



Примесный состав берилла из сподуменовых пегматитов месторождения Пашки (провинция Нуристан, Афганистан)

С. Г. Скублов^{1,2}, Н. Хамдард², М. А. Иванов², А. К. Гаврильчик², В. С. Стативко^{2,1}

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург
skublov@yandex.ru

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург
nazifullahhandard@gmail.com, ivanov_ma@pers.spmi.ru

Методом SIMS (масс-спектрометрии вторичных ионов) определен примесный состав кристаллов берилла (аквамарина) из пегматитов литиевого месторождения Пашки (провинция Нуристан, Афганистан). Выполнено 12 локальных определений содержания 20 химических элементов (включая галогены и воду). В сравнении с аквамаринном из редкометалльных, в том числе и сподуменовых пегматитов других регионов мира, изученный берилл существенно обогащен крупноионными литофильными элементами: Li (порядка 1100 ppm), Na (4500 ppm) и K (300 ppm). Высокие концентрации щелочных элементов в составе берилла из литиевых пегматитов рассматриваются в качестве генетического признака высокого потенциала щелочей, создающегося в процессе кристаллизации ассоциирующего с бериллом сподумена и других литиевых минералов. Эта известная генетически обусловленная особенность берилла, характерная для продуктивных литиевых пегматитов, перспективна для использования при разработке поисковых и оценочных критериев литиевых пегматитов Нуристана и других пегматитовых провинций.

Ключевые слова: месторождение Пашки, берилл, аквамарин, сподуменовые пегматиты, метод SIMS, редкие элементы, поисковые и оценочные критерии

Impurity composition of beryl from spodumene pegmatites of Pashki deposit (Nuristan province, Afghanistan)

S. G. Skublov^{1,2}, N. Hamdard², M. A. Ivanov², A. K. Gavrilchik², V. S. Stativko^{2,1}

¹ Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg

² St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg

The SIMS method (secondary ions mass-spectrometry) determined the impurity composition of a beryl crystals (aquamarine) from the pegmatites of the Pashki lithium deposit (Nuristan province, Afghanistan). 12 local determinations of the content of 20 chemical elements (including halogens and water) were performed. In comparison with aquamarine from rare metals, including spodumene pegmatites from other regions of the world, the studied beryl is significantly enriched with large ion lithophile elements: Li (about 1100 ppm), Na (4500 ppm) and K (300 ppm). High concentrations of alkaline elements in the beryl of lithium pegmatites are considered as a genetic sign of the high potential of alkalis created during the crystallization of spodumene associated with beryl and other lithium minerals. This well-known genetically determined feature of beryl, characteristic of productive lithium pegmatites, therefore is promising in the development of search and evaluation criteria for lithium pegmatites of Nuristan and other pegmatite provinces.

Keywords: Pashki deposit, beryl, aquamarine, spodumene pegmatites, SIMS method, trace elements, search and evaluation criteria

Введение

Тема востребованности и дефицитности литиевого сырья в настоящее время настолько актуальна, что безоговорочно ее можно отнести к числу наиболее глубоко исследованных сторон экономического, промышленно-технологического и ресурсного состояния минерально-сырьевых баз России и других стран. Хорошо известно, что на фоне грядущего истощения запасов активно разрабатываемых вулканогенных месторождений литиевого сырья интерес к таким рудным объектам, как литиевые (сподуменовые) пегматиты, возрастает.

Афганистан обладает крупными пегматитовыми месторождениями лития, пространственно и генети-

чески связанными с гранитами третьей фазы комплекса Лагман мел-палеогенового возраста. Редкометалльные пегматиты LCT-типа (специализированные на Li, Cs и Ta), к которым относятся сподуменовые пегматиты, широко представлены в восточной части страны, в основном в провинции Нуристан (Benham, Coats, 2007). Существенный вклад в их открытие и последующее исследование внесли советские геологи в 70-е годы XX века (Rossovskiy, Chmyrev, 1977). Однако комплексное минералого-геохимическое исследование этих рудных объектов не проводилось. В данной статье представлены некоторые результаты полевых работ, выполненных в 2023 г. Н. Хамдардом в провинции Нуристан на практически неизученном месторождении Пашки, где

