



Электронная версия доступна на сайте
[www.fmm.ru/Новые данные о минералах](http://www.fmm.ru/Новые_данные_о_минералах)

Минералогический музей
 имени А.Е. Ферсмана РАН

НДМ

Новые данные о минералах, том 58, вып. 3 (2024), 56–65

О находке хризоберилла в гранитном пегматите Придорожный на Юго-Западном Памире

Шодибеков М.А.¹, Паутов Л.А.^{2,3}, Мираков М.А.¹, Бахтибеков Т.Г.¹,
 Артемьев Д.А.³, Карпенко В.Ю.², Махмадшариф С.¹, Хворов П.В.³

¹Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана, Душанбе

²Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва

³Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН), Миасс

В статье приводится описание находки хризоберилла в гранитном пегматите Придорожный на правом борту реки Шахдары (Юго-Западный Памир, ГБАО, Таджикистан). Пегматит с хризобериллом представляет из себя крутопадающую маломощную жилу в гнейсах и гранитогнейсах Шахдаринской серии докембрийского возраста. Пегматит слабозонален, преимущественно кварц-олигоклазового состава с подчиненной ролью альбита, калиевого полевого шпата, мусковита, шерла, граната спессартин-альмандинового ряда. Акцессорные минералы: андалузит, монацит-(Ce), циркон, фторопатит, титанит, Cs-содержащий берилл и недоизученные W-содержащие тантало-ниобаты. Хризоберилл представлен в пегматите одиночными пластинчатыми и таблитчатыми кристаллами, двойниковыми и реже тройниковыми сростками. Размер выделений хризоберилла варьирует от 0.5 до 10 мм. Цвет минерала желтовато-зеленый. В коротковолновом ультрафиолетовом свете минерал люминесцирует в желто-оранжевых тонах. Микротвердость VHN_{200} – 1607. Измеренная плотность 3.67(2) г/см³. Параметры элементарной ячейки хризоберилла: $a = 4.430(1)$, $b = 9.410(1)$, $c = 5.480(1)$ Å. Приведены ИК- и КР-спектры минерала. Эмпирическая формула описываемого хризоберилла $Be_{1.00}(Al_{1.97}Fe_{0.02}Ti_{0.01})_{2.00}O_4$. По данным LA-ICP-MS хризоберилл обогащен оловом (Sn > 1900 ppm), бором (B > 140 ppm) и скандием (Sc < 100 ppm). Приведено сравнение содержаний элементов-примесей в хризоберилле и берилле из пегматита Придорожный. Образец с хризобериллом передан в Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН (№ FMM_1_98624).

Ключевые слова: хризоберилл, пегматиты, Шахдара, Юго-Западный Памир, ГБАО, Таджикистан, элементы-примеси, бериллий, LA-ICP-MS.

При полевых работах в бассейне реки Шахдары на Юго-Западном Памире в 2018 году в гранитном пегматите Придорожный был обнаружен хризоберилл, ранее неизвестный в этом пегматитовом теле. Находки хризоберилла на Памире довольно редки (рис. 1). Впервые хризоберилл с Памира описали Л.Н. Россковский и А.Н. Шостацкий [1964] в пегматитах на Пиш-Ходарживском (местное название Пиш-Хидоржевском) участке Ваханского хребта. В этих пегматитах хризоберилл встречается исключительно в виде желваков, которые представляют собой кристаллы хризоберилла,

«одетые» в агрегаты мелкочешуйчатого белого мусковита. В Геологическом музее Геологической службы Таджикистана (Душанбе) экспонируется образец хризоберилла со слюистой оторочкой из коллекции В.Ф. Дурнева с привязкой: «участок Нишусп, ЮЗ Памир».

Пегматит Придорожный, в котором обнаружен хризоберилл, расположен на правом борту реки Шахдары, в ее среднем течении, напротив кишлака Шивоз, в скальном откосе автодороги Хорог – Рошткала – Джаушангоз (Горно-Бадахшанская автономная область, Республика Таджикистан).



Рис. 1. Схематическая карта Юго-Западного Памира с отмеченными проявлениями хризоберилла: 1 – пегматиты Пиш-Ходарживского участка; 2 – пегматиты участка Нишусп; 3 – пегматит Придорожный.

Пегматит Придорожный, так же как и вблизи расположенные пегматитовые жилы Лесхозовская и Шахдаринская, залегает в гнейсах и гранитогнейсах шахдаринской серии докембрийского возраста. Возникновение этих пегматитов предположительно связывают со становлением неогеновых лейкократовых стресс-гранитов памиро-шугнанского комплекса, хотя какой-либо пространственной связи пегматитов с гранитами не отмечается [Коноваленко и др., 2001; Коноваленко, 2006].

Пегматит Придорожный представляет из себя крутопадающую жилу мощностью от 10 до 30 см (рис. 2а–в). Вверх по склону пегматит прослежен на расстоянии приблизительно 40 м, далее труднодоступен для наблюдений. Простираение пегматитовой жилы субширотное, падение от 70° на юг до вертикального. Контакт пегматита с вмещающими гнейсами резкий секущий. Видимых изменений гнейсов на контакте с жилой не наблюдается (рис. 2в, г). Участками в пегматите встречаются в различной степени переработанные ксенолиты вмещающих кристаллических сланцев и гнейсов (рис. 2в, д).

Пегматитовая жила Придорожная имеет отчетливо симметрично-зональное строение, но переходы от одной зоны пегматита к другой постепенные. Призальбантовые зоны сложены лейкократовым мелко-среднезернистым кварц-олигоклазовым агрегатом с резко подчиненной ролью мусковита, шерла, марганцовистого алмандина. По направлению к осевой части жилы размер зерен минералов увеличивается, порода приобретает средне-крупнозернистую структуру, в качестве породообразующего минерала появляется пертитовый микроклин, увеличивается доля шерла и участками мусковита (рис. 2б–г). В крупнозернистой осевой зоне пегматита встречаются небольшие миаролы, на стенках которых нарастают

щетки альбита, призматические кристаллы шерла и длиннопризматические кристаллы горного хрусталя. Особенностью этого пегматита, в отличие от пегматитовых жил Лесхозовская и Шахдаринская, является присутствие андалузита, который образует длиннопризматические розовые зерна длиной от 3 мм до 1 см (рис. 2е). Из других акцессорных минералов в пегматите Придорожный обнаружены монацит-(Се), гранаты спессартин-альмандинового ряда, циркон, фторapatит, титанит, топаз, Cs-содержащий берилл и недоизученные W-содержащие тантало-ниобаты.

