



УДК 552.331.1:571.53

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.25.15>

Рудоносность редкометалльных гранитов Зашихинского массива (Иркутская область) и минералы-концентраторы Ta, Nb, Th, Zr, TR

Н. В. Алымова

Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск

Н. В. Владыкин

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск
Иркутский научный центр СО РАН, г. Иркутск*

Аннотация. Зашихинский массив (Иркутская область) приурочен к позднепалеозойской Восточно-Саянской зоне редкометалльного щелочно-гранитного магматизма. Представлены новые данные о минерально-петрографическом, химическом и микроэлементном составе пород массива. Выделены три фациальные разновидности пород массива по степени дифференцированности и рудоносности. Самые ранние амфиболсодержащие микроклин-альбитовые граниты сменяются лейкократовыми кварц-альбитовыми, переходящими в существенно альбитовые разновидности. Альбититы являются самыми редкометалльными породами месторождения, содержания REE – свыше 10 000 мкг/г и местами достигают 15 440 мкг/г. На графиках парных корреляций породообразующих и редких элементов четкие тренды составов могут свидетельствовать о происхождении всех фациальных разновидностей пород массива из единой первичной магмы в процессе ее дифференциации от ранних фаций к поздним. Спектры редкоземельных элементов всех фаций щелочных пород однотипны и отличаются только общими их содержаниями. Спайдер-диаграммы пород также близки и различаются только небольшими вариациями размеров аномалий. Полученные геологические, петрографические и геохимические данные свидетельствуют о магматическом генезисе редкометалльных гранитов и альбититов. Главными минералами-концентраторами редких элементов в породах и рудах изучаемого массива являются колумбит, стрюверит-ильменорутил, циркон и ксенотим. В гранитах массива нами не зафиксировано метасоматической зональности и замещения одних минералов другими, характерных для пород метасоматического происхождения.

Ключевые слова: щелочные граниты, рудоносность, редкометалльные месторождения, Зашихинский массив, минералы-концентраторы.

Для цитирования: Алымова Н. В., Владыкин Н. В. Рудоносность редкометалльных гранитов Зашихинского массива (Иркутская область) и минералы-концентраторы Ta, Nb, Th, Zr, TR // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 25. С. 15–29. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.25.15>

Введение

С проявлениями щелочно-гранитного магматизма связаны уникальные месторождения с комплексной (тантал-ниобиевой, циркониевой, редкоземельной, бериллиевой, литиевой и др.) редкометалльной минерализацией.

По масштабам накопления Ta, Nb, Zr, Y, REE такие щелочные гранитные массивы – весьма крупные объекты, имеющие важное практическое значение в минерально-сырьевой базе различных стран, в том числе и в России [Petrology and textural ... , 2003; Distribution and evolution ... , 2011; Sinclair W. D., Jambor J. L., Birkett T. C., 1992; The Khaldzan-Buregtei ... , 2004; Geochronology, geochemistry and ... , 2014; The unigue Katugin ... , 2017]. К подобным массивам относится Зашихинское месторождение (Иркутская область), возникшее в пределах позднепалеозойской Восточно-Саянской зоны редкометалльного щелочно-гранитного магматизма. Зона имеет форму пояса, вытянутого в северо-восточном направлении вдоль западной границы Тувино-Монгольского микроконтинента. На продолжении этого пояса, к северу за Главным Саянским разломом, находится Зашихинское месторождение [Age, composition of ... , 2011]. Восточно-Саянская зона возникла в периферической части Баргузинской магматической провинции [Там же], главными составляющими последней являются крупнейший Ангаро-Витимский гранитоидный батолит и ограничивающие его с флангов рифтовые зоны (Удино-Витимская, Сыннырская, Восточно-Саянская, Сайженская) [Ярмолюк, Кузьмин, 2012]. Образование Баргузинской магматической провинции и Восточно-Саянской магматической зоны связывается с формированием мантийного плюма в конце карбона – начале перми [Age, composition of ... , 2011].

Зашихинский массив является уникальным месторождением редкометалльного сырья с самым высоким содержанием тантала в России [Перспективы рационального освоения ... , 2011]. Руды месторождения относятся к тантал-ниобиевому промышленному типу. Кроме того, они обогащены редкоземельными элементами иттриевой группы, наиболее востребованной в современных технологиях. Существующие представления о происхождении Зашихинского месторождения носят дискуссионный характер. Многие исследователи относили породы массива и ассоциирующее с ними оруденение к метасоматитам [Архангельская, Шурига, 1997; Архангельская, Рябцев, Шурига, 2012]. По мнению других авторов, породы представляют собой типичные щелочные редкометалльные агпаитовые граниты с рядом минералогических и петрохимических особенностей, свойственных магматическим породам [Kostitsyn, Altukhov, 2004; Age, composition of ... , 2011; Vladykin, Alymova, Perfil'ev, 2016; Composition, sources, and ... , 2016].

Аналитические методы исследования

Аналитические исследования пород и минералов Зашихинского массива проводились с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН и Байкальского центра нанотехнологий ИрНИТУ (г. Иркутск): химический состав пород был определен с помощью рентгенофлюоресцентного силикатного анализа на многоканальном рентгеновском спектрометре СРМ-25; щелочные элементы (K, Na, Li, Rb, Cs) установлены методом фотометрии пламени (прибор – атомно-эмиссионный пламенный спектрофотометр ДФС-12, методика – СТП

ИГХ-009-07). Определение состава минералов редкометалльных гранитов проведено с помощью рентгеновского электронно-зондового микроанализатора JXA-8200, Jeol. Ltd. (Япония), снабженного растровым электронным микроскопом высокого разрешения, энергодисперсионным спектрометром (EDS) с SiLi-детектором с разрешением 133 eV и пятью спектрометрами с волновой дисперсией (WDS).

Геологическое положение и строение массива

Зашихинский массив щелочных редкометалльных гранитоидов расположен в Нижнеудинском районе Иркутской области в Восточном Саяне. Он тяготеет к зоне влияния Главного Саянского разлома – краевого шва Сибирской платформы. Разлом трассируется выходами осадочных, вулканогенных, интрузивно-формационных комплексов широкого возрастного диапазона. Одним из важнейших элементов строения этой зоны является пояс умеренно-щелочных и щелочных гранитоидов и комагматичных им вулканитам палеозойского возраста, известных как огнитский интрузивный комплекс и верхненерхинская свита.

