

ТИПИЗАЦИЯ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ ЩЕЛОЧНЫХ ГРАНИТОВ

© 2023 г. Почетный член Ю. Б. Марин^{1, *}, д. чл. В. В. Смоленский¹, д. чл. С. М. Бескин²

¹Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия, 2, Санкт-Петербург, 109106 Россия

²Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ),
ул. Версаева, 15, Москва, 121357 Россия

*e-mail: yubmarin@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.07.2023 г.

После доработки 16.08.2023 г.

Принята к публикации 18.08.2023 г.

Предлагается новый вариант классификации редкометалльных щелочных гранитов с выделением трех типов, существенно отличающихся по химическому и минеральному составу и особенностям их редкометалльно-редкоземельной специализации. Приведен средний состав пород из эталонных массивов каждого типа редкометалльных щелочных гранитов, кратко охарактеризованы выделенные типы и подчеркнуты их важнейшие индикаторные признаки.

Ключевые слова: редкометалльные щелочные граниты, коэффициент агапайности, глиноземистость, “канонические отношения” несовместимых элементов, щелочные амфиболы и пироксены, танталониобаты

DOI: 10.31857/S0869605523050040, EDN: SZOLML

ВВЕДЕНИЕ

Как уже неоднократно отмечалось (Коваленко, 1977; Бескин и др., 1979, 1999; Бескин, Марин, 2019), собственно *редкометалльными* являются такие субщелочные или щелочные (коэффициент агапайности ≥ 0.7) микроклин-альбитовые граниты с акцессорными танталониобатами \pm минералами Li, Cs, REE, Y, Zr, Be, Sn, W, которыми образованы малые, до 3 км в поперечнике, интрузивы, а также группы даек и/или силлов. Различаются три типа редкометалльных гранитов, переходов между которыми не наблюдалось, как и совмещений *одновозрастных* гранитов разных типов в *единых* рудных узлах (Бескин и др., 1979, 1999; Ткачев и др., 2020):

I – слюдяные *танталовые* – колумбит-танталитовые, микролитовые, воджинитовые, с $\text{Ta}_2\text{O}_5 : \text{Nb}_2\text{O}_5$ в среднем 1 : 1, обычно содержащие касситерит, литиевые слюды, реже вольфрамит, амблигонит, гердерит и др.;

II – аннитовые, полилитионитовые, рибекитовые, арфведсонитовые, эгириновые *танталониобиевые* – колумбитовые, пироксеновые¹, фергусонитовые, с $\text{Ta}_2\text{O}_5 : \text{Nb}_2\text{O}_5$ от 1 : 7 до 1 : 14, с Hf-цирконом, минералами REE, криолитом и др.;

III – сподуменовые *тантал-литиевые* – танталит-колумбитовые, с $\text{Ta}_2\text{O}_5 : \text{Nb}_2\text{O}_5$ в среднем 1 : 2, с поллуцитом, петалитом и др.

Распределение редкометалльных гранитов разных типов и возрастов неодинаково (Бескин, Марин, 2003, 2013; Быховский, Потанин, 2009; Ткачев и др., 2020):

¹ Под пироксеном понимается серия сложных оксидов Nb, Ca и Na с добавочными анионами (см. Atencio et al., 2010).

а) архей-протерозойские редкометалльные граниты любых типов и сопряженные с ними пегматиты, располагаются только на кратонах среди древних кристаллических толщ – на щитах (Канадский, Балтийский, Африканский и др.) и в активизированных в позднем докембрии краевых перикратонных поясах-субщитах (Восточный Саян и др.);

б) фанерозойские редкометалльные щелочные граниты (РЩГ) встречаются как на щитах и субщитах, так и в горно-складчатых областях, приурочиваясь, как правило, к переработанным останцам древних кристаллических толщ (Хайломинский, Улуттанзекский и другие массивы). Намечается значительный рост числа массивов РЩГ в палеозое по сравнению с докембрием (где они немногочисленны), но потом падение их числа в мезо-кайнозое (Бескин, Марин, 2003; Ткачев и др., 2020).

Редкометалльные щелочные граниты обычно входят в состав ассоциаций щелочных магматитов, представленных возрастным рядом (Гаврилова, Бескин, 1992; Коваленко и др., 2004, 2007, 2009; Frost С., Frost В., 2011; Ярмолук, Кузьмин, 2012; Гребенников, 2014; Ярмолук и др., 2016, 2020; Sami et al., 2017, 2018; Бескин, Марин, 2019): 1) пантеллериты, комендиты или контрастные базальт-щелочно-риолитовые серии; 2) дайки сходного состава; 3) малые интрузии микроклин-альбитовых щелочных гранитов, которые проявляются автономно или чаще завершают формирование гранитоидных серий повышенной щелочности, проявленных в виде крупных плутонов центрального типа. Щелочные граниты слагают небольшие штоки, пластовые залежи, пологие гарполиты мощностью до нескольких сотен метров, тела шайбовидной формы, как правило, малоглубинные. Залегая в тех или иных частях кровли крупных массивов более ранних гранитоидов (Бескин и др., 1979; Гаврилова, Бескин, 1992; Бескин, Марин, 2019), массивы РЩГ часто выглядят как бы куполами, “отходящими” от обычных гранитоидов. Вместе с тем известно и немало примеров, когда массивы РЩГ залегают и под толщей обычных гранитоидных пород (“внутренние граниты”, “купол в куполе” и т.п.).

В отличие от редкометалльных щелочных гранитов нередкометалльные разновидности таких пород завершают сиенит-граносиенитовые серии (типа малокуналецкого комплекса в Западном Забайкалье). Известны безрудные щелочные моношпатовые лейкограниты, являющиеся разновидностью аляскитов с повышенным фоном редких элементов и слагающие крупные массивы дуговой и кольцевой формы, например, массивы Кент и Майтас в Центральном Казахстане, крупнозернистые аляскиты с рибекитом т.н. “главной фазы Хан-Богдо” в Монголии и др. (Бескин и др., 1979; Гаврилова, Бескин, 1992; Бескин, Марин, 2019).

Становление массивов РЩГ сопровождается, а нередко и предворяется, интенсивной метасоматической переработкой вмещающих пород вдоль зон нарушений, реже имеющей площадной характер, с образованием зон альбитизации, рибекитизации и др. (Апельцин и др., 1967; Бескин и др., 1979; Щерба и др., 1981; Владыкин, 1983; Гаврилова, Бескин, 1992; Быховский, Потанин, 2009; Гречишев и др., 2010; Архангельская, 2012; Бескин, Марин, 2019). Нередко и сами массивы щелочных гранитов частично, а иногда и практически полностью, трансформируются в зоны таких метасоматитов, в которых, тем не менее, сохраняются фрагменты типичной для РЩГ овоидофировой физиографии – “гороховидный” кварц со структурой “снежного кома”. Для пород большинства докембрийских и некоторых фанерозойских массивов РЩГ (Катугин в России; Виго в Испании; Нгое в ЮАР, Ампасиндава, Ампасибитика в Мадагаскаре) при частичном сохранении овоидофировой физиографии характерны гнейсовидные или полосчатые текстуры. Так, например, редкометалльно-щелочногранитовые породы Катугинского месторождения выглядят как типичные ортогнейсы – среди полевошпатовой массы вытянутые цепи отделенных друг от друга почти округлых зерен кварца рядом с ориентированными в том же направлении удлиненными индивидами щелочных темноцветных минералов (Бескин и др., 1979; Гаврилова, Бескин, 1992; Бескин, Марин, 2003, 2019; Gladkochub et al., 2017). Подавляющее же большин-

ство фанерозойских массивов РЩГ (Верхнее Эспе и Лосевка в Казахстане, Улугтанзекское и Зашихинское в России, Халдзан-Бурегтэ и Хан-Богдо в Монголии, Гурайя в Аравии и др.) сложено массивными, типично овоидофировыми породами (Бескин и др., 1979; Щерба и др., 1981; Гаврилова, Бескин, 1992; Бескин, Марин, 2003, 2019; Zhu et al., 2015; Sami et al., 2017, 2018).

