

УДК 553.21:549.02

ТИПОМОРФИЗМ МИНЕРАЛОВ ВЕЗДАРИНСКОЙ ЖИЛЫ (ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ПАМИР) – РЕПЕР ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЕГМАТИТООБРАЗОВАНИЯ

Бухарова Оксана Владимировна¹,
bukharovagetina@gmail.com

Кунгулова Эльвира Нурфасовна¹,
elvirakungulova@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность работы обусловлена необходимостью уточнения условий формирования уникального пегматитового объекта – Вездаринской миароловой пегматитовой жилы, давшей миру большое количество редких минеральных видов, что указывает на особенные физико-химические параметры среды минералообразования.

Цель: дать характеристику формирования структурно-вещественных комплексов пегматитовой жилы по типоморфным признакам полевых шпатов, турмалинов, гранатов, слюд.

Объекты: породообразующие и второстепенные минеральные виды Вездаринской пегматитовой жилы

Методы. Количественный анализ химического состава минералов выполнен рентгеноспектральным микроанализом на микронде JXA-8100 и на сканирующих электронных микроскопах Tescan Mira 3 LMU и VEGA II LMU, совмещенных со спектрометрами INCA Energy350 Oxford, структурное состояние полевых шпатов рассчитывалось по результатам рентгеновского анализа на дифрактометре XPert PRO (PANalytical)

Результаты. Получены комплексные данные по минеральному составу Вездаринской пегматитовой жилы (определены и уточнены 4 минеральных вида слюд, 4 вида турмалинов, 2 вида плагиоклазов), выделены генерации минеральных видов, зафиксированы новые для этого пегматита минералы (андалузит, бертьерин), ассоциация с которыми является типоморфной. Предложен сценарий образования околомаролового агрегата жилы и проанализирована роль ремобилизации вмещающих пород при формировании пегматита (его минеральных ассоциаций). По ассоциации минеральных фаз определены температуры образования вещественно-структурных комплексов жилы. Типохимизм второстепенных минералов фиксирует наличие гетерогенной, подвергшейся разделению на существенно силикатную и силикатно-флюидную части, пегматитообразующей среды. Геохимия пегматита и его минеральный набор обусловлены изменением химизма пегматитового расплава под влиянием вмещающих его пород шугнанской свиты шахдаринской серии.

Ключевые слова:

Миароловые пегматиты, Вездаринская жила, минеральные ассоциации, генерации, пегматитообразование, Юго-Западный Памир.

Введение

Последние годы публикуют обобщающие работы по типизации пегматитов, их промышленной специализации [1–9], в которых характеризуются пегматитоносные районы и провинции мира, описываются геологические предпосылки их появления, а также сравниваются условия их образования. В этом контексте Памирская пегматитовая провинция является наименее изученной, поскольку это труднодоступный регион, располагающийся в высокогорных районах на территории Таджикистана, в меньшей степени Афганистана. Уникальные миароловые пегматиты (Вездаринская, Лесхозовская и Музейная жилы) стали известны благодаря работам российских геологов В.Е. Загорского, И.С. Перетяжко, С.И. Коноваленко, Л.Н. Россовского, С.А. Ананьева и др. [10–19]. В этих жилах были обнаружены новые и редкие минералы: стибиоколумбит ($SbNbO_4$), иксиолит ($Ta, Nb, Sn, Fe, Mn)_4O_8$, еремеевит $Al_6(BO_3)_3(OH, F)$, гамбергит $Be_2(BO_3)OH$ [11], виитаньемиит $Na(Ca, Mn)Al(PO_4)(F, OH)_3$ [16], корагоит $Mn_3(Nb, Ta)_3(Nb, Mn)_2W_2O_{20}$, герценбергит SnS [17]), описаны коллекционные образцы, представленные агрегатами из породообразующих и второстепенных минералов (полевых шпатов, кварца, слюд, турмалинов). Были обобщены немногочисленные данные о

химическом составе минеральных фаз в жилах [18]; фрагментарно выполнены анализы включений, что позволило охарактеризовать параметры формирования отдельных зон жил [19–21].

Целью данной работы является установление физико-химических параметров формирования структурно-вещественных комплексов Вездаринской пегматитовой жилы посредством типоморфизма сквозных минералов (породообразующих и второстепенных), в частности, описание возможного сценария образования околомаролового агрегата и роли ремобилизации вещества вмещающих пород при формировании пегматита.

Объект исследования

Вездаринская жила входит в состав пегматитового поля Юго-Западного Памира и расположена в верховьях р. Вез-Дара на высоте около 4000 м. Это вытянутое тело размером 6×45 м сечет гнейсы и мрамора шугнанской свиты шахдаринской серии архейского возраста [18]. По классификации миароловых пегматитов она принадлежит к кристаллоносной формации субредкометальной подформации турмалиноносных пегматитов [18], к классу редкоэлементных типа LCT (Li-Cs-Ta) [22]. Ценная коллекция образцов из этого

пегматитового тела появилась в Томском государственном университете благодаря доценту кафедры минералогии и геохимии ТГУ Сергею Ивановичу Коноваленко, участвовавшему в экспедициях на Памир в 1989 и 2015 гг. С.И. Коноваленко с коллегами описали это пегматитовое тело как ассиметричное слабо зональное, что связано с неравномерным распространением минеральных агрегатов [19]. Анализ минеральных агрегатов позволил выделить восемь структурно-вещественных комплексов (СВК): кварц-полевошпатовый (Qz-2Fsp), кварц-плагиоклазовый с турмалином гранатом (Qz-Pl with Tur/Grt), кварц-полевошпатовый пегматоидный (Qz-Fsp PG), калишпатовый блоковый (K Fsp megacrystal), миароловый (Mirolitic cavities), околомароловый (Near mirolitic) и трещинно-прожилковый (Fractures-vein) [23].

Материалы и методы

Минералогическое исследование базируется на характеристике структурно-вещественных комплексов, описанных в работе [23]. Правомерность выделенных генераций показали аналитические исследования, отметившие структурные и типохимические особенности минеральных видов. Исследования химического состава минералов проводились методами рентгеноспектрального микроанализа на микрозонде JXA-8100 и на сканирующих электронных микроскопах Tescan Mira 3 LMU и VEGA II LMU, совмещенных со спектрометрами INCA Energy350 Oxford. Мономинеральные оксидовые шашки и полиминеральные пластины были изготовлены с параллельными рабочими поверхностями, одна из которых была отполирована и покрыта проводящим материалом (углеродом). Анализ минералов методом ВДС проводился при следующих рабочих параметрах: ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока зонда 30–50 нА, диаметр электронного пучка 2–4 мкм. Правильность полученных результатов контролировалась периодической съемкой стандартов, использованных при калибровке. Калибровка прибора осуществлялась по лабораторным стандартам: природным альбиту, ортоклазу, диопсиду и синтетическому фтор-флогопиту. Для более точной коррекции матричных эффектов при анализе водосодержащих фаз в программу вводилось ожидаемое содержание H₂O 2,5 мас. % для слюд. Пределы обнаружения для элементов-примесей составили (1 σ , мас. %): TiO₂ – 0,013, FeO – 0,029, MnO – 0,021, MgO – 0,018, BaO – 0,113, CaO – 0,011, Na₂O – 0,024, K₂O – 0,010, Rb₂O – 0,015, Cs₂O – 0,03, P₂O₅ – 0,016, F – 0,16, Cl – 0,01. Параметры съемки при анализе химического состава минералов энергодисперсионным анализатором: ускоряющее напряжение 20кВ, РС=5, живое время набора 120 сек, катод вольфрамовый, размер зонда 1–2 μ m. Были использованы стандартные образцы MAC (55 Standard Universal Block Layout+F/Cup, Micro-Analysis Consultants Ltd, UK): Si K α -линия – кварц, Al K α -линия – корунд, Ca K α -линия – волластонит, K K α -линия – KBr, Na K α -линия – альбит, Ba K α -линия – BaF₂, Mg K α -линия – MgO, Fe K α -линия – Fe, Mn K α -линия – Mn, F K α -линия – флюорит, Cl K α -линия –

галит, Ti K α -линия – Ti. Количественная оптимизация выполнялась по кобальту. Расчет кристаллохимических коэффициентов слюд производился анионным методом (на 12 анионов). Литий в слюдах рассчитан по недостатку в позиции Y [24, 25]. Кристаллохимические коэффициенты турмалинов получены по алгоритму расчета формул минералов по неполным микронзондовым данным [26]. Полевые шпаты и гранаты рассчитывались анионным методом, на 8 и 12 позиций кислород, соответственно.