Массив сложен щелочными гранитами, обогащенными редкими элементами, образующими обособленное тело, которое внедрено в Хайламинский массив гранитоидов среднепалеозойского огнитского комплекса [Архангельская, Рябцев, Шурига, 2012]. В плане массив имеет эллипсовидную, вытянутую в северо-западном направлении форму, его площадь на современном срезе составляет около 1,3 км² (рис. 1). Глубина эрозионного среза – около 300 м.

Возраст гранитов Зашихинского массива геохронологическими методами пока не установлен. Косвенными показателями его возраста являются приуроченность массива к Восточно-Саянской зоне редкометалльных гранитоидов, формирование которой ограничивается интервалом 305–290 млн лет [Age, composition of ... , 2011] и внедрением в гранитоиды Хайламинского массива, возраст которого был оценен в 261±4 млн лет (Rb–Sr-исследования) [Kostitsyn, Altukhov, 2004]. Исходя из этого, можно предположить пермский возраст редкометалльных гранитов Зашихинского месторождения.

На основе минерально-петрографического исследования состава пород и содержаний полезных компонентов выделены три фациальные разновидности гранитов Зашихинского массива по степени дифференцированности и рудоносности: I – амфиболсодержащие кварц-микроклин-альбитовые с порфиоровыми выделениями гороховидного кварца и удлиненными призмами арфведсонита (9 валовых проб); II – лейкократовые кварц-альбит-микроклиновые с гороховидными вкрапленниками кварца и мелкими зернами в основной массе пород (37 валовых проб); III – лейкократовые кварц-альбитовые, переходящие в альбититы (18 валовых проб).

Третья фация гранитов наиболее редкометалльная и является главным рудным участком Зашихинского массива. Богатые руды месторождения (средние содержания Nb₂O₅ = 0,03 мас. % и Ta₂O₅ = 0,027 мас. %) развиты на

площади $30 \times 1000 \text{ м}^2$. Они слагают тело сложно-пластообразной формы со средней мощностью около 150 м, круто (под углом больше $40\text{--}50^\circ$) падающее к северу. Вниз по разрезу массива они сменяются породами с более низкими концентрациями Ta и Nb, в которых содержатся линзы и блоки богатых руд [Архангельская, Шурига, 1997].

Выделенную последовательность фациальных разновидностей пород массива мы связываем с магматической дифференциацией щелочно-гранитных расплавов, обогащенных флюидными компонентами.

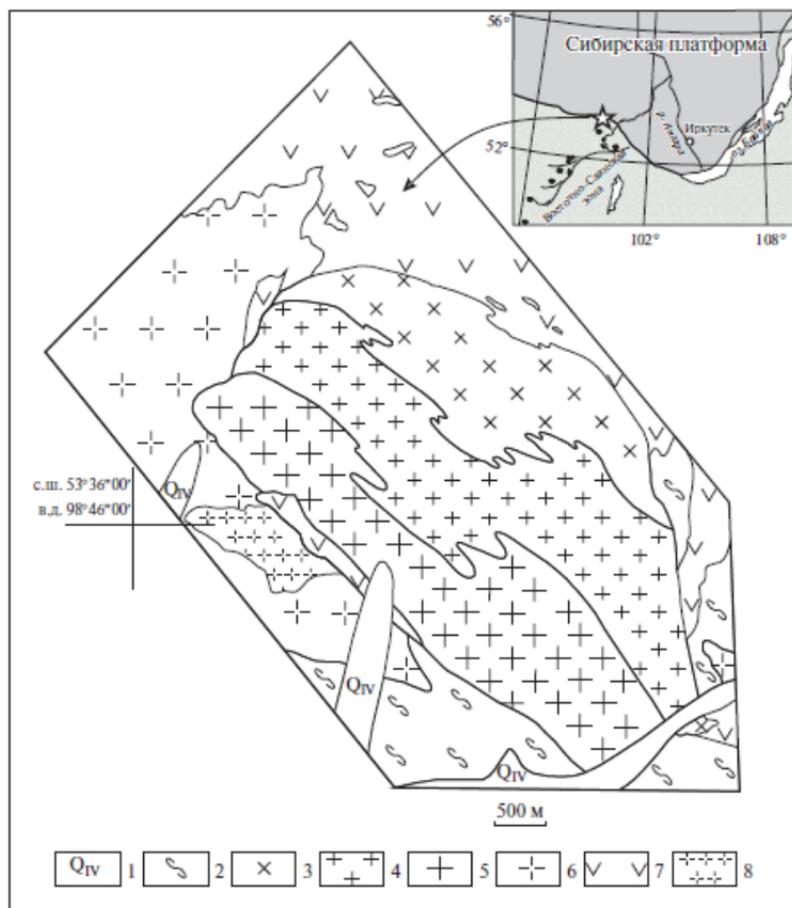


Рис. 1. Схема геологического строения Зашихинского массива [Архангельская, Рябцев, Шурига, 2012] с уточнениями авторов.

Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения (Q_{IV}). Зашихинский массив: 3 – кварц-альбитовые граниты и альбититы массива (фация III), 4 – лейкократовые кварц-альбит-микроклиновые граниты (фация II), 5 – амфиболсодержащие кварц-микроклин-альбитовые граниты (фация I). Среднепалеозойские интрузивные породы: 6 – пегматоидные амфиболовые граниты, 7 – граниты, сиениты, граносиениты огнитского комплекса (D_2og), 8 – диориты хойто-окинского комплекса (Pz_1ho). Раннепротерозойские интрузивные породы: 2 – сланцы, микрогнейсы, амфиболиты бирюсинской свиты (PR_1br_2)

Петрохимические и геохимические особенности пород

Редкометалльные породы Зашихинского месторождения относятся к агпаитовым щелочным гранитам и характеризуются высокими содержаниями большинства некогерентных элементов. Граниты массива отличаются повышенными содержаниями щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ до 12,68 мас. %), преимущественно натриевым типом щелочности ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$) и высокими значениями коэффициента агпаитности (K_a) 1,0–1,2. Кроме того, граниты массива отличаются повышенными содержаниями Rb, Li, Y, Zr, Hf, Ta, Nb, Th, U, Zn, Ga, REE и низкими содержаниями Ca, Mg, Al, P, Ba, Sr. Четкие линейные зависимости на графиках парных корреляций породообразующих и редких элементов пород [Vladykin, Alymova, Perfil'ev, 2016] свидетельствуют об их едином происхождении в процессе дифференциации щелочно-гранитной магмы и последовательном их обогащении соответствующими редкими элементами при переходе от первой фациальной группы к третьей.

