



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

Н Д М

Новые данные о минералах, том 54, вып. 2 (2020), 61–68

Фосфорсодержащий гельвин Шахдаринской пегматитовой жилы (Юго-Западный Памир, Таджикистан)

Паутов Л.А.^{1,3}, Мираков М.А.², Шодибеков М.А.²,
 Махмадшариф С.², Хворов П.В.³, Артемьев Д.А.³, Файзиев А.Р.²

¹Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, pla58@mail.ru

²Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН РТ, Душанбе

³Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, Миасс

В миароловой пегматитовой жиле Шахдаринская, расположенной на юго-западном склоне Шутнанского хребта на Юго-Западном Памире (ГБАО, Таджикистан), диагностирован гельвин. Минерал обнаружен в виде тетраэдрических кристаллов (0.2–1 мм) и зернистых агрегатов в миароловых полосах в ассоциации с кварцем, щелочным бериллом, литиевыми слюдами, эльбаитом, кальцитом. Цвет гельвина от лимонно-желтого до желто-коричневого. Микротвердость VHN = 762. Показатель преломления $n = 1.733(2)$. Плотность 3.22(3) г/см³. Параметр кубической элементарной ячейки $a = 8.2705(8) \text{ \AA}$, $V = 565.7(2) \text{ \AA}^3$. Приведена рентгеновская дифрактограмма. ИК-спектр близок к опубликованным данным для гельвина, но содержит дополнительные полосы поглощения 1095 и 1048 см⁻¹, возможно, принадлежащие колебаниям PO₄-тетраэдров. Химический состав гельвина изучен электронно-зондовым методом и LA-ICP-MS. Среднее по 7 анализам (мас.%): SiO₂ 32.08, Al₂O₃ 0.25, SnO₂ 0.04, FeO 11.47, MnO 37.64, ZnO 1.63, CaO 0.07, BeO 13.4, Li₂O 0.06, P₂O₅ 0.54, S 5.59, – S = O 2.80, сумма 99.96. Эмпирическая формула (расчет на сумму катионов 10): (Mn_{2.95}Fe_{0.89}Zn_{0.11}Li_{0.02}Ca_{0.01})_{3.98}(Be_{2.98}Al_{0.03})_{3.01}(Si_{2.97}P_{0.04})_{3.01}O_{12.07}S_{0.97}. Гельвин обогащен элементами-примесями (ppm): Sc 297, Li 260, Sn 327, Y 32, HREE 11. Фосфор (P₂O₅ от 0.1 до 1.1 мас.%), по косвенным данным, входит в гельвин как изоморфная примесь.

Ключевые слова: фосфорсодержащий гельвин, гранитные пегматиты, миароловые пегматиты, Шахдаринская жила, река Шахдара, Шутнанский хребет, Памир, ГБАО, Таджикистан.

Введение

При полевых работах 2018–2019 гг. в долине реки Шахдары в Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана нами в одном из наиболее известных и изученных миароловых гранитных пегматитов Юго-Западного Памира – жиле Шахдаринская (Коноваленко, 2006, 2009; Astrelina et al., 2011; Соколова и др., 2017) – был обнаружен гельвин. В мире гельвин известен во многих гранитных

пегматитах (Еремеев, 1868; Беус, 1960; Зубков и др., 1976; Dunn, 1976; Волошин, Савченко, 2007; Zito, Hanson, 2017, и др.), однако в доступной литературе нам не удалось обнаружить описания или упоминания гельвина с Памира. Это обстоятельство и особенности химического состава памирского гельвина (повышенное содержание фосфора и лития) послужили поводом для написания настоящей заметки.