Хризоберилл встречается в центральной зоне пегматитовой жилы Придорожная довольно часто. В некоторых участках количество выделений хризоберилла достигает 80–100 на 1 дм² поверхности скола пегматита. Хризоберилл представлен одиночными пластинчатыми и таблитчатыми кристаллами, двойниковыми и реже тройниковыми сростками. Размер выделений хризоберилла варьирует от 0.5 до 10 мм, наиболее часто встречаются кристаллы и их сростки размером 5–7 мм в поперечнике (рис. 4). В тех же участках пегматитовой жилы, где обильны выделения хризоберилла, наблюдаются призматические кристаллы и сростки кристаллов от светло-голубого до синего цвета Cs-содержащего железистого берилла (рис. 4а, г). К сожалению, встречены только единичные сростания берилла с хризобериллом, по которым нельзя однозначно сказать, какой из этих минералов кристаллизовался раньше.

В отличие от хризоберилла из Пиш-Ходарживского участка на Юго-Западном Памире, выделения которого заключены в слюдистую рубашку [Россовский, Шостацкий, 1964], описываемый хризоберилл образует кристаллы и сростки с блестящими чистыми гранями. Лишь некоторые выделения хризоберилла в кварце окружены тонкой оторочкой из мусковита (рис. 3), уверенно видимой лишь при электронно-микроскопическом изучении.

Большинство кристаллов хризоберилла полупрозрачны, некоторые прозрачны. Цвет минерала желтовато-зеленый. Блеск сильный стеклянный, на сколах жирный. У хризоберилла обычно хорошо проявлена спайность по (011), у минерала из Придорожной пегматитовой жилы спайности мы не наблюдали. В прозрачных шлифах минерал бесцветный прозрачный, в более толстых шлифах, чем стандартные, окраска слабая желтовато-зеленая. Плеохроизм незаметен. Минерал оптически двuosный положительный, 2V большой (до 80°), сильно изменчив в пределах зерна. Твердость по Моосу выше 7. Микротвердость, измеренная на микротвердомере ПМТ-3, тарированном по NaCl, составила VHN₂₀₀ – 1607 (по семи замерам при разбросе от 1414 до 1825). Это значение по-

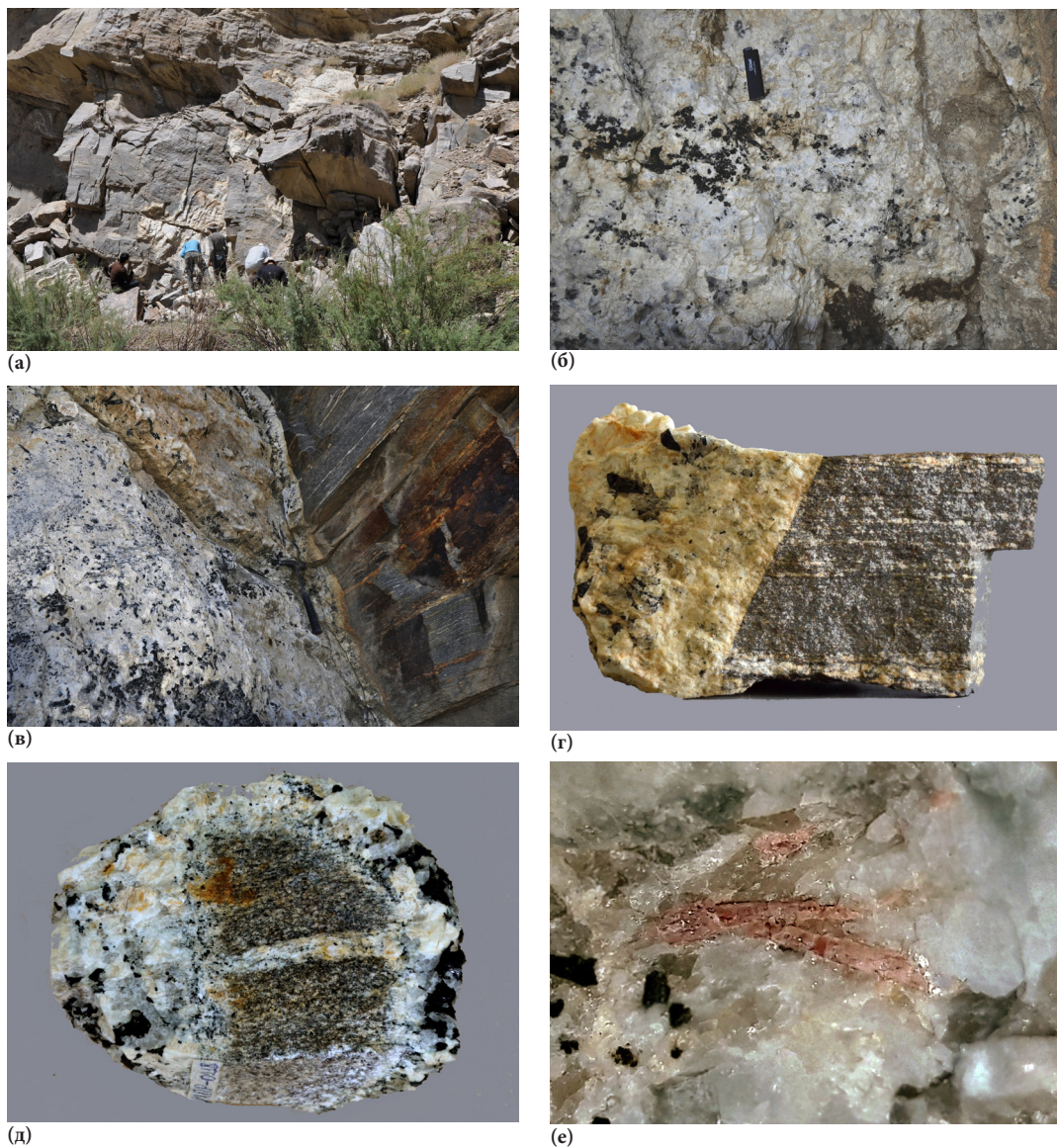


Рис. 2. Пегматитовая жила Придорожная, правый борт реки Шахдары, Юго-Западный Памир, ГБАО: а – вид пегматитовой жилы в гнейсах шахдаринской серии; б – облик пегматита в обнажении; в – резкий секущий контакт пегматитовой жилы с гнейсами; г – образец из контакта пегматита с гнейсами, в котором видна мелкозернистая приальбандовая зона, постепенно переходящая в среднезернистую и далее к оси жилы в крупнозернистый пегматит с черным турмалином; д – частично резорбированный и разбитый ксенолит гнейса в пегматите, размер образца 8.2 × 6 см; е – аксессуарный андалузит (сросток столчатых кристаллов розового цвета) в пегматите, ширина поля зрения 15 мм.