Одинаковой конфигурацией линий в REE-спектрах отражается поведение редкоземельных элементов всех фаций щелочных гранитов массива (рис. 2, А). Редкометалльные граниты Зашихинского массива резко обогащены тяжелыми редкими землями ($\text{La}/\text{Yb} \sim 0,1$), что существенно выделяет их среди пород многих других массивов щелочных гранитов. Для спектра REE типичен глубокий европиевый минимум, что является показателем формирования всей серии пород массива в результате магматической дифференциации.

Спектры распределения редких элементов на спайдердиаграммах (рис. 2, Б) также сходны для пород всех трех фациальных разновидностей. Для спайдердиаграмм характерны отрицательные аномалии бария, стронция, урана, легких редкоземельных элементов, титана. Положительные аномалии характерны для тория, ниобия, тантала, свинца, циркония, гафния. Для тяжелых редкоземельных элементов и иттрия наблюдается положительный наклон линии спектра.

Минералогические особенности пород

Породообразующими минералами гранитов Зашихинского массива являются кварц, микроклин и альбит, вариации которых в различных фациях значительные. К второстепенным минералам относятся щелочной амфибол (арфведсонит) и пироксен (эгирин), слюды (лепидомелан, тайниолит, полилитонит), флюорит. Акцессорные минералы представлены колумбит-танталитом, пироксолом, минералами группы стрюверит-ильменорутил, ксенотимом, гагаринитом, минералами группы криолита, цирконом, торитом, карбонатами и сульфидами. В гранитах массива не зафиксировано метасоматической зональности и замещения одних минералов другими, характерных для пород метасоматического происхождения.

Минералами-концентраторами тантала, ниобия и других редких элементов в породах и рудах массива, представляющими основную практическую ценность при эксплуатации месторождения, являются колумбит, минералы группы стрюверит-ильменорутил, циркон, ксенотим, гагаринит, описание которых представлено ниже.

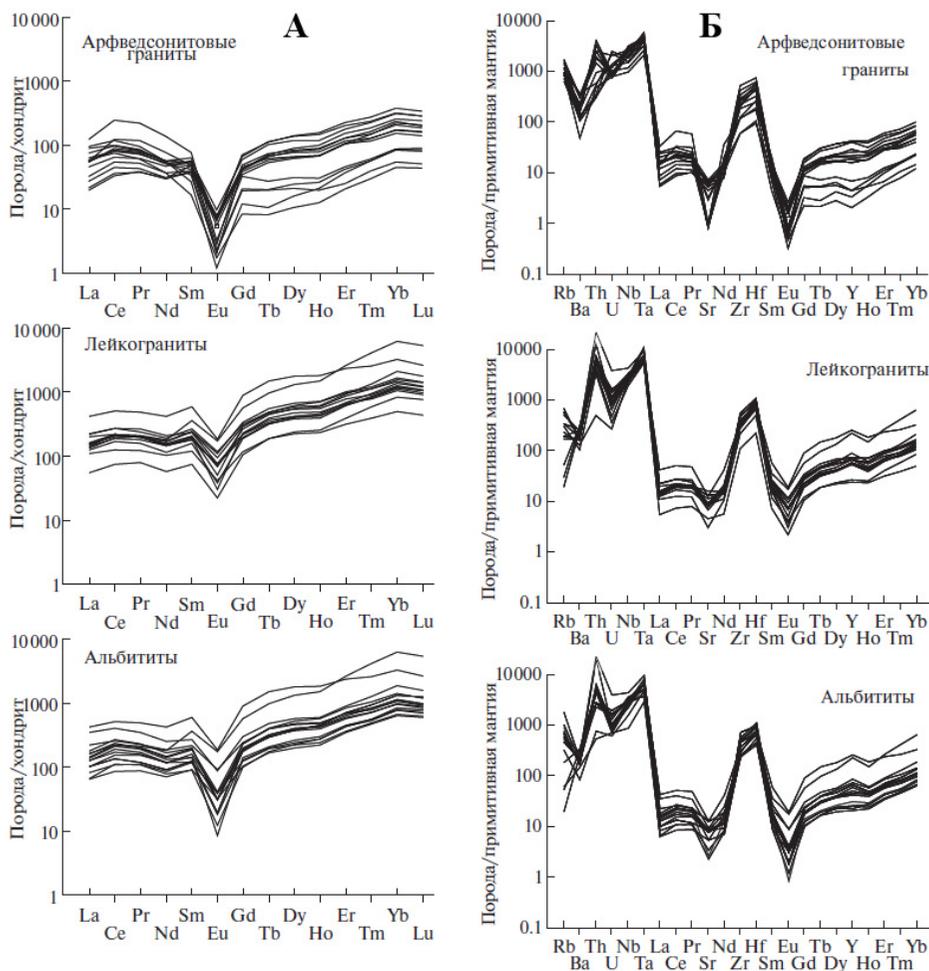


Рис. 2. Спектры редкоземельных элементов, нормированные по хондриту [Wakita, Schmitt, Rey, 1970] (А) и спайдер-диаграммы редких элементов, нормированные произведено к составу примитивной мантии по [Sun, McDonough, 1989] (Б) в гранитах массива

Колумбит является главным редкометалльным рудным минералом Зашихинского массива. Образует черные обособления (крупные – 2–5 мм и мелкие – менее 0,5 мм), иногда вытянутые кристаллы. Ранее [Архангельская, Рябцев, Шурига, 2012] выделялось несколько не вполне очевидных генераций колумбитов, нами были проведены исследования этого минерала из следующих выборок: 1) из альбититов и кварц-альбитовых гранитов; 2) из кварц-микроклин-альбитовых лейкогранитов; 3) из промышленного шлиха, представляющего смесь всех трех фациальных разновидностей гранитов; 4) из фракции мелких кристаллов, выделенных из кварц-микроклин-альбитовых пород.