Краткое описание Шахдаринской жилы и ассоциации гельвина

Шахдаринская пегматитовая жила находится на юго-западном склоне Шугнанского хребта, на правом борту реки Шахдары, левого притока реки Гунт. Жила залегает в метаморфических породах (мраморах и гранат-биотитовых гнейсах) шахдаринской серии архей-протерозойского возраста. Пегматит по трековым датировкам апатита имеет возраст $3.2\text{--}7.5 \pm 0.2$ млн лет (Коноваленко, 2006). Возникновение гранитных пегматитов, расположенных в долине р. Шахдары, по косвенным признакам связывают со становлением Памирско-Шугнанского плутона, образовавшегося в результате проявления коллизионных процессов в течение позднего триаса и раннего неогена. Плутоны сложены высокоглиноземистыми двуслюдяными гранит-лейкогранитами и гнейсо-гранитами (Бархатов, 1963; Буданова, Буданов, 1983; Коноваленко, 2006), относимыми А.Г. Владимировым с соавторами (1992) к стресс-гранитам. Шахдаринская пегматитовая жила обнажается в скальном обнажении в виде совокупности пологопадающих тел, прослеженных по простиранию приблизительно на 100 метров. Жила характеризуется весьма сложной морфологией (рис. 1) с многочисленными апофизами и ксенолитами вмещающих пород. Контакты пегматита с гнейсами резкие, с малоомощной аплитовидной зоной, что свидетельствует об интрузивной природе пегматита. Другие зоны пегматита выражены слабо, и основная часть жилы сложена кварц-двуполевошпатовым комплексом, иногда обогащенным черным турмалином шерл-дравитового ряда. Местами развит крупноблочный кварц-микроклиновый комплекс. Миаролы приурочены к участкам жилы с наибольшей мощностью и часто окружены кварц-альбит-слюдистым околониарольным комплексом, иногда со значительной ролью турмалина эльбаитового ряда. Второстепенными минералами пегматита являются слюды разнообразного состава: от биотита до полиидионита, изучению которых посвящена работа Е.Н. Соколовой с соавторами (2017). Акцессорные минералы представлены гранатом спессартин-альмандинового ряда, топазом, ильменитом, уранинитом, ксенотимом-(Y), цирконом, касситеритом, иксоитом, апатитом (Соколова и др., 2017), бесщелочным и щелочным бериллом, монацитом-(Ce), минералами ряда колумбит-тангалит, пироксеном, микролитом, кальцитом и др.

В участке раздува жилы расположены многочисленные мелкие (от 1 до 20 см в наибольшем измерении) миаролы, стенки которых инкрустированы кристаллами светлого молочно-дымчатого кварца, пластинчатыми кристаллами светлых литийсодержащих слюд, столбчатыми и игольчатыми кристаллами щелочного берилла от светло-голубого до синего цвета и их агрегатами, редко – мелкими кристаллами и зернистыми агрегатами желтого и жел-

товато-коричневого гельвина. Часто полости заполнены полностью или частично светло-серым пластинчатым кальцитом.



Рис. 1. Выход пегматитовой жилы Шахдаринская на склоне Шугнанского хребта, Юго-Западный Памир.

Методы исследования

Химический состав минералов из Шахдаринской жилы изучался методами локального электронно-зондового анализа на сканирующем электронном микроскопе JSM-35 CF фирмы JEOL с Si(Li)-детектором и системой анализа ISIS фирмы Oxford Instruments при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 1 нА в Институте геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Республики Таджикистан (Душанбе) и на микроанализаторе JCSA-733 фирмы JEOL в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН (Москва) с помощью энергодисперсионного Si(Li)-детектора и системы анализа INCA Energy 350 фирмы Oxford Instruments при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 1 нА и живом времени набора спектра 100–150 с. В качестве стандартов использовались: Si(K α), Ca(K α) – воластонит; Al(K α), P(K α) – AlPO $_4$; Sn(L α) – SnO $_2$, Fe(K α) – Fe $_2$ O $_3$, Mn(K α) – MnTiO $_3$, Zn(K α) – ZnO, S(K α) – ZnS. Для изучения положения пика P(K α) в гельвине, фосфатах и фосфидах проводилось сканирование спектра на волнодисперсионном спектрометре с кристаллом-анализатором PET при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 20 нА.

Бериллий и элементы-примеси определялись методом LA-ICP-MS на масс-спектрометре Agilent 7700x с лазерной приставкой New Wave Research UP-213 в Институте минералогии УрО РАН, г. Миасс. Параметры лазера: Nd:YAG, длина волны излучения 213 нм, энергия пучка (fluence) 10–13 Дж/см 2 , частота повторения импульсов 10–20 Гц, диаметр пятна абляции 30–50 мкм, несущий газ He, скорость потока 0.5–0.65 л/мин. Время работы лазера: 5 с (преабляция), 30 с (холостой ход) и 45–50 с (время анализа). Время между анализами, включающими перечисленные выше стадии, 20–25 с. Параметры измерений на масс-спектрометре: RF Power – 1550 Вт, рабочий газ Ar, скорость несущего потока 0.95–1.05 л/мин, плазмообразующий поток Ar – 15 л/мин, охлаждающий поток Ar – 0.9 л/мин.

Для градуировки использовались международные стандарты NIST SRM-612, USGS GSD-1g. Расчет концентраций проводился в программе Iolite с использованием ^{29}Si в качестве внутреннего стандарта.

Инфракрасные спектры гельвина получены с порошка минерала, запрессованного в таблетку с KBr, на двухлучевом спектрометре Specord-75IR. Калибровка спектрометра проводилась по полистиролу.

Показатели преломления измерялись иммерсионным методом с контролем показателя преломления жидкостей на рефрактометре ИРФ-23 в монохроматическом свете ($\lambda = 589 \text{ нм}$).

