // Разведка и охрана недр. **2011**. № 6. С. 9–13.

Сорохтина Н.В., Козарко Л.Н., Шпаченко А.К., Сенин В.Г. Состав и условия кристаллизации циркона из редкометалльных руд массива Гремяха-Вырмес, Кольский п-ов // Геохимия. **2016**. № 12. С. 1076–1090.

Степанов А.В., Северов Э.А. Гагаринит – новый редкоземельный минерал // Докл. АН СССР. **1961**. Т. 141. № 4. С. 954–957.

Ярмолюк В.В., Кузьмин М.И. Позднепалеозойский и раннемезозойский редкометалльный магматизм Центральной Азии: этапы, области и обстановки формирования // Геол. рудн. месторождений. **2012**. Т. 54. № 5. С. 375–399.

Ярмолюк В.В., Лыхин Д.А., Козловский А.М., Никифоров А.В., Травин А.В. Состав, источники и механизмы формирования редкометалльных гранитоидов позднепалеозойской Восточно-Саянской зоны щелочного магматизма (на примере массива Улан-Тологой) // Петрология. **2016**. Т. 24. № 5. С. 515–536.

Ярмолюк В.В., Лыхин Д.А., Шурига Т.Н., Воронцов А.А., Сугоракова А.М. Возраст, состав пород, руд и геологическое положение бериллиевого месторождения Снежное: к обоснованию позднепалеозойской Восточно-Саянской редкометалльной зоны (Россия) // Геол. рудн. месторождений. **2011**. Т. 53. № 5. С. 438–449.

The Composition of Ore-Forming Minerals in Rare-Metal Alkaline Granites of the Zashikhinsky Massif (Irkutsk region)

N. V. Alymova^a, N. V. Vladykin^a

^aVinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch RAS, Irkutsk, Russia

*e-mail: alymova@igc.irk.ru

The Zashikhinsky alkaline-granite massif, with the unique Ta–Nb–Zr–REE ore deposit, is located in the Irkutsk region and associates with the Late-Paleozoic East Sayan zone of rare-metal magmatism. Three facial varieties of granites were identified according to their differentiation and ore-bearing potential. These granite varieties include: (1) amphibole-bearing quartz-microcline-albite facies, (2) quartz-albite-microcline granites, (3) quartz-albite granites altered to albitites. These rocks show high concentrations of heavy rare earth elements and significant Nb/Ta ratios. Minerals, which concentrate rare elements, are represented by columbite, niobium rutile, zircon, xenotimum, and gagarinite. The long-term crystallization differentiation of the melt with a accumulation of inconsistent elements contributed to formation of rare-metal mineralization. Enrichment of granites in REE, Zr, Nb, and Ta testifies for initial enrichment of alkaline-granitic melts with ore components. Rocks of the Zashikhinsky massif originated from the magma of “transitional composition” and are characterized by mineral parageneses which are intermediate between parageneses of alkaline apgaites and Li-F granites.

Keywords: columbite, mineral concentrators, rare elements, rare-metal granites, Zashikhinsky deposit, East Sayan

REFERENCES

Alymova N.V. Metallogenic trend and ore content of alkaline rare-metal granites in the Zashikhinsky deposit (Irkutsk region). *Bull. Siberian Branch Earth Sci. Section Russian Acad. Natural Sci. Geol. prospect. explorat. ore deposits*. **2016**. N 2(55). P. 9–20 (in Russian).

Arhangel'skaya V.V., Ryabcev V.V., Shuriga T.N. Geological structure and mineralogy of the tantalum deposits of Russia. Moscow: VIMS, **2012**. 191 p.

Arhangel'skaya V.V., Shuriga T.N. Geological features, zoning, and mineralization of the Zashikhinsky tantalum-niobium deposit. *Native Geology*. **1997**. N 5. P. 7–10 (in Russian).

Baisalova A.O. Features of metasomatic processes of rare-metal manifestations of the Akzhailyautas granite massif and adjacent areas. Ph.D. dissertation. Kazakhstan: Almaty, **2018**. 164 p. (in Russian).

Bastos N., Pereira V. The world-class Sn, Nb, Ta, F (Y, REE, Li) deposit and the massive cryolite associated with the albite-enriched facies of the Madeira A-type granite, Pitinga mining district, Amazonas State, Brazil. *Canad. Miner.* **2009**. Vol. 47. N 6. P. 1329–1357.

Beskin C.M. Geology and indicator geochemistry of tantalum-niobium deposits in Russia (rare-metal granites). Moscow: Scientific World, **2014**. 112 p. (in Russian).

Dergachev V.B., Annikova I.Yu. Ongonite-like dikes of the Zashikhinskoe deposit (Eastern Sayan). *Dokl. Russian Acad. Sci.* **1993**. Vol. 332. N 5. P. 614–616 (in Russian).