Рентгенография была выполнена на дифрактометре XPert PRO (PANalytical). Условия съемки: трубка с медным анодом (CuK α) с Ni-фильтром, напряжение на трубке меняли от 20 до 30 кВ, ток от 18 до 25 мА, диапазон углов 2 θ 18...54°. Образец снимался дважды: общая рентгенограмма в области углов 2 θ (18–54°) со скоростью вращения 40 об./мин, и в области углов 2 θ (28–32°) и 2 θ (40–52°) со скоростью 0,50 об./мин. Расшифровка дифрактограмм проводилась с помощью программного обеспечения PDF-4 и HighScore. Расчеты структурных характеристик проводились по стандартной методике [27].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП МИИ ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и Томского регионального центра коллективного пользования ТГУ

Результаты исследования

Вездаринская жила на 80 % сложена кварцем и полевыми шпатами (плагиоклазом и калишпатовом), второстепенные минералы представлены турмалинами, слюдами, в меньшей степени гранатом.

Калиевые полевые шпаты в пегматитовом теле представлены тремя генерациями: I – субизометричные зерна размером до 0,5 см в кварц-полевошпатовом СВК и их реликтами в кварц-плагиоклазовом; II – таблитчатые зерна размером около 1 см, образующие с кварцем графическую структуру в кварц-полевошпатовом пегматоидном СВК и переходящие в калишпатовый блоковый комплекс в виде крупных зерен размером более 2 см (табл. 1, 2); III – кристаллы в миароловом комплексе. Последняя генерация КПШ, которая описана в [18], в исследуемом каменном материале не представлена. Для ранней генерации КПШ характерно наличие 6–8 % альбитового минала и небольшое содержание кальция (CaO 0,11–0,16 мас. %). Во второй генерации содержание альбитовой молекулы больше в два раза. По результатам рентгеноструктурного анализа калиевые полевые шпаты I и II генерации являются промежуточным ортоклазом с характерным для него содержанием от 75 до 79 % Al в позиции t1, степень моноκлинности при этом варьирует от 0,54 до 0,61.

Плагиоклазы присутствуют во всех комплексах, кроме миаролового. Они образуют семь генераций, отличающихся по морфологическим признакам, химическому составу и структурным особенностям (табл. 3, 4). Первая генерация соответствует олигоклазу (Pl_{Na20}) с низкой степенью структурной упорядоченности ($\Sigma t1$ 0,36). Она представлена изометричными зернами от 0,05 до 1 см с тонкими ровными полисинтетическими

двойниками. Вторая генерация (P_{I№1}) выделена в пределах кварц-двуполевошпатового и пегматоидного комплексов и представлена пертитом распада в ортоклазе.

Таблица 1. Химический состав калиевых полевых шпатов Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 1. Chemical composition of potassium feldspars of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Компоненты Composition	Структурно-вещественный комплекс/Structural-material complex				Near miarolitic	Miarolitic cavities	Fractures-vein
	Qz-2Fsp (4)	Qz-Pl with Tur/Grt (5)	Qz-Fsp PG (8)	K Fsp megacrystal (7)			
SiO ₂ , wt. %	64,54	65,36	64,42	64,14	Отсутствует None	Нет данных No data available	Отсутствует None
Al ₂ O ₃	18,25	18,08	18,52	18,59			
CaO	0,16	0,11	–	–			
Na ₂ O	0,87	0,72	1,53	1,35			
K ₂ O	15,57	16,1	14,82	15,07			
Σ	99,39	100,37	99,29	99,15			
Si, ф.к. (apfu)	3,00	3,01	2,96	2,95			
Al	1,00	0,98	1,00	1,01			
Ca	0,01	0,01	0	0			
Na	0,08	0,06	0,14	0,12			
K	0,92	0,95	0,87	0,88			
An, %	0,79	0,78	0	0			
Ab, %	8	6	13	12			
Fsp, %	92	92	87	88			
Генерация Generation	I	I	II	II		III (?)	

Примечания: «–» – ниже предела обнаружения, римскими цифрами указаны генерации минералов, в скобках – количество измерений; Ab, % – альбитовая молекула; An, % – анортитовая молекула; Fsp, % – ортоклазовая молекула.

Notes: «–» – below the detection limit, roman numerals indicate the generation of minerals, in parentheses – the number of dimensions; Ab, % – albite molecule; An, % – anorthite molecule; Fsp, % – orthoclase molecule.

Таблица 2. Структурные характеристики калиевых полевых шпатов Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 2. Structural characteristics of potassium feldspars of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Рентгенографические характеристики Radiographic characteristics	Структурно-вещественный комплекс Structural-material complex			
	Qz-2Fsp	Qz-Pl with Tur/Grt	Qz-Fsp PG	K Fsp megacrystal
2Θ ₍₂₀₁₎	21,01	21,03	21,02	21,20
2Θ ₍₀₆₀₎	41,78	41,78	41,72	41,89
2Θ ₍₂₀₄₎	50,74	50,79	50,73	50,88
Δz	0,61	0,54	0,55	0,56
Δp	0	0	0	0
t ₁	0,79	0,75	0,79	0,75
t ₂	0,21	0,25	0,21	0,25
Σt ₁	0,80	0,77	0,77	0,77
Генерация Generation	I	I	II	II

Примечания: Δz – моноклинная упорядоченность; Δp – триклинная упорядоченность; Σt₁ – степень структурной упорядоченности, римскими цифрами указаны генерации минералов.

Notes: Δz – monoclinic ordering; Δp – triclinic ordering; Σt₁ – degree of structural ordering, Roman numerals indicate the generation of minerals.

Ламели (ширина до 5 нм) имеют закономерную линейную ориентировку. Плаггиоклаз третьей генерации распространен в кварц-плаггиоклазовом СВК и является олигоклазом (P_{I№25}). Это достаточно крупные серицитизированные зерна (более 5 мкм) с корродированными границами. В матрице зерен плаггиоклаза заключены редкие таблитчатые зерна андалузита (~150 μm по удлинению) (в вес. %: SiO₂ 37,54; Al₂O₃ 61,95; FeO 0,26; Σ 99,75). Четвертая генерация плаггиоклаза (P_{I№3}) установлена в кварц-полевошпатовом пегматоидном и

калийшпатовом блоковом СВК, который в виде сегрегационных ленточных пертитов замещения развивается по ортоклазу, вплоть до формирования альбитизированных участков до 0,5 мм. Плаггиоклаз пятой генерации (P_{I№13}) приурочен к блоковой СВК, представлен индивидами (менее 0,5 мм) с полисинтетическим двойникованием, в виде ориентированных (с одновременным погасанием) вростков в калиевом полевошпате. Шестая генерация представлена тонкопластинчатым плаггиоклазом (P_{I№0}), который формирует агрегаты околониаролового пространства (более 2 см) с пористой текстурой. Седьмая генерация плаггиоклаза образована также альбитом (P_{I№2}), который входит в состав минеральной ассоциации трещинно-прожилкового комплекса, где выполняет межзерновое пространство и заполняет трещины в минералах.

В целом плаггиоклазы Вездаринской жилы соответствуют ряду альбит–олигоклаз. Плаггиоклаз из калийшпатового блокового СВК и из трещинно-прожилкового комплекса, локализованного в пределах первого, содержат в своем составе P₂O₅ от 0,36 до 0,70 мас. %. Структурная упорядоченность возрастает от ранних генераций к поздним (табл. 4).

Турмалины представлены четырьмя минеральными видами (табл. 5). В кварц-плаггиоклазовом СВК черный турмалин образует псевдографические агрегаты с кварцем, формируя локальные зоны в плаггиоклазовом матрикесе. Этот турмалин соответствует дутровиту с содержанием ювитовой молекулы до 22 %. Размер зерен достигает 5 мм. Часто по периферии и механически деформированным частям индивидов развивается мелко-тонкошуйчатый агрегат бертьерина (в вес. %: SiO₂ – 23,87; Al₂O₃ – 24,32; MgO 5,42; – FeO 37,2; MnO – 0,58; CaO – 0,09; Na₂O – 0,11; K₂O – 0,1; Cl – 0,02; Σ – 91,69)

с каолинитом и редкими индивидами 2–3 μm ниобий-танталсодержащего рутила (Nb₂O₅ до 0,44 вес. %, Ta₂O₅ 1,04 вес. %). В околомияроловом СВК в пористом альбитовом агрегате присутствуют крупные кристаллы шерла (>2 см по L₃) с примесью россманитового минала (34 %). В миароловых полостях находятся друзовые агрегаты цветных турмалинов переменного состава с высокими содержаниями MnO (до 6,6 вес. %).