Рентгеновское изучение минералов методом порошка проводилось на рентгеновских дифрактометрах ДРОН-3 под управлением программно-аппаратного комплекса DIFWIN на Cu-излучении с Ni-фильтром в лабораториях Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Рес-

публики Таджикистан (Душанбе) и Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (Москва). В качестве внутреннего стандарта при измерении параметров элементарной ячейки гельвина использовался химически чистый CaF_2 .

Описание гельвина

Гельвин в Шахдаринской жиле представлен мелкими (0.2–1 мм в поперечнике) прозрачными и полупрозрачными тетраэдрическими кристаллами желтого и желто-коричневого цвета, нарастающими на щелочной берилл и кварц, а также зернистыми агрегатами (рис. 2). Реже встречаются кристаллы гельвина, представленные комбинацией положительного и отрицательного тетраэдров (рис. 2г). Тетраэдрическая форма кристаллов гельвина, по данным Д.А. Фурсенко (1989), характерна при кристаллизации минерала из нейтральных и слабощелочных растворов.

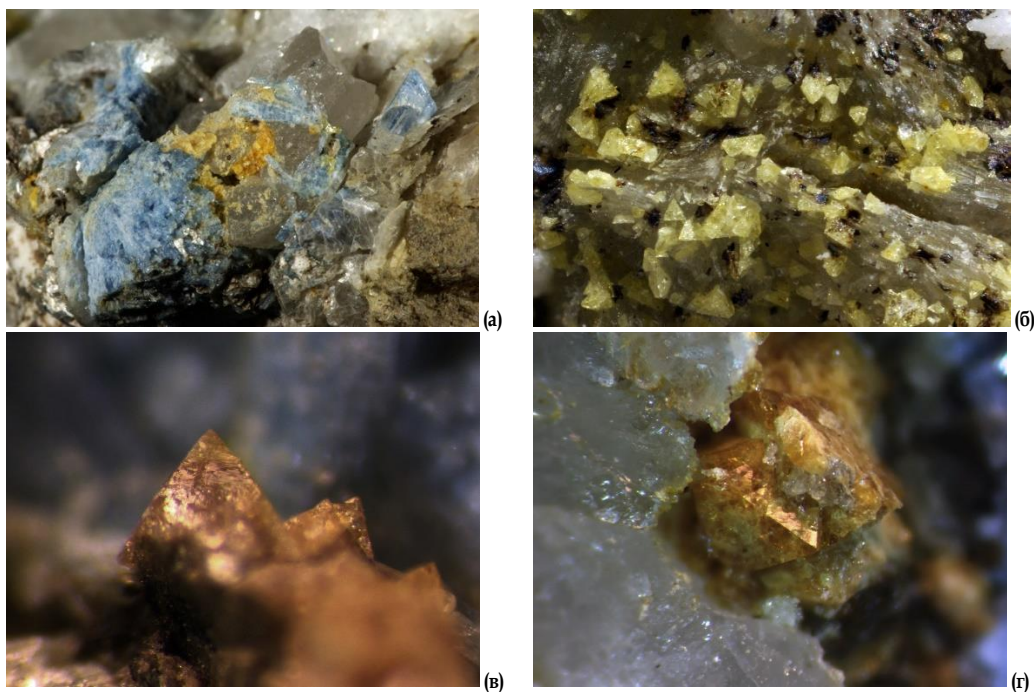


Рис. 2. Гельвин из жилы миаролового гранитного пегматита Шахдаринская: а - зернистые агрегаты гельвина (желтое) в образце пегматита с щелочным бериллом, литиевой слюдой и кварцем, ширина поля зрения 2 см; б - тетраэдрические желтые кристаллы гельвина на кварце, ширина поля зрения 3 мм; в, г - кристаллы гельвина в полости пегматита с кварцем и бериллом, формы кристаллов: в - тетраэдр, г - комбинация положительного и отрицательного тетраэдров, фото при косом освещении, ширина поля зрения 1.9 мм.

Гельвин обладает стекляннным блеском, на поверхностях скола блеск жирный. Минерал хрупкий с раковистым изломом. Твердость гельвина из Шахдаринской жилы, измеренная на микротвердомере ПИМТ-3 при нагрузке 100 г, составила $VHN = 762$ (при разбросе 707–872), что попадает в диапазон микротвердости гельвина $VHN 573\text{--}830$ по данным Л.А. Зубкова с соавторами (1976). Измерение микротвердости осложнялось хрупкостью мине-

рала: отпечатки пирамидки сопровождались трещинами и иногда выкрашиванием материала. Плотность гельвина с Юго-Западного Памира – $3.22(3) \text{ г/см}^3$ – определена уравниванием зерен минерала в растворе жидкости Клеричи. Измеренный показатель преломления гельвина $n = 1.733(2)$ весьма близок к показателю преломления (1.732) гельвина такого же состава, определенному Д.А. Фурсенко (1989), уточнившим известную треугольную диаграмму Дж. Гласса связи состав –

свойства для минералов группы гельвина (Glass et al., 1944). Результаты расчета рентгеновской дифрактограммы памирского гельвина в сравнении с эталонными данными приведены в табл. 1. Параметр элементарной ячейки минерала, рассчитанный методом наименьших квадратов, составил $a = 8.2705(8) \text{ \AA}$, $V = 565.7(2) \text{ \AA}^3$, и весьма близок к параметру элементарной ячейки гельвина (Зубков и др., 1976).