Формально все щелочные граниты относят к типу *A*-гранитов, хотя все чаще обращается внимание на размытость представлений и о нем, и о признаках этого типа (Гребенников, 2014). Для разделения всего многообразия РЩГ С.П. Гаврилова и С.М. Бескин (Гаврилова, Бескин, 1992) использовали диаграмму коэффициент апаитности – глиноземистость, достаточно наглядно отражающую изменение химических особенностей этой группы пород, с которыми в прямой зависимости находятся видовой состав слюд и щелочных темноцветов, парагенезис редкометалльных и редкоземельных минералов. На ее основе и была предложена классификация редкометалльных щелочных гранитов с выделением четырех типов (Гаврилова, Бескин, 1992):

- I – литий-фтористые литиево-слюдисто-рибекитовые с эгирином, колумбитовые;
- II – эгирин-рибекитовые с арфведсонитом, пироксоловые;
- III – эгирин-арфведсонитовые и арфведсонитовые, редкоземельно-пироксоловые;
- IV – арфведсонитовые, цирконосиликатные с силикатами ниобия и редких земель.

Но уже и тогда авторы этой классификации отмечали (Гаврилова, Бескин, 1992), что на классификационной диаграмме в поле типа I попали и литий-фтористые *плюмазитовые* граниты с темными слюдами и колумбитом, некоторые граниты I типа являются переходными от плюмазитовых танталоносных к апаитовым ниобиеносным, I и II типы щелочных гранитов близки по содержанию ниобия и циркония, а II и III несущественно отличаются по величинам коэффициентов апаитности и глиноземистости.

Это, и значительное за прошедшие 30 лет пополнение банка аналитических данных по известным и появившимся новым объектам (особенно в Азии и Африке), позволяют предложить новый вариант типизации редкометалльных щелочных гранитов, уточнив и несколько расширив набор индикаторных признаков в работе (Гаврилова, Бескин, 1992), в том числе за счет широко используемых в последнее время “канонических отношений” содержаний несовместимых элементов (Workman, Hart, 2005; Коваленко и др., 2007) – Zr/Nb, Nb/U, Th/Ta, La/Yb.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа были использованы опубликованные (Колотухина, 1964; Апельцин и др., 1967; Тугаринов, Коваленко, 1973; Аптон, 1976; Серых и др., 1976; Щерба и др., 1981; Владыкин, 1983; Drysdall et al., 1984, 1986; Ермолов и др., 1988; Солодов и др., 1990; Гаврилова, Бескин, 1992; Pillet et al., 1992; Коваль, 1998; Hadj-Kaddour et al., 1998; Goodenough et al., 2000; Schmitt et al., 2000; Wu et al., 2002; Ганзеев, Гречищев, 2003; Коваленко и др., 2004, 2007, 2009; Костицын, Алтухов, 2004; Abdel-Rahman, 2006; Гурьянов, 2007; Трунилина и др., 2008; Быховский, Потанин, 2009; Козлов, 2009; Bastos, Pereira, 2009; Costi et al., 2009; Гречищев и др., 2010; Kerr, 2011; Архангельская, 2012; Ярмолук, Кузьмин, 2012; Qiu et al., 2014; Ларин и др., 2015; Kempe et al., 2015; Melcher et al., 2015; Zhu et al., 2015; Владыкин и др., 2016; Скляр и др., 2016; Ярмолук и др., 2016, 2020; Abu El-Rus et al., 2017; Sami et al., 2017, 2018; Никифоров и др., 2023) и авторские данные химического состава пород (в общей сложности до 700 анализов из наиболее известных в России и в мире проявлений РЩГ). В выборку включались только породы с содержанием SiO₂ более 69 мас. %, не подверженные значительным вторичным изменениям. Исключались также анализы пород, представляющих крайние члены высокодифференцированных расплавов. Молекулярные количества рассчитывались по стандартной методике.

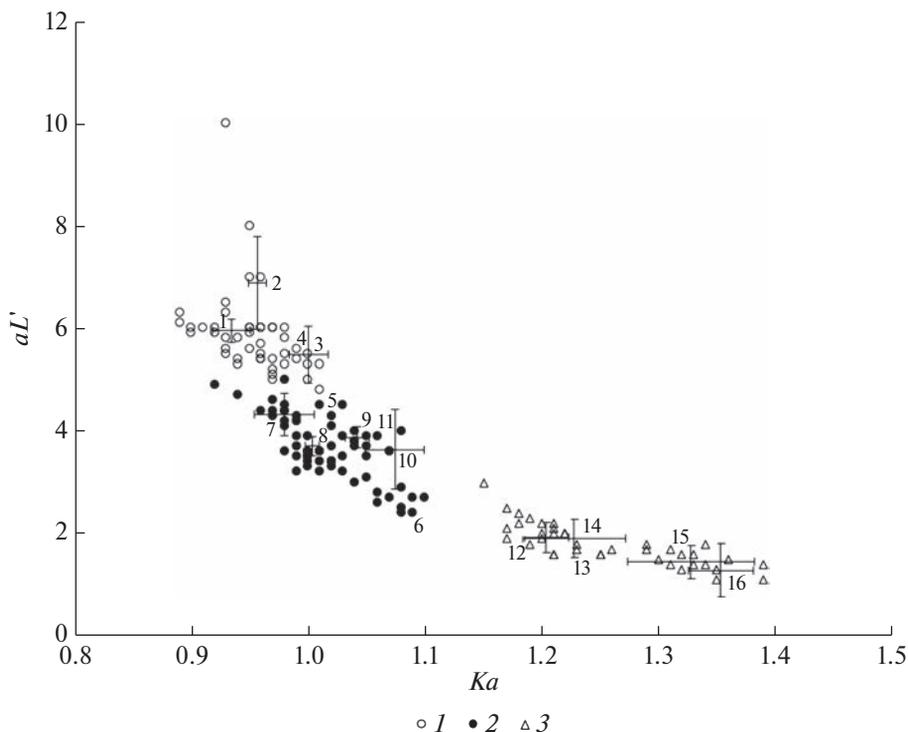


Рис. 1. Диаграмма соотношения коэффициентов агапитности (Ka) и глиноземистости (aL') в массивах редкометалльных щелочных гранитов. 1 – I тип, 2 – II тип, 3 – III тип. Цифрами на диаграмме обозначены точки средних значений и “усы” 95% доверительных вероятностных интервалов для массивов: 1 – Лосевский, 2 – Габаль-Эль-Инейги, 3 – Ийсор, 4 – Зашихинский, 5 – Улугтанзек, 6 – Катугин, 7 – Улан-Тологой, 8 – Верхнее Эспе, 9 – Керегетас-II, 10 – Арыскан, 11 – Гурайя, 12 – Халдзан-Бурегтэ, 13 – Ампасиндава, 14 – Стрендж-Лейк, 15 – Хан-Богдо, 16 – Мадагаскар.

