

МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 553.896.621.55(571.5)

ВЕЩЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕГМАТИТОВОЙ ЖИЛЫ ВЕЗДАРИНСКАЯ (ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ПАМИР)

Э.Н. Кунгулова, О.В. Бухарова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия



На основе характерных структурно-текстурных особенностей минеральных агрегатов проведена реконструкция процесса пегматитообразования миароловой турмалиноносной, редкоэлементной пегматитовой жилы LCT-типа. Установлено, что микроструктурные характеристики агрегатов маркируют особенности среды минералообразования и позволяют выделить генерации породообразующих и второстепенных минеральных видов. Показаны тренды полигенного минералообразования в процессе формирования пегматита и миарол.

Ключевые слова: миароловые пегматиты, Вездаринская жила, структурно-текстурная характеристика агрегатов, генерации, пегматитообразование.

Введение

При кристаллизации магматического расплава значительное количество летучих компонентов остается в остаточном расплаве, обуславливая специфические физико-химические характеристики кристаллизации последнего. Из этого остаточного расплава формируются особенные по структурно-текстурным и минералогическим характеристикам горные породы, по петрохимии близкие к составу поздних дифференциатов магматических комплексов. Такие породы носят название «пегматиты» и отличаются проявлением зональности и развитием необычных структур минеральных агрегатов. Их формирование происходит в широком температурном интервале, отвечающем концу магматического – началу гидротермального процесса при высокой активности летучих и подвижных компонентов [Косухин, Бакуленко, Чупин, 1984]. Особое место среди них занимают пегматиты миароловой фации, для которых характерно наличие первичных пустот – миарол, обеспечивающих условия для роста крупных и хорошо образованных кристаллов. Они встречаются в различных формациях, но наиболее характерны для пегматитов малых и умеренных глубин.

В опубликованной литературе о миароловых пегматитах отражена минералогия этих объектов [Загорский, 2012; Коноваленко, 2015; Соколова и др., 2017], оценен их ювелирный потенциал [Герасимов, Коноваленко, 2015], описаны редкие и новые минералы [Коноваленко и др., 1981; Мираков и др., 2018]. В то же время геологическая характеристика, детали внутреннего строения, структурно-текстурные и геохимические особенности миароловых пегматитов встречаются редко [London, 2005]. Один из

монументальных трудов о миароловых пегматитах принадлежит авторам иркутской геологической школы В.Е. Загорскому, И.С. Перетяжко и Б.М. Шмакину [Загорский, 1999], в которой они представили классификацию пегматитов миароловой фации. В настоящее время наибольший интерес в исследовании миароловых пегматитов представляет термобарогеохимическое направление, позволяющее реконструировать режим кристаллизации пегматитовых магм [Mona-Liza C. Sirbescu et al., 2013; Перетяжко, 2015; Смирнов, 2015] и условия образования миароловых полостей [Перетяжко, 2010].

Несмотря на представительность результатов исследований, первичные данные минералого-петрографических характеристик пегматитов в литературе отображены скудно. Между тем структурно-текстурные особенности минеральных агрегатов сложных по строению пегматитовых тел несут в себе информацию об эволюции пегматитового расплава и последующих процессах перекристаллизации. Реализация таких исследований возможна только при системной коллекции каменного материала, отражающей строение конкретной пегматитовой жилы.

Геологическое положение объекта исследования

Пегматитовая жила Вездаринская находится в верховьях р. Вез-Дара, левого притока Шахдары (рис. 1), имеет размеры 6 × 45 м, занимает секущее положение по отношению к гнейсам шахдаринской серии [Загорский, 1999] входит в состав одноименного пегматитового поля Юго-Западного Памира, который является частью Памиро-Гималайского гранит-лейкогранитового пояса, протягивающегося с северо-запада на юго-восток вдоль горных сооруже-

ний Памира, Гиндукуша, Каракорума и Гималаев [Россовский, Коноваленко, 1976]. Территория распространения миароловых пегматитов Памира в геологическом плане представляет собой жесткую докембрийскую глыбу – срединный массив внутри киммерийско-альпийского складчатого пояса [Коноваленко, 2006]. Для миароловых пегматитов Юго-Западного Памира отмечается отсутствие пространственной связи с гранитоидами. Однако на основании

геологических признаков (пегматиты являются наиболее поздними магматическими образованиями региона) и по U-Pb датировке, возраст пегматитов составляет $3,2-7,5 \pm 0,2$ млн лет, что дает основание предполагать их генетическую связь с неогеновыми высокоглиноземистыми двуслюдяными гранит-лейкогранитами и гнейсогранитами с гранатом и кордиеритом памиро-шугнанского комплекса [Коноваленко, Сазонова, Сирнов, 2001; Коноваленко, 2006].