Таблица 1. Рентгеновские порошковые данные гельвина

Гельвин, ЮЗ Памир			Гельвин, JCPDS 38-0468			Гельвин, ЮЗ Памир			Гельвин, JCPDS 38-0468		
d	I		d	I	hkl	d	I		d	I	hkl
			5.844	1	110	1.688	8		1.6888	6	422
4.141	4		4.139	3	200	1.621	3		1.6224	3	510
3.700	12		3.702	10	210	1.5345	2		1.5362	2	520
3.377	100		3.378	100	211	1.5097	5		1.5102	4	521
2.925	6		2.925	4	220	1.4618	12		1.4623	7	440
2.615	17		2.617	14	310	1.4181	7		1.4185	6	530
2.387	7		2.388	5	222				1.3983	1	531
2.293	3		2.295	2	320	1.3785	7		1.3788	6	600
2.210	18		2.2120	18	321	1.3520	1		1.3600	1	610
2.067	3		2.0690	2	400	1.3416	6		1.3418	5	611
1.949	45		1.9501	40	330	1.3074	2		1.3079	1	620
1.850	5		1.8497	5	420	1.2765	7		1.2761	5	541
1.805	3		1.8052	2	421				1.2615	1	533
1.763	1		1.7639	1	332	1.2470	1		1.2471	1	622

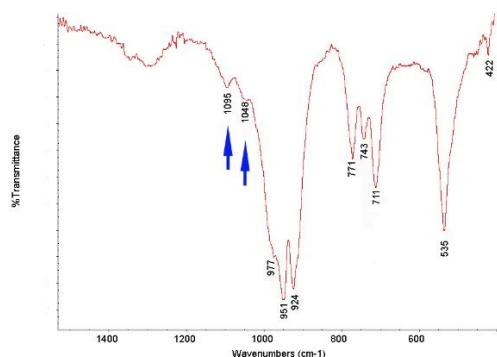


Рис. 3. Инфракрасный спектр гельвина из Шахдаринской пегматитовой жилы, Юго-Западный Памир. Синими стрелками отмечены полосы поглощения, которые могут быть интерпретированы как полосы валентных колебаний PO_4 -тетраэдров.

Химический состав гельвина Шахдаринской жилы представлен в табл. 2 и отражен на треугольной диаграмме составов минералов группы гельвина: гельвин $\text{Mn}_4(\text{Be}_3\text{Si}_3\text{O}_{12})\text{S}$ – гентгельвин $\text{Zn}_4(\text{Be}_3\text{Si}_3\text{O}_{12})\text{S}$ – даналит $\text{Fe}_4(\text{Be}_3\text{Si}_3\text{O}_{12})\text{S}$ (рис. 5). Эмпирическая формула минерала, рассчитанная для среднего состава по 7 локальным анализам (на сумму катионов 10): $(\text{Mn}_{2.95}\text{Fe}_{0.89}\text{Zn}_{0.11}\text{Li}_{0.02}\text{Ca}_{0.01})_{3.98}(\text{Be}_{2.98}\text{Al}_{0.03})_{3.01}(\text{Si}_{2.97}\text{P}_{0.04})_{3.01}\text{O}_{12.07}\text{S}_{0.97}$.

Зональности кристаллов гельвина при наблюдении сечений кристаллов в проходящем свете, в режиме BSE и по картам распределения марганца,

Инфракрасный спектр гельвина из Шахдаринской пегматитовой жилы (рис. 3) довольно близок к ИК-спектрам гельвина из других мест нахождения (Chukanov, 2014), за исключением присутствия слабых полос поглощения 1095 и 1048 cm^{-1} . Эти дополнительные полосы поглощения в ИК-спектре памирского гельвина могут быть отнесены к валентным колебаниям тетраэдров PO_4 .

железа и цинка не наблюдается (рис. 4). Особенно noteworthy химического состава описываемого гельвина является присутствие фосфора (P_2O_5 от 0.1 до 1.1 мас.%). По результатам сканирования линии РК α на волнодисперсионном спектрометре с кристаллом-анализатором PET (рис. 6) фосфор в гельвине присутствует в форме фосфатного иона, что согласуется с результатами ИК-спектроскопии минерала. Сдвиг линии РК α в гельвине относительно фосфидов составляет около 0.92 эВ. При просмотре в иммерсионных препаратах, в прозрачных пластинках гельвина под оптическим поляризационным микроскопом и при наблюдении препаратов из гельвина под сканирующим электронным микроскопом в режиме BSE включений других фаз, которые могли бы быть носителями фосфора, не выявлено, что косвенно говорит в пользу изоморфного вхождения фосфора в состав гельвина.