Минералы группы колумбита из редкометалльных гранитов месторождения характеризуются значительными вариациями состава: MnO (0,38–12,06 мас. %), FeO_{total} (7,19–19,71 мас. %), Ta₂O₅ (1,85–18,94 мас. %), Nb₂O₅ (58,88–75,46 мас. %). Также отмечаются повышенные содержания SnO (до 0,41 мас. %) и пониженные UO₂ и ThO₂. Широкий диапазон химического состава колумбита, даже в пределах одного массива, характерен для колумбита редкометалльных гранитов (табл. 1).

Циркон – типичный аксессуарный минерал редкометалльных гранитоидов, содержание которого в породах Зашихинского массива достигает 7 %. Циркон играет значительную роль в балансе редких элементов, являясь главным концентратором циркония и гафния в щелочных гранитах. Минерал образует ограненные кристаллы дипирамидального облика, размером до 5 мм, нередко с включениями в центральной части зерен.

Встречаются также мелкие, полностью прозрачные, ограненные кристаллы. Химический состав циркона редкометалльных гранитов массива близок к теоретическому. Соотношения Zr и Si в них отвечают формульным значениям в составе минерала.

Таблица 1

Химический состав колумбитов в редкометалльных гранитах массива (мас. %)

Компоненты	1	2	3	4	5ц	5к	6	7	8
TiO ₂	0,46	1,75	3,19	2,72	0,67	0,73	3,26	1,80	1,50
FeO	7,92	14,76	19,71	19,86	8,20	7,19	19,37	15,65	16,81
MnO	12,06	4,58	0,62	0,38	11,42	12,00	1,64	3,62	3,52
MgO	0,00	0,00	0,17	0,20	0,05	0,00	0,00	0,01	0,12
Nb ₂ O ₅	75,28	58,88	68,02	61,81	75,46	73,23	69,36	59,18	69,80
Ta ₂ O ₅	4,50	18,75	8,32	14,87	1,85	6,01	6,60	18,94	7,47
SnO ₂	0,06	0,29	0,41	0,31	0,02	0,12	0,39	0,28	0,27
Ce ₂ O ₃	0,06	0,03	0,00	0,06	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01
Nd ₂ O ₃	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,16	0,17	0,00	0,00
Yb ₂ O ₃	0,01	0,09	0,00	0,00	0,06	0,26	0,00	0,01	0,00
ThO ₂	0,00	0,00	0,02	0,00	0,12	0,00	0,04	0,00	0,00
UO ₂	0,03	0,00	0,01	0,01	0,07	0,00	0,00	0,02	0,00
Сумма	100,38	99,41	100,47	100,22	97,92	99,72	100,83	99,51	99,50

Примечание. 1–4 – из альбититов (фашия III); 5ц, 5к, 6 – из кварц-микроклин-альбитовых лейкогранитов (фашия II); 7, 8 – из мелких кристаллов гранитов фашии II; 5ц – анализ из центральной части кристалла; 5к – анализ из краевой части. Состав минералов определен с помощью рентгеновского электронно-зондового микроанализатора (Институт геохимии СО РАН, аналитик – Суворова Л. Ф.)

Содержания HfO₂ в изученных цирконах – 3–4 мас. % при соотношении ZrO₂/HfO₂ 14–20. Для минерала характерны незначительные содержания Nb₂O₅ (менее 0,01 мас. %), Ta₂O₅ (0,01 мас. %) и повышенные концентрации Y₂O₃ (от 0,3 до 2 мас. %), Yb₂O₃ (от 0,3 до 0,8 мас. %), ThO₂ (до 1 мас. %), UO₂ (до 0,1 мас. %). Четкими индикаторами минералообразования цирконов массива являются концентрации в них ниобия, тантала и редкоземельных элементов (табл. 2).

В редкометалльных гранитах Зашихинского массива встречается разновидность циркона с небольшим содержанием UO_2 – циртолит. Циртолиты по составу отличаются от кристаллических цирконов, в них наблюдаются пониженные концентрации SiO_2 и ZrO_2 , скорее всего, из-за присутствия H_2O (табл. 2). Циртолит кристаллизуется в таких же формах, как и циркон, но непрозрачен и окрашен в коричневый цвет. Отмечается главным образом в парагенезисе с торитом и флюоритом. Для него характерны пониженные содержания HfO_2 (2,5–2,8 мас. %) при повышенном отношении $ZrO_2 / HfO_2 = 33$. Высокие содержания ThO_2 (2–3 мас. %), Y_2O_3 (до 3 мас. %) и Yb_2O_3 (0,6 мас. %) в циртолите, возможно, объясняются более поздней его кристаллизацией по сравнению с прозрачным цирконом и участием при его кристаллизации флюидной фазы – F и H_2O .

Таблица 2

Химический состав цирконов в редкометалльных гранитах массива (мас. %)

Компоненты	Циркон					Циртолит	
	1	2	3	4	5	1	2
SiO_2	31,41	30,71	31,76	30,37	31,31	25,81	27,58
TiO_2	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01
Al_2O_3	0,08	0,00	0,00	0,00	0,02	0,30	0,25
FeO	0,07	0,06	0,05	0,02	0,01	0,94	0,81
MnO	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,06
MgO	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00
CaO	0,00	0,07	0,01	0,01	0,01	0,80	0,89
Na_2O	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,05	0,04
K_2O	0,05	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02
SrO	0,13	0,04	0,09	0,09	0,16	0,12	0,27
ZrO_2	64,39	62,16	63,41	62,43	66,38	56,13	57,23
HfO_2	3,11	2,73	3,93	2,74	1,83	2,77	2,47
Nb_2O_5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ta_2O_5	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,02	0,08
P_2O_5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Y_2O_3	0,54	1,30	0,34	1,80	0,24	3,11	2,33
La_2O_3	0,02	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
Ce_2O_3	0,12	0,05	0,00	0,00	0,15	0,04	0,06
Nd_2O_3	0,09	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04
Sm_2O_3	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Eu_2O_3	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,01
Gd_2O_3	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	0,09	0,05
Dy_2O_3	0,06	0,12	0,04	0,19	0,00	0,27	0,22
Er_2O_3	0,11	0,18	0,06	0,20	0,05	0,18	0,17
Yb_2O_3	0,29	0,84	0,20	0,82	0,14	0,61	0,60
ThO_2	0,00	0,89	0,00	1,12	0,06	3,07	2,25
UO_2	0,05	0,11	0,04	0,14	0,00	0,09	0,21
PbO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	0,03	0,01	0,01	0,08	0,00	0,05	0,02
Сумма	100,46	99,27	100,05	100,04	100,44	100,24*	101,49*

Примечание. Минералы анализировались на микрозонде в ИГХ СО РАН (аналитик – Суворова Л. Ф.).