падает в диапазон микротвердости хризоберилла (VHN 1125–1927), приведенный в работе С.И. Лебедевой [1977]. Плотность, измеренная уравниванием зерен минерала в растворе жидкости Клеричи, оказалась равной 3.67(2) г/см³ и близка к плотности хризоберилла, приводимой в справочной литературе (3.63–3.84 г/см³), но несколько ниже расчетной плотности 3.725 г/см³ по измерен-

ным элементному составу и параметрам элементарной ячейки минерала. Такое различие между измеренной и вычисленной плотностью мы связываем с наличием в описываемом хризоберилле многочисленных «шторок» с очень мелкими (1–5 мкм), вероятно, вторичными или мнимо вторичными газовой-жидкими включениями.

В коротковолновом ультрафиолетовом свете

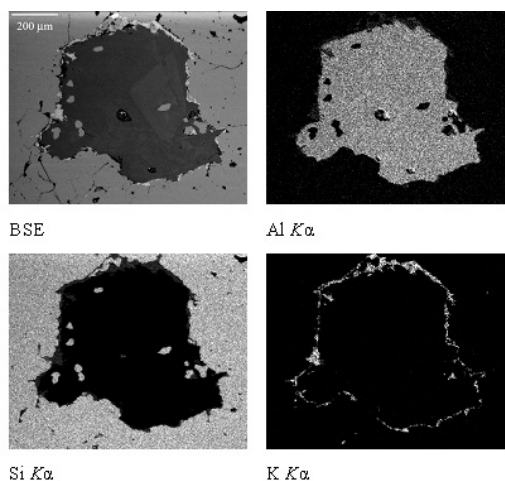


Рис. 3. Слабозональное зерно хризоберилла в кварце с каймой мусковита. Изображение в режиме BSE и рентгеновские карты распределения элементов (символы элементов и рентгеновские линии указаны под картами). Зональность, видимая на изображении в режиме BSE, обусловлена незначительными вариациями содержания железа.

хризоберилл из пегматита Придорожный неярко люминесцирует в оранжево-желтых тонах (рис. 5). На сколотых кристаллах наблюдается неравномерность в интенсивности люминесценции: краевые зоны кристаллов светятся несколько ярче по сравнению с центральными. В длинноволновом ультрафиолетовом свете люминесценции у минерала не наблюдается.

Инфракрасные спектры хризоберилла из пегматита Придорожный приведены на рис. 6. Методом ИК-спектроскопии Н.А. Громаловой [2010] в спектрах природного хризоберилла и его разновидности александрита с Урала выявлены линии OH^- в области $3100\text{--}3600\text{ см}^{-1}$, при этом группа OH^- присутствует в структуре в двух различных позициях. Первая позиция характеризуется полосой поглощения $3230\text{--}3240\text{ см}^{-1}$, вторая позиция OH^- проявляется в спектре менее интенсивной полосой в области $3400\text{--}3600\text{ см}^{-1}$. В хризоберилле с Памира полосы OH^- групп не наблюдаются или проявлены очень слабо. ИК-спектр описываемого хризоберилла в области $370\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ весьма близок к спектрам хризоберилла из других месторождений

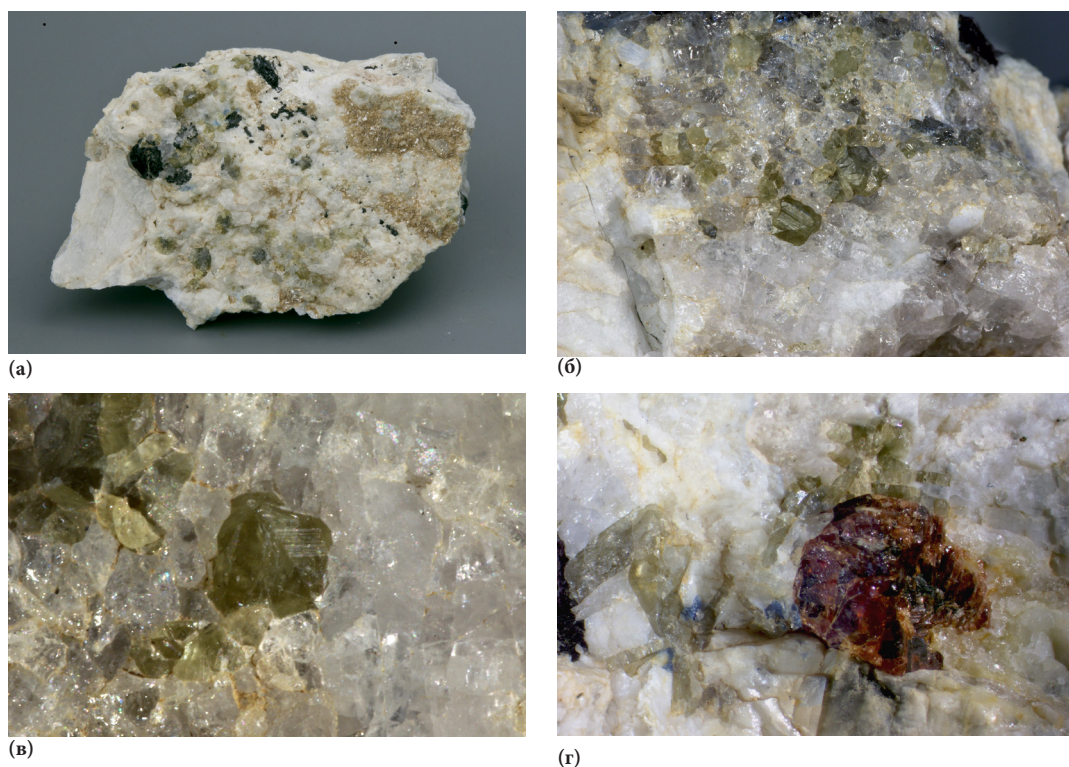
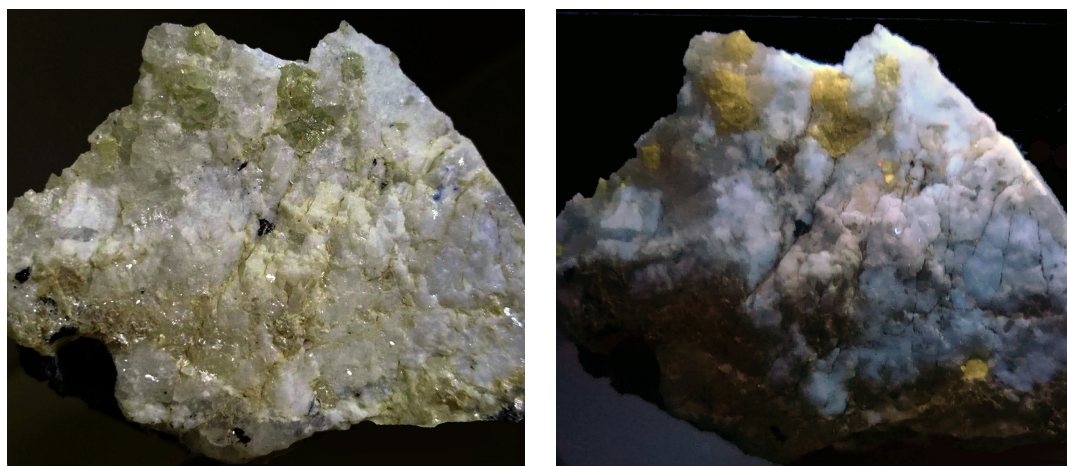