Для цитирования: Скублов С. Г., Хамдард Н., Иванов М. А., Гаврильчик А. К., Стативко В. С. Примесный состав берилла из сподуменовых пегматитов месторождения Пашки (провинция Нуристан, Афганистан) // Вестник геонаук. 2024. 2 (350). С. 46–50. DOI: 10.19110/geov.2024.2.5

For citation: Skublov S. G., Hamdard N., Ivanov M. A., Gavrilchik A. K., Stativko V. S. Impurity composition of beryl from spodumene pegmatites of Pashki deposit (Nuristan province, Afghanistan). 2024, 2 (350), pp. 46–50, doi: 10.19110/geov.2024.2.5

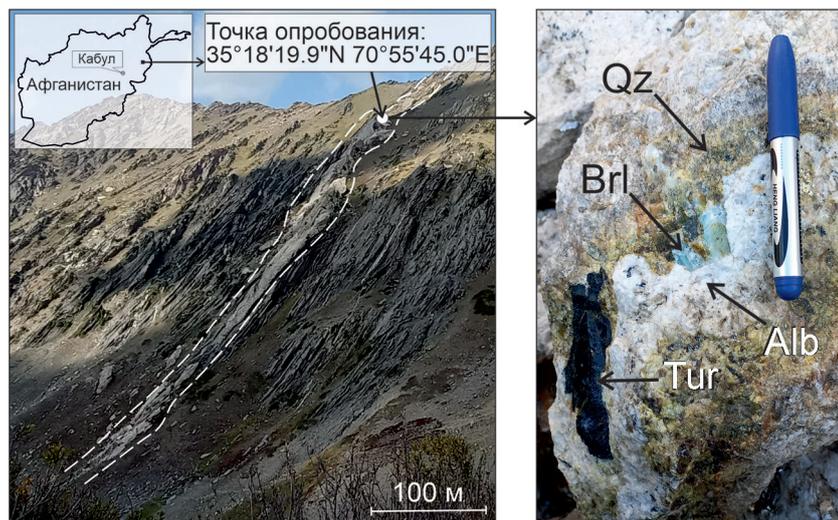


Рис. 1. Фотографии пегматитовой жилы месторождения Пашки и кристаллов аквамарина в пегматите (длина маркера примерно 15 см). Обозначения минералов: Brl — берилл (аквамарин), Tur — турмалин (шерл), Qz — кварц. На врезке показано положение месторождения

Fig. 1. Images of the pegmatite vein of the Pashki deposit and aquamarine crystals in pegmatite (marker length is approximately 15 cm). Mineral designations: Brl — beryl (aquamarine), Tur — tourmaline (sherl), Qz — quartz. The inset shows the position of the deposit

в одной из жил сподуменовых пегматитов впервые были обнаружены крупные кристаллы голубого берилла — аквамарина (рис. 1).

Берилл — типичный минерал редкометалльных, в том числе и литиевых пегматитов. В трудах отечественных и зарубежных геологов середины и конца XX века (А. И. Гинзбург, Н. А. Солодов, Б. М. Шмакин, E. N. Cameron, R. N. Jahns и другие) особенности примесного состава берилла рассмотрены в качестве генетически обусловленного типоморфного признака для пегматитов разной минералогической специализации — мусковитовой, бериллиевой и литиевой. В настоящее время в связи с развитием новых методов высокоточного определения химического состава минерального вещества, пришедших на смену прежним, менее точным методам, намечился переход на более достоверные и статистически обоснованные геохимические показатели проявлений типоморфизма минералов. Поэтому то, что раньше в закономерности изменения примесного состава берилла в пегматитах отмечалось лишь как тенденция, в настоящее время может быть выражено более достоверно и с высокой точностью.

Примером реализации нового подхода может служить изучение состава берилла из Шонгуйского месторождения редкометалльных пегматитов (Кольская провинция) с развитой, как считалось ранее, Li-Ta-Nb-минерализацией. Высокоточным методом SIMS в берилле из этого месторождения было установлено повышенное содержание щелочных металлов, что позволило пересмотреть прежние представления и обоснованно отнести данные пегматиты к Li-Cs-Na-типу (Morozova et al., 2023).