* Приведена сумма с учетом теоретического содержания 6 мас. % H_2O .

Ксенотим встречается во всех разновидностях гранитов Зашихинского месторождения в виде мелких желтовато-зеленоватых кристаллов с совершенной спайностью. Содержание легких редкоземельных элементов незначительное, менее 1 % (табл. 3). Вариации содержания средних редкоземельных элементов (самарий, гадолиний) – 1–3 мас. %, наиболее высокие концентрации в тяжелых редкоземельных элементах (диспрозий, иттербий) 3–6 мас. %. Содержания иттрия (41–43 мас. %) и фосфора (36–38 мас. %) отвечают формульному составу ксенотима. Кроме того, в минерале отмечается содержание тория (0,1–1,5 мас. %), урана (0,03–0,24 мас. %), свинца (0,2–0,3 мас. %).

Минералы группы *стрюверит-ильменорутил* образуют изометричные ограненные кристаллы с сильным алмазным блеском. Встречаются в различных фациях редкометалльных гранитов Зашихинского массива. По химическому составу являются промежуточной разновидностью между ильменорутилом и стрюверитом при близких содержаниях ниобия и тантала, в сумме превышающих 25 мас. %. Кроме того, в них отмечены концентрации олова до 1,5 мас. % (см. табл. 3).

Гагаринит – очень редкий фторид редкоземельных элементов, в настоящее время встречен только в некоторых массивах редкометалльных гранитов СП (Казахстан), Катугинское (Забайкалье), Зашихинское (Восточный Саян), Улуг-Танзек (Восточная Тыва). Минерал является очень важной рудой на тяжелые редкоземельные элементы. В Зашихинском массиве он обнаружен в аксессуарных количествах во многих шлифах, отличается большим положительным рельефом и сильным двупреломлением, как у карбонатов. Гагаринит кристаллизуется вместе с минералами группы криолита, флюоритом, колумбитом. В спектре редкоземельных элементов преобладают средние и тяжелые земли, содержание иттрия – 44–46 мас. %. Главными элементами гагаринита являются натрий, кальций, иттрий, фтор (см. табл. 3).

Связь редкометалльного оруденения с магматизмом – одна из ключевых проблем современной петрологии и геохимии. В 60–70-е гг. все редкометалльные проявления в гранитах считались метасоматическими, что позволило выделить особую группу «апогранитов» [Альбитизированные и грейзенизированные ... , 1962]. При детальном геолого-геохимическом исследовании работ по Li-F-гранитам Монголии был доказан их магматический генезис [Коваленко, 1977 и др.]. Открытие онгонитов, вулканических аналогов редкометалльных гранитов [Коваленко, Коваленко, 1976], послужило весомым доказательством в пользу магматической гипотезы образования последних. В результате термобарогеохимических исследований в минералах были выявлены расплавные включения, которые однозначно подтвердили магматический генезис редкометалльных гранитов и связанное с ними оруденение [Наумов, Коваленко, Владыкин, 1971; Andreeva, 2016; Volatile components ... , 2000; New data on ... , 2015]. Существенное обогащение щелочных гранитов Зашихинского массива несовместимыми элементами, вплоть до рудных концентраций, фтором, летучими компонентами, высокие значения в них коэффициентов агпаитности ($K_a > 1$) свидетельствуют о вы-

сокой степени дифференциации исходных щелочно-гранитных магм, специализированных в отношении Ta, Nb, Zr, REE. Возникновение уникальной редкометалльной Ta-Nb-REE-минерализации в изученных породах связывается с процессами длительной кристаллизационной дифференциации расплава.

Таблица 3

Химический состав минералов-концентраторов редких элементов (мас. %)

Компоненты	Ксенотим				Гагаринит		Стрюверит-ильменорутил	
	1	2	3	4	1	2	1	2
SiO ₂	0,11	0,16	0,11	0,15	0,04	0,02	–	–
TiO ₂	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,00	0,01	61,90	64,77
Al ₂ O ₃	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,00	0,00	0,05	0,08
FeO	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,19	0,10	7,73	7,92
MnO	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
MgO	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	8,65	11,62	0,01	0,00
ZnO	–	–	–	–	–	–	–	–
CaO	0,03	0,07	0,08	0,01	–	–	–	–
Na ₂ O	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	10,64	10,41	–	–
K ₂ O	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,12	0,13	–	–
BaO	0,01	0,03	0,00	0,07	0,00	0,00	0,06	0,01
SrO	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,00	0,03	–	–
PbO	0,27	0,28	0,18	0,30	0,29	0,36	–	–
P ₂ O ₅	36,68	36,70	37,64	37,63	–	–	–	–
SnO ₂	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	–	1,44	1,22
Nb ₂ O ₅	0,02	0,08	0,09	0,00	–	–	15,01	17,74
Ta ₂ O ₅	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	–	13,54	8,41
Y ₂ O ₃	43,07	41,77	41,31	43,42	40,87	44,00	–	–
La ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,23	–	–
Ce ₂ O ₃	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,37	0,43	–	–
Nd ₂ O ₃	–	–	0,02	0,57	0,90	0,70	–	–
Sm ₂ O ₃	0,87	1,72	1,57	0,71	0,71	0,76	–	–
Eu ₂ O ₃	0,25	0,39	0,37	0,09	–	–	–	–
Gd ₂ O ₃	2,15	2,74	2,68	1,63	1,49	1,70	–	–
Dy ₂ O ₃	4,31	5,08	5,21	3,66	4,05	2,98	–	–
Ho ₂ O ₃	1,44	1,26	1,27	1,80	1,04	0,96	–	–
Er ₂ O ₃	3,39	3,31	3,19	1,94	2,65	1,45	–	–
Tm ₂ O ₃	0,60	0,60	0,50	0,83	0,23	0,16	–	–
Yb ₂ O ₃	4,39	3,91	4,32	6,17	1,64	0,52	–	–
HfO ₂	0,22	0,12	0,23	0,13	–	–	–	–
ThO ₂	0,72	0,46	0,76	0,05	0,10	0,07	–	–
UO ₂	0,13	0,08	0,12	0,02	–	–	–	–
F	0,29	0,31	0,38	0,03	36,91	37,79	–	–
Сумма-I	99,03	99,15	99,53	99,40	112,2 1	114,4 3	–	–
F-O*	0,12	0,13	0,16	0,01	15,54	15,91	–	–
Сумма-II**	98,91	99,02	99,37	99,38	96,67	98,52	99,93	100,18

Примечание. Минералы анализировались на микрозонде в ИГХ СО РАН (аналитик – Суворова Л. Ф.).