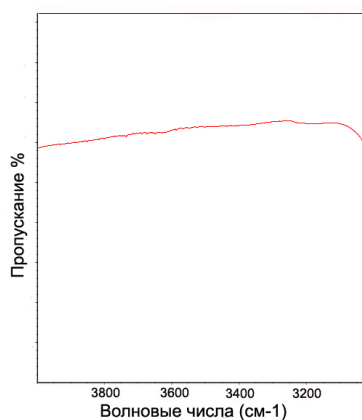
Рис. 4. Хризоберилл в пегматите Придорожный, ЮЗ Памир: а – обр. FMM_1_98624, кристаллы и зерна хризоберилла (желто-зеленые) в пегматите, мелкие светло-синие кристаллы – берилл, размер образца $8 \times 5 \times 4\text{ см}$; б – многочисленные кристаллы и сдвоженные зерна хризоберилла в кварц-альбитовом агрегате, ширина поля зрения 6 см; в – двойник хризоберилла в кварце, ширина поля зрения 2.2 см; г – сколы таблитчатых кристаллов хризоберилла (желто-зеленые) в кварц-альбитовом агрегате, синие зерна – берилл, темно-красное изометричное зерно – гранат альмандин-спессартинового ряда, черные вrostки в гранате – W-содержащий ферроколумбит, ширина поля зрения 13 мм.



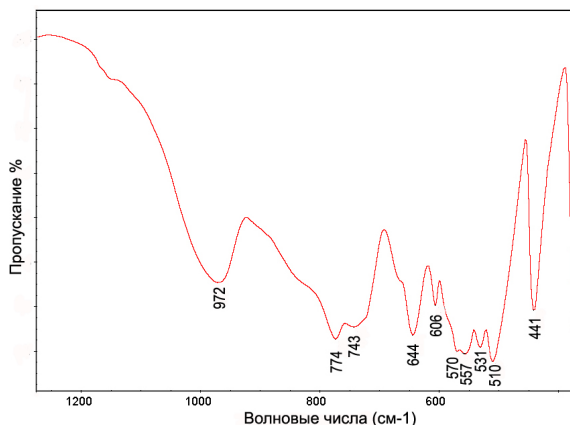
(а)

(б)

Рис. 5. Образец пегматита с кристаллами и сростками кристаллов хризоберилла из пегматитовой жилы Придорожная, Юго-Западный Памир: а – вид образца при дневном свете, размер образца 5 × 3 см; б – вид образца при косом освещении коротким ультрафиолетовым светом.



(а)



(б)

Рис. 6. ИК-спектры хризоберилла из пегматита Придорожный, Юго-Западный Памир. Условия получения спектров: инфракрасный фурье-спектрометр ФСМ 2201, препарат – суспензия минерала на вазелиновом масле, подложка – КВг.

[Hofmeister et al., 1987; Chukanov, Viggasina, 2020]. Рамановский спектр (рис. 7) минерала с Юго-Западного Памира соответствует КР-спектрам хризоберилла, приведенным в базе <https://ruff.info> и опубликованным в литературе [Орлов и др., 2007; Malíčková et al., 2020; Gao et al., 2023]. Колебаний ОН-групп в раман-спектре нашего хризоберилла не зафиксировано. С интерпретацией инфракрасных спектров и спектров комбинационного рассеяния хризоберилла можно познакомиться по работам ряда авторов [Hofmeister et al., 1987; Chukanov, Viggasina, 2020, и др.].

Рентгеновская порошковая диаграмма хризоберилла из пегматита Придорожный близка к эталонной рентгенограмме минерала и приведена в табл. 1.

Параметры элементарной ромбической ячейки хризоберилла из образца МПР-0518 вычислены методом наименьших квадратов и составили: $a = 4.430(1)$, $b = 9.410(1)$, $c = 5.480(1)$ Å.