Наблюдаются как однородные индивиды тсилаизит-эльбаитовые состава, так и зональные кристаллы. Согласно результатам рентгеноспектрального микроанализа, центральные зоны кристаллов имеют шерл-эльбаитовый состав с незначительной примесью MnO (0,8 вес. %). Следующая зона представлена турмалином фойтитового состава с тсилаизитовой молекулой (12 %), а оторочка образована эльбаитом.

Таблица 3. Химический состав плагиоклазов Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 3. Chemical composition of plagioclases of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Компоненты Composition	Структурно-вещественный комплекс/Structural-material complex										
	Qz-2Fsp		Qz-Pl with Tur/Grt		Qz-Fsp PG		K Fsp megacrystal		Near miarolitic	Mia rolitic	Fractures-vein
	(6)	(8)	(5)	(10)	(5)	(17)	(21)	(12)	(7)		(6)
SiO ₂ , wt. %	63,83	69,00	63,25	62,28	69,00	68,29	69,29	66,45	68,81	Отсутствует/None	68,88
Al ₂ O ₃	22,53	19,27	22,46	23,23	19,28	20,1	19,25	21,35	19,06		19,50
CaO	3,99	0,17	4,21	5,13	0,16	0,56	0,10	2,54	–		0,46
Na ₂ O	8,89	10,53	8,82	8,41	10,54	11,08	10,86	9,91	11,30		10,54
K ₂ O	0,71	1,03	0,43	0,40	1,03	0,24	0,50	0,23	–		0,22
Σ	99,96	100,00	99,17	99,45	100,00	100,28	100,00	100,48	99,17		100,15 ^a
Si, ф.к. (apfu)	2,82	3,01	2,82	2,77	3,01	2,96	3,02	2,90	3,02		2,98
Al	1,17	0,99	1,18	1,22	0,99	1,03	0,99	1,10	0,99		0,99
Ca	0,19	0,01	0,20	0,25	0,01	0,03	0,00	0,12	0,00		0,02
Na	0,76	0,89	0,76	0,73	0,89	0,93	0,92	0,84	0,96		0,88
K	0,04	0,06	0,02	0,02	0,06	0,01	0,03	0,01	0,00		0,01
№ Pl	20	1	20	25	1	3	0	13	0		3
Ab, %	77	93	78	73	93	96	97	86	100		97
An, %	19	1	20	25	1	3	0	13	0		2
Fsp, %	4	6	2	2	6	1	3	1	0		1
Генерация Generation	I	II	I	III	II	IV	IV	V	VI		VII

Примечания: «–» – ниже предела обнаружения, римскими цифрами указаны генерации минералов, в скобках – количество измерений; ^ac 0,55 вес. % P₂O₅, Ab, % – альбитовая молекула; An, % – анортитовая молекула; Fsp, % – ортоклазовая молекула.

Note: «–» – below the detection limit, roman numerals indicate the generation of minerals, in parentheses – the number of dimensions; ^ac 0,55 wt. % P₂O₅, Ab, % – albite molecule; An, % – anorthite molecule; Fsp, % – orthoclase molecule.

Таблица 4. Структурные характеристики плагиоклазов Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 4. Structural characteristics of plagioclases of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Рентгенографические характеристики Radiographic characteristics	Структурно-вещественный комплекс/Structural-material complex				
	Qz-2Fsp	Qz-Pl with Tur/Grt	Qz-Fsp PG	K Fsp megacrystal	Near miarolitic
2θ ₍₂₀₁₎	22,00	21,96	22,06	22,16	22,14
2θ ₍₁₃₁₎	31,43	31,44	31,48	31,49	31,41
2θ _(13̄1)	29,73	29,77	29,98	30,29	30,21
Δ2θ _(131–13̄1)	1,70	1,66	1,50	1,19	1,20
2θ ₍₁₁₃₎	50,75	50,82	50,84	50,71	50,78
2θ ₍₂₀₄₎	51,37	51,46	51,42	51,39	51,30
Σt ₁	0,36	0,41	0,53	0,89	0,80
№ Pl	18	25	7	15	1
Генерация/Generation	I	III	IV	V	VI

Примечания: Σt₁ – степень структурной упорядоченности; № Pl – номер плагиоклаза, римскими цифрами указаны генерации минералов. Структурное состояние II генерации (ламеллы) не удалось проанализировать.

Note: Σt₁ – degree of structural orderliness; № Pl – plagioclase number, Roman numerals indicate the generation of minerals. The structural state of generation II (lamellae) could not be analyzed.

Таким образом, в Вездаринской жиле присутствует две генерации шерла, три генерации эльбаита, по одной генерации фойтита и увит-дуровита. Для турмалинов из миаролового СВК характерно наличие примеси цинка и рубидия.

Гранаты образуют участки псевдографических агрегатов совместно с кварцем в пределах кварц-плагиоклазового комплекса. Зерна размером от 0,3 мм до 1,5 мм сильно трещиноваты и деформированы (табл. 6).

Гранат Вездаринской жилы представлен альмандином с незначительной примесью пиропового минала. Содержание спессартиновой молекулы не превышает 2–3 %. В пределах кварц-плагиоклазового комплекса в направлении от краевых частей жилы к полевошпатовому пегматоидному СВК происходит укрупнение индивидов и возрастает содержание в них альмандинового минала.

Таблица 5. Химический состав турмалинов Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 5. Chemical composition of tourmalines of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Компоненты Composition	Структурно-вещественный комплекс/Structural-material complex									
	Qz-2Fsp	Qz-Pl with Tur/Grt	Qz-Fsp PG	K Fsp megacrystal	Near miarolitic	Miarolitic cavities				Fractures -vein
	–	(8)	–	–	(3)	(4)	(5)	(4)	(3)	(15)
SiO ₂ , wt. %		35,6			35,21	36,78	34,82	36,99	34,82	36,05
TiO ₂		1,43			0,73	0,10	0,16	0,05	0,12	0,21
Al ₂ O ₃		32,00			34,42	35,56	35,41	37,38	36,84	32,63
CaO		1,24			0,47	0,03	0,11	0,21	0,27	0,04
MnO		–			0,22	0,81	2,37	3,69	6,62	0,05
MgO		4,75			0,79	0,02	0,02	0,01	0,01	1,81
FeO		9,55			11,95	7,99	11,36	1,62	2,76	13,61
ZnO		–			–	0,08	0,14	0,02	0,06	–
Na ₂ O		1,8			1,83	3,06	1,79	2,86	2,52	1,92
K ₂ O		–			0,12	0,02	0,04	0,02	0,03	–
Rb ₂ O		–			–	0,06	0,05	0,04	0,06	–
F		–			–	1,87	0,63	1,8	1,13	–
Si, ф.к. (apfu)		5,93			5,88	6,03	5,86	5,93	5,74	6,04
Ti		0,18			0,09	0,01	0,02	–	0,01	0,03
Al		6,29			6,78	6,88	7,02	7,06	7,16	6,44
Ca		0,22			0,08	0,01	0,02	0,04	0,05	0,01
Mn		–			0,03	0,11	0,34	0,5	0,92	0,01
Mg		1,18			0,20	–	0,01	–	–	0,45
Fe		1,33			1,67	1,10	1,60	0,22	0,38	1,91
Zn		–			–	0,01	0,02	–	0,01	–
Na		0,58			0,59	0,97	0,58	0,89	0,81	0,62
K		–			0,03	–	0,01	–	0,01	–
F		–			–	0,97	0,34	0,91	0,59	–
Li*		0,09			0,36	0,86	0,14	1,28	0,77	0,13
X		0,80			0,70	0,98	0,61	0,93	0,86	0,63
Al(Si)		0,07			0,12	–	0,14	0,07	0,26	–
Al-Y		0,22			0,65	0,91	0,88	0,99	0,9	0,48
Srl, %		15			42	36	–	–	–	48
Elb, %		–			–	58	10	73	52	9
Oln, %		8			–	–	–	–	–	–
Ftt, %		–			–	–	73	10	15	17
Tst, %		–			1	4	12	17	31	19
Mg-Ftt, %		14			–	–	–	–	–	–
Uvt, %		22			5	–	0,5	–	–	1
Dtw, %		37			18	2	4,5	–	2	6
Rsm, %		4			34	–	–	–	–	–

Примечание: «–» – ниже предела обнаружения; Li* – литий расчётный [19]; Srl, % – шерловая молекула; Elb, % – эльбаитовая молекула; Oln, % – оленитовая молекула; Ftt, % – фойтитовая молекула; Tst, % – тсилазитовая молекула; Mg-Ftt, % – Mg-фойтитовая молекула; Uvt, % – увитовая молекула; Dtw, % – дутровитовая молекула; Rsm, % – россманитовая молекула.