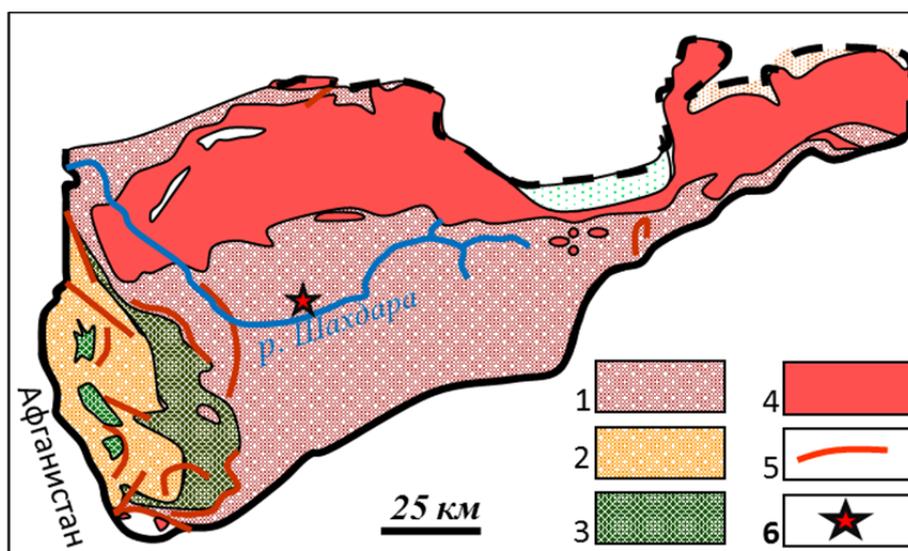


Рис. 1. Геологическая схема Юго-Западного Памира и расположение Вездаринской жилы [Лозиев, Саидов, 1989]
 1 – гранат-биотитовые гнейсы шаххаринской серии (докембрий); 2 – горанская серия (докембрий); 3 – хорогский ортокомплекс (докембрий); 4 – гранит-лейкограниты памиро-шугнанского комплекса; 5 – разрывные нарушения; 6 – Вездаринская жила

Fig. 1. The geological scheme of the Pamirs and the location of the Vezdarinskaya vein [Loziev, Saidov, 1989]
 1 – garnet-biotite gneisses of the Shakhdara series (Precambrian); 2 – goran series (Precambrian); 3 – Khorog orthocomplex (Precambrian); 4 – granite-leucogranites of the Pamir-Shugnansky complex; 5 – fault; 6 – Vezdarinskaya vein

Фактический материал и методы исследований

Каменная коллекция, которая послужила материалом для проведения исследований, была отобрана доцентом кафедры минералогии и геохимии ТГУ Сергеем Ивановичем Коноваленко в ходе экспедиций на Памир, в которых он принимал участие в 1989 и 2015 гг. Было обработано 33 образца, которые максимально полно характеризовали строение Вездаринской жилы. Структурно-текстурный анализ был выполнен на макро- и микроуровне, в последнем случае взаимоотношения между минералами и агрегатами анализировались с использованием петрографического микроскопа Leica DM 750 и растрового электронного микроскопа VEGA II LMU, совмещенным с энергодисперсионным детектором. Для получения изображения на растровом электронном микроскопе и определения химического состава минеральных фаз шлифы покрывались проводящим материалом (углеродом), после чего были выполне-

ны необходимые испытания. Параметры съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 5 нА, живое время набора 120 с, диаметр зонда 1–2 мкм. Стандарты для работы представлены природными и синтетическими фазами MAC 55 (Standard Universal Block Layout+F/Cup; Micro-Analysis Consultants Ltd., UK). Изображения получали в обратно-рассеянных электронах. Состав полевых шпатов уточнялся методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре XPert PRO (PANalytical) в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ГГФ ТГУ (аналитики Т.С. Небера, А.А. Артамонова, М.О. Хрущева). Были отобраны мономинеральные фракции 0,5–0,25 мм из каждого структурно-вещественного комплекса (18 шт.), которые были истерты в порошок в яшмовой ступке. Условия съемки на дифрактометре: 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 2Θ (28–32°) и 2Θ (40–52°) со скоростью 0,50 об./мин. Расшифровка дифрактограмм проводилась с помощью программного обеспечения PDF-4 и HighScore. Положение всех индикаторных рефлексов для полевых шпатов описано в источнике [Франк-Каменецкий, 1983]. Номер плагиоклаза в данной работе был определен двумя методами: рентгеноструктурным и оптическим методом Мишель-Леви [Сазонов, 1999].