Fig. 1. Plot of agpaite index (Ka) vs aluminum saturation index (aL') in rare-metal alkaline granites. 1 – I-type, 2 – II-type, 3 – III-type. Figures on the diagram indicate points of average values and “whiskers” of 95% confidence probability intervals for massifs: 1 – Losevsky, 2 – Gabal-El-Ineigi, 3 – Iysor, 4 – Zashikhinsky, 5 – Ulugtanzek, 6 – Katuginsky, 7 – Ulan-Tologoy, 8 – Verkhnee Espe, 9 – Keregetas-II, 10 – Aryska, 11 – Guraya, 12 – Khaldzan-Buregte, 13 – Ampasindava, 14 – Strange Lake, 15 – Khan-Bogdo, 16 – Madagascar.

Предлагаемый новый вариант классификации редкометалльных щелочных гранитов предполагает выделение трех типов, существенно отличающихся по химическому и минеральному составу и особенностям их редкометалльно-редкоземельной специализации. В табл. 1 приведен средний состав пород из своего рода эталонных хорошо изученных массивов каждого типа редкометалльных щелочных гранитов. Кратко охарактеризуем выделенные типы и подчеркнем их индикаторные признаки (рис. 1, 2, табл. 2).

I тип. Граниты этого типа представлены наиболее высоко кремнеземистыми ($SiO_2 \geq 73.5$ мас. %) и глиноземистыми (14–13 мас. %) разностями среди редкометалльных щелочных гранитов, с чем связано широкое распространение в них наряду со щелочными амфиболами (рибекитом и арфведсонитом), иногда эгирином, разнообразных слюд (ряда фенгит – мусковит или феррифенгит – мусковит – циннвальдит, полилитонит, литиевый аннит). Они известны на Приполярном Урале, в Восточном Саяне,

Таблица 1. Химический состав редкометалльных щелочных гранитов разных типов в эталонных массивах
Table 1. Chemical composition of different types of the rare-metal alkaline granites in reference massifs

Компо- ненты	I тип		II тип				III тип		
	Лосевский (Казахстан)	Хайлома- Зашихинский	Эспе (Казахстан)	Катугин	Улуттанзек	Гурайя (Сауд. Аравия)	Хан Богдо (Монголия)	ХалданБуретгэ (Монголия)	Ампасндава (Мадагаскар)
SiO ₂	74.18	73.89	74.06	72.73	72.77	74.12	71.36	71.34	70.70
TiO ₂	0.04	0.03	0.11	0.20	0.22	0.09	0.35	0.31	0.36
Al ₂ O ₃	13.64	13.31	12.30	11.98	13.14	11.83	10.18	10.54	9.42
Fe ₂ O ₃	1.30	0.93	1.71	2.64	1.28	1.19	4.04	1.05	5.17
FeO	0.78	0.78	1.11	2.17	0.98	1.08	2.28	3.22	1.15
MnO	0.12	0.07	0.05	0.07	0.07	0.06	0.21	0.10	0.07
MgO	0.14	0.18	0.32	0.12	0.31	0.14	0.17	0.04	0.62
CaO	0.59	0.24	0.50	0.29	0.52	0.47	0.72	0.30	1.03
Na ₂ O	5.18	5.31	4.88	4.93	5.22	4.95	5.2	5.09	5.81
K ₂ O	3.79	4.17	4.01	4.61	4.29	3.48	4.86	3.97	3.08
Сумма	99.76	98.91	99.05	99.74	98.8	97.41	99.37	95.96	97.41
<i>n</i>	26	60	35	120	160	30	15	14	7
<i>Ka</i>	0.93	1.0	1.0	1.09	1.02	1.01	1.32	1.20	1.34
<i>aL'</i>	5.8	5.5	3.6	2.4	4.3	4.5	1.6	2.0	1.4
<i>A/CNK</i>	0.99	0.97	0.92	0.89	0.92	0.93	0.68	0.80	0.65
Nb/Ta	6.2	6.5	11.1	13.3	9.6	10.8	26.0	20.0	26.6
Zr/Hf	10.3	16.4	27.3	32.0	24.2	28.6	43.8	38.0	42.0
Zr/Nb	1.9	1.8	4.8	2.4	2.4	3.5	30.0	6.3	10.5
La/Yb	0.4	0.3	2.4	3.3	2.3	2.5	6.3	6.9	10.0
Nb/U	20.5	28.9	20.7	28.6	15.0	18.8	8.8	30.0	25.0
Th/Ta	0.7	0.5	1.2	1.2	1.7	1.8	6.5	2.1	2.4

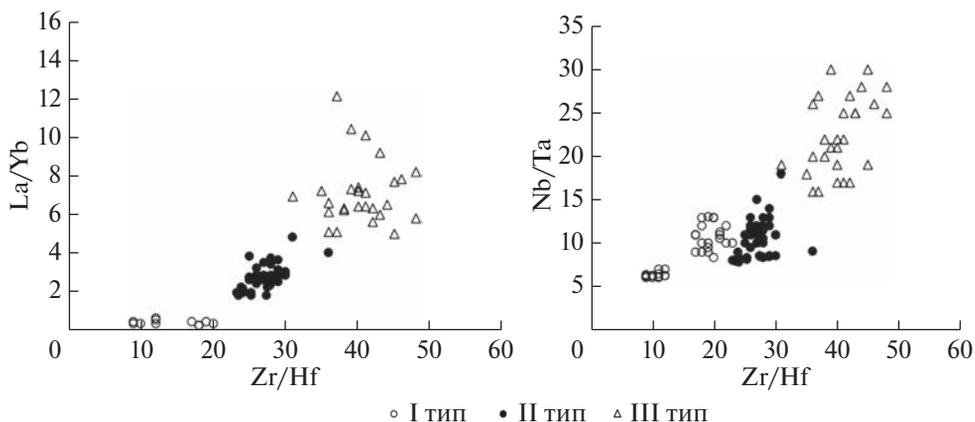


Рис. 2. Диаграммы наиболее характерных канонических отношений элементов в массивах редкометалльных щелочных гранитов трех типов.

Fig. 2. Plots of the most typical canonical elements ratios in arrays of three types rare-metal alkaline granites.

Северном Казахстане, Украине, Египте и др. Выделяются разновидности: биотитовые с рибекитом, биотит-рибекитовые иногда с полилитоном, рибекит-полилитоновые, эгирин-рибекитовые с литиевыми слюдами. Средний для массивов коэффициент апгаитности в пределах 0.92–1.01, коэффициент глиноземистости – 5–8, величины Nb/Ta отношения 6–11, Zr/Hf 10–20, La/Yb 0.2–0.8 (табл. 1, 2).