Note: «–» – below the detection limit; Li* – lithium calculated [19]; Srl, % – sherl molecule; Elb, % – elbaite molecule; Oln, % – olenite molecule; Ftt, % – foitite molecule; Tst, % – tsilaisite molecule; Mg-Ftt, % – Mg-foitite molecule; Uvt, % – uvite molecule; Dtw, % – dutrovite molecule; Rsm, % – rossmanite the molecule.

Слюды Вездаринской жилы, согласно результатам рентгеноспектрального микроанализа (табл. 7), представлены изоморфными смесями, состоящими из анитовой, флогопитовой, тайниолитовой, мусковитовой, трилитононитовой, полилитононитовой, оксифлогопитовой и истонитовой молекул. Бурые слюды, представленные существенно аннитом, присутствуют в трех комплексах (кварц-двуполевошпатовом, кварц-плагиоклазовом и калишпатовом). Вблизи контакта пегматитового тела с вмещающими породами размеры индивидов достигают 1 см (I генерация), в кварц-плагиоклазовом и калишпатовом она образует тонко-чешуйчатые единичные выделения (II, III генерации). Для первой генерации характерно повышенное содержание истонитового минала и присутствие фтора, для второй – равная примесь оксифлогопитовой и истонитовой молекул, для третьей – самой железистой – му-

сковитовой и оксифлогопитовой. В пределах околомияролового комплекса слюда представлена золотистым мелкочешуйчатым мусковитом с долей полилитононитового минала 16 %. В миароловом СВК слюды отличаются многообразием состава: флогопит, полилитононит и литийсодержащий мусковит. Слюды из миаролового комплекса содержат Cs и Rb. Генерации мусковита отличаются содержанием примесных элементов Mg, Fe, Rb, Zn и Ti. Для всех видов слюд миаролого комплекса характерно повышенное содержание фтора (до 1,9 вес. %). В трещинно-прожилковом комплексе совместно с альбитом и кварцем присутствует мусковит IV генерации. В жильном агрегате, расположенном ближе к миаролам, он может достигать гигантских размеров, а на периферии пегматитового тела составляет первые мм. Для этого мусковита характерно наличие 35 % трилитононитовой молекулы.

Таблица 6. Химический состав гранатов кварц-плагиоклазового комплекса Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 6. Chemical composition of garnets of miarolitic pegmatite of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Компоненты Composition	Структурно-вещественный комплекс Structural-material complex		
	Qz-Pl with Grt		
	1 (4)	2 (8)	3 (2)
SiO ₂ , wt. %	37,17	36,99	36,77
Al ₂ O ₃	20,8	20,82	20,67
MgO	2,86	2,1	1,71
FeO	35,77	37,14	38,96
MnO	1,31	1,07	0,59
CaO	1,71	1,87	1,06
Σ	99,60	99,99	99,72
Si, ф.к. (apfu)	3,02	2,69	2,98
Al	1,99	1,79	1,97
Fe	2,43	2,26	2,64
Mg	0,35	0,23	0,21
Mn	0,09	0,07	0,04
Ca	0,15	0,15	0,09
Alm, %	80,61	83,78	83,81
Prp, %	11,49	8,45	8,17
Grs, %	4,91	5,8	5,06
Sps, %	2,99	1,97	2,96

Примечание: 1 – зона контакта кварц-плагиоклазового комплекса с вмещающими породами; 2 – «центральная» часть кварц-плагиоклазового комплекса; 3 – зона контакта кварц-плагиоклазового и калишпатового комплекса. В скобках указано количество измерений. Alm, % – альмандиновая молекула; Prp, % – пироповая молекула; Grs, % – гроссулярная молекула; Sps, % – спессартиновая молекула.

Note: 1 – the contact zone of the quartz-plagioclase complex with the host rocks; 2 – the «central» part of the quartz-plagioclase complex; 3 – the contact zone of the quartz-plagioclase and kalishpat complex. The number of dimensions is indicated in parentheses. Alm, % – almandine molecule; Prp, % – pyrope molecule; Grs, % – grossular molecule; Sps, % – spessartin molecule.

Всего в теле миароловых пегматитов присутствует четыре минеральных вида: аннит (3 генерации), поллититонит, флогопит и мусковит (4 генерации).

Обсуждение

Пегматитовые тела Юго-Западного Памира формировались из уникальных гетерогенных остаточных расплавов, обогащенных специфическим флюидом, богатым бором, фтором, редкими щелочами [21]. Существование такой минералообразующей среды обусловлено сложным геологическим строением, которые обеспечивали вмещающие гнейсы и мрамора шугнанской свиты шахдаринской серии.

Генетическое значение степени упорядоченности и наличия структур распада твердого раствора в полевых шпатах.

Калиевые полевые шпаты Вездаринской жилы относятся к моноклинному виду с невысокой степенью структурной упорядоченности. Возможно несколько сценариев образования и сохранения ортоклаза в минеральных ассоциациях. Первый – «сухая система»

[28]. Второй – низкое парциальное давление флюида в области кристаллизации КПШ [29]. Третий – наличие водосодержащего флюида с низкой концентрацией водородных ионов (протонов), поскольку процесс трансформации твид-структуры ортоклаза в микроклин вызывает именно протон [30], свободно проникающий в индивид и разрывающий тетраэдрические связи между Al, Si и O, ускоряя межзерновую диффузию и вызывая Al-Si перераспределения на границе твердых фаз [31]. Высокая концентрация водородных ионов возможна при высокой температуре воды, когда она ведет себя как слабая кислота [32], либо флюид должен иметь повышенную кислотность благодаря растворенным в нем солям сильных кислот.

Рассмотрев эти три сценария, первый вариант представляется менее обоснованным, поскольку наблюдаются участки с мirmekитовой структурой, а также наличие в ассоциации минералов с гидроксо-группой [23]. Вероятнее, кристаллизация пегматита (Qz-2Fsp и K Fsp megacrystal СВК) проходила при незначительном количестве водосодержащего флюида с растворенными в нем слабыми кислотами, в условиях низкого парциального давления и невысокой температуры. Структуры распада, наблюдаемые в калиевых полевых шпатах, связаны с двумя разными механизмами образования. Первый тип – собственно пертиты распада, образовались в результате миграции ионов Na и K по крупным каналам, имеющимся в структуре полевых шпатов, при избытке Na в гетерогенном твердом растворе. Зерна КПШ со структурой пертитов отмечены в ранних краевых комплексах. Распределение альбитового компонента между равновесными плагиоклазами и калишпатом разной степени упорядоченности [33] показывают температуры распада 500–450 °С. Второй тип – пертиты замещения, вызваны автометасоматическим процессом, обусловленный миграцией флюида с Na и Ca в межзерновом пространстве. В блоковой зоне отмечаются структуры совместного роста – олигоклаз-ортоклазовый микроагрегат. Отсутствие метасоматических признаков позволяет воспользоваться двуполевошпатовым термометром, который соответствует температуре формирования агрегата 420–400 °С.

Типохимизм породообразующих и второстепенных минералов

Из проанализированных полевых шпатов Вездаринской жилы интерес представляет олигоклаз, который маркирует зоны пегматита, сформированные в условиях Ca профицита, вызванного обогащением среды минерализации веществом вмещающих пород.

Неравномерное присутствие бора в гетерогенном пегматитовом расплаве привело к фрагментарному образованию кварц-гранатовой псевдографики в Вездаринской турмалиноносной жиле, в которой гранат относится к пироп-альмандиновому ряду и отличается малым содержанием спессартиновой молекулы. Его состав отражает процесс «очистки» среды минералообразования от избыточных Mg, Fe, Al, заимствованных из вмещающих пород. Незначительное вхождение в структуру гранатов Mn указывает на его

концентрацию во флюидной составляющей пегматитового гетерогенного расплава, что подтверждает типоморфизм слюд, турмалинов. И даже при незначи-

тельном количестве в среде минералообразования Мп он охотнее будет входить в состав слюд, турмалина или танталониобатов.