При описании пегматитовых тел была использована следующая терминология. *Структурно-вещественный комплекс* – минеральная ассоциация, характеризующаяся выдержанностью минерального состава, типоморфными структурами и текстурами. Второстепенные минералы, входящие в состав комплекса, определяют его специфику. *Генерация минерала* – разновозрастные индивиды минерала, выделившиеся на разных стадиях минералообразования и отличающихся своими типоморфными особенностями [Жабин, 1979].

Результаты исследований

Вездаринская пегматитовая жила является типичным представителем малоглубинных турмалиноносных миароловых пегматитов, формирование которой связано с кристаллизацией боросодержащих расплавов [Загорский, 1999; Коноваленко, Сазонов, Смирнов, 2001], и соответствует редкоземельным пегматитам LCT типа (Li-Cs-Ta) [Cerny, Erkit, 2005].

Вездаринская жила, подобно другим жилам миароловых пегматитов Юго-Западного Памира [Коноваленко, 2006], имеет сложное слабо зональное участковое внутреннее строение, выраженное в развитии неравномерно распространенных структурно-вещественных комплексов (рис. 2). В пегматитовом теле Вездаринской жилы выделяются до восьми структурно-вещественных комплексов: кварц-двуполевошпатовый, кварц-плагиоклазовый с турмалином или гранатом, кварц-полевошпатовый пегматоидный, калишпатовый блоковый, миароловый, околомароловый и трещинно-прожилковый.

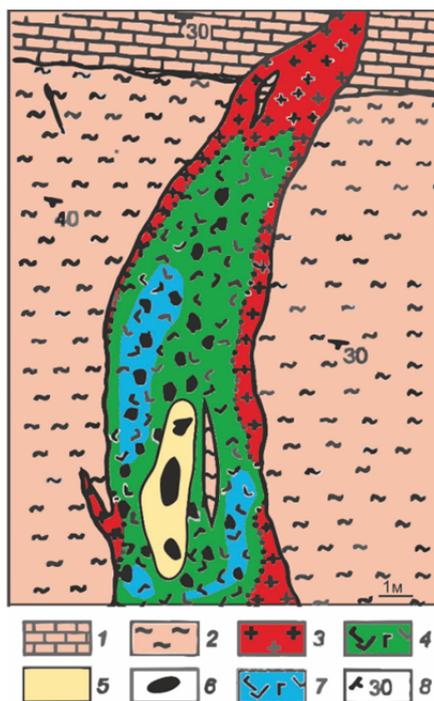


Рис. 2. Схема строения Вездаринской жилы [Бакуменко, Коноваленко, 1988] с дополнениями авторов

1 – кальцитовый мрамор; 2 – гранат-биотитовые гнейсы Шахдаринской серии; 3 – кварц-двуполевошпатовый комплекс; 4 – кварц-плагиоклазовый с турмалином или гранатом; 5 – калишпатовый блоковый комплекс; 6 – миаролы; 7 – кварц-полевошпатовый пегматоидный комплекс; 8 – элементы залегания

Fig. 2. The structure of the Vezdarinskaya vein [Bakumenko, Konovalenko, 1988] with the additions of the authors
1 – calcite marble; 2 – garnet-biotite gneisses of the Shakhdara series; 3 – quartz-double-feldspar complex; 4 – quartz-plagioclase with tourmaline or garnet; 5 – potassium feldspar block complex; 6 – miarols; 7 – quartz-feldspar pegmatoid complexes; 8 – elements of occurrence

Кварц-двуполевошпатовый комплекс образуется вблизи контакта пегматитового тела с вмещающими породами и формирует краевые части жилы. Для него характерна среднезернистая гранитная

структура и однородная текстура (рис. 3, а). Порода сложена гипидиоморфными индивидами полевых шпатов и ксеноморфными зернами кварца, размеры последнего варьируют от 0,5 до 1,5 мм.