Количество элементов-примесей в памирском гельвине определялось методом LA-ICP-MS в двух зернах минерала в четырех участках при диаметре кратеров абляции 55 мкм. Результаты расчета концентраций элементов в гельвине по двум образцам сравнения (NIST CRM-612 и USGS GSD-1g) удовлетворительно согласуются между собой и приведены в табл. 3. По элементам-примесям гельвин из Шахдаринской жилы гораздо богаче берилла, на котором он часто нарастает, и заметно обогащен Sc, Sn, Li, Y и HREE. Повышенные содержания лития (37.4 ppm), олова (20.8 ppm) и скандия (625 ppm) отмечались также для даналита из мариоловых пегматитов Cheyenne Canyon, El Paso Co., Колорадо, США

(Zito, Hanson, 2017). Распределение редкоземельных элементов в гельвине из Шахдаринской жилы на Юго-Западном Памире (рис. 7) характеризуется обогащением тяжелыми *HREE* по сравнению с легкими *LREE* с проявленными тетрад-эффектами М-типа ($T1 = 1.14$, $T3 = 1.71$, $T4 = 1.38$, $T1-4 = 1.39$). График нормированных к хондриту C1 (Sun, McDonough, 1989) содержаний редкоземельных элементов в гельвине из миаролового гранитного пегматита на Юго-Западном Памире имеет ярко выраженный Eu-минимум и значительно отличается от аналогичных графиков для минералов группы гельвина из миароловых пегматитов Коло-

радо (Zito, Hanson, 2017), альбититов Sucuri в Бразилии и особенно из W-содержащих кварцевых жил Dajishan в Китае (Raimbault, Bilal, 1993). Вероятно, обогащенность гельвина тяжелыми редкоземельными элементами связана не столько с составом минералообразующей среды, сколько с кристаллохимическими особенностями (большей близостью ионных радиусов *HREE* по сравнению с *LREE* к размерам ионов Mn^{+2} , Fe^{+2} и Zn^{+2} в 8-ной координации) и кристаллизацией его из нейтральных и слабощелочных растворов, в пользу чего свидетельствует и тетраэдрическая форма кристаллов гельвина, о которой говорилось выше.

Таблица 2. Химический состав (мас.%) гельвина из пегматитовой жилы Шахдаринская

	1	2	3	4	5	6	7	Среднее
SiO ₂	32.06	31.53	32.2	31.75	32.38	32.27	32.37	32.08
Al ₂ O ₃	0.29	0.20	0.30	0.43	0.11	0.12	0.28	0.25
SnO ₂ *	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
FeO	12.3	13.06	8.80	7.84	13.76	13.48	11.04	11.47
MnO	37.31	36.57	40.00	40.56	35.26	35.85	37.92	37.64
ZnO	1.73	1.49	1.46	1.76	1.33	1.87	1.74	1.63
CaO *	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
BeO *	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4
Li ₂ O *	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
P ₂ O ₅	1.06	1.10	0.30	0.69	0.11	0.18	0.32	0.54
S	5.51	5.43	5.56	5.53	5.78	5.59	5.76	5.59
Сумма	103.83	102.95	102.19	102.13	102.30	102.93	103.00	102.76
- S = O	2.76	2.72	2.78	2.77	2.89	2.80	2.88	2.80
Сумма	101.08	100.24	99.41	99.37	99.41	100.14	100.12	99.96
Коэффициенты в формуле при расчете на сумму катионов 10								
Al ⁺³	0.03	0.02	0.03	0.05	0.01	0.01	0.03	0.03
Si ⁺⁴	2.94	2.91	2.99	2.95	3.01	2.99	2.99	2.97
P ⁺⁵	0.08	0.09	0.02	0.05	0.01	0.01	0.03	0.04
Mn ⁺²	2.90	2.86	3.15	3.19	2.78	2.81	2.97	2.95
Fe ⁺²	0.94	1.01	0.68	0.61	1.07	1.04	0.85	0.89
Zn ⁺²	0.12	0.10	0.10	0.12	0.09	0.13	0.12	0.11
Ca ⁺²	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Sn ⁺⁴	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Be ⁺²	2.95	2.97	2.99	2.99	3.00	2.98	2.98	2.98
Li ⁺¹	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
S ⁻²	0.95	0.94	0.97	0.96	1.01	0.97	1.00	0.97
O ⁻²	12.13	12.11	12.06	12.09	12.01	12.04	12.04	12.07

Примечание. * По данным LA-ICP-MS.