Редкометалльные минералы этих гранитов – колумбит (представлен полным рядом от колумбита-Fe до колумбита-Mn), ниобиевый рутил, плумбопирохлор, фергусонит, малакон, циртолит и циркон, которым сопутствует ферриторит и торианит, ксенотим-(Y), гагаринит-(Y). В существенно слюдяных разностях иногда в незначительном количестве присутствует касситерит. Определяющими рудоносный потенциал массивов щелочных гранитов этого типа являются колумбит и ниобиевый рутил (концентраторы тантала и ниобия), циркон и циртолит (концентраторы циркония, иттрия, гафния), ксенотим и гагаринит (концентраторы элементов иттриевой группы). Связанные с этими массивами рудные объекты относятся к геолого-промышленному типу цирконий-тантал-ниобиевых (Быховский, Потанин, 2009) рудопроявлений и мелких, реже крупных (Зашихинское) месторождений.

II тип. Граниты этого типа представлены умеренно кремнеземистыми (SiO_2 72–74 мас. %) и умеренно глиноземистыми (13.5–11.5 мас. %) разностями среди редкометалльных щелочных гранитов, что определяет преимущественное распространение в них щелочных амфиболов (рибекита и чаще арфведсонита) наряду с эгирином и гораздо реже слюдами (полилитоном, литиевый аннит, циннвальдит). Средний для массивов коэффициент апгаитности в пределах 0.97–1.11, коэффициент глиноземистости – 2–5, величины Nb/Ta отношения 8–16, Zr/Hf 18–32, La/Yb 0.5–4 (табл. 1, 2).

Массивы РЩГ этого типа пользуются наибольшим распространением и известны в Туве, в Казахстане, Китае, в Нигерии, Египте, Саудовской Аравии, Бразилии и в других регионах. Редкометалльно-редкоземельная минерализация определяется в первую очередь пирохлором (с церием и свинцом) иногда с колумбитом, важную роль играют циркон, гагаринит, иттрофлюорит, монацит и бастнезит, в меньшей степени эльпидит, торит и др.

Преобладают арфведсонитовые и эгирин-арфведсонитовые, реже рибекитовые и эгирин-рибекитовые, наименее распространены рибекит- и арфведсонит-аннитовые граниты. В аннитовых разностях доминируют колумбит, циркон, монацит, иттро-

Таблица 2. Общая характеристика разных типов редкометалльных щелочных гранитов
Table 2. General characterization of different types of rare-metal alkaline granites

Индикаторные признаки	I тип	II тип	III тип
Характерные амфиболы, пироксены, слюды	Рибекит, арфведсонит эгирин полилитионит, литиевый аннит, литиевый мусковит, циннвальдит	Арфведсонит, рибекит эгирин полилитионит, литиевый аннит, циннвальдит	Арфведсонит эгирин астрofilлит
Главные полезные компоненты (в скобках попутные)	Ниобий, тантал, цирконий, (литий, торий, уран, редкие земли, иттрий)	Ниобий, иттрий, цирконий, тантал, редкие земли, (торий, уран)	Редкие земли, иттрий, цирконий, ниобий, (бериллий)
Характерные минералы	Колумбит, фергусонит, ферриторит, ниобиевый рутил, циркон, циртолит, ксенотим, гагаринит и др.	Пирохлор, циркон, гагаринит, бастнезит, колумбит, иттрофлюорит, эльпидит, торит, криолит и др.	Эльпидит, гитгинсит, армстронгит, силикаты REE, Nb, Ti, пирохлор, монацит, гагаринит и др.
Коэффициент апаитности	0.92–1.01	0.97–1.11	1.15–1.40
A/CNK	0.96–1.01	0.90–0.96	0.65–0.85
$al = Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + FeO + MgO)$	5–8	2–5	1.0–2.2
Nb/Ta	6–11	8–16	18–30
Zr/Hf	10–20	18–32	35–45
Zr/Nb	1.1–2.1	2.3–5.5	6–30
Nb/U	10–35	10–40	10–40
Th/Ta	0.3–2.5	1–3	2–9
La/Yb	0.2–0.8	0.5–4	6–11
Примеры массивов	Хайлома-Зашихинский, Аксуг, массивы Лонгот-Юганского комплекса Полярного Урала (Россия); Лосевский, Ийсор (Казахстан); Габаль Эль Инейги (Египет)	Улугтанзек, Улкан, Катугин, Улан-Тологай (Россия); Керегетас, Эспе (Казахстан); Баэрчже (Китай); Гурайя, Тавлах (Сауд. Аравия); Мадейра (Бразилия)	Халдзан-Бурэгтэ, Хан Богдо (Монголия); Ту Том, Стрейндж-Лейк (Канада); Кудару (Нигерия); Ампасиндава, Ампасибитика (Мадагаскар)

флюорит, в эгирин-рибекитовых и эгирин-арфведсонитовых – пирохлор, циркон и гагаринит.

Яркими представителями II типа гранитов являются массивы: Катугин и Улуг-Танзек в России, Эспэ в Казахстане, Баэрчже в Китае, Гурайя в Саудовской Аравии, Мадейра (Питинга) в Бразилии. Именно с массивами этого типа связаны крупные комплексные месторождения ниобия, циркония, иттрия, тантала, редких земель и криолита.

III тип. В сравнительно немногочисленных массивах РЩГ этого типа распространены арфведсонитовые, арфведсонит-эгириновые и эгириновые породы с силикатами циркония, ниобия, титана и редких земель. Их наиболее известные и изученными представителями являются массивы Хан-Богдо и Халдзан-Бурэгтэ Монголии, Стрейндж-Лейк и Ту Том Канады (Владыкин, 1983; Коваленко и др., 2004, 2007; Goodenough et al., 2000; Kerr, 2011; Kempe et al., 2015). Редкометалльные граниты этого типа обычно мезо-меланократовые, самые низко кремнеземистые (SiO_2 70–72 мас. %) и низко глиноземистые (11–9.5 мас. %) в семействе щелочных гранитов. Соответственно коэффициент глиноземистости не превышает величину 2.2. Коэффициент

агпаитности достигает 1.4. Отношение ниобия к танталу более 18, чаще 20–24, циркония к гафнию в интервале 35–45, La/Yb 6–11 (табл. 1, 2). Характерными редкометалльными минералами гранитов являются цирконосиликаты - эльпидит, армстронгит и иногда эвдиалит с высоким содержанием REE, титаносиликаты - нептунит и астрофиллит с высокими содержаниями лития и REE, силикаты ниобия, редкоземельные силикаты. В разновидностях с несколько пониженной щелочностью появляются полилитонит, циркон и пироксолор и сокращается количество цирконо-и титаносиликатов.

Подчеркнув наиболее существенные признаки и особенности выделенных типов редкометалльных щелочных гранитов, остановимся на их сопоставлении. Заметно различается распространенность массивов разных типов: лидирует II тип, а массивы щелочных гранитов I и особенно III, наиболее щелочного, типа пользуются ограниченным распространением. Заметим при этом, что массивы всех типов обычны для молибденовых (мафических) провинций (Бескин, Марин, 2019) и лишь редкие массивы I и II типов (например, Питинга) встречаются в оловянных (салических) провинциях.