Элементный состав хризоберилла из пегматита Придорожный изучался методами электронно-зондового микроанализа в ИГССС НАНТ (Душанбе) и в лаборатории Минералогического музея имени А.Е. Ферсмана РАН (Москва). Элементы-примеси и бериллий определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с лазерным пробоотбором (LA-ICP-MS) в ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (Миасс) и в Минералогическом музее имени А.Е. Ферсмана РАН. Химический состав хризоберилла из пегматита

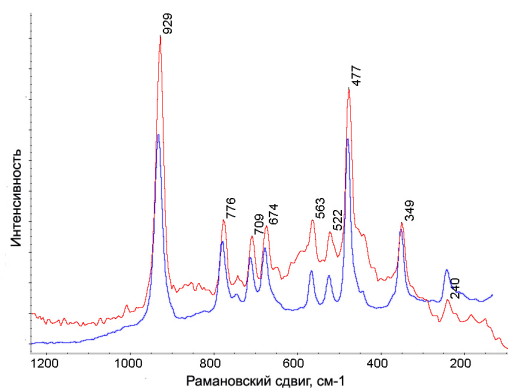


Рис. 7. Рамановские спектры хризоберилла. Верхний красный спектр – хризоберилл, пегматит Придорожный, Юго-Западный Памир. Условия получения спектра: рамановский спектрометр Thermo DXR 2xi с конфокальным микроскопом Olympus, длина волны лазера 532 нм, мощность лазера 10 мВт, экспозиция 0.5 сек, количество сканирований 10, решетка 400 штрихов/мм, диафрагма 25 микрон, разрешение 2 см⁻¹, калибровка проведена по стандартному образцу кремния. Нижний синий спектр – хризоберилл, Шри-Ланка, RRUFF 080110.

Придорожный и для сравнения из других местонахождений этого минерала приведены в табл. 2. Расчет формульных коэффициентов описываемого хризоберилла по анионам (O = 4) приводит к формуле: $Be_{1.00}(Al_{1.97}Fe_{0.02}Ti_{0.01}Ti_{2.00}O_4)$. Так как мы не определяли соотношение Fe^{+2}/Fe^{+3} в хризоберилле, то все железо рассчитано и приведено в нашем анализе как FeO, хотя какая-то часть железа может присутствовать в минерале со степенью окисления +3. Вопросам изоморфного вхождения двух- и трехвалентного железа в октаэдрические позиции природных и синтетических хризобериллов, в том числе его разновидности александрита, посвящен ряд работ [Громалова, 2010; Урусов и др. 2011, и др.]. В нашем случае возможное вхождение железа (II) в структуру минерала подтверждается присутствием небольших количеств титана и олова. Вероятным механизмом вхождения железа в структуру хризоберилла может являться гетеро-валентное изоморфное замещение по схеме: $Fe^{+2} + (Ti, Sn)^{+4} = 2(Al, Fe)^{+3}$. Во многих опубликованных работах в составе хризоберилла отмечается присутствие кремния, причем иногда в весьма высоких концентрациях (например, в хризоберилле из пегматитов Индии SiO_2 2.05% [Soman et al., 1985], в хризоберилле из пегматитов Пиш-Ходарживского участка на ЮЗ Памире – 3.94% [Россовский, Шостацкий, 1964], в хризоберилле из пегматитов Северного Приладожья – 5.68 мас.% [Сафронова, 1971] и т.д.). Исходя из структурного сходства хризоберилла и форстерита А.А. Беус [1960] счи-

Таблица 1. Рентгеновские порошкограммы хризоберилла

Пегматит Придорожный, Юго-Западный Памир*		Минас-Жерайс, Бразилия JCPDS 45-1445		
<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>	<i>hkl</i>
4.706	10	4.7088	2	0 2 0
4.008	40	4.0082	13	1 1 0
3.576	4	3.5666	1	0 2 1
3.448	4	3.4438	1	1 0 1
3.236	85	3.2344	37	1 1 1
2.783	3	2.7802	2	1 2 1
2.736	4	2.7380	1	0 0 2
2.561	95	2.5609	65	1 3 0
2.369	13	2.3681	7	0 2 2
2.354	5	2.3535	5	0 4 0
2.320	79	2.3199	37	1 3 1
2.263	78	2.2622	41	1 1 2
2.163	7	2.1627	6	0 4 1
2.089	5	2.0883	83	1 2 2
2.079	100	2.0778	34	1 4 0
2.001	7	2.0063	4	2 1 1
		1.9417	1	1 4 1
		1.8827	2	2 2 1
1.871	7	1.8707	9	1 3 2
1.819	6	1.8096	1	2 3 0
1.736	4	1.7325	3	1 5 0
		1.703	1	0 2 3
		1.6886	1	1 0 3
1.663	21	1.6622	16	1 1 3
1.654	15	1.6519	17	1 5 1
1.618	80	1.6174	100	2 2 2
1.614	66	1.6129	95	2 4 0
		1.5886	2	1 2 3
1.543	12	1.5471	13	2 4 1
1.509	10	1.5082	22	0 6 2
1.488	16	1.4872	14	1 3 3
1.465	18	1.4644	41	1 5 2
1.444	2	1.4428	4	0 4 3
1.409	3	1.4094	4	3 1 1
		1.3934	2	2 1 3
1.384	2	1.3838	4	2 4 2
		1.3871	3	2 5 1
1.371	31	1.3699	33	0 0 4
1.362	41	1.3613	58	0 6 2

Примечание. * Анализ проведен на дифрактометре ДРОН-3, Cu-анод, Ni-фильтр, непрерывный режим, скорость сканирования 1 градус в минуту, диапазон 2θ 9–70°, внутренний стандарт кварц. Аналитик М.А. Шодибеков.

тал вполне возможным вхождение примеси кремния в хризоберилл. Однако высокие содержания кремния в хризоберилле в большинстве случаев получены мокрым химическим анализом (включая весовые, колориметрические, атомно-абсорбционные методы и ИСП-ОЭС, -МС) и рентгено-флуоресцентным анализом, т.е. методами, для которых материал для анализа должен быть тонко истерт. Учитывая высокие абразивные свойства хризоберилла, нельзя исключить загрязнения проб материалом ступок или истирателей. К сожалению, в отличие от работ XIX века [Awdejew, 1843], в современных работах редко описываются процедуры подготовки проб к анализам. В анализах хризоберилла, выполненных с помощью электронного микронзонда, обычно содержание SiO_2 указывается ниже предела обнаружения или не превышает 0.1 мас. %.

При рядовых анализах хризоберилла из пегматита Придорожный кремний обнаружен не был. Дополнительно было проведено сканирование

рентгеновского спектра на волнодисперсионном спектрометре с кристаллом ТАР на микронзонде JСХА-733 при токе зонда 100 нА и ускоряющем напряжении 20 кВ, которое не выявило наличие пика Si K α . Это свидетельствует о том, что содержание кремния в описываемом минерале менее 0.02 мас. %.