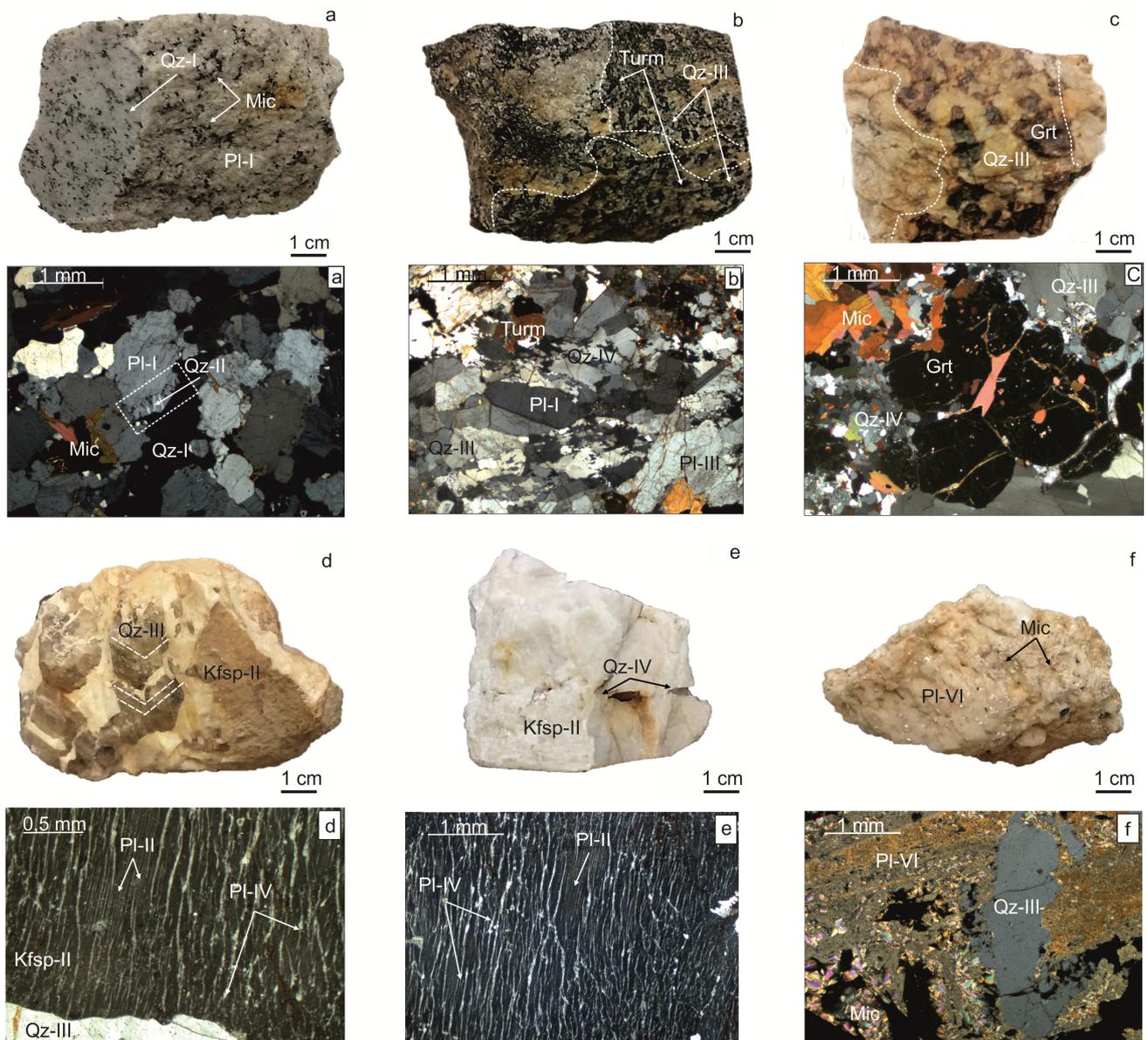


Рис. 3. Структурно-вещественные комплексы Вездаринской миароловой пегматитовой жилы (макро- и микровид)

Представлены макроснимки образцов пегматита различных комплексов, ниже размещены микроснимки (шлифов породы), полученные с помощью поляризационного микроскопа, николи X.

a – гранитная структура кварц-двуполевошпатового комплекса с фрагментами мирмекитовых сростаний (1); **b** – кварц-плагиоклазовый комплекс с псевдографической структурой кварца (Qz-III) и турмалина; **c** – кварц-плагиоклазовый комплекс с псевдографической структурой кварца (Qz-III) и граната; **d** – кварц-полевошпатовый пегматоидный комплекс с характерной индукционной штриховкой на кварцевых индивидах (Qz-III) и пертитизированным ортоклазом (пертиты распада (Pl-II) и замещения (Pl-IV)); **e** – пертиты распада (Pl-II) и замещения (Pl-IV) в ортоклазе калишпатового блокового комплекса; **f** – плагиоклаз крупнозернистой структуры с корродированными индивидами кварца в околومیароловом комплексе; **Pl** – плагиоклаз, **Kfsp** – калиевый полевошпат, **Turm** – турмалин, **Grt** – гранат, **Mic** – слюда, **Qz** – кварц. Римскими цифрами указаны номера генераций