Таблица 7. Химический состав слюд Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)
Table 7. Chemical composition of micas of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Компоненты Composition	Структурно-вещественный комплекс/Structural-material complex									
	Qz-2Fsp	Qz-Pl with Tur/Grt	Qz-Fsp PG	K Fsp megacrystal	Near miarolitic	Miarolitic cavities			Fractures-vein	
	(7)	(3)		(7)	(14)	(7)	(5)	(7)	(8)	(40)
SiO ₂ , wt. %	34,5	37,75	Отсутствует/None	35,68	46,97	55,46	46,93	41,89	45,8	46,37
Al ₂ O ₃	19,67	18,50		16,82	35,58	18,56	30,42	12,11	34,82	35,21
TiO ₂	–	4,13		4,01	–	0,01	0,02	–	–	–
MgO	5,19	8,83		1,36	0,06	0,01	0,01	24	0,73	0,47
FeO	23,81	19,83		29,42	1,23	0,05	–	4,65	1,66	2,04
MnO	0,25	0,41		–	0,01	0,02	0,02	0,06	0,02	0,02
ZnO	–	–		–	–	–	0,03	–	–	–
CaO	0,01	–		–	0,06	0,04	–	0,01	0,01	0,01
Na ₂ O	0,26	–		0,6	0,11	0,21	0,15	0,21	0,5	0,52
K ₂ O	10,4	9,83		8,33	9,69	10,64	11,3	10,79	9,31	9,31
Rb ₂ O	0,07	–		–	0,06	0,55	0,14	0,25	0,05	0,09
Cs ₂ O	–	–		–	–	1,06	0,1	0,01	–	0,01
F	0,3	–		–	0,08	9,6	1,44	5,15	0,73	0,34
Li ₂ O (calc)	–	–		–	1,08	7,72	2,03	0,38	1,53	1,26
Cl	0,22	0,21		2,61	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
Сумма-F	94,36	99,49		98,82	94,89	94,10	91,10	94,00	94,44	95,18
Si, ф.к. (apfu)	2,85	2,89		2,94	3,22	3,52	3,3	3,12	3,15	3,17
Ti	–	0,24		0,25	–	–	–	–	–	–
Al	1,91	1,66		1,63	2,87	1,39	2,52	1,06	2,82	2,84
Mn	0,02	0,03		–	–	–	–	–	–	–
Mg	0,64	1,01		0,17	0,01	0	0	2,69	0,08	0,05
Fe	1,64	1,26		2,02	0,07	0	0	0,29	0,1	0,12
Na	0,04	0		0,1	0,01	0,03	0,02	0,03	0,07	0,07
K	1,1	0,96		0,88	0,85	0,86	1,02	1,03	0,82	0,81
Rb	–	–		–	–	–	0,02	0,01	–	–
Cs	–	–		–	–	0,03	–	–	–	–
F	0,08	–		–	0,02	1,92	0,32	1,21	0,16	0,07
Cl	0,03	–		0,36	–	–	–	–	–	–
Li	–	–		–	0,3	1,96	0,57	0,11	0,42	0,35
□	–	0,04		0,03	0,13	0,11	–	–	0,12	0,12
O	0,87	1,04		1,02	0,84	–	0,39	0,84	0,7	0,78
OH	1,06	0,96		0,97	1,14	0,87	1,28	–	1,14	1,15
Ann, %	56	52	72	3	–	–	9	5	6	
Phl, %	–	–	–	–	–	–	80	4	3	
OPhl, %	–	23	13	–	–	–	–	–	–	
Eas, %	32	25	–	–	–	–	–	–	–	
Ms, %	12	–	15	81	–	69	–	52	56	
Plt, %	–	–	–	16	100	31	–	–	–	
Tnlt, %	–	–	–	–	–	–	11	–	–	
Tlt, %	–	–	–	–	–	–	–	39	35	

Примечание: «–» – ниже предела обнаружения; □ – вакансия в позиции X, в скобках указано количество измерений; Ann, % – аннитовая молекула; Phl, % – флогопитовая; Tnlt, % – тайниолитовая; Ms, % – мусковитовая; Tlt, % – трилиитионитовая; Plt, % – полилитионитовая; OPhl, % – оксифлогопитовая; Eas, % – истонитовая.

Note: «–» – below the detection limit, □ – vacancy in the position X, the number of dimensions is indicated in parentheses; Ann, % – annite molecule; Phl, % – phlogopite; Tnlt, % – tainiolite; Ms, % – muscovite; Tlt, % – trilitionite; Plt, % – polyolithionite; OPhl, % – oxyphlogopite; Eas, % – istonite.

Эволюция состава слюды Вездаринской пегматитовой жилы отражает общую динамику минералообразования: существенно Fe-Al слюды с примесью Mg и Ti кристаллизуются из остаточного силикатного расплава с незначительным содержанием воды, формирующего основной объем пегматита (кварц-двуполевошпатовый, кварц-плагиоклазовый с турмалином/гранатом, кварц-полевошпатовый пегматоидный, калишпатовый блоковый комплексы); Li-Al слюды и собственно Mg-слюда образуются из обосо-

бившейся существенно флюидной части, которая участвует в формировании миаролового, околомияролового и прожилкового комплексов. Характер распространения слюд в пегматитовом процессе указывает на изменение кислотности-щелочности среды, активности летучих компонентов и щелочей [34]. Представленный набор минеральных видов в Вездаринской жиле показал, что пегматит кристаллизовался в щелочной среде (репер биотит), а миаролы, околомияроловые и прожилковые агрегаты формирова-

лись в среде повышенной кислотности, содержащей Cs, Rb и Li при высокой активности последнего. Редкие щелочные металлы некогерентны к расплаву и накапливаются в его дериватах: во флюиде или в остаточной силикатной части. Перераспределение щелочей в системе водный флюид – остаточный силикатный расплав зависит от состава флюида: чисто водный флюид не концентрирует в себе щелочные металлы, а рост давления в системе только способствует накоплению Li, Rb, Cs в остаточном расплаве. Однако если флюид обогащен хлором – именно в нем происходит концентрация редких щелочных металлов [35]. Поскольку прямых данных о концентрации хлора в водном флюиде не имеется, рассмотрим среду кристаллизации миаролового комплекса, опираясь на результаты исследований включений в кварце [19]. Согласно [19], термобарогеохимия показала в корневой части индивидов кварца наличие расплавных и сингенетических с ними флюидных высокоплотных водных растворов с незначительной долей углекислоты. Судя по всему, среда формирования миаролового комплекса была представлена водно-силикатной жидкостью, обогащенной фтором, бором, редкими щелочами. Кроме того, нет однозначного ответа, являлась ли слюда миарол продуктом кристаллизации силикатной составляющей флюида или образовалась из его водной фазы. В околомароловом и в трещино-прожилковом комплексах появляется генерация мусковита как результат гидролиза полевых шпатов ранних СВК с характерными типохимическими признаками (содержит Na, Fe, OH⁻) и в ассоциации с индивидами кварца с зазубренными краями (следствие кристаллизации избытка кремнезема при разложении полевого шпата щелочными растворами). Температура формирования кварц-плагиоклазовой зоны по минеральному геотермометру сонахождения биотита и граната (по [33]) составила 500–450 °С.

Известно, что образование турмалина для пегматитов «чистой линии» имеет последовательность: шерл (Fe) → тсилаизит (Mn) → эльбаит (оленит) (Li, Al) [32]. В Вездаринской жиле отмечается следующее: турмалин краевой зоны пегматита обогащен Ca, Ti, Mg, что снижает общее содержание шерлового минерала. Это можно объяснить влиянием вмещающих пород (мрамора, гнейсы) на пегматитовый расплав, образовавшийся Вездаринскую жилу.