Бериллий в хризоберилле из пегматита Придорожный измерен методом LA-ICP-MS по образцу сравнения – желто-зеленому прозрачному бериллу из пегматитов Воьныни. В качестве внутреннего стандарта использовался ^{27}Al . Полученное содержание BeO близко к расчетному содержанию оксида бериллия в хризоберилле (табл. 2). Отметим, что при использовании для градуировки международных стандартов – стеклов NIST SRM-612 и USGS GSD-1g – были получены более низкие содержания BeO, 16.74 мас. % (среднее по пяти анализам при разбросе от 16.26 до 17.20 мас. %), по сравнению с расчетным для хризоберилла значением (BeO 19.70 мас. %). Близкая ситуация (измеренное

Таблица 2. Химический состав (мас. %) хризоберилла из различных месторождений

Компоненты	1	2	3	4	5	6
SiO_2	н.п.о.	3.94	н.п.о.	1.90	0.02	
Al_2O_3	78.38	73.43	78.4	76.00	78.63	80.30
TiO_2	0.48	0.59		0.34	0.11	
SnO_2	0.28			0.12		
Fe_2O_3		0.85		0.57		
FeO	1.31	0.36	3.9	1.39	0.55	
MgO	0.02	0.20		0.65		
CaO	0.05	нет		0.27		
BeO	19.61	18.84	18.0	19.05	19.32	19.70
MnO	н.п.о.	0.06		0.00		
Cr_2O_3	н.п.о.	0.003		0.08	0.02	
Сумма	100.13	99.21	100.3	100.47	98.67	100.00

Примечания. 1 – хризоберилл из пегматита Придорожный, ЮЗ Памир. Условия анализа: JСХА-733 JEOL, Si(Li)-детектор, 20 кВ, 1 нА, расчет концентраций выполнен методом ХРР с учетом бериллия в программе CalcZAF; BeO измерен методом LA-ICP-MS, масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой HP 4500 и системой лазерной абляции New Wave Research UP-213, частота повторения импульсов лазера 20 Hz, диаметр пятна абляции 40 мкм, несущий газ в ячейке абляции Ar (скорость потока 0.4 л/мин), образец сравнения – берилл с Воьныни.

2 – хризоберилл из пегматитов Ваханского хребта, ЮЗ Памир. Мокрый хим. анализ, в сумму анализа включены: Li_2O 0.41, K_2O 0.20, Na_2O 0.09, H_2O^+ 0.10, H_2O^- 0.10 мас. %, аналитик Л.М. Либина [Россовский, Шостацкий, 1964].

3 – хризоберилл из Бразилии. Мокрый хим. анализ, проба истерта в металлической ступке [Awdejew, 1843].

4 – пластинчатая разность серовато-зеленого цвета, Изумрудные копи, Урал. Мокрый хим. анализ, а сумму анализа включена H_2O 0.10 мас. %, аналитик М.Е. Казакова [Власов, Кутукова, 1960].

5 – хризоберилл из лейкогранитов, Касерес, Испания. Электронно-зондовый анализ, BeO – LA-ICP-MS, в сумму анализа включен Na_2O 0.02 мас. % [Merino et al., 2013].

6 – BeAl_2O_4 , теоретический состав.

н.п.о. – ниже предела обнаружения; «нет» – так в оригинале; пустая клетка – данные отсутствуют.

содержание BeO от 17.43 до 17.85 мас.%) наблюдалась при изучении хризоберилла из Камеруна методом LA-ICP-MS при использовании в качестве стандарта на бериллий того же стекла NIST-612 [Kanouo et al., 2016]. Возможно, главная причина расхождения в результатах измерения бериллия связана с разницей на три порядка в содержаниях бериллия в стандартных образцах (содержание Be в стеклах: NIST-612– 35.3 г/т, GSD-1g – 47 г/т при довольно большой неопределенности принятых концентраций) и в изучаемом минерале.

С другой стороны, дефицит бериллия в хризоберилле отмечается не только в некоторых опубликованных анализах минерала, выполненных методами мокрой химии, но и в отдельных локальных электронно-зондовых анализах [Захаров, Ханнин, 2012]. Так, измеренное на JEOL JXA-8500F с помощью кристалла LDEB среднее содержание BeO по 20 анализам хризоберилла из пегматитов Бразилии составило 18.30 мас.% при содержаниях SiO₂ ниже чувствительности микрозондового анализа [Beurlen et al., 2013], что приводит к формуле Be_{0.93}(Al_{2.03}Fe_{0.03})_{2.06}O₄. Результаты рентгено-спектрального микроанализа хризоберилла и его хромового аналога мариинскита из Мариинского бериллиевого месторождения (окрестности пос. Малышева, Урал) на микроанализаторе CAMECA SX 100 с помощью кристалла PC3 не выявили дефицита бериллия [Хиллер, 2016].

Вероятно, в настоящее время не представляется возможным объективно оценить проблему реального или мнимого дефицита бериллия в хризоберилле и вхождения кремния в качестве структурной примеси в этот минерал. Для этого требуется дальнейшее изучение химизма хризоберилла из различных месторождений и совершенствование локальных методов определения элементного состава минералов бериллия.

Элементы-примеси в хризоберилле определялись методом лазерной абляции LA-ICP-MS. Для градуировки использовались международные стандарты NIST SRM-612 и USGS GSD-1g. Измерения были выполнены на пяти участках образца хризоберилла. Сходимость результатов по двум указанным стандартам для элементов-примесей оказалась удовлетворительной (табл. 3).