Fig. 3. Structural and material complexes of the Vezdarinskaya miarolitic pegmatite vein (macro and micro view)
 Macro photographs of pegmatite samples of various complexes are presented; below are micrographs (sections of rocks) obtained using a polarizing microscope, Nicole X.
a – granite structure of a quartz-bisexual feldspar complex with fragments of myrmekite accretions (1); **b** – quartz-plagioclase complex with a pseudographic structure of quartz (Qz-III) and tourmaline; **c** – quartz-plagioclase complex with a pseudographic structure of quartz (Qz-III) and garnet; **d** – quartz-feldspar pegmatoid complex with characteristic induction hatching on quartz individuals (Qz-III), and perthitized orthoclase (perthites of decay (Pl-II) and substitution (Pl-IV)); **e** – perthites of decay (Pl-II) and substitution (Pl-IV) in the orthoclase of the potassium feldspar block complex; **f** – coarse-grained plagioclase with corroded quartz individuals in the near-miarolitic complex; **Pl** – plagioclase, **Kfsp** – potassium feldspar, **Turm** – tourmaline; **Grt** – pomegranate; **Mic** – mica; **Qz** – quartz. Roman numerals indicate generation numbers

Плагиоклаз комплекса (Pl I генерации) представлен олигоклазом (Pl_{№19}, угол погасания 2°), имеет тонкие, ровные полисинтетические двойники. Калиевый полевой шпат I генерации является ортоклазом и встречается крайне редко, его соотношение с плагиоклазами составляет около 1:4 соответственно. В ортоклазе отмечается присутствие пертитов распада в виде тонких ламелей (до 5 нм) альбита, образующего II генерацию плагиоклаза (Pl_{№1}). Нередко можно встретить гранофирную структуру, обусловленную наличием капельного кварца в зернах калиевого полевого шпата. Часть таких включений кварца в одном индивидуе имеет одновременное облачное погасание. На границах зерен олигоклаза и ортоклаза встречаются реакционные соотношения между ними в виде мирмекитов. Слюда комплекса представлена биотитом, выделения которого могут составлять как десятые миллиметры, так и крупные вытянутые зерна размером около 1 см.

Минеральная ассоциация краевого комплекса сменяется крупно-среднезернистым агрегатом *кварц-плагиоклазового комплекса с турмалином или гранатом*. В пределах комплекса наблюдается зональное укрупнение структуры пегматита от среднезернистой до крупно- и гигантозернистой. Текстура агрегата пятнистая, обусловленная неравномерным распределением меланократовых минералов (рис. 3, b, c).

В этом комплексе плагиоклаз по структурным особенностям зерен был разделен на две генерации. Наиболее распространены в кварц-плагиоклазовом комплексе среднезернистые идиоморфные индивидуиды, идентичные по морфологии и составу плагиоклазу кварц-двуполевошпатового комплекса (Pl I генерации, Pl_{№19}). Другой тип плагиоклаза (III генерация) имеет более крупные зерна (более 5 мм) с корродированными границами. Зачастую такие зерна серицитизированы и имеют деформированные нечеткие границы между полисинтетическими двойниками. Кроме того, для плагиоклаза III генерации характерен более высокий номер (Pl_{№25}, угол погасания 7°) по сравнению с ранними генерациями. Калиевый полевой шпат в данном комплексе представлен ортоклазом (I генерация), реликты которого встречаются в центральных частях зерен плагиоклаза III генерации. Кварц, один из порообразующих минералов комплекса, представлен двумя генерациями: сростания с турмалином / гранатом и индивидуидами в полевошпатовой матрице. В агрегате с турмалином кварц среднезернистый (~0,2 мм), гипидиоморфный, трещиноватый с облачным погасанием (Qz-I). Во втором случае это ксеноморфные мелкие неправильной рваной формой зерна с волнистым погасанием (Qz-II), которые выполняют интерстиции между полевым шпатом.

Турмалин комплекса черный, с характерным поперечным сечением в виде сферического треуголь-

ника (от 1 до 12 мм), с размерами по L₆ более 2 см. В шлифах видно, что индивидуиды турмалина корродированы кварцем, это придает шерлу облик тонко-мелкозернистого брекчированного агрегата, однако вся масса псевдообломков гаснет одновременно, что определяет наличие индивидуа (рис. 4, a, b). Нередко наблюдаем структуры обрастания, где в центре турмалиновых зерен присутствует кварц (Qz-I) (рис. 4, c). Некоторые зерна турмалина имеют тонкую кайму обрастания с повышенными цветами интерференции, образующую другую генерацию турмалина (рис. 4, d).