Главной задачей настоящей статьи является представление результатов высокоточного определения содержания элементов-примесей в берилле, обнаруженном в пегматитах литиевого месторождения Пашки, для их использования в качестве количественно выраженного типохимического признака проявления в пегматитах сподуменовой минерализации.

Геологическая характеристика месторождения

Месторождение Пашки находится в пределах Парунского пегматитового поля, в горах, на высоте от 3000 до 4300 м. Здесь на площади 2×3.5 км среди ме-

таморфических пород кашмундской серии верхнего триаса — кристаллических сланцев, кварцитопесчаников и мраморизованных известняков — обнажена серия протяженных (до 1 км и более при мощности до нескольких десятков метров) крутопадающих пегматитовых тел северо-восточного простирания с богатой сподуменовой минерализацией.

Состав рудоносных пегматитов указанного месторождения — кварц-сподумен-микроклин-альбитовый. В его пределах пегматиты представлены двумя сравнительно крупными телами: жилами № 1, 3 и жильной зоной № 2, имеющей вид «сетчатого» сочленения множества разноориентированных жильных форм. Предварительно оцененные запасы месторождения до глубины 100 м составляют 127 тыс. т Li₂O (Benham, Coats, 2007).

Жила № 3, в которой были обнаружены кристаллы аквамарина, имеет штокообразную форму и залегает преимущественно согласно вмещающим породам (тонкослоистым гранатовым и ставролитовым кварц-биотитовым сланцам). Она простирается на 600 м, мощность от 2 до 8 м. Характерно широкое распространение сахаровидных агрегатов мелкокристаллического альбита. На участках блоковой и пегматоидной структуры часто встречается турмалин (шерл и эльбаит), кристаллы которого достигают в длину 5×10 см.

В верхней (головной) части жилы № 3 обычно можно наблюдать мелкие кристаллы берилла длиной до 1—2 см. Крупные кристаллы прозрачного берилла (аквамарина нежно-голубого оттенка), исследованию состава которых посвящена данная статья, были обнаружены в этой жиле (абсолютная отметка 3800 метров) в ассоциации со сподуменом, микроклином, альбитом (клевеландитом), танталитом и полихромным турмалином (рис. 1).

Методы исследования

Три фрагмента кристаллов аквамарина из разных зерен размером около 1 см каждый были помещены в стандартный препарат (шайбу) вместе с зерном оливина, необходимого для оценки фона при анализе содержания летучих компонентов. Анализ состава берилла выполнялся на ионном зонде Cameca IMS-4f в Ярославском филиале ФТИАН им. К. А. Валиева РАН (аналитики Е. В. Потопов и С. Г. Симакин). На каждом

фрагменте равномерно по площади отполированной поверхности было выполнено по 4 анализа на 20 компонентов (табл. 1).

Методика измерения содержания малых и редких элементов, включая летучие компоненты (воду и галогены), подробно изложена в работе С. Г. Скублова с соавторами (2022). Точность определения составляет 10–15 % для элементов с концентрацией > 1 ppm и 10–20 % для элементов с концентрацией 0.1–1 ppm. Предел обнаружения определен как 5–10 ppb. Диаметр аналитического кратера порядка 20 мкм.

Обсуждение результатов

Данные по примесному составу изученного аквамарина (табл. 1) были сопоставлены с составом аквамарина из редкометалльных пегматитов различных регионов мира: Ильменского комплекса, Вьетнама, Ойгаинского месторождения (Киргизия), Алтая (Китай), Мозамбика и Мадагаскара (16 анализов, неопубликованные данные С. Г. Скублова и А. К. Гаврильчик); Ямранга (Восточный Непал) (50 анализов, Bhandari et al., 2023); месторождения Калифорния Блю Майн (США) (169 анализов, Pauly et al., 2021); Центральных Альп (Италия) (6 анализов, Vocchio et al., 2009); Коктогая (Китай), Минас-Жерайс (Бразилия) и Ноумас (Южная Африка) — всего 51 анализ (Cui et al., 2023); района Хунянь, Китай (2 анализа, Jiang et al., 2023).