Описываемый хризоберилл обогащен оловом (Sn > 1900 ppm) и бором (B > 140 ppm), что сближает его с хризобериллом из объектов других генетических типов: Малышевского (ныне Мариинского) месторождения изумруда и бериллия на Урале и Шри-Ланки (рис. 8). Весьма высокие содержания олова (Sn > 3057 ppm) по данным LA-ICP-MS наблюдались в хризоберилле из россыпей на западе Мамфе в Камеруне [Kanouo et al., 2016]. Еще более высокие содержания олова (Sn до 3700 ppm) отмечены в единичных анализах

Таблица 3. Содержания элементов-примесей (ppm) в хризоберилле из пегматита Придорожный на Юго-Западном Памире по данным LA-ICP-MS по различным образцам сравнения (среднее по пяти анализам)

Элемент	По NIST-612 Режим абляции линия	По NIST-612 Режим абляции точка	По GSD-1g Режим абляции точка
B ¹⁰	146	182	174
Mg ²⁵	58	57	56
P ³¹	62	45	352
Sc ⁴⁵	119	116	129
Ti ⁴⁹	837	800	756
Zn ⁶⁶	< 2	< 2	< 2
Sr ⁸⁸	0.2	0.2	0.2
Nb ⁹³	74	72	77
Sn ¹¹⁸	1920	1760	1970
Ta ¹⁸¹	21	21	21
W ¹⁸²	2	2	2

Примечание. Условия анализа: масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой Agilent 7700x и системой лазерной абляции New Wave Research UP-213, частота повторения импульсов лазера 10–20 Hz, диаметр пятна абляции 30–80 мкм, несущий газ в ячейке абляции He (скорость потока 0.5–0.65 л/мин) с дальнейшим применением Ar (0.9–0.95 л/мин).

хризоберилла из гранитного пегматита Маршиков (Maršikov) в Чешской Республике [Rybnikova et al., 2023]. Близкое к нашим данным содержание бора (B 104 ppm) приведено в единичном анализе методом LA-ICP-MS в хризоберилле из лейкогранитов Касерес, Испания [Merino et al., 2013]. Особо отметим обогащенность хризоберилла из пегматита Придорожный скандием (Sc > 100 ppm), что на три порядка больше, чем в хризоберилле из Камеруна [Kanouo et al., 2016], и соответственно значительно больше, чем в хризоберилле из Испании, в котором содержание скандия находится ниже предела обнаружения методом LA-ICP-MS [Merino et al., 2013].

Сравнение содержаний элементов-примесей в хризоберилле и находящемся в ассоциации с ним берилле приведено на рис. 9. Как видно из диаграммы на этом рисунке, хризоберилл обогащен оловом, титаном, бором, скандием, ниобием и фосфором по сравнению с бериллом. Так как временные соотношения указанных минералов в пегматите Придорожный на настоящее время остались невыясненными, то интерпретация такого распределения элементов-примесей между хризобериллом и бериллом не проводилась.

В целом можно сказать, что набор примесных элементов в хризоберилле отражает геохимическую специализацию на Sn, Sc, B, Nb пегматитов Шахдаринского поля. По данным только LA-ICP-MS невозможно определить, являются ли перечисленные элементы в хризоберилле структур-

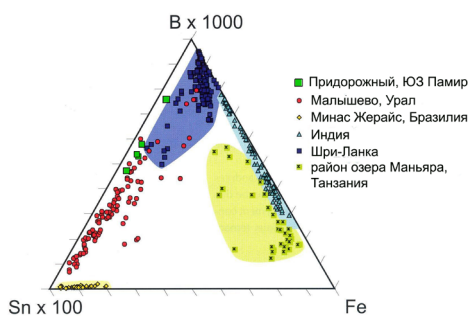


Рис. 8. Тройная диаграмма, показывающая соотношения Sn, Fe и B (ppm) в хризоберилле из различных месторождений [Schmetzer, 2010], с нанесенными составами хризоберилла из пегматита Придорожный на Юго-Западном Памире.

ными примесями или связаны с субмикронными вростками других фаз, флюидными включениями. Последнее наиболее актуально для бора, так как в объем испаренного лазером материала (даже при пятне абляции диаметром в 30 мкм) неизбежно попадают десятки-сотни мелких флюидных включений, о которых говорилось выше. Учитывая, что в близрасположенной Лесхозовской пегматитовой жиле в газовой-жидких включениях впервые был обнаружен сассолин, а концентрация H_3BO_3 во включениях всех комплексов пегматита оценивается около 18 мас.% [Смирнов и др., 2000], нельзя исключать, что по крайней мере часть бора в хризоберилле связана с борнокислыми растворами во флюидных включениях.

Пегматит Придорожный, в отличие от других пегматитов Шахдаринского пегматитового поля, содержит ассоциацию высокоглиноземистых минералов: хризоберилла, андалузита, топаза. Традиционно считается, что кристаллизация хризоберилла связана с пегматитами, обогащенными алюминием за счет ассимиляции вмещающих глиноземистых пород [Беус, 1960; Беус, Диков, 1967, и др.]. Возможно, что и в случае жилы Придорожной обогащение алюминием пегматита связано со взаимодействием расплава с вмещающими метаморфическими породами шахдаринской серии. В пользу этого говорят следующие факты: малая

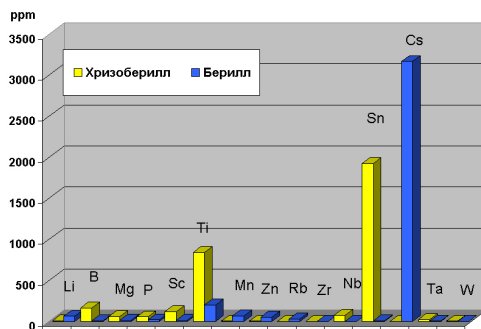


Рис. 9. Диаграмма сравнения содержаний элементов-примесей (ppm) в хризоберилле и берилле из гранитного пегматита Придорожный, правый борт реки Шахдары, Юго-Западный Памир (по данным LA-ICP-MS).

мощность пегматитового тела и соответственно большее отношение поверхности к объему, чем в более мощных жилах; наличие ксенолитов кристаллических сланцев и гнейсов (рис. 2е). С другой стороны, контакты пегматита с вмещающими породами резкие без видимых экзоконтактовых зон изменения (рис. 2в, г), количество ксенолитов весьма невелико, и вряд ли они могли существенно увеличить глиноземистость пегматитообразующей среды. Пегматит Придорожный находится на значительном расстоянии от Памиро-Шугнанского плутона, и, как для остальных пегматитов Шахдаринского пегматитового поля, совершенно неясно, если ли связь этих пегматитов с лейкогранитами Памиро-Шугнанского массива. Возможно, что гранитные пегматиты долины реки Шахдары являются не производными гранитного интрузива, а выжатыми и перемещенными продуктами ультраметаморфизма пород шахдаринской серии и вещественный состав пегматитов определяется тем, из каких разностей метаморфических пород происходило отделение лейкосомы.

Авторы благодарят за помощь в проведении полевых работ А.Р. Файзиева, Ф. Рахими, Р.У. Сабирову и А.О. Карпова.