Гранат в кварц-плагиоклазовом комплексе имеет красно-оранжевый цвет, размеры зерен варьируют от первых миллиметров до 1 см, индивидуиды сильно трещиноватые (рис. 3, c). Согласно результатам рентгеноспектрального микроанализа, в гранате Вездаринской жилы содержатся зерна ксенотима и циркона (первые нанометры). В кварц-плагиоклазовом комплексе присутствуют лейсты бурой и светлой слюды размером до 3 мм.

Кварц-полевошпатовый пегматоидный комплекс занимает основной объем осевой части жилы. Эта порода имеет крупнозернистую, местами графическую структуру, пятнистую текстуру (рис. 3, d). Графическая структура обусловлена выделением на фоне полевошпатовой матрицы скелетных кристаллов дымчатого кварца, на гранях которого присутствует индукционная штриховка. Пегматит комплекса сложен калиевым полевым шпатом (60%), плагиоклазом (20%) и кварцем (20%). Калиевый полевой шпат представлен крупными (более 1 см) зернами ортоклаза (II генерация), интенсивно пертитизированными. По морфологическим особенностям в пределах комплекса выделяются как пертиты распада, так и сегрегационные пертиты. Пертиты распада представлены в виде тонких ламелей (до 0,01 мм) и соответствуют плагиоклазу II генерации. В свою очередь, сегрегационные пертиты имеют ширину выделений до 0,2 мм, развиваются согласно направлениям спайности и соответствуют альбиту (Pl_{№0-3} IV генерации). Кварц пегматоидного комплекса образует крупные ихтиоглипты размером от 0,5 до 1,5 см специфической дымчатой окраски.

Калишпатовый блоковый комплекс сложен калиевым полевым шпатом (80–85%) и плагиоклазом (~10%). Для комплекса характерны среднекрупнозернистая структура и массивная текстура (рис. 6, e), местами отмечаются участки мелкоблокового строения. Калиевый полевой шпат соответствует ортоклазу, который идентичен ортоклазу предыдущего комплекса. Для калиевого полевого шпата данного комплекса характерны многочисленные пертитовые сростания, которых отличает разная природа происхождения (заменить на: которые отличаются разной природой происхождения).