На диаграмме соотношения содержания Li и Cs (рис. 2, а) аквамарин из месторождения Пашки отличается от аквамарина из других редкометалльных пег-

матитовых объектов повышенным содержанием Li (среднее (медианное) содержание 1097 ppm) и умеренным содержанием Cs (в среднем 260 ppm). В целом содержание Li в аквамарине из редкометалльных пегматитов может варьировать в очень широком диапазоне (по опубликованным работам и данным авторов) — от 60 до 2000 ppm. Ранее было установлено (Скублов и др., 2022), что среднее (медианное) содержание Li в аквамарине различного генезиса составляет около 200 ppm. Содержание Li в аквамарине из месторождения Пашки превышает это значение более чем в пять раз. Более высокое содержание Li, в среднем на уровне 4000–5000 ppm, установлено только для воробьевита из сподуменовых пегматитов Кольского п-ова (Скублов и др., 2022; Morozova et al., 2023). По содержанию Cs аквамарин из месторождения Пашки соответствует аквамарину из редкометалльных пегматитов комплекса Эронго (Намибия) (в среднем 331 ppm, Lum et al., 2016).

По соотношению щелочей (Na и K) аквамарин из месторождения Пашки демонстрирует повышенное содержание этих элементов (рис. 2, b) — содержание Na в среднем 4548 ppm, K — 309 ppm. Заметно более высокое содержание Na (на уровне 8500–9000 ppm) и K (600–650 ppm) было установлено для аквамарина из пегматитов Ноумас, Южная Африка, Cui et al., 2023). Если сравнивать с воробьевитом из сподуменовых пегматитов Кольского п-ова, то последний отличается более высоким содержанием Na (более 19 000 ppm) и схожим уровнем содержания K (Morozova et al., 2023).

Аквамарин из месторождения Пашки также выделяется повышенным содержанием Ca и Ti (рис. 2, с).

Таблица 1. Редкоэлементный состав (ppm) аквамарина из месторождения Пашки
Table 1. Trace element composition (ppm) of aquamarine from the Pashki deposit

Компонент Component	Фрагмент 1 / Fragment 1				Фрагмент 2 / Fragment 2				Фрагмент 3 / Fragment 3			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Li	1129	1102	1091	952	1046	911	963	949	1243	1270	1342	1996
Cs	347	173	293	278	162	225	267	146	309	252	226	396
Na	5101	4224	4411	4355	4274	4833	4830	3940	4474	4622	5506	6025
K	344	280	338	309	275	336	301	244	397	309	365	193
Rb	48.8	37.1	39.4	39.8	34.9	40.9	37.4	27.7	37.0	40.5	44.9	41.0
Sr	0.64	0.58	1.45	1.45	1.21	1.43	1.08	1.23	3.60	1.14	0.97	0.99
Ca	111	116	166	148	156	202	128	143	245	148	164	129
Mg	444	471	500	479	502	547	538	301	481	344	332	249
Fe	2968	2714	2691	2614	2315	2648	2752	1718	2827	2339	2559	2147
Mn	79.3	84.5	94.5	90.6	87.4	102	94.7	86.8	115	91.1	106	86.7
Ti	73.5	140	189	179	153	170	108	112	581*	119	248	85.2
V	1.15	1.41	1.47	1.25	1.16	1.38	1.17	0.90	2.62	1.11	1.35	1.16
Cr	16.4	22.9	66.3	61.4	51.2	75.4	44.0	52.3	44.3	47.4	47.3	39.9
Co	1.88	1.58	2.62	1.96	1.46	2.17	1.60	1.54	1.56	1.52	1.61	1.39
Sc	21.2	8.26	5.88	4.51	3.98	4.81	4.28	3.90	9.14	3.07	3.76	3.06
Ga	11.0	6.20	6.94	6.69	5.68	6.87	6.23	5.70	8.22	6.01	6.95	5.67
B	0.49	0.48	0.53	0.49	0.53	0.49	0.54	0.68	0.90	0.58	0.57	0.63
F	9.39	9.25	14.4	15.7	23.5	19.3	6.70	15.6	20.3	17.8	31.0	18.3
Cl	2210	2292	2402	1992	2359	2057	1947	1921	2897	2595	2804	3973
H ₂ O	36608	34710	33364	29926	32731	29563	32530	31735	29378	31011	30845	30677

Примечание: звездочкой отмечено содержание Ti, связанное с захватом микровключения.
Note: an asterisk marks Ti content associated with micro-inclusion capture.