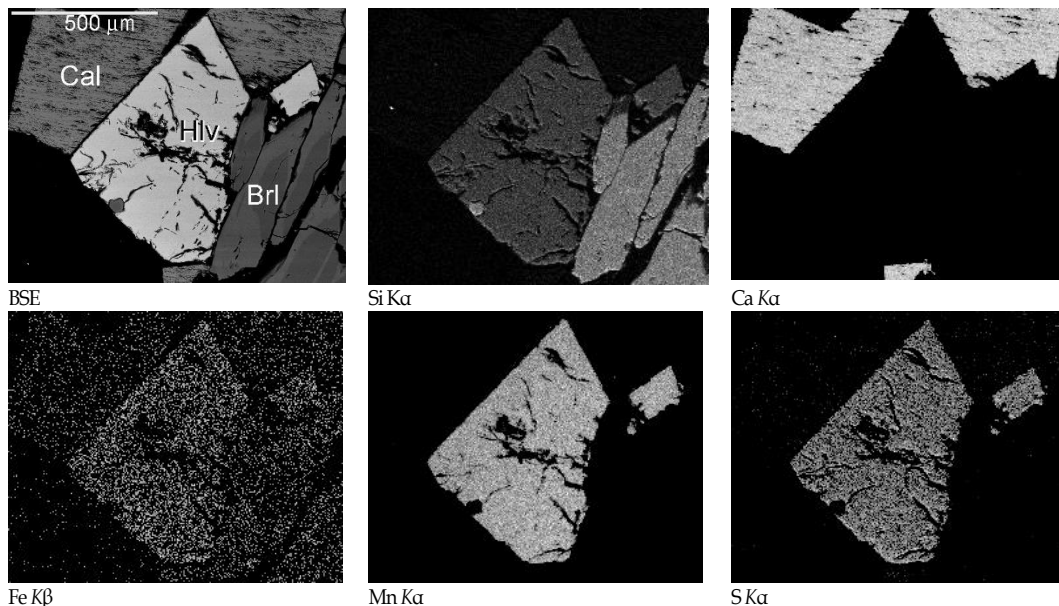


Рис. 4. Срастание гельвина (Hlv) с бериллом (Brl) и кальцитом (Cal). Полированный шлиф, изображение в режиме BSE и рентгеновские карты в характеристическом излучении указанных элементов.

Таблица 3. Содержание элементов-примесей (ppm) в гельвине из пегматитовой жилы Шахдаринская по данным LA-ICP-MS

Используемый стандарт	NIST CRM-612				Среднее	Среднее	Предел обнаружения	Используемый стандарт	NIST CRM-612				Среднее	Среднее	Предел обнаружения
	1	2	3	4					1	2	3	4			
Al	1740	1930	1504	1382	1639	1570	0.4	Sm	0.13	0.04	0.25	0.05	0.12	0.11	0.03
Li	251	244	311	214	255	260	0.6	Eu	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01
B	12	14	28	17	17	16	0.9	Gd	0.16	0.20	0.41	0.25	0.25	0.26	0.02
K	6.5	10	21	19	14	15	3.0	Tb	0.08	0.10	0.20	0.14	0.13	0.12	0.006
Sc	358	334	163	339	299	297	0.2	Dy	1.25	1.07	2.18	1.74	1.56	1.51	0.03
Ti	14	16	14	16	15	14	0.3	Ho	0.23	0.27	0.48	0.41	0.34	0.33	0.005
V	<0.02	<0.02	0.06	0.05	0.03	0.03	0.02	Er	1.09	1.04	2.35	1.75	1.56	1.54	0.02
Rb	0.24	0.54	1.02	0.97	0.69	0.72	0.07	Tm	0.37	0.36	0.64	0.55	0.48	0.46	0.009
Sr	0.04	0.08	0.28	0.10	0.12	0.12	0.01	Yb	5.6	5.0	7.7	7.2	6.4	6.2	0.03
Y	26	24	44	36	32	32	0.006	Lu	0.88	0.77	1.21	1.16	1.00	0.97	0.01
Zr	0.19	0.21	0.28	0.23	0.23	0.23	0.02	Hf	0.16	0.14	0.08	0.12	0.13	0.12	0.05
Nb	0.55	0.56	0.51	0.50	0.53	0.53	0.01	Ta	1.43	1.89	1.95	2.42	1.91	1.9	0.006
Sn	347	351	313	298	327	293	0.12	W	0.18	0.27	0.25	0.26	0.24	0.27	0.02
Cs	25	41	61	94	55	60	0.11	Tl	0.01	0.04	0.05	0.04	0.03	0.04	0.01
La	0.79	0.69	0.84	0.07	0.60	0.61	0.006	Pb	0.97	1.26	2.10	2.38	1.68	2.0	0.10
Ce	1.5	1.3	1.6	0.18	1.1	1.2	0.007	Bi	0.32	0.28	0.99	0.58	0.54	0.70	0.02
Pr	0.15	0.12	0.17	0.03	0.12	0.12	0.005	Th	4.8	4.1	7.1	0.7	4.2	4.2	0.007
Nd	0.34	0.26	0.56	0.11	0.32	0.32	0.05	U	2.8	2.7	2.4	0.93	2.2	2.3	0.01