* F-O – избыточный кислород, заменяющий при расчетах фтор.

** Сумма-II приведена с вычетом избыточного кислорода.

Заключение

Выделены три фациальные разновидности гранитов Зашихинского массива по степени дифференцированности и рудоносности: I) амфиболсодержащие кварц-микроклин-альбитовые; II) лейкократовые кварц-альбит-микроклиновые; III) лейкократовые кварц-альбитовые, переходящие в альбититы.

Граниты массива отличаются повышенными содержаниями щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ до 12,68 мас. %), преимущественно натриевым типом щелочности ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$) и высокими значениями коэффициента агапитности (Ka) 1,0–1,2. Кроме того, породы характеризуются повышенными содержаниями Rb, Li, Y, Zr, Hf, Ta, Nb, Th, U, Zn, Ga, REE и низкими содержаниями Ca, Mg, Al, P, Ba, Sr.

Установлены минералы-концентраторы в щелочных гранитах Зашихинского массива, которыми являются колумбит, циркон, ксенотим и стрюверит с ильменорутилом, показана генетическая связь этих минералов с их магматическим происхождением. Впервые определены и приведены содержания редких и редкоземельных элементов в этих минералах из редкометалльных гранитов Зашихинского массива.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта ИИЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональные связи» и гранта РФФИ № 17-45-388045.

Список литературы

- Альбитизированные и грейзенизированные граниты (апограниты) / А. А. Беус, В. А. Северов, А. А. Ситнин, К. Д. Субботин. М. : Изд-во АН СССР, 1962. 196 с.
- Архангельская В. В., Шурига Т. Н. Геологическое строение, зональность и оруденение Зашихинского тантал-ниобиевого месторождения // *Отечеств. геология*. 1997. № 5. С. 7–10.
- Архангельская В. В., Рябцев В. В., Шурига Т. Н. Геологическое строение и минералогия месторождений тантала России // *Минерал. сырье*. 2012. № 25. 318 с.
- Коваленко В. И. Петрология и геохимия редкометалльных гранитов. Новосибирск : Наука, 1977. 205 с.
- Коваленко В. И., Коваленко Н. И. Онгониты – субвулканические аналоги редкометалльных Li-F гранитов. М. : Наука, 1976. 127 с.
- Наумов В. Б., Коваленко В. И., Владыкин Н. В. Термометрические исследования включений в топазах из онгонитов // *Докл. акад. наук СССР*. 1971. Т. 199, № 3. С. 681–683.
- Перспективы рационального освоения комплексных ниобий-тантал-редкометалльных месторождений России / Г. А. Машковцев, Л. З. Быховский, А. А. Рогожин, А. В. Темнов // *Разведка и охрана недр*. 2011. № 6. С. 9–13.
- Ярмолюк В. В., Кузьмин М. И. Позднепалеозойский и раннемезозойский редкометалльный магматизм Центральной Азии: этапы, области и обстановки формирования // *Геология рудных месторождений*. 2012. Т. 54, № 5. С. 375–399.
- Andreeva I. A. Genesis and mechanisms of formation of rare-metal peralkaline granites of the Khaldzan Buregtey massif, Mongolia: evidence from melt inclusions // *Petrology*. 2016. Vol. 24, N 5. P. 462–476. DOI: 0.1134/S0869591116050027.

Age, composition of rocks and geological setting of the Snezhnoe beryllium deposit: Substantiation of the Late Paleozoic East Sayan rare-metal zone, Russia / V. V. Yarmolyuk, D. A. Lykhin, T. N. Shuriga, A. A. Vorontsov, A. M. Sugorakova // *Geology of Ore Deposits*. 2011. Vol. 53, N 5. P. 390–400. DOI: 10.1134/S1075701511040064.

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 / V. V. Yarmolyuk, A. M. Kozlovsky, A. V. Nikiforov, A. V. Travin, D. A. Lykhin *Petrology*. 2016. Vol. 24, N 5. P. 477–496. DOI: 10.1134/S0869591116050076.

Distribution and evolution of zirconium mineralization in peralkaline granites and associated pegmatites of the Khan Bogd Complex, southern Mongolia / J. Kynicky, A. R. Chakhmouradian, C. Xu, L. Krmicek, M. Galiova // *Canadian Mineralogist*. 2011. N 49. P. 947–965.

Geochronology, geochemistry and metallogenic implications of the Boziguo'er rare metal-bearing peralkaline granitic intrusion in South Tianshan, NWChina / H. Huang, Z. Zhang, M. Santosh, D. Zhang // *Ore Geology Reviews*. 2014. Vol. 61. P. 157–174.

Kostitsyn Yu. A., Altukhov E. N. The Khäilama and Aryskañ massifs of alkali granitoids, Eastern Sayan: age and formation conditions by Rb-Sr isotopic and geochemical data // *Geochemistry International*. 2004. Vol. 42, N 3. P. 195–204.

New data on the age of ore formation in the unique Katugin rare-metal deposit (Aldan Shield) / A. B. Kotov, A. M. Larin, D. P. Gladkochub, E. B. Salnikova, E. V. Sklyarov, E. V. Tolmacheva, T. V. Donskaya, S. D. Velikoslavinsky, S. Z. Yakovleva // *Doklady Earth Sciences*. 2015. Vol. 463, N 2. P. 782–786. DOI: 10.1134/S1028334X15070107.