Общей особенностью формирования массивов редкометалльных щелочных гранитов всех трех типов является сходное поведение несовместимых элементов, прежде всего накопление редких металлов в наиболее дифференцированных разностях. Вместе с тем содержания редких элементов в разных массивах каждого типа заметно различаются, варьируя от просто повышенных до промышленных концентраций, и одновременно перекрываются с их содержаниями в массивах других типов. Средние значения параэлементных, в том числе канонических, отношений в гранитах из массивов одного типа менее изменчивы и интервалы их изменений для некоторых отношений (Nb/Ta, Zr/Hf, Zr/Nb, La/Yb) практически не перекрываются между массивами разных типов (рис. 2).

От I к III типам РЩГ увеличивается коэффициент агпаитности, заметно снижается глиноземистость, соответственно уменьшается коэффициент глиноземистости, растут ниобий-танталовое, цирконий-гафниевое и цирконий-ниобиевое отношения, возрастает роль элементов цериевой группы в спектре РЗЭ (рис. 2, табл. 2), падает содержание лития в гранитах в целом, в слюдах и щелочных амфиболах и, напротив возрастает редкометалльно-редкоземельное минеральное разнообразие.

Редкометалльные щелочные граниты формировались, хотя и в коровых обстановках, но с очевидным участием мантийных расплавов и флюидов (Бескин и др., 1979; Коваленко и др., 2007, 2009; Гребенников, 2014; Ларин и др., 2015; Ярмолюк и др., 2016, 2020 и др.). Подобное сочетание могло реализоваться только тогда, когда возникли и мощная кора и глубокие расколы в ней, только там, где сохранились мощные блоки кристаллического фундамента: щиты, кратонные краевые пояса (субщиты), а также микроконтиненты среди складчатых областей. В пределах складчатого обрамления многих кратонов широко проявились внутриплитные процессы, приведшие к возникновению крупных рифтовых систем и образованию огромных батолитов, сопряженных с обрамляющими их рифтовыми зонами. Батолиты сложены в основном гранитами нормального ряда щелочности, меньшим распространением пользуются субщелочные граниты и резко ограничены щелочные граниты, отражая разномасштабное взаимодействие мантийных и коровых источников при формировании крупных магматических областей в ходе воздействия мантийных плюмов на литосферу (Ярмолюк и др., 2016, 2020).

Магеринскими для редкометалльных щелочных гранитоидов считают магмы, сформированные при участии мантийных расплавов и корового материала (Goodepough et al., 2000; Коваленко и др., 2004, 2007, 2009; Workman, Hart, 2005; Ярмолюк, Кузьмин, 2012; Zhu et al., 2015; Ларин и др., 2015; Владыкин и др., 2016; Ярмолюк и др., 2016, 2020; Sami et al., 2017, 2018). Предполагается, что возникшие мантийные расплавы воздействовали на низы коры, либо вызывая ее плавление с последующим смешением анатектических и мантийных магм, либо ассимилируя вещество коры с образованием расплавов с различными коро-мантийными характеристиками. О мантийной природе источников *первичных магм* щелочных гранитов, особенно II и III типов, опреде-

ленно свидетельствуют Sm-Nd изотопные данные (Wu et al., 2002; Коваленко и др., 2004, 2007; Костицын, Алтухов, 2004; Bastos, Pereira, 2009; Ярмолюк, Кузьмин, 2012; Zhu et al., 2015; Sami et al., 2017, 2018 и др.) и подтверждают значения канонических отношений несовместимых элементов (Workman, Hart, 2005; Коваленко и др., 2009; Ярмолюк и др., 2016, 2020). Для биотит-рибекитовых (арфведсонитовых) колумбитовых гранитов I типа предполагается преимущественно коровый источник, при некотором добавлении магматического или флюидного мантийного материала. Вероятно, различие состава гранитов I–III типов, выражающееся в увеличении мантийного вещества к последнему из них, зависит и от структурных условий проницаемости для глубинных расплавов, поступающих на верхние горизонты литосферы, и от особенностей их взаимодействия с коровым материалом.

Вариации минерального состава и геохимических особенностей, прежде всего особенностей редкометалльно-редкоземельной специализации щелочных гранитов отдельных массивов связаны, видимо, не столько с внутрикамерной дифференциацией расплавов, сколько с активным воздействием восходящих трансмагматических флюидов (существенно водород-углеводородных, фтористых), формирующихся в результате дегазации обогащенной мантии, приводящим к существенной перестройке структуры расплава (Безмен и др., 2005) с возникновением в ходе его кристаллизации необычных (особенно в породах III типа) минеральных ассоциаций. Практически непрерывный переход от позднемагматического к пневматолитово-гидротермальному этапу с изменением физико-химических параметров минералообразующей среды (падением температуры, нарастанием окислительных условий, флуктуациями кислотности – щелочности) приводит к дальнейшему перераспределению редких и редкоземельных элементов и усложнению, и появлению новых минеральных парагенезисов.

ВЫВОДЫ

1. К редкометалльным щелочным гранитам относятся микроклин-альбитовые антитовые, полилитионитовые, рибекитовые, арфведсонитовые, эгириновые граниты (коэффициент агапайности ≥ 0.9) с акцессорными танталониобатами \pm минералами Zr, REE, Y, U, Th, Be, криолитом, которыми образованы малые, до 3 км в поперечнике, интрузивы, группы даек и/или силлов.

2. Среди массивов редкометалльных щелочных гранитов целесообразно выделение трех типов, существенно отличающихся по химическому и минеральному составу, особенностям их редкометалльно-редкоземельной специализации и промышленной значимости.

3. Содержания редких элементов в массивах каждого типа заметно различаются, варьируя от просто повышенных до промышленных концентраций, причем средние содержания могут перекрываться и между массивами разных типов. Средние значения параэлементных отношений в гранитах из массивов одного типа менее изменчивы, интервалы их изменений для некоторых отношений (Nb/Ta, Zr/Hf, Zr/Nb, La/Yb) практически не перекрываются между массивами разных типов.

4. От I к III типам РЩГ увеличивается коэффициент агапайности, заметно снижаются глиноземистость, а соответственно и коэффициент глиноземистости, растут ниобий-танталовое, цирконий-гафниевое и цирконий-ниобиевое отношения, возрастает роль элементов цериевой группы в спектре РЗЭ и редкометалльно-редкоземельное минеральное разнообразие.

5. Наибольшую промышленную значимость имеют массивы II типа, именно с ними связаны крупные комплексные месторождения ниобия, циркония, иттрия, тантала, редких земель и криолита (Катугин, Улугтанзек, Гурайя, Мадейра).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Апельцин Ф.Р., Скоробогатова Н.В., Якушин Л.Н. Генетические черты редкометалльных гранитоидов Полярного Урала. М.: Недра, 1967. 199 с.

Аптон Б. Щелочная провинция Северо-Западной Гренландии // Щелочные породы. М.: Мир, 1976. С. 198–216.