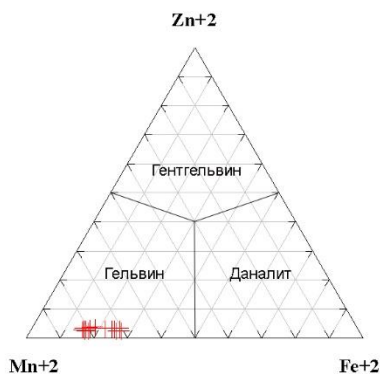


Рис. 5. Составы гельвина (красные кресты) из Шахдаринской пегматитовой жилы на Юго-Западном Памире, нанесенные на диаграмму гельвин – гентгельвин – даналит.

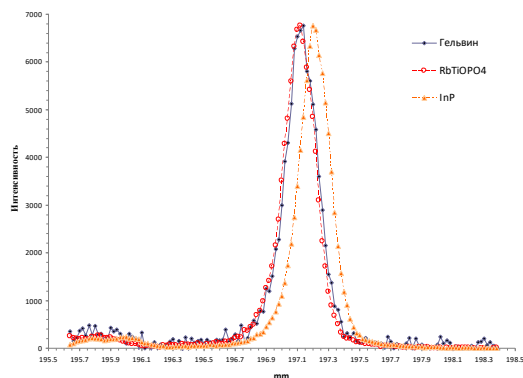


Рис. 6. Результаты сканирования пика Р Кa в гельвине, фосфате $RbTiPO_4$ и фосфиде индия InP на волнодисперсионном спектрометре с кристаллом-анализатором РЕТ при ускоряющем напряжении 20 кВ. Для удобства сравнения интенсивности пиков приведены к одной величине.

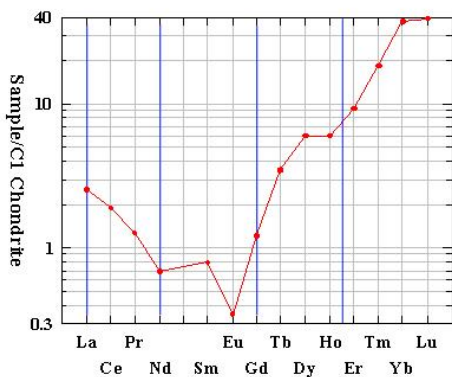


Рис. 7. Распределение редкоземельных элементов с тетраэд-эффектами для гельвина из пегматитовой жилы Шахдаринская, Юго-Западный Памир. Содержания РЗЭ нормированы к хондриту C1 (Sun, McDonough, 1989).

Основные результаты и обсуждение

1. В гранитном миароловом пегматите – жиле Шахдаринская на Юго-Западном Памире (ГБАО, Таджикистан) – диагностирован гельвин, ранее неизвестный в пегматитах Памира. По-видимому, эта находка гельвина является первой не только для Памира, но и для Таджикистана.

2. В памирском гельвине зафиксированы нехарактерные для этого минерала содержания P_2O_5 до 1.1 мас.%. По косвенным признакам (отсутствие посторонних фаз в описываемом гельвине по рентгеновским данным, ИК-спектроскопии и оптической и электронной сканирующей микроскопии), возможно, фосфор изоморфно входит в бериллосиликатный каркас гельвина. Известно, что фосфор может входить в алюмосиликатный каркас полевых шпатов и фельдшпатоидов, в том числе содалито-подобных природных и синтетических соединений (Hasha et al., 1988; Bu et al., 1998; Котельников и др., 2011, и т.д.). Наиболее простая схема изоморфизма могла бы быть следующей: $P^{+5} + Al^{+3} \leftrightarrow 2Si^{+4}$, однако присутствие в составе гельвина примесей Li, Sc, Sn и REE может значительно усложнить указанную схему. В настоящее время мы не обладаем достаточным количеством информации для решения вопроса о механизме вхождения фосфора в гельвин, и требуются дополнительные исследования роли примесных элементов в минералах группы гельвина.