Petrology and textural evolution of granites associated with tin and rare-metals mineralization at the Pitinga mine, Amazonas, Brazil / S. Lais, R. Lenharo, P. Pollard, H. Born // *Lithos*. 2003. Vol. 66. P. 37–61.

Sinclair W. D., Jambor J. L., Birkett T. C. Rare earths and potential for rare earth deposits in Canada // *Exploration and Mining Geology*. 1992. Vol. 1. P. 265–281.

Sun S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes: magmatism in the oceanic basins / A. D. Saunders, M. J. Norry (Eds.) // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 1989. Vol. 42. P. 313–345.

The Khaldzan-Buregtei massif of peralkaline rare-metal igneous rocks: structure, geochronology, and geodynamic setting in the caledonides of Western Mongolia / V. I. Kovalenko, V. V. Yarmolyuk, P. M. Kartashov, A. M. Kozlovskii, E. N. Listratova, E. B. Salnikova, V. P. Kovach, I. K. Kozakov, A. B. Kotov, S. Z. Yakovleva, V. A. Ponomarchuk. *Petrology*. 2004. Vol. 12, N 5. P. 412–436.

The unique Katugin rare-metal deposit (Southern Siberia): Constraints on age and genesis / D. P. Gladkochub, T. V. Donskaya, E. V. Sklyarov, V. B. Saveleva, A. M. Mazukabzov, E. P. Bazarova, A. B. Kotov, A. M. Larin, E. B. Salnikova, E. V. Tolmacheva, S. D. Velikoslavinsky, V. P. Kovach, N. Y. Zagornaya, N. V. Vladykin, N. V. Alymova, S. A. Pisarevsky, V. V. Sharygin, A. E. Starikova, E. A. Khromova // *Ore Geology Reviews*. 2017. Vol. 91. P. 246–263. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.10.002.

Vladykin N. V., Alymova N. V., Perf il'ev V. V. Geochemical Features of Rare-Metal Granites of the Zashikhinsky Massif, East Sayan // *Petrology*. 2016. Vol. 24, N 5. P. 512–525. DOI: 10.1134/S0869591116050052.

Volatile components (H₂O, CO₂, CL, F, AND S) in magmas of intermediate and acid compositions from distinct geodynamic settings: evidence from melt inclusions and chill glasses / V. I. Kovalenko, V. V. Yarmolyuk, V. B. Naumov, V. A. Dorofeeva // *Petrology*. 2000. Vol. 8, N 6. P. 525–556.

Wakita H., Schmitt R. A., Rey P. Elemental abundances of major, minor, and trace elements in Apollo 11 lunar rocks, soil and core samples // *Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference*, 1970. P. 1685–1717.

Ore-Content of Rare-Metal Granites of Zashikhinsky Massif (Irkutsk Region) and Minerals Concentrating Ta, Nb, Th, Zr, TR

N. V. Alymova

Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk

N. V. Vladykin

Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk

Irkutsk Scientific Center SB RAS, Irkutsk

Abstract. Zashikhinsky massif (Irkutsk region) is confined to late Paleozoic East Sayan Mountains zone of alkaline rare-metal granite magmatism. New data of mineral, petrographical, chemical and microelemental composition of rocks of the massif are considered. Three facies varieties of rocks of the massif according to their differentiation grade and ore mineralization are distinguished. The earliest amphiboliferous microcline-albite granites are replaced with leucocratic quartz-albite granites changing into essentially albite varieties. Albitites are the most rare-metal rocks of the deposit; the REE content is over 10 000 g/t in some places reaches 15 440 g/t. In double correlation plots of rock-forming and rare elements common compositional trends are observed; that may indicate the origin of all facies varieties of massif rocks from common primary magma in the process of its differentiation from early to late facies. The REE Spectra of all facies of alcaic rocks are of the same type and differ in their total contents only. Spider-diagrams of these rocks are also similar and differ with minor variations of anomaly sizes. The obtained geological, petrographical and geochemical data indicate the magmatic genesis of rare-metal granites and albitites. The main minerals concentrating rare elements in rocks and ores of the massif are columbite, struverite-ilmenorutile, zircon and xenotime. The massif granites do not show metasomatic zonation and replacement of some minerals by the others that is common for metasomatic rocks. On the basis of all characteristics, the Zashikhinskoe deposit is estimated as one of the largest tantalum rare-metal deposits of alkaline-granite type in Russia.

Keywords: alcaic granites, ore content, rare-metal deposits, Zashikhinsky massif, host minerals.

For citation: Alymova N.V., Vladykin N.V. Ore-Content of Rare-Metal Granites of Zashikhinsky Massif (Irkutsk Region) and Minerals Concentrating Ta, Nb, Th, Zr, TR. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2018, vol. 25, pp. 15-29. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.25.15> (in Russian)

References

- Beus A.A., Severov V.A., Sitnin A.A., Subbotin K.D. *Al'bitizirovannye i greizenizirovannye granity (apogranity)* [Albitized and greisenized granites (apogranites)]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1967, 196 p. (in Russian)
- Arhangel'skaya V.V., Shuriga T.N. *Geologicheskoe stroenie, zonal'nost' i orudnenie Zashikhinskogo tantal-niobievogo mestorozhdeniya* [Geological features, zoning, and mineralization of the Zashikhinsky tantalum-niobium deposit]. *Otechestvennaya geologiya* [Otechestvennaya Geology], 1997, no. 5, pp. 7-10. (in Russian)
- Arhangel'skaya V.V., Ryabcev V.V., Shuriga T.N. *Geologicheskoe stroenie i mineralogiya mestorozhdenij tantala Rossii* [Geological structure and mineralogy of the tantalum deposits of Russia]. Moscow, Mineral Syr'e Publ., 2012, no. 25, 318 p. (in Russian)
- Kovalenko V.I. *Petrologiya i geokhimiya redkometall'nykh granitov* [Petrology and Geochemistry of Rare-Metal Granites]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977, 205 p. (in Russian)

Kovalenko V.I., Kovalenko N.I. *Ongonity – subvulkanicheskie analogi redkometall'nykh Li-F granitov* [Ongonites – Subvolcanic Analogues of Rare-Metal Li-F Granites]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 127 p. (in Russian)