Значительное разнообразие турмалина по составу представлено в миароловом комплексе, где его индивиды зачастую зональны и при их формировании реализуется практически стандартная геохимическая схема (снижение содержания Fe и увеличение Mn, Li, Al): шерл-эльбаит обрастает фойтитом, периферия представлена тсилаизит-эльбаитом с примесью фойтита. Фойтит свидетельствует о повышении кислотности среды минералообразования при значительном содержании в ней Al и при умеренном количестве Fe. Присутствие изоморфных примесей Zn, Rb в турмалине миарол также подтверждают условия незначительного дефицита железа в системе. В результате разгерметизации миарол (усадки стенок полостей) остатки флюида формируют трещино-прожилковый

комплекс. Поздние генерации боросиликата существенно железистые, при этом в их составе присутствуют Li, Al, Mn, что указывает на участие в их формировании остаточного водного флюида миарол. Мигрируя в другие СВК пегматитовой жилы, активный раствор способствовал появлению зональных индивидов шерла в тонкой «рубашке» эльбаитового состава с типичными реакционными границами между минеральными фазами. Так проявился механизм синхронного псевдоморфизма, который происходит на границе протокристалл–раствор, где осуществляется неполный обмен компонентами [36]. Турмалин околомаролового комплекса уникален по своему составу, представлен смесью видообразующих молекул шерла и россманита (Fe, Li, Al) с увитом (Ca, Mg) и дутровитом (Fe, Ti). Такой состав маркирует эффект смешивания двух минералообразующих сред: расплавной части (Fe, Ca, Ti, Mg) и флюидной (Li, F), разделение которых произошло на начальной стадии пегматитового процесса, но при формировании околомаролового комплекса они могли взаимодействовать.

В минеральных ассоциациях нами определены еще два типоморфных минерала: андалузит и бертьерин, наличие которых также говорит об особенностях среды минералообразования. Включения андалузита в матрице полевого шпата указывает на избыток алюминия над содержащимися в среде щелочами. Появление андалузита однозначно не связано с гидролизом полевого шпата, поскольку он сопровождается высвобождением кремнезема, а значит образованием метасоматического кварца, которого нет в минеральном агрегате. Бертьерин с каолинитом и редкими зернами рутила образуется при разрушении турмалина, в результате переработки последнего остаточным водным флюидом миарол, о чем свидетельствует наличие Cl, Mn в бертьерине, Nb, Ta – в рутиле. Бертьерин, в составе которого одновременно присутствует окисное и закисное железо, является репером окислительно-восстановительных условий. Наличие трехвалентного железа в бертьерине, развившегося по шерлу, указывает на высокую активность кислорода в остаточном растворе.

Таким образом, структурный типоморфизм полевых шпатов, их совместное нахождение в минеральных парагенезисах СВК, а также типохимизм второстепенных минеральных видов позволяют оценить температуру кристаллизации пегматита, воздействие вмещающих пород на состав расплава, установить кислотность-щелочность силикатной и существенно флюидной частях и отметить изменение окислительно-восстановительных условий водно-силикатного флюида в пегматитообразующей системе.

Заключение

В работе по типоморфизму слюд, полевых шпатов, турмалинов и гранатов дана характеристика среды их кристаллизации. По особенностям состава структурно-вещественных комплексов, слагающих Вездаринскую жилу, четко фиксируются две среды минералообразования. Основной объем пегматитового тела, сложенный кварц-двуполевошпатовым, псевдографи-

ческим, пегматоидным, блоковым агрегатами, образовывался в интервале 500–400 °С из пегматитового расплава, оригинальный химизм которого связан с поступлением в него дополнительно Са, Mg, Ti, Al из вмещающих пород. Последнее обстоятельство привело к появлению нехарактерных для классических пегматитов минеральных ассоциаций и разнообразило минеральный набор Вездаринской жилы, которая насчитывает по обобщенным данным порядка 40 минеральных видов. Формирование остальных минеральных комплексов и их автотемасоматические преобразования в теле пегматита связаны с эволюцией силикатно-флюидной фазы, в которой обособились редкие щелочные металлы, летучие (В, F, H₂O, немного Cl) и, конечно, редкие (Nb, Та, Zn и др.). Механизм формирования околомаролового комплекса, по результатам проведенных исследований, отчасти объ-

ясняется тем, что он не является продуктом автотемасоматоза стенки миаролы и мог возникнуть в процессе кристаллизации гибридной среды (расплав-флюид). Анализируя условия кристаллизации уникальной по минералогическому составу Вездаринской жилы, отмечаем нормальный рядовой для пегматитового процесса характер распределения рудных элементов (Li, Nb и др.) и образования рудных парагенезисов, формирование которых связано с силикатно-флюидной средой и ее дериватов, продуцирующей миаролы и поздние структурно-вещественные комплексы в пегматитовом теле.

Данное исследование – дань памяти и глубокого уважения минералогу, наставнику Сергею Ивановичу Коноваленко.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 0721-2020-0041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dill H.G. Pegmatites and aplites: their genetic and applied ore geology // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 69. – P. 417–561.
2. Alkali metal and rare earth element evolution of rock-forming minerals from the Gatumba area pegmatites (Rwanda): quantitative assessment of crystal-melt fractionation in the regional zonation of pegmatite groups / N. Hulsbosch, J. Hertogen, S. Dewaele, L. André, Ph. Muchez // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2014. – V. 132. – P. 349–374.
3. Zheng-Hang Lv, Zhang H., Tang Y. Anatexis origin of rare metal/earth pegmatites: evidences from the Permian pegmatites in the Chinese Altai // *Lithos*. – 2021. – V. 380–381. – P. 105865.
4. Formation of miarolitic-class, segregation-type pegmatites in the Taishanmiao batholith, China: the role of pressure fluctuations and volatile exsolution during pegmatite formation in a closed, isochoric system / Y. Yuan, L.R. Moore, R.J. McAleer, S. Yuan, H. Ouyang, H.E. Belkin, J. Mao, D.M. Sublett, R.J. Bodnar // *American Mineralogist*. – 2021. – V. 106. – Iss. 10. – P. 1559–1573.
5. Rare element minerals' assemblage in El Quemado pegmatites (Argentina): insights for pegmatite melt evolution from gahnite, columbite-group minerals and tourmaline chemistry and implications for mineralogenesis / Vanina López de Azarevich, P. Fulignati, A. Gioncada, M. Azarevich // *Mineralogy and Petrology*. – 2021. – V. 115. – P. 497–518.
6. Feldspar thermometry in pegmatites: truth and consequences / D. London, L.E. Hunt, Ch.R. Schwing, B.M. Guttery // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2020. – V. 175. – Iss. 1. – P. 1617–1636.
7. Chemical composition of gemstones and characterization of their host pegmatites and country rocks from Chumar Bakhoo, Gilgit-Baltistan, Pakistan: implications for the source of gem-forming fluids / A. Hussain, M.T. Shah, M. Arif, M.H. Agheem, M.S. Mughal, Sh. Ullah, S.A. Hussain, I. Sadiq // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – V. 14. – Iss. 13. – P. 1303. URL: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07682-3> (дата обращения 15.09.2021).
8. Geochemical contrasts between Late Triassic Rb-rich and barren pegmatites from Ningshan pegmatite district, South Qinling Orogen, China: implications for petrogenesis and rare metal exploration / X. Nie, Z. Wang, L. Chen, G. Wang, Z. Li // *Minerals*. – 2020. – V. 10. – Iss. 7. – P. 10070582.
9. Webber K.L., Simmons W.B., Falster A.U. Pegmatites of the oxford county pegmatite field, Maine, USA // *The Canadian Mineralogist*. – 2019. – V. 57. – P. 811–815.
10. Дурнев В.Ф., Мелентьев Г.Б., Соколов В.А. Первая находка поллуцита в пегматитах Памира // *Доклады АН СССР*. – 1973. – Т. 213. – № 1. – С. 180–183.
11. Первая находка гамбергита в пегматитах СССР / Л.Н. Россковский, С.И. Коноваленко, С.А. Ананьев, Е.П. Петухов // *Доклады АН СССР*. – 1981. – Т. 260. – № 4. – С. 992–995.
12. Коноваленко С.И., Волошин А.В., Пахомовский Я.А. Вольфрамсодержащие разновидности танталониобатов из миароловых гранитных пегматитов Юго-Западного Памира // *Минералогический журнал*. – 1982. – № 1. – С. 65–74.
13. Россковский Л.Н., Коноваленко С.И., Ананьев С.А. Еремеевит – вновь найденный в России минерал // *Записки Всесоюзного минералогического общества*. – 1983а. – Ч. 122. – Вып. 2. – С. 212–217.
14. Коноваленко С.И., Волошин А.В., Пахомовский Я.А. Тусионит MnSn(BO₃)₂ – новый борат из гранитных пегматитов Юго-Западного Памира // *Доклады АН СССР*. – 1983б. – Т. 272. – № 6. – С. 1449–1453.
15. Коноваленко С.И., Волошин А.В., Ананьев С.А. Тетравикманит из миароловых пегматитов Юго-Западного Памира // *Минералогический журнал*. – 1984. – Т. 6. – № 1. – С. 89–92.
16. Коноваленко С.И., Ананьев С.А., Кузнецова И.К. Виитаньемит из миароловых пегматитов Юго-Западного Памира // *Записки Всесоюзного минералогического общества*. – 1991. – Ч. 120. – Вып. 1. – С. 74–79.
17. Находка герценбергита в гранитном миароловом пегматите Вез-Дара на Юго-Западном Памире (Таджикистан) / Л.А. Паутов, М.А. Мираков, М.А. Шодибеков, П.В. Хворов // *Новые данные о минералах*. – 2018. – Т. 52. – Вып. 1. – С. 6–14.
18. Загорский В.Е., Перетяжко И.С., Шмакин Б.М. Гранитные пегматиты. Т. 3. Миароловые пегматиты. – Новосибирск: Изд-во «Наука». Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 488 с.
19. Бакуменко И.Т., Коноваленко С.И. Особенности формирования миароловых пегматитов и их положение среди гранитных пегматитов // *Термобарогеохимические исследования процессов минералообразования*. Вып. 733. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 123–135.
20. Перетяжко И.С. Условия образования минерализованных полостей (миарол) в гранитных пегматитах и гранитах // *Петрология*. – 2010. – Т. 18. – № 2. – С. 195–222.
21. Редкие щелочные металлы в слюдах миароловых пегматитов жилы Шахдаринской (Юго-Западный Памир) / Е.Н. Соколова, С.З. Смирнов, Э.Н. Кунгулова, В.Н. Королюк, С.И. Коноваленко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 83–96.
22. Cerny P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited // *Canadian Mineralogist*. – 2005. – V. 43. – P. 2005–2026.
23. Кунгулова Э.Н., Бухарова О.В. Вещественная характеристика пегматитовой жилы Вездаринская (Юго-Западный Памир) // *Геосферные исследования*. – 2019. – № 3. – С. 6–19.
24. Foster M.D. Interpretation of the composition of lithium micas // *Geological survey professional*. – 1960. – V. 354. – P. 115–147.
25. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation / G. Tischendorf, B. Gottesmann, H.J. Forster, R.B. Trumbull // *Mineralogical Magazine*. – 1997. – V. 61. – № 6. – P. 809–834.
26. Соколов П.Б. Расчет кристаллохимических формул минералов по неполным микронзондовым данным (на примере группы турмалина) // *Записки Всесоюзного минералогического общества*. – 1985. – Вып. 4. – С. 496–502.