3. Гельвин встречен в миароловом комплексе Шахдаринской жилы, и его кристаллизация проходила, вероятно, в гидротермальный этап становления пегматита, после образования берилла, но раньше кальцита. Незначительная доля гентгельвинового (менее 5%) и даналитового (17–28 %) миалов в составе описываемого гельвина свидетельствует о его образовании при умеренных значениях f_{O_2} и максимальных f_{S_2} (Фурсенко, 1989). Обогащенность гельвина тяжелыми редкоземельными элементами и тетраэдрическая форма кристаллов гельвина говорят, что кристаллизация его происходила из нейтральных или слабощелочных растворов.

Благодарности

Авторы благодарят за помощь в проведении полевых работ Ф.К. Рахими, Р.У. Сабирову, Р.Д. Бахтдавлатова, И. Оймухаммадозода, Т.Г. Бахтибекова и С.А. Эльназарова и за ценные советы и обсуждения И.М. Куликову, Н.В. Чуканова, А.В. Касаткина и П.Ю. Плечова.

Список литературы

- Бархатов Б.П. Тектоника Памира. Изд-во Ленинградского университета, 1963. 244 с.
- Беус А.А. Геохимия бериллия и генетические типы бериллиевых месторождений. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 332 с.
- Буданова К.Т., Буданов В.И. Метамагматические формации Юго-Западного Памира. Душанбе: Дошир, 1983. 276 с.
- Владимиров А.Г., Мальх М.М., Дронов В.М., Чернер Э.С., Поляков Г.В. Индосинийский магматизм и геодинамика Южного Памира. Новосибирск, 1992. 229 с.
- Волюшин А.В., Савченко Е.Э. Минералы группы гельвина в амзонитовых пегматитах Кольского полуострова // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2007. № 4. С. 144–148.
- Еремеев П.В. Об открытии русского гельвина // Горный журнал. Спб. 1868. № 10. С. 57–63.
- Зубков А.Б., Галецкий Л.С., Металиди С.В. Минералы гельвиновой группы и их месторождения. Киев: Наукова думка, 1976. 216 с.
- Коноваленко С.И. Типы миароловых пегматитов кристаллической толщи Юго-Западного Памира // Геммология. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2006. С. 69–75.
- Коноваленко С.И. Коллекционное сырье миароловых пегматитов Юго-Западного Памира // Геммология. Сборник статей. Томск: Томский ЦНТИ, 2009. С. 62–75.
- Котельников А.Р., Ананьев В.В., Ковальский А.М., Сук Н.И. Синтез полевошпатоподобных фосфор- и мышьяк-содержащих каркасных силикатов // Вестник ОНЗ РАН. 2011. Т. 3. NZ6047. DOI: 10.2205/2011NZ000177.
- Соколова Е.Н., Смирнов С.З., Кунгулова Э.Н., Корлюк В.Н., Коноваленко С.И. Редкие щелочные металлы в слюдах миароловых пегматитов жилы Шахдаринской (Юго-Западный Памир) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 5. С. 83–96.
- Фурсенко Д.А. Условия синтеза минералов группы гельвина. Новосибирск: Наука, 1989. 78 с.
- Astrelina E., Smirnov S., Ragozin A., Karmanov N., Konovalenko S. Late magmatic crystallization in the tourmaline-bearing miarolitic granitic pegmatites (by example of Shakhdarinskaya and Leskhozovskaya veins, SW Pamir, Tajikistan) // ECROFI-XXI. European Current Research on Fluid Inclusions (Montanuniversitat Leoben, Austria, 9–11 August, 2011): Abstracts. 2011. P. 24–25.
- Bu X., Gier T.E., Feng P., Stucky G.D. Template control of framework topology and charge in new phosphate- and arsenate-based sodalite analogs // Microporous and mesoporous materials. 1998. 20 (4/6). P. 371–379.
- Chukanov N.V. Infrared spectra of Mineral species. Springer International Publishing. 2014. 1726 p.
- Dunn P.J. Genthelvitite and the helvine group // Mineral Magazine. 1976. Vol. 40. P. 627–636.
- Hasha D., Sierra de Saldarriaga L., Saldarriaga C., Hathaway P.E., Cox D.F., Davis M.E. Studies of silicoaluminophosphates with the sodalite structure // Journal of the American Chemical Society. 1988. 110 (7). P. 2127–2135.
- Raimbault L., Bilal E. Trace-element contents of helvite-group minerals from metasomatic albitites and hydrothermal veins at Sucuri, Brazil and Dajishan, China // The Canadian Mineralogist. 1993. Vol. 31. № 1. P. 119–126.
- Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the Ocean Basins. Eds. A.D. Sunders and M.J. Norry. Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. V. 42. P. 313–345.
- Zito G., Hanson S. L. Genthelvitite Overgrowths On Danalite Cores From A Pegmatite Miarolitic Cavity In Cheyenne Canyon, El Paso County, Colorado // The Canadian Mineralogist. 2017. Vol. 55. № 2. P. 195–206.