Образец хризоберилла в пегматите из жилы Придорожная с Юго-Западного Памира передан в Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН (№ FMM_1_98624).

Список литературы:

- Беус А.А. Геохимия бериллия и генетические типы бериллиевых месторождений. М.: Из-во АН СССР, 1960. 330 с.
- Беус А.А., Диков Ю.П. Геохимия бериллия в процессах эндогенного минералообразования (на основе гидротермального эксперимента). М.: Недра, 1967. 160 с.
- Власов К.А., Кутукова Е.И. Изумрудные копи. М.: Из-во АН СССР, 1960. 252 с.
- Громалова Н.А. Раствор-расплавная кристаллизация и комплексное исследование состава, кристалломорфологии и свойств хризоберилла и александрита: Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 255 с.
- Захаров А.В., Ханин Д.А. Новые данные о хризоберилле из пегматитов Липовского жильного поля (Средний Урал) // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. 2012. № 9. С. 68-74.
- Меликсетян Б.М. О находке акцессорного хризоберилла в щелочных пегматитах Мегринского района // Записки армянского отделения Всесоюзного минералогического общества. 1963. С. 163-166.
- Колисниченко С.В., Попов В.А., Кисин А.Ю. Хризоберилл-берилловые гранитные пегматиты Еремкинского массива на Южном Урале // Литосфера. 2013. № 2. С. 135-144.
- Коноваленко С.И., Сазонтова Н.А., Смирнов С.З. Состав, строение и режим формирования миароловых пегматитов Лесхозовской жилы (Юго-Западный Памир) // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Материалы научной конференции, посвященной 80-летию со дня рождения проф. М.П. Кортусова. Томск. 2001. Вып. 2. С. 226-228.
- Коноваленко С.И. Типы миароловых пегматитов кристаллической толщи Юго-Западного Памира // Геммология: Сборник статей. Томск: ФГУ «Томский ЦНТИ», 2006. С. 69-75.
- Лебедева С.И. Микротвердость минералов. М.: Недра, 1977. 118 с.
- Захаров А.В., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Андалузит из гранитных пегматитов Липовского жильного поля (Средний Урал) // Труды Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого. 2014. № 161. С. 257-259.
- Орлов Р.Ю., Вигасина М.Ф., Успенская М.Е. Спектры комбинационного рассеяния минералов. Справочник. М.: GEOS, 2007. 141 с.
- Росовский Л.Н., Шостацкий А.Н. Пегматиты с хризобериллом в одном из районов Средней Азии // Минералы СССР. Труды минералогического музея им. А.Е. Ферсмана. 1964. Вып. 15. С. 154-161.
- Сафронова Г.П. К находке акцессорного хризоберилла в пегматитах Приладожья. Минералогия и геохимия докембрия Карелии. Л.: Наука, 1971. С. 56-61.
- Смирнов С.З., Перетяжко И.С., Прокофьев В. Ю., Загорский В. Е., Шهبанин А.П. Первая находка сассолина (H_3BO_3) во флюидных включениях в минералах // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 2. С. 194-206.
- Урусов В.С., Громалова Н.А., Вяткин С.В., Русаков В.С., Мальцев В.В., Еремин Н.Н. Исследование методами ЭПР и мессбауэровской спектроскопии структурного и валентного состояния атомов хрома и железа в хризоберилле и александрите // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2011. № 2. С. 29-33.
- Хиллер В.В. Определение бериллия в оксидах и силикатах методом рентгеноспектрального микрозондового анализа // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. 2016. № 13. С. 130-137.
- Awdejew M. Analysis of chrysoberyl // Philosophical Magazine. Series 3. 1843. 22(147). P. 501-502.
- Beurlen H., Thomas R., Melgarejo J.C., Da Silva J.M.R., Rhede D., Soares D.R., Da Silva M.R. Chrysoberyl-sillimanite association from the Roncadeira pegmatite, Borborema Province, Brazil: implications for gemstone exploration // Journal of Geosciences. 2013. 58 (2). P. 79-90.
- Chukanov N.V., Vigasina M.F. Raman spectra of minerals. Springer International Publishing, 2020. 1376 p.
- Hofmeister A.M., Hoering T.C., Virgo D. Vibrational spectroscopy of beryllium aluminosilicates: Heat capacity calculations from band assignments // Physics and Chemistry of Minerals. 1987. Vol. 14. P. 205-224.
- Gao Y., Li X., Cheng Y., Huang T., Li K., Xu B., Tang R. Gemological, Spectral and Chemical Features of Canary Yellow Chrysoberyl // Crystals. 2023. Vol. 13. № 11. 1580.
- Kanono N.S., Ekomane E., Youngue R.F., Njonfang E., Zaw K., Changqian M., Ghogomu T.R., Lentz D.R., Venkatesh A.S. Trace elements in corundum, chrysoberyl, and zircon: Application to mineral exploration and provenance study of the western Mamfe gem clastic deposits (SW Cameroon, Central Africa) // Journal of African Earth Sciences. 2016. 113. P. 35-50.
- Maličková I., Bačík P., Fridrichová J., Hanus R., Štubňa J., Milovská S., Škoda R. Detailed luminescence spectra interpretation of selected oxides: Spinel from Myanmar and chrysoberyl – Var. alexandrite from Tanzania // Acta Geol. Slovaca. 2020. № 12. P. 69-74.
- Merino E., Villaseca C., Orejana D., Jeffries T. Gahnite, chrysoberyl and beryl co-occurrence as accessory minerals in a highly evolved peraluminous pluton: The Belvis de Monroy leucogranite (Cáceres, Spain) // Lithos. 2013. Vol. 179. P. 137-156.
- Rybnikova O., Uher P., Novák M., Chládek Š., Bačík P., Kurylo S., Vaculovič T. Chrysoberyl and associated beryllium minerals resulting from metamorphic overprinting of the Maršíkov – Schindlerhübel III pegmatite, Czech Republic // Mineralogical Magazine. 2023. Vol. 87. № 3. P. 369-381.
- Schmetzer K. Russian Alexandrites. 2010. 141 s.
- Soman K., Nair N.G.K. Genesis of chrysoberyl in the pegmatites of Southern Kerala, India // Mineralogical Magazine. 1985. Vol. 49. № 354. P. 733-738.