27. Франк-Каменецкий В.А. Рентгенография основных типов породобразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты). – Л.: Недра, 1983. – 359 с.
28. Мельников В.С. Генетическое значение инверсионного перехода санидин/микроклин. 1. Флюидный фактор в трансформации двойниковой структуры щелочных полевых шпатов // Минералогический журнал. – 2009. – Т. 31. – № 4. – С. 16–29.
29. Самаркин Г.И., Самаркина Е.Я., Спиридов Э.М. Состав и условия кристаллизации КПШ их гранитоидов главного гранитного пояса Южного Урала // Известия ФН СССР. Серия геологическая. – 1976. – № 4. – С. 24–34.
30. Graham C.M., Elphick S.C. A re-examination of the role of hydrogen in Al-Si interdiffusion in feldspars // Contrib Mineral Petrol. – 1990. – V. 104. – P. 481–491.
31. Мельников В.С. Трансформация твид-структуры ортоклаза в решетчатый микроклин // Минералогический журнал. – 2005. – Т. 27. – № 2. – С. 9–31.
32. Ферсман А.Е. Избранные труды. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. VI. – 742 с.
33. Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. – М.: Недра, 1976. – 287 с.
34. Понаморева Н.И., Гордиенко В.В., Буторин В.В. Физико-химические условия образования литиево-железистых слюд в гранитных пегматитах // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1993. – № 2. – С. 102–106.
35. Webster J.D., Holloway J.R., Hervig R.L. Partitioning of lithophile trace elements between H₂O and H₂O+CO₂ fluids and topaz rhyolite melt // Economic Geology. – 1989. – V. 84. – № 1. – P. 116–134.
36. Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. – СПб: Изд-во «Невский курьер», 1995. – 228 с.

Поступила: 08.10.2021 г.

Информация об авторах

Бухарова О.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры минералогии и геохимии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Кунгулова Э.Н., аспирант геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 553.21:549.02

TYPOMORPHISM OF MINERALS OF VEIN VEZDARINSKAYA (SOUTHWESTERN PAMIR) AS AN INDICATOR OF PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES OF PEGMATITE FORMATION

Oksana V. Bukharova¹,
bukharovagetina@gmail.com

Elvira N. Kungulova¹,
elvirakungulova@mail.ru

¹ National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, 634050, Tomsk, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to clarify the conditions for formation of a unique pegmatite object – the Vezdarinskaya miarolitic pegmatite vein. This object gave the world a large number of rare mineral species, which indicates special physico-chemical parameters of the mineral formation medium.

The main aim of the research is to characterize the formation of structural-material complexes of the pegmatite vein by typomorphic features of feldspar, tourmalines, garnets, micas.

Objects: rock-forming and secondary mineral species of the pegmatite vein Vezdarinskaya.

Methods. Quantitative analysis of the chemical composition of minerals was performed using X-ray spectral microanalysis on the JXA-8100 microprobe and on scanning electron microscopes Tescan Mira 3 LMU and VEGA II LMU, combined with INCA Energy350 Oxford spectrometers, the structural state of feldspars was calculated based on the results of X-ray analysis on the XPert PRO (PANalytical) diffractometer.

Results. The authors have obtained the complex data on the mineral composition of the pegmatite vein Vezdarinskaya (4 mineral species of mica, 4 species of tourmalines, 2 species of plagioclases were identified and refined), generations of mineral species were identified, new minerals for this pegmatite (andalusite, bertierine) were recorded, the association with which is typomorphic. A scenario for formation of a nearmiarolitic vein aggregate is proposed and the role of remobilization of host rocks in the formation of pegmatite (its mineral associations) is analyzed. According to the association of mineral phases, the formation temperatures of the structural-material complexes of the vein were determined. The typochemism of secondary minerals records the presence of a heterogeneous pegmatite-forming medium, which has undergone separation into silicate and silicate-fluid parts. The geochemistry of pegmatite and its mineral set are caused by a change in the chemistry of the pegmatite melt under the influence of the rocks of the Shugnan formation of the Shahdarinskaya series that contains it.

Key words:

Miarolitic pegmatites, Vezdarinskaya vein, mineral associations, generation, pegmatite formation, Southwestern Pamir.

This work was supported by the grant no. 0721-2020-0041 from the Russian Ministry of Science and Higher Education.