Архангельская В.В. Катугинское комплексное тантал-ниобиевое с цирконием, редкими землями и криолитом месторождение / Геологическое строение и минералогия месторождений тантала России. М.: ВИМС, 2012. С. 94–155.

Безмен Н.И., Жариков В.А., Калинин А.Г. Плавление щелочных алюмосиликатных систем под давлением водно-водородного флюида (Робщ = 200 МПа) // Петрология. 2005. Т. 13. № 4. С. 451–472.

Бескин С.М., Ларин В.Н., Марин Ю.Б. Редкометалльные гранитовые формации. Л.: Недра, 1979. 280 с.

Бескин С.М., Марин Ю.Б. Об эволюции редкометаллогранитового минерало- и рудогенеза в геологической истории // ЗВМО. 2003. Т. 132. № 2. С. 1–14.

Бескин С.М., Марин Ю.Б. Геодинамические типы редкометалльного гранитового магматизма и ассоциирующие с ними месторождения // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 155–162.

Бескин С.М., Марин Ю.Б. Пегматитоносные гранитовые системы (систематика и продуктивность). М.: Научный Мир, 2019. 227 с.

Бескин С.М., Марин Ю.Б., Матиас В.В., Гаврилова С.П. Так, что же такое “редкометалльный гранит”? : история вопроса, терминология, типы, суждение о генезисе // ЗВМО. 1999. Т. 128. № 6. С. 28–41.

Быховский Л.З., Потанин С.Д. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений. М.: ВИМС, 2009. 157 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.

Гаврилова С.П., Бескин С.М. Классификация редкометалльных щелочных гранитов // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1992. Т. 67. Вып. 1. С. 103–114.

Ганзеев А.А., Гречищев О.К. Новый генетический тип редкометалльных щелочных гранитов Мадагаскара // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 6. С. 534–553.

Гребенников А.В. Гранитоиды А-типа: проблемы диагностики, формирования и систематики // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 9. С. 1356–1373.

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

Гурьянов В.А. Геология и металлогения Улканского района. Владивосток: Дальнаука, 2007. 227 с.

Ермолов П.В., Владимиров А.Г., Тихомирова Н.И. Петрология пересыщенных кремнеземом аплаитовых щелочных гранитов. Новосибирск: Наука. 1988. 88 с.

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

Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Ковач В.П. и др. Вариации источников магм щелочных гранитоидов и связанных с ними пород Халдзан-Бургетейской группы массивов (Западная Монголия) по изотопным (неодим, стронций и кислород) и геохимическим данным // Петрология. 2004. Т. 12. № 1. С. 24–42.

Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Ковач В.П. и др. Вариации изотопного состава неодима и канонических отношений содержаний несовместимых элементов как отражение смешения источников магм щелочных гранитоидов Халдзан-Бургетейского массива и одноименного редкометалльного месторождения, Западная Монголия // Петрология. 2009. Т. 17. № 3. С. 249–275.

Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Козловский А.М. и др. Два типа источников магм редкометалльных щелочных гранитоидов // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 6. С. 506–534.

Коваль П.В. Региональный геохимический анализ гранитоидов. Новосибирск: НИЦ ОИИГМ, 1998. 487 с.

Козлов В.Д. Редкоземельные элементы как индикаторы источников рудного вещества, степени дифференциации и рудоносности интрузий редкометалльных гранитов (Восточное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 1. С. 38–53.

Колотухина С.Е. Геология месторождений редких элементов Африки. М.: Наука, 1964. 302 с.
Костицын Ю.А., Алухов Е.Н. Хайламинский и Арысканский массивы щелочных гранитоидов, В. Саян: время и условия формирования по данным Rb-Sr изотопных и геохимических исследований // Геохимия. 2004. № 3. С. 243–253.

Ларин А.М., Котов А.Б., Владыкин Н.В. и др. Источники и геодинамическая обстановка формирования редкометалльных гранитов катугинского комплекса (Алданский шит) // Докл. РАН. 2015. т. 464. № 1. с. 76–80.

Марин Ю.Б. Петрогеохимические подтипы редкометалльных гранитовых формаций // Докл. АН. 1995. Т. 343. № 1. С. 96–99.

Никифоров А.В., Иванова А.А., Ярмолюк В.В. и др. Геохронология щелочных пород района Арысканского редкометалльного месторождения (В. Саян) // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 508. № 2. С. 193–202.

Серых В.И., Габов Ю.А., Новичкова А.П., Назарова К.М. Минеральный и химический состав ультракислых гранитоидов Центрального Казахстана. Алма-Ата: Наука Каз. ССР, 1976. 194 с.

Склярёв Е.В., Гладкокуб Д.П., Котов А.Б. и др. Генезис Катугинского редкометалльного месторождения: магматизм против метасоматоза // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35. № 3. С. 9–22.

Солодов Н.А., Усова Т.Ю., Осокин Е.Д. Нетрадиционные типы редкометалльного минерального сырья. М.: Недра, 1990. 248 с.

Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневецкая Н.А. Сравнение суперконтинентальных циклов в металлогении ниобия // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 55–75.

Трунилина В.А., Орлов Ю.С., Роев С.П., Зайцев А.И. Состав и генетические аспекты формирования гранитов А-типа Верхояно-Колымской складчатой области // Отечественная геология. 2008. № 5. С. 99–109.

Тугаринов А.И., Коваленко В.И. Геохимия гранитоидов Нигерии. М.: Наука, 1973. 106 с.

Шерба Г.Н., Кудряшов А.В., Масгутов Р.В., Малькова Р.Н. Граниты и метасоматиты геотектоногенов Казахстана. Алма-Ата: Наука Каз. ССР, 1981. 200 с.

Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Саватенков В.М. и др. Состав, источники и геодинамическая природа гигантских батолитов Центральной Азии: по данным геохимических и изотопных Nd исследований гранитоидов Хангайского зонального магматического ареала // Петрология. 2016. № 5. С. 468–498.

Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Саватенков В.М. и др. Позднемезозойская Восточно-Монгольская вулканическая область: строение, магматические ассоциации, источники магматизма // Петрология. 2020. № 6. С. 563–590.

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

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

Typification of Rare-Metal Alkaline Granites

Yu. B. Marin^{a, *}, V. V. Smolensky^a, and S. M. Beskin^b

^aSaint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

^bInstitute of Mineralogy, Geochemistry, and Crystal Chemistry of Rare Elements, Moscow, Russia

*e-mail: yubmarin@yandex.ru

A new variant of classification of rare-metal alkaline granites is proposed with allocation of three types, essentially differing on chemical and mineral composition and features of their Rare Metal - Rare Earth specialization. The average composition of rocks from reference massifs of each type of rare-metal alkaline granites is given, the selected types are briefly characterized and their most important indicative features are emphasized.

Keywords: rare-metal alkaline granites, agpaite index, aluminum saturation index, canonical ratios of incompatible trace elements, alkaline amphiboles and pyroxenes, tantaloniobates

REFERENCES

Abdel-Rahman A.M. Petrogenesis of anorogenic peralkaline granitic complexes from Eastern Egypt. *Mineral. Mag.* 2006. Vol. 70. P. 27–50.