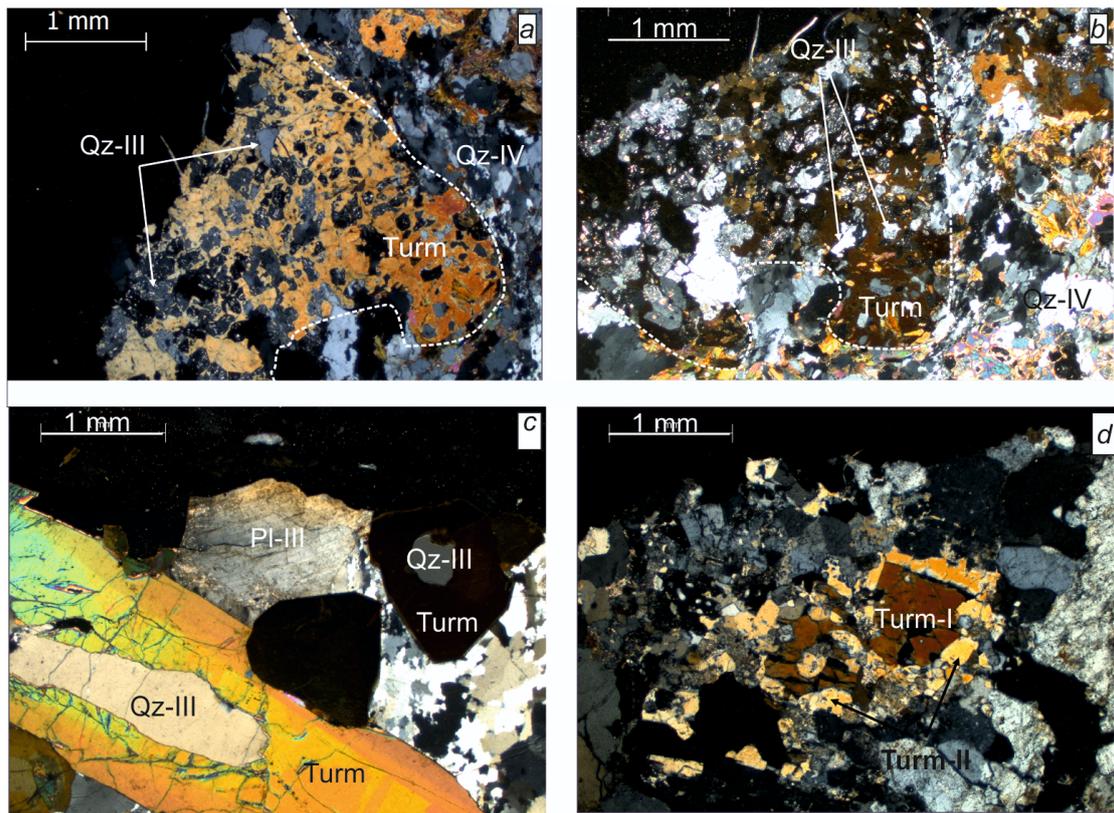


Рис. 4. Структурно-текстуальные особенности кварц-плагиоклазового комплекса Вездаринской пегматитовой жилы

a, b – псевдографические сростания кварца и турмалина с одновременным погасанием турмалина (*b*); *c* – структура обрастания (индивидулы кварца в фугляре турмалина); *d* – структура обрастания в кристаллах турмалина. **Pl** – плагиоклаз, **Turm** – турмалин, **Mic** – слюда, **Qz** – кварц. Римскими цифрами указаны номера генераций, пунктирной линией оконтурен индивид турмалина

Fig. 4. Structural and textural features of the quartz-plagioclase complex of the Vezdarinskaya pegmatite vein

a, b – pseudomorphic intergrowths of quartz and tourmaline, with the simultaneous extinction of tourmaline (*b*); *c* – fouling structure (quartz individuals in a tourmaline case); *d* – fouling structure in tourmaline crystals. **Pl** – plagioclase, **Turm** – tourmaline, **Mic** – mica, **Qz** – quartz. Roman numbers indicate generation numbers, the dashed line outlines the individual tourmaline

Фрагментарно сохраняются микропертиты распавшиеся в ортоклазе, большая часть которых в процессе сегрегации существенно укрупнилась и имеет ленточную форму выделений (сегрегационные пертиты, Pl-IV, рис. 3, e) [Руденко, 1954]. Часто в калишпатовые индивиды погружены пертитовые вроски плагиоклаза (Pl-V), которые угасают (под микроскопом) одновременно (рис. 5, a), некоторые исследователи такие структуры называют шахматным альбитом. Сканирующий электронный микроскоп позволяет наблюдать интенсивные процессы выщелачивания в калишпатовом блоковом комплексе, выраженные массовым проявлением каверн (рис. 5, b).

Околомиароловый комплекс неравномерно развит по периферии миарол и сложен кварц-лепидолит-альбитовым агрегатом. Для этого комплекса характерна пористая, тонкокоздреватая текстура (рис. 3, f). Основной объем породы выполнен крупнозернистым (~ 10 мм) тонкопластинчатым альбитом с четкими полисинтетическими двойниками (VI генерация, Pl_{N60},

угол погасания 20°). Зерна серицитизированы. Морфология индивидов альбита комплекса уникальна – в объеме гипидиоморфных зерен присутствуют многочисленные пустотки, частично выполнены радиально-лучистыми агрегатами лепидолита (рис. 6, a). Кварц комплекса представлен крупными (<10 мм) зернами неправильной формы, границы которых корродированы, реже ксеноморфные зерна (~ 0,3 мм) наблюдаются в пустотках альбита. В пределах развития комплекса можно встретить кристаллы и сростки шерла, а в пустотках плагиоклаза зерна апатита (до 5 нм), ильменита, рутила и касситерита (~2 нм) (рис. 6, b).

Миароловый структурно-вещественный комплекс определяется границами миароловых пустот в пегматитовом теле и характеризуется крупно- и гигантозернистой структурой. Полости от 3 до 15 см линзовидной или округлой форм распределены довольно равномерно по всему пегматитовому телу и не встречаются только в краевом комплексе среди пегматита гранитной структуры.