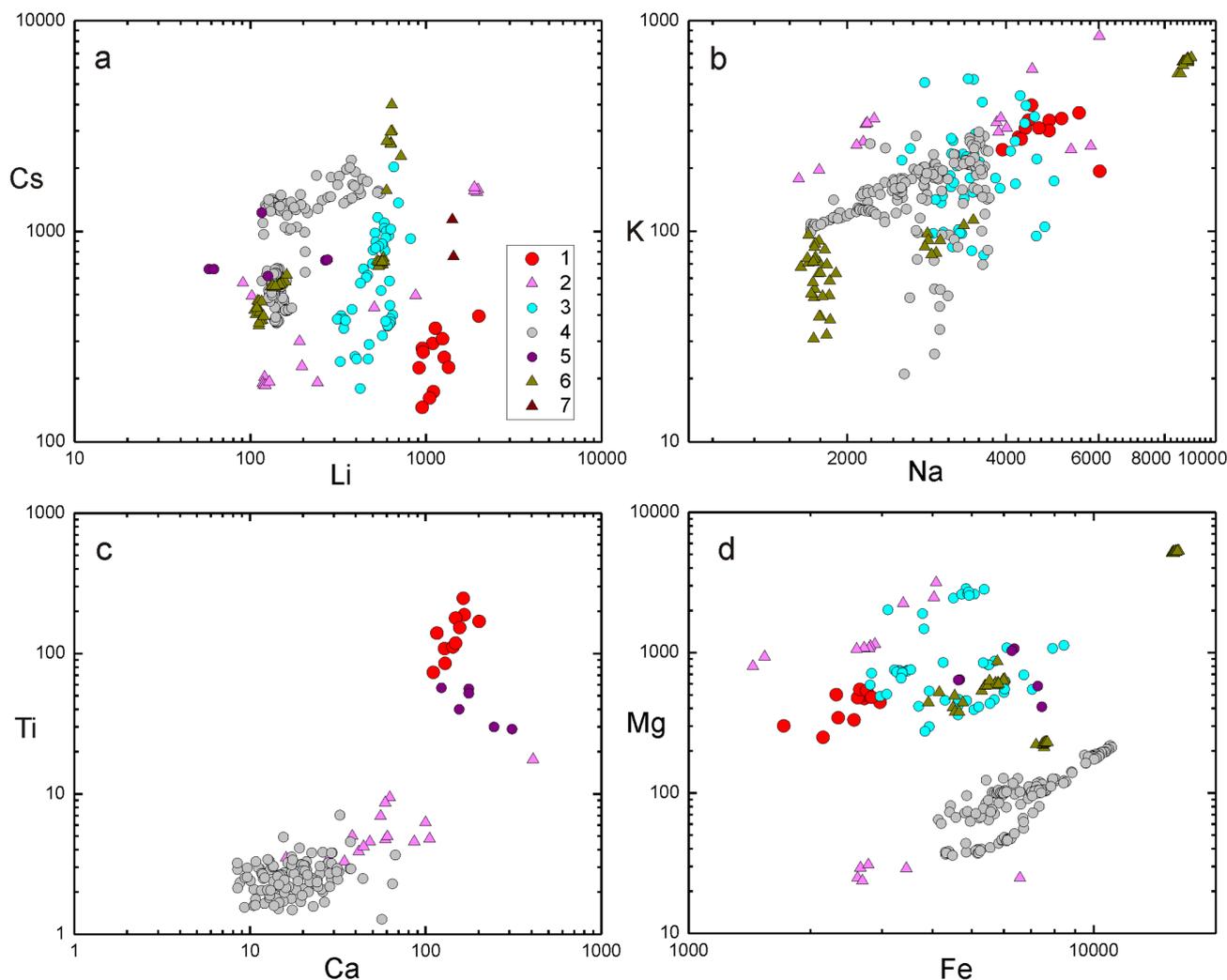


Рис. 2. Соотношение содержания редких элементов (ppm) в аквамарине из месторождения Пашки: а — Li-Cs; б — Na-K; с — Ca-Ti; д — Fe-Mg. Показан состав аквамарина: 1 — месторождения Пашки; 2–7 — редкометалльных пегматитов мира: 2 — Мозамбика и Мадагаскара; 3 — Ямранга (Восточный Непал) (Bhandari et al., 2023); 4 — месторождения Калифорния Блю Майн (США) (Pauly et al., 2021); 5 — Центральных Альп (Италия) (Bocchio et al., 2009); 6 — Коктогая (Китай), Минас-Жерайс (Бразилия) и Ноумас (Южная Африка) по (Cui et al., 2023); 7 — района Хуньянь (Китай) (Jiang et al., 2023)

Fig. 2. Ratio of content of trace elements (ppm) in aquamarine from the Pashki deposit: а — Li-Cs; б — Na-K; с — Ca-Ti; д — Fe-Mg. The composition of aquamarine is shown from: 1 — Pashki deposit; 2–7 — trace metal pegmatites of the world: 2 — Mozambique and Madagascar; 3 — Yamrang pegmatites (Eastern Nepal) (Bhandari et al., 2023); 4 — California Blue Mine deposits (USA) (Pauly et al., 2021); 5 — pegmatites of the Central Alps (Italy) (Bocchio et al., 2009); 6 — pegmatites of Coctogai (China), Minas Gerais (Brazil) and Noumas (South Africa) by (Cui et al., 2023); 7 — pegmatites of Hunyan district (China) (Jiang et al., 2023)

Среднее содержание Ca составляет в нем 148 ppm, Ti — 140 ppm (за исключением точки 9, табл. 1). По содержанию Ca ему соответствует аквамарин из пегматитов Центральных Альп (Италия) со средним содержанием 198 ppm, но в нем содержание Ti в разы ниже — 44 ppm (Bocchio et al., 2009). Содержание