Abu El-Rus M.A., Mohamed M.A., Lindh A. Mueilha rare metals granite, Eastern Desert of Egypt: an example of a magmatic-hydrothermal system in the Arabian-Nubian Shield. *Lithos.* 2017. Vol. 294–295. P. 362–382.

Apeltsin F.R., Skorobogatova N.V., Yakushin L.N. Genetic features of rare-metal granitoids of the Polar Urals. Moscow: Nedra, 1967. 199 p. (in Russian).

Arkhangelskaya V.V. Katuginское комплекс танталум-ниобий deposit with zirconium, rare earths and cryolite. In: *Geological structure mineralogy of tantalum deposits in Russia.* Moscow: VIMS, 2012. p. 94–155 (in Russian).

Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Gieré R., Kartashov P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *Canad. Miner.* 2010. Vol. 48. P. 673698.

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 S.M., Larin V.N., Marin Yu.B. Rare-metal granite formations. Leningrad: Nedra, **1979**. 280 p. (in Russian).
- Beskin S.M., Marin Yu.B. On the evolution of rare-metal granite mineralogy and ore genesis in geological history. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2003**. N 2. P. 1–14 (in Russian).
- Beskin S.M., Marin Yu.B. Geodynamic types of rare-metal granite magmatism and associated deposits. *J. Mining Institute*. **2013**. Vol. 200. P. 155–162 (in Russian).
- Beskin S.M., Marin Yu.B. Pegmatite-bearing granite systems. Moscow: Scientific World, **2019**. 227 p. (in Russian).
- Beskin S.M., Marin Yu.B., Mathias V.V., GavriloVA S.P. So, what is “rare-metal granite”? background, terminology, types, genesis judgment. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. 1999. Vol. 128. N 6. P. 28–41 (in Russian).
- Bezmen N.I., Zharikov V.A., Kalinichev A.G. Melting of alkaline aluminosilicate systems under pressure of hydrogen-hydrogen fluid ($P = 200$ MPa). *Petrology*. **2005**. Vol. 13, N 4. P. 451–472 (in Russian).
- Bykhovskiy L.Z., Potanin S.D. Geological and industrial types of rare metal deposits. Moscow: VIMS, **2009**. 157 p. (in Russian).
- Costi H.T., Dall'agnol R., Pichavant M., Rämö O.T. The peralkaline tin-mineralized Madeira cryolite albite-rich granite of Pitinga, Amazonian craton, Brazil: petrography, mineralogy and crystallization processes. *Canad. Miner.* **2009**. Vol. 47. P. 1301–1327.
- Drysdall A.R., Douch C.J. Nb–Th–Zr mineralization in microgranite–microsyenite at Jabal Tawlah, Midyan region, Kingdom of Saudi Arabia. *J. African Earth Sci.* **1986**. Vol. 4. P. 275–288.
- Drysdall A.R., Jackson N.J., Ramsay C.R., Douch C.J., Hackett D. Rare element mineralization related to Precambrian alkali granites of the Arabian Shield. *Econ. Geol.* **1984**. Vol. 79. P. 1366–1378.
- Ermolov P.V., Vladimirov A.G., Tikhomirova N.I. Petrology of apgaitic alkaline granites supersaturated with silica. Novosibirsk: Nauka. **1988**. 88 p. (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. 39–53.
- Ganseev A.A., Grechishchev O.K. A new genetic type of rare-metal alkaline granites of Madagascar. *Russian Geol. Geophys.* **2003**. Vol. 44. N 6. P. 534–553 (in Russian).
- GavriloVA S.P., Beskin S.M. Classification of rare-metal alkaline granites. *Bull. Moscow Soc. Naturalists, Dep. Geol.* **1992**. Vol. 67. Iss. 1. P. 103–114 (in Russian).
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Sklyarov E.V., Kotov A.B., Vladykin N.V., Larin A.M., Salnikova E.B., Saveleva V.B., Sharygin V.V., Starikova A.E., Tolmacheva E.V., Bazarova E.P., Kovach V.P., Alymova N.V. The unique Katugin rare-metal deposit (southern Siberia): Constraints on age and genesis. *Ore Geology Reviews*. **2017**. N 91. P. 246–263.
- Goodenough K.M., Upton B.G.J., Ellam R.M. Geochemical evolution of the Ivigtut granite, South Greenland: a fluorine-rich “A-type” intrusion. *Lithos*. **2000**. Vol. 51. P. 205–221.
- Grebnennikov A.V. A-type granitoids: problems of diagnosis, formation and systematic. *Russian Geol. Geophys.* **2014**. Vol. 55. N 9. P. 1356–1373 (in Russian).
- Grechishchev O.K., Zhmodik S.M., Shcherbov B.L. Rare metal deposit Ulug–Tanzek (Tuva, Russia). Novosibirsk: Academic Publishing house “Geo”, **2010**. 195 p. (in Russian).
- Guryanov V.A. Geology and metallogeny of Ulkan district. Vladivostok: Dalnauka, **2007**. 227 p. (in Russian).
- Hadj-Kaddour Z., Demaiffe D., Caby R. The alkaline–peralkaline granitic post-collisional Tin Zebane dyke swarm (Pan-African Tuareg shield, Algeria): prevalent mantle signature and late apgaitic differentiation. *Lithos*. **1998**. Vol. 45. P. 223–243.
- Kempe U., Mockel R., Graupner T. et al. The genesis of Zr–Nb–REE mineralisation at Khalzan Buregte (Western Mongolia) reconsidered. *Ore Geology Rev.* **2015**. Vol. 64. P. 602–625.
- Kerr A. Rare-Earth-Element (REE) mineralization in Labrador: a review of known environments and the geological context of current exploration activity. In: *Current Research*. Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources, Geological Survey, **2011**. Report 11-1. P. 109–143.
- Kolotukhina S.E. Geology of deposits of rare elements of Africa. Moscow: Nauka, **1964**. 302 p. (in Russian).
- Kostitsyn Yu.A., Altukhov E.N. Khaylaminisky and Arysksansky massifs of alkaline granitoids, V. Sayan: time and conditions of formation according to Rb–Sr isotopic and geochemical studies. *Geochemistry*. **2004**. N 3. P. 243–253 (in Russian).
- Koval P.V. Regional geochemical analysis of granitoids. Novosibirsk: SIC OIIGM, **1998**. 487 p. (in Russian).
- Kovalenko V.I. Petrology and geochemistry of rare-metal granites. Novosibirsk: Nauka, **1977**. 205 p. (in Russian).
- Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Kovach V.P. et al. Variations of magma sources of alkaline granitoids and related rocks of the Khaldzan–Buregteisk group of massifs (Western Mongolia) according to isotopic (neodymium, strontium and oxygen) and geochemical data. *Petrology*. **2004**. Vol. 12. N 1. P. 24–42 (in Russian).
- Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Kovach V.P. et al. Variations in the Isotopic composition of neodymium and canonical Ratios of the contents of incompatible Elements as a Reflection of the Mixing of Magma Sources of alkaline Granitoids of the Khaldzan–Buregteisk massif and the rare-metal deposit of the same Name, Western Mongolia. *Petrology*. **2009**. Vol. 17. N 3. P. 249–275 (in Russian).
- Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Kozlovskiy A.M. et al. Two types of magma sources of rare-metal alkaline granitoids. *Geol. Ore Deposits*. **2007**. Vol. 49. N 6. P. 506–534 (in Russian).