Frost C.D., Frost B.R. On ferroan (A-type) granitoids: their compositional variability and modes of origin. *J. Petrol.* **2011**. Vol. 52. P. 39–55.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Sklyarova E.V., Kotov A.B., Vladyskin N.V., Pisarevsky S.A., Larin A.M., Salnikova E.B., Saveleva V.B., Sharygin V.V., Starikova A.E., Tolmacheva E.V., Velikoslavinsky S.D., Mazukabzova A.M., Bazarova E.P., Kovach V.P., Zagornaya N.Yu., Alymova N.V., Khromova E.A. The unique Katugin rare-metal deposit (southern Siberia): Constraints on age and genesis. *Ore Geol. Reviews*. **2017**. N 91. P. 246–263.

Grechishchev O.K., Zhmodik S.M., Scherbov B.L. Rare metal deposit Ulug-Tanzek (Tuva, Russia). Novosibirsk: Academic Publishing House Geo, **2010**. 195 p. (in Russian).

Kovalenko V.I. Petrology and geochemistry of rare-metal granites. Novosibirsk: Nauka, **1977**. 205 p. (in Russian).

Kovalenko V.I., Kovalenko N.I. Ongonites – subvolcanic analogues of rare-metal lithium-fluoride granites. *Proc. Joint Soviet-Mongolian expedition*. **1976**. Vol. 15. 128 p. (in Russian).

Kudrin V.S., Shuriga T.N. Russian experience in discovering unique and large complex rare-metal (Ta, Nb, Y, TR, Zr) deposits in alkaline quartz-albite-microcline metasomatites and ways of its implementation in modern conditions. In: *Mat. Conf. "Large and unique deposits of rare and noble metals"*. Saint Petersburg: Mining Institute, **1998**. P. 79–84 (in Russian).

Mashkovtsev G.A., Bykhovsky L.Z., Rogozhin A.A., Temnov A.V. Prospects for the rational development of complex niobium-tantalum-rare ore deposits of Russia. *Exploration and conservation of mineral resources*. **2011**. N 6. P. 9–13 (in Russian).

McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth. *Chem. Geol.* **1995**. N 120. P. 223–253.

Salvi S., Williams-Jones A.E. Orthomagmatic fluid inclusions in the strange lake complex, Quebec/Labrador: Implications for Y, Zr and REE concentration. *Plinius*. **1991**. N 5. P. 189–190.

Sorokhtina N.V., Kogarko L.N., Shpachenko A.K., Senin V.G. Composition and conditions of crystallization of the rare-metal ores of the Greymykh-Vyrmes massif, Kola Peninsula. *Geochem. Int.* **2016**. Vol. 54. N 12. P. 1035–1048.

Stepanov A.V., Severov E.A. Gagarinite – a new rare-earth mineral. *Dokl. USSR Acad. Sci.* **1961**. Vol. 141. N 4. P. 954–957.

Vladyskin N.V. Mineralogical and geochemical features of Mongolian rare-metal granitoids. Novosibirsk: Nauka, **1983**. 200 p. (in Russian).

Vladyskin N.V., Alymova N.V., Perfil'ev V.V. Geochemical features of rare-metal granites of the Zashikhinsky Massif, East Sayan. *Petrology*. **2016**. Vol. 24. N 5. P. 512–525.

Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical, characteristics, discrimination, and petrogenesis. *Contrib. Miner. Petrol.* **1987**. Vol. 95. P. 407–419.

Yarmolyuk V.V., Kozlovsky A.M., Nikiforov A.V., Travin A.V., Lykhin D.A. Composition, sources, and mechanisms of origin of rare-metal granitoids in the Late Paleozoic Eastern Sayan zone of alkaline magmatism: A case study of the Ulaan Tolgoi massif. *Petrology*. **2016**. Vol. 24. N 5. P. 477–496.

Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I. Late Paleozoic and Early Mesozoic rare-metal magmatism of Central Asia: Stages, provinces, and formation settings. *Geol. Ore Deposits*. **2012**. Vol. 54. N 5. P. 375–399.

Yarmolyuk V.V., Lykhin D.A., Shuriga T.N., Vorontsov A.A., Sugorakova A.M. Age, composition of rocks and geological setting of the Snezhnoe beryllium deposit: Substantiation of the Late Paleozoic East Sayan rare-metal zone, Russia. *Geol. Ore Deposits*. **2011**. Vol. 53. N 5. P. 390–400.

Zaraisky G.P., Aksyuk A.M., Devyatova V.N., Chevychelov V.Yu., Udoratina O.V. The Zr/Hf ratio as a fractionation indicator of rare-metal granites. *Petrology*. **2009**. Vol. 17. N 1. P. 25–45.