этих элементов в аквамарине из редкометалльных пегматитов комплекса Эронго (Намибия) заметно ниже — на уровне 60–80 ppm (Lum et al., 2016). При этом изучаемый аквамарин отличается пониженным содержанием Fe (в среднем 2631 ppm) по сравнению с аквамарин из других редкометалльных пегматитов (рис. 2, d). Содержание Mg (в среднем 475 ppm), напротив, соответствует средним значениям для аквамарина из редкометалльных пегматитов.

Аквамарин из месторождения Пашки в сравнении с аквамарин из редкометалльных пегматитов ком-

плекса Эронго отличается повышенным содержанием Cr (в среднем 47 и 5 ppm соответственно) и Mn (91 и 31 ppm) и пониженным — Sc (4 и 51 ppm). Среднее содержание Rb в аквамарине из месторождения Пашки примерно соответствует содержанию, установленному для редкометалльных пегматитов (40–60 ppm). Более высоким содержанием Rb отличается аквамарин месторождения Калифорния Блю Майн (в среднем 113 ppm, Pauly et al., 2021) и пегматитов Мозамбика (в среднем 143 ppm, данные авторов).

Количество Mn (в среднем 91 ppm) в аквамарине из месторождения Пашки соответствует аквамарину из различных типов пегматитов и грейзенов (Скублов и др., 2022).

По содержанию воды (в среднем 31 373 ppm) аквамарин из месторождения Пашки ближе к воробьевиту (в среднем 33 981 ppm), чем к среднему составу



аквамарины (19 978 ppm, Скублов и др., 2022). Аналогично, у аквамарина из месторождения Пашки гораздо выше содержание Cl (в среднем 2326 ppm, по сравнению с 493 ppm). Содержание F находится на сходном уровне (17 и 11 ppm соответственно).