Kozlov V.D. Rare-earth elements as indicators of sources of ore matter, degree of differentiation and ore-bearing intrusions of rare-metal granites (Eastern Transbaikalia). *Russian Geol. Geophys.* **2009**. Vol. 50. N 1. P. 38–53 (in Russian).

Larin A.M., Kotov A.B., Vladykin N.V. et al. Sources and geodynamic conditions of the formation of rare-metal granites of the Katuginsky complex (Aldansky shield). *Doklady Earth Sci.* **2015**. Vol. 464, Iss. 1. P. 889–893.

Marin Yu.B. Petrogeochemical subtypes of rare-metal granite formations. *Reports Acad. Sci.* **1995**. Vol. 343. N 1. P. 96–99 (in Russian).

Melcher F., Graupner T., Gäbler H.E., Sitnikova M., Henjes-Kunst F., Oberthür T., Gerdes A., Dewaele S. Tantalum–(niobium–tin) mineralisation in African pegmatites and rare metal granites: constraints from Ta–Nb oxide mineralogy, geochemistry and U–Pb geochronology. *Ore Geology Reviews.* **2015**. Vol. 64. P. 667–719.

Nikiforov A.V., Ivanova A.A., Yarmolyuk V.V. et al. Geochronology of alkaline rocks of the Arysksky rare metal deposit area (V. Sayan). *Doklady Earth Sci.* **2023**. Vol. 508. N 2. P. 193–202 (in Russian).

Pillet D., Chenevoy M., Bélanger M. Pétrologie du granite peralcalin du Lac Brisson, Labrador central, Nouveau Québec. 1. Mode de mise en palce et évolution chimique. *Canad. J. Earth Sci.* **1992**. Vol. 29. P. 353–372.

Qiu Z.L., Liang D.Y., Wang Y.F., Sun Y., Li L.F. Zircon REE, trace element characteristics and U–Pb chronology in the Baerzhe alkaline granite: Implications to the petrological genesis and mineralization. *Acta Petrologica Sinica.* **2014**. Vol. 30. P. 1757–1768.

Sami M., Ntaflos T., Farahat E.S., Mohamed H.A., Ahmed A.F., Hauzenberger C. Mineralogical, geochemical and Sr–Nd isotopes characteristics of fluorite-bearing granites in the Northern Arabian-Nubian Shield, Egypt: constraints on petrogenesis and evolution of their associated rare metal mineralization. *Ore Geology Reviews.* **2017**. Vol. 88. P. 1–22.

Sami M., Ntaflos T., Farahat E.S., Mohamed H.A., Hauzenberger C., Ahmed A.F. Petrogenesis and geodynamic implications of Ediacaran highly fractionated A-type granitoids in the north Arabian-Nubian Shield (Egypt): constraints from wholerock geochemistry and Sr–Nd isotopes. *Lithos.* **2018**. Vol. 304–307. P. 329–346.

Schmitt A.K., Emmermann R., Trumbull R.B., Bühn B., Henjes-Kunst F. Petrogenesis and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Brandberg Complex, Namibia: Evidence for a major mantle contribution in metaluminous and peralkaline granites. *J. Petrol.* **2000**. Vol. 41. P. 1207–1239.

Serykh V.I., Gabov Yu.A., Novichkova A.P., Nazarova K.M. Mineral and chemical composition of ultraacid granitoids of Central Kazakhstan. Alma-Ata: Nauka Kaz.SSR, **1976**. 194 p. (in Russian).

Shcherba G.N., Kudryashov A.V., Masgutov R.V., Malkova R.N. Granites and metasomatites of geotectogens of Kazakhstan. Alma-Ata: Nauka Kaz. SSR, **1981**. 200 p. (in Russian).

Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Kotov A.B. et al. Genesis of the Katuginsky rare metal deposit: magmatism versus metasomatosis. *Pacific Geology.* **2016**. Vol. 35. N 3. P. 9–22 (in Russian).

Solodov N.A., Usova T.Yu., Osokin E.D. Unconventional types of rare-metal mineral raw materials. Moscow: Nedra, **1990**. 248 p. (in Russian).

Tkachev A.V., Rundqvist D.V., Vishnevskaya N.A. Comparison of supercontinental cycles in niobium metallogeny. *Geol. Ore Deposits.* **2020**. Vol. 62. N 1. P. 49–68.

Trunilina V.A., Orlov Yu.S., Roev S.P., Zaitsev A.I. Composition and genetic aspects of the formation of A-type granites of the Verkhoyno-Kolyma folded region. *Russian Geology.* **2008**. N 5. P. 99–109 (in Russian).

Tugarinov A.I., Kovalenko V.I. Geochemistry of Granitoids of Nigeria. Moscow: Nauka, **1973**. 106 p. (in Russian).

Upton B. Alkaline province of Northwest Greenland. In: The Alkaline Rocks. Ed. H. Sørensen. London: John Wiley and Sons, **1974**.

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

Vladykin N.V., Alymova N.V., Perfiliev V.V. Geochemical features of rare-metal granites of the Zashikhinsky massif, Vostochny Sayan. Petrology. **2016**. Vol. 24. N 5. P. 554–568 (in Russian).

Workman R.K., Hart S.R. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth Planet. Sci. Lett.* **2005**. Vol. 231. P. 53–72.

Wu F.Y., Sun D.Y., Li H.M., Jahn B.M., Wilde S. A-type granites in north-eastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chem. Geol.* **2002**. Vol. 87. P. 143–173.

Yarmolyuk V.V., Kozlovsky A.M., Savatenkov V.M. et al. Composition, sources and geodynamic nature of giant batholiths of Central Asia: according to geochemical and isotopic Nd studies of granitoids of the Khangai zonal magmatic area. *Petrology.* **2016**. N 5. P. 433–461.

Yarmolyuk V.V., Kozlovsky A.M., Savatenkov V.M. et al. Late Mesozoic East Mongolian volcanic region: structure, magmatic associations, sources of magmatism. *Petrology.* **2020**. N 6. P. 491–514.

Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I. Late Paleozoic and Early Mesozoic rare-metal magmatism of Central Asia: stages, areas and conditions of formation. *Geol. Ore Deposits.* **2012**. Vol. 54. N 5. P. 313–333.

Yarmolyuk V.V., Lykhin D.A., Kozlovsky A.M. et al. Composition, sources and mechanisms of formation of rare-metal granitoids of the Late Paleozoic East Sayan zone of alkaline magmatism (on the example of the Ulan-Tolgoi massif). *Petrology.* **2016**. Vol. 24. N 5. P. 477–496.

Zhu Z.Y., Wang R.C., Che X.D., Zhu J.C., Wei X.L., Huang X. Magmatic–hydrothermal rare-element mineralization in the songshugang granite (northeastern Jiangxi, China): Insights from an electron-microprobe study of Nb–Ta–Zr minerals. *Ore Geology Reviews.* **2015**. Vol. 65. P. 749–760.