REFERENCES

- Dill H.G. Pegmatites and aplites: their genetic and applied ore geology. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 69, pp. 417–561.
- Hulsbosch N., Hertogen J., Dewaele S., André L., Muechez Ph. Alkali metal and rare earth element evolution of rock-forming minerals from the Gatumba area pegmatites (Rwanda): quantitative assessment of crystal-melt fractionation in the regional zonation of pegmatite groups. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 132, pp. 349–374.
- Zheng-Hang Lv, Zhang H., Tang Y. Anatexis origin of rare metal/earth pegmatites: evidences from the Permian pegmatites in the Chinese Altai. *Lithos*, 2021, vol. 380–381, pp. 105865.
- Yuan Y., Moore L.R., McAleer R.J., Yuan S., Ouyang H., Belkin H.E., Mao J., Sublett D.M., Bodnar R.J. Formation of miarolitic-class, segregation-type pegmatites in the Taishanmiao batholith, China: the role of pressure fluctuations and volatile exsolution during pegmatite formation in a closed, isochoric system. *American Mineralogist*, 2021, vol. 106, Iss. 10, pp. 1559–1573.
- Vanina López de Azarevich, Fulignati P., Gioncada A., Azarevich M. Rare element minerals' assemblage in El Quemado pegmatites (Argentina): insights for pegmatite melt evolution from gahnite, columbite-group minerals and tourmaline chemistry and implications for minerogenesis. *Mineralogy and Petrology*, 2021, vol. 115, pp. 497–518.
- London D., Hunt L.E., Schwing Ch.R., Guttery B.M. Feldspar thermometry in pegmatites: truth and consequences. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2020, vol. 175, Iss. 1, pp. 1617–1636.
- Hussain A., Shah M.T., Arif M., Agheem M.H., Mughal M.S., Ullah Sh., Hussain S.A., Sadiq I. Chemical composition of gemstones and characterization of their host pegmatites and country rocks from Chumar Bakhoor, Gilgit-Baltistan, Pakistan: implications for the source of gem-forming fluids. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, Iss. 13, article number 1303. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07682-3> (accessed 15 September 2021).
- Nie X., Wang Z., Chen L., Wang G., Li Z. Geochemical contrasts between Late Triassic Rb-rich and barren pegmatites from Ningshan pegmatite district, South Qinling Orogen, China: implications for petrogenesis and rare metal exploration. *Minerals*, 2020, vol. 10, Iss. 7, pp. 10070582.
- Webber K.L., Simmons W.B., Falster A.U. Pegmatites of the oxford county pegmatite field, MAINE, USA. *The Canadian Mineralogist*, 2019, vol. 57, pp. 811–815.
- Durnev V.F., Melentev G.B., Sokolov V.A. Pervaya nakhodka pollutsita v pegmatitakh Pamira [The first finding of pollucite in the Pamir pegmatites]. *Reports of the AN USSR*, 1973, vol. 213, no. 1, pp. 180–183.
- Rossovskiy L.N., Konovalenko S.I., Ananov S.A., Petukhov E.P. Pervaya nakhodka gambergita v pegmatitakh SSSR [The first finding of gambergite in the pegmatites of the USSR]. *Reports of the AN USSR*, 1981, vol. 260, no. 4, pp. 992–995.
- Konovalenko S.I., Voloshin A.V., Pakhomovskiy Ya.A. Volframsoderzhashchie raznovidnosti tantaloniobatov iz miarolovnykh granitnykh pegmatitov Yugo-Zapadnogo Pamira [Tungsten-containing varieties of tantaloniobates from miarolitic

- granite pegmatites of the Southwestern Pamirs]. *Mineralogical Journal*, 1982, no. 1, pp. 65–74.
13. Rossovskiy L.N., Konovalenko S.I., Ananov S.A. Eremeevit – vnov naydeny v Rossii mineral [Eremeevite is a mineral newly found in Russia]. *Notes of the All-Union Mineralogical Society*, 1983a, vol. 122, no. 2, pp. 212–217.
 14. Konovalenko S.I., Voloshin A.V., Pahomovskiy Ya.A. Tusionit $MnSn(BO_3)_2$ – novy borat iz granitnykh pegmatitov Yugo-Zapadnogo Pamira [Tusionite $MnSn(BO_3)_2$ is a new borate from granite pegmatites of the Southwestern Pamirs]. *Reports of the AN USSR*, 1983b, vol. 272, no. 6, pp. 1449–1453.
 15. Konovalenko S.I., Voloshin A.V., Ananov S.A. Tetravikmanit iz miarolovykh pegmatitov Yugo-Zapadnogo Pamira [Tetravikmanite from miarol pegmatites of the Southwestern Pamirs]. *Mineralogical Journal*, 1984, vol. 6, no. 1, pp. 89–92.
 16. Konovalenko S.I., Ananov S.A., Kuznetsova I.K. Viitanemiite iz miarolovykh pegmatitov Yugo-Zapadnogo Pamira [Viitanemiite from miarol pegmatites of the Southwestern Pamirs]. *Notes of the All-Union Mineralogical Society*, 1991, vol. 120, no. 1, pp. 74–79.
 17. Pautov L.A., Mirakov M.A., Shodibekov M.A., Hvorov P.V. The discovery of herzenbergite in the granite miarol pegmatite of Vezdar in the Southwestern Pamirs (Tajikistan). *New data on minerals*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 6–14. In Rus.
 18. Zagorsky V.E., Peretyazhko I.S., Shmakin B.M. *Granitnye pegmatity. T. 3. Miarolovye pegmatity* [Granite pegmatites. Vol. 3. Miarolitic pegmatites]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999. 487 p.
 19. Bakumenko I.T., Konovalenko S.I. Osobennosti formirovaniya miarolovykh pegmatitov i ikh polozhenie sredi granitnykh pegmatitov [Features of the formation of miarol pegmatites and their position among granite pegmatites]. *Termobarogeokhimicheskie issledovaniya protsessov mineraloobrazovaniya* [Thermobarogeochemical studies of mineral formation processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. Vol. 733, pp. 123–135.
 20. Peretyazhko I.S. Conditions for the formation of mineralized cavities (miaroles) in granite pegmatites and granites. *Petrology*, 2010, vol. 18, no. 2, pp. 195–222.
 21. Sokolova E.N., Smirnov S.Z., Kungulova E.N., Korolyuk V.N., Konovalenko S.I. Rare alkali metals in micas from Shakhdarinskaya miarolitic pegmatite (South8Western Pamir). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 83–96. In Rus.
 22. Cerny P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited. *Canadian Mineralogist*, 2005, vol. 43, pp. 2005–2026.
 23. Kungulova E.N., Bukharova O.V. Composition characteristics of the Vezdarinskaya pegmatite vein (South-Western Pamir). *Geosphere Research*, 2019, no. 3, pp. 6–19. In Rus.
 24. Foster M.D. Interpretation of the composition of lithium micas. *Geological survey professional*, 1960, vol. 354, pp. 115–147.
 25. Tischendorf G., Gottesmann B., Forster H.J., Trumbull R.B. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation. *Mineralogical Magazine*, 1997, vol. 61, no. 6, pp. 809–834.
 26. Sokolov P.B. Raschet kristalokhimicheskikh formul mineralov po nepolnym mikrozonovym dannym (na primere gruppy turmalina) [Calculation of crystal chemical formulas of minerals based on incomplete microprobe data (using the example of the tourmaline group)]. *Notes of the All-Union Mineralogical Society*, 1985, vol. 4, pp. 496–502.
 27. Frank-Kamenetsky V.A. *Rentgenografiya osnovnykh tipov porodoobrazuyushchikh mineralov (sloistye i karkasnye silikaty)* [Radiography of the main types of rock-forming minerals (layered and skeleton silicates)]. Leningrad, Nedra Publ., 1983. 359 p.
 28. Melnikov V.S. The genetic significance of the sanidin/microcline inversion transition. 1. Fluid factor in the transformation of the double structure of alkaline feldspar. *Mineralogical Journal*, 2009, vol. 31, no. 4, pp. 16–29. In Rus.
 29. Samarkin G.I., Samarkina E.Ya., Spiridovov E.M. Sostav i usloviya kristallizatsii KPSH ikh granitoidov glavnogo granitnogo poyasa Yuzhnogo Urala [Composition and conditions of crystallization of CPS of their granitoids of the main granite belt of the Southern Urals]. *Izvestiya FN USSR. Series: Geological*, 1976, no. 4, pp. 24–34.
 30. Graham C.M., Elphick S.C. A re-examination of the role of hydrogen in Al-Si interdiffusion in feldspars. *Contrib Mineral Petrol*, 1990, vol. 104, pp. 481–491.
 31. Melnikov V.S. Transformation of the tweed structure of the orthoclase into a lattice microcline. *Mineralogical Magazine*, 2005, vol. 27, no. 2, pp. 9–31. In Rus.
 32. Fersman A.E. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow, AN SSSR Publ., 1960. Vol. VI, 742 p.
 33. Perchuk L.L., Ryabchikov I.D. *Fazovoe sootvetstvie v mineralnykh sistemakh* [Phase matching in mineral systems]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 287 p.
 34. Ponamoreva N.I., Gordienko V.V., Butorin V.V. Fiziko-khimicheskie usloviya obrazovaniya litievo-zhelezistykh slyud v granitnykh pegmatitakh [Physico-chemical conditions of formation of lithium-ferruginous micas in granite pegmatites]. *Notes of the All-Union Mineralogical Society*, 1993, no. 2, pp. 102–106.
 35. Webster J.D., Holloway J.R., Hervig R.L. Partitioning of lithophile trace elements between H_2O and H_2O+CO_2 fluids and topaz rhyolite melt. *Economic Geology*, 1989, vol. 84, no. 1, pp. 116–134.
 36. Krasnova N.I., Petrov T.G. *Genesis mineralnykh individov i agregatov* [Genesis of mineral individuals and aggregates]. Saint Petersburg, Nevskii kuryer Publ., 1995. 228 p.

Received: 8 October 2021.

Information about the authors

Oksana V. Bukharova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

Elvira N. Kungulova, graduate student, National Research Tomsk State University.