Выводы

Характерной особенностью химического состава изученного берилла (аквамарины) из сподуменовых пегматитов месторождения Пашки является существенное обогащение такими крупноионными литофильными элементами, как Li (в среднем 1100 ppm), Na (4500 ppm) и K (300 ppm), а также водой (порядка 30 000 ppm). Это позволяет отнести его к бериллам щелочного (натриево-литиевого) типа с предполагаемым гетеровалентным изоморфизмом: $\text{Li}^+ + (\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Rb}^+, \text{Cs}^+) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Be}^{2+} + \text{вакансии в каналах}$.

Бериллы такого типа относятся к числу типоморфных для литиевых пегматитов и в ассоциации со сподуменом, полихромным турмалином (эльбаитом), альбитом и другими минералами свидетельствуют о достижении высокого потенциала Li, Na, K в водонасыщенной системе образования этих пород. В данном случае аквамарин характеризуется аномально высокой щелочностью (содержанием Li и Na), что позволяет использовать его в качестве важных поисково-оценочных признаков высокой продуктивности пегматитовых тел на литиевое сырье.

Авторы благодарны С. Г. Симакину и Е. В. Потапову (ЯФ ФТИАН РАН) за проведение аналитических исследований.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГГД РАН FMUW-2022-0005.

Литература / References

Скублов С. Г., Гаврилчик А. К., Березин А. В. Геохимия разновидностей берилла: сравнительный анализ и визуализация аналитических данных методами главных компонент (PCA) и стохастического вложения соседей с t-распределением (t-SNE) // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 455–469. DOI: 10.31897/PMI.2022.40

Skublov S. G., Gavrilchik A. K., Berezin A. V. Geochemistry of beryl varieties: comparative analysis and visualization of analytical data by principal component analysis (PCA) and t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE). *Journal of Mining Institute*, 2022, V. 255, pp. 455–469.

Benham A. J., Coats S. Minerals in Afghanistan: rare-metal deposits. Afghanistan Geological Survey website. 2007. (<https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/10924>)

Bhandari S., Qin K., Zhou Q., Evans N. J., Gyawali B. R., He C., Sun Z. Magmatic-hydrothermal evolution of the aquamarine-bearing Yamrang Pegmatite, Eastern Nepal: Insights from beryl, garnet, and tourmaline mineral chemistry. *Ore Geol. Rev.*, 2023, V. 162, 105713. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2023.105713

Bocchio R., Adamo, I., Caucia F. Aquamarine from the Masino-Bregaglia Massif, Central Alps, Italy // *Gems & Gemology*. 2009. Vol. 45. No. 3. P. 204–207.

Cui S., Xu B., Shen J., Miao Z., Wang Z. Gemology, spectroscopy, and mineralogy study of aquamarines of three different origins // *Crystals*. 2023. Vol. 13. 1478. DOI: 10.3390/cryst13101478

Jiang Y., Li J., Li P., Cai Y., Zhang L. Geochemical and spectroscopic features of beryl (aquamarine) from Renli No. 5 pegmatite in Hunan, Central China // *Minerals*. 2023. Vol. 13. 336. DOI: 10.3390/min13030336

Lum J.E., Viljoen F., Cairncross B., Frei D. Mineralogical and geochemical characteristics of BERYL (AQUAMARINE) from the Erongo Volcanic Complex, Namibia // *J. African Earth Sci.* 2016. Vol. 124. P. 104–125. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2016.09.006

Morozova L. N., Skublov S. G., Zozulya D. R., Serov P. A., Borisenko E. S., Solovjova A. N., Gavrilchik A. K. Li-Cs-Na-Rich beryl from beryl-bearing pegmatite dike No. 7 of the Shongui deposit, Kola Province, Russia // *Geosciences*. 2023. Vol. 13. 309. DOI: 10.3390/geosciences13100309

Pauly C., Gysi A. P., Pfaff K., Merkel I. Beryl as indicator of metasomatic processes in the California Blue Mine topaz-beryl pegmatite and associated miarolitic pockets. *Lithos*, 2021. 404, 106485. DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106485

Rossovskiy L. N., Chmyrev V. M. Distribution patterns of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Afghanistan) // *Int. Geol. Rev.* 1977. Vol. 19. Iss. 5. P. 511–520. DOI: 10.1080/00206817709471047

Поступила в редакцию / Received 31.01.2024