Naumov V.B., Kovalenko V.I., Vladykin N.V. *Termometricheskie issledovaniya vklyucheniij v topazah iz ongonitov* [Thermometric studies of inclusions in topaz from ongonites]. *Doklady akademii nauk SSSR* [Doklady of the Academy Sciences of the USSR], 1971, vol. 199, no. 3, pp. 681-683. (in Russian)

Mashkovcev G.A., Bykhovskij L.Z., Rogozhin A.A., Temnov, A.V. *Perspektivy racionall'nogo osvoeniya kompleksnyh niobij-tantal-redkometall'nyh mestorozhdenij Rossii* [Prospects of rational development of complex niobium-tantalum-rare-metal deposits of Russia]. *Razvedka i ohrana nedr* [Exploration and protection of mineral resources], 2011, no. 6, pp. 9-13. (in Russian)

Yarmolyuk V.V., Kuz'min M.I. *Pozdnepaleozoyskiy i rannemezozoyskiy redkometall'nyy magmatizm Tsentral'noy Azii: etapy, oblasti i obstanovki formirovaniya* [Late Paleozoic and Early Mesozoic rare-earth magmatism of Central Asia: stages, regions and conditions of formation]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenij* [Geology of ore deposits], 2012, vol. 54, no. 5, pp. 375-399. (in Russian)

Andreeva I.A. Genesis and mechanisms of origin of rare-metal granites of the Mongolian Khaldzan-Burentey massif, research data of melt inclusions. *Petrology*, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 462-476. DOI: 10.1134/S0869591116050027.

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. *Geology of Ore Deposits*, 2011, vol. 53, no. 5, pp. 390-400. DOI: 10.1134/S1075701511040064.

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, no. 5, pp. 477-496. DOI: 10.1134/S0869591116050076.

Kynicky J., Chakhmouradian A.R., Xu C., Krmicek L., Galiouva M. Distribution and evolution of zirconium mineralization in peralkaline granites and associated pegmatites of the Khan Bogd Complex, southern Mongolia. *Canadian Mineralogist*, 2011, no. 49, pp. 947-965.

Huang H., Zhang Z., Santosh M., Zhang D. Geochronology, geochemistry and metallogenic implications of the Boziguo'er rare metal-bearing peralkaline granitic intrusion in South Tianshan, NWChina. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 61, pp. 157-174.

Kostitsyn Yu.A., Altukhov E.N. The Khäilama and Aryskañ massifs of alkali granitoids, Eastern Sayan: age and formation conditions by Rb-Sr isotopic and geochemical data. *Geochemistry International*, 2004, vol. 42, no. 3, pp. 195-204.

Kotov A.B., Larin A.M., Gladkochub D.P., Salnikova E.B., Sklyarov E.V., Tolmacheva E.V., Donskaya T.V., Velikoslavinsky S.D., Yakovleva S.Z. New data on the age of ore formation in the unique Katugin rare-metal deposit (Aldan Shield). *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 463, no. 2, pp. 782-786. DOI: 10.1134/S1028334X15070107.

Lais S., Lenharo R., Pollard P., Born H. Petrology and textural evolution of granites associated with tin and rare-metals mineralization at the Pitinga mine, Amazonas, Brazil. *Lithos*, 2003, vol. 66, pp. 37-61.

Sinclair W.D., Jambor J.L., Birkett T.C. Rare earths and potential for rare earth deposits in Canada. *Exploration and Mining Geology*, 1992, vol. 1, pp. 265-281.

Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes: magmatism in the oceanic basins. *Geol. Soc. London. Spec. Publ.*, 1989, vol. 42, pp. 313-345.

Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Kartashov P.M., Kozlovskii A.M., Listratova E.N., Salnikova E.B., Kovach V.P., Kozakov I.K., Kotov A.B., Yakovleva S.Z., Ponomarchuk V.A. The Khaldzan-Buregtei massif of peralkaline rare-metal igneous rocks: structure, geochronol-

ogy, and geodynamic setting in the caledonides of Western Mongolia. *Petrology*, 2004, vol. 12, no. 5, pp. 412-436.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Sklyarov E.V., Saveleva V.B., Mazukabzov A.M., Bazarova E.P., Kotov A.B., Larin A.M., Salnikova E.B., Tolmacheva E.V., Velikoslavinsky S.D., Kovach V.P., Zagornaya N.Y., Vladykin N.V., Alymova N.V., Pisarevsky S.A., Sharygin V.V., Starikova A.E., Khromova E.A. The unique Katugin rare-metal deposit (Southern Siberia): Constraints on age and genesis. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 91, pp. 246-263. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.10.002.

Vladykin N.V., Alymova N.V., Perf il'ev V.V. Geochemical Features of Rare-Metal Granites of the Zashikhinsky Massif, East Sayan. *Petrology*, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 512-525. DOI: 10.1134/S0869591116050052.

Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Naumov V.B., Dorofeeva V.A. Volatile components (H₂O, CO₂, CL, F, AND S) in magmas of intermediate and acid compositions from distinct geodynamic settings: evidence from melt inclusions and chill glasses. *Petrology*, 2000, vol. 8, no. 6, pp. 525-556.

Wakita H., Schmitt R.A., Rey P. Elemental abundances of major, minor, and trace elements in Apollo 11 lunar rocks, soil and core samples. *Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference*, 1970, pp. 1685-1717.

Алымова Наталья Викторовна

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник
Институт геохимии СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Фаворского, 1а
тел.: (3952)42-99-64
e-mail: alymova@igc.irk.ru

Alymova Natalya Viktorovna

Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Senior Scientific Worker
Institute of Geochemistry SB RAS
1a, Favorsky st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
tel.: (3952)42-99-64
e-mail: alymova@igc.irk.ru

Владыкин Николай Васильевич

доктор геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией
Институт геохимии СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Фаворского, 1а
тел.: (3952)42-55-12
Иркутский научный центр СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 134
тел.: (3952) 45-30-70
e-mail: vlad@igc.irk.ru

Vladykin Nikolay Vasil'evich

Doctor of of Sciences (Geology and
Mineralogy), Head of the Laboratory
Institute of Geochemistry SB RAS
1a, Favorsky st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
tel.: (3952)42-55-12
Irkutsk Scientific Center SB RAS
134, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
tel.: (3952) 45-30-70
e-mail: vlad@igc.irk.ru

Дата поступления: 06.07.2018

Received: July, 06, 2018