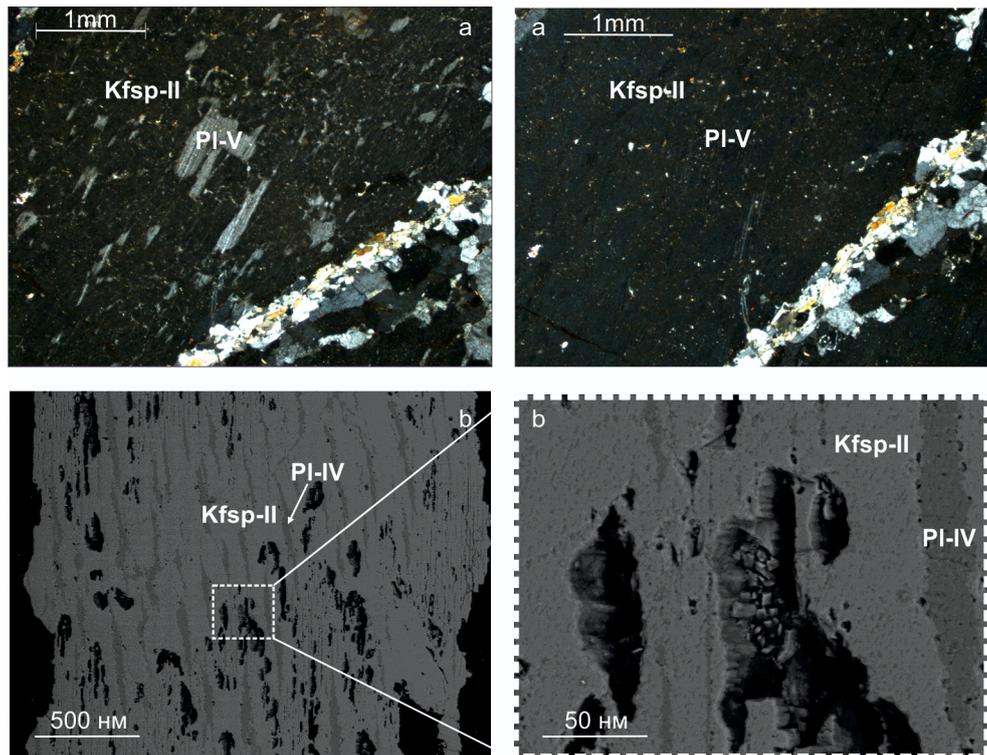


Рис. 5. Структурно-текстурные особенности калишпатового блокового комплекса Вездаринской пегматитовой жилы

a – пертитовые вросстки плагиоклаза (структура шахматного альбита); *b* – каверны выщелачивания в измененных участках калишпатового блокового комплекса (фото РЭМ, BSE-изображение). **PI** – плагиоклаз, **Kfsp** – калиевый полевой шпат. Римскими цифрами указаны номера генераций

Fig. 5. Structural and textural features of the potassium feldspar block complex of the Vezdarinskaya pegmatite vein

a – perthite growths of plagioclase (structure of chess albite); *b* – leaching caverns in the altered areas of the feldspathic block complex (photo SEM, BSE image). **PI** – plagioclase, **Kfsp** – potassium feldspar. Roman numbers indicate generation numbers

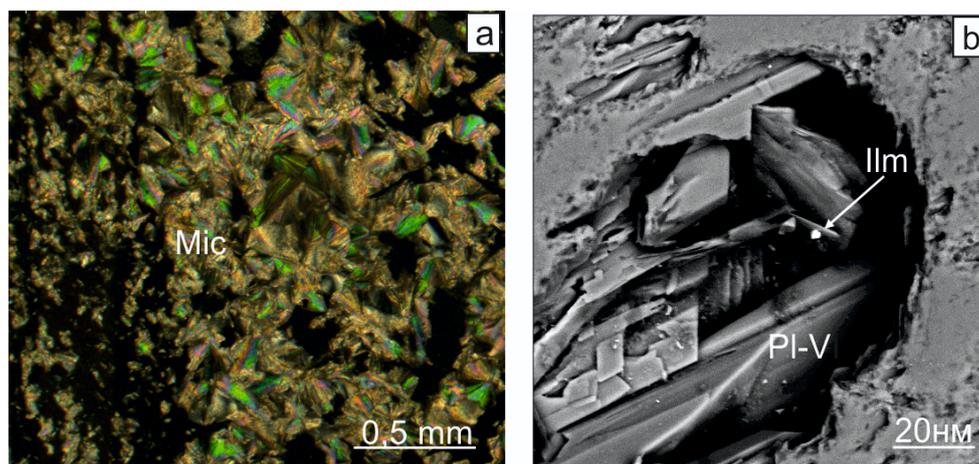


Рис. 6. Структурно-текстурные особенности околомиаролового комплекса Вездаринской жилы

a – радиально-лучистый агрегат лепидолита, развитый в пустотках между зерен плагиоклаза; *b* – зерно ильменита в образованное полости между индивидов плагиоклаза (фото РЭМ, BSE-изображение). **PI** – плагиоклаз, **Mic** – слюда, **Ilm** – ильменит. Римскими цифрами указаны номера генераций

Fig. 6. Structural and textural features the near-miarolitic complex of the Vezdarinskaya vein

a – radial radiant aggregate of lepidolite developed in the voids between the grains of plagioclase; *b* – grain of ilmenite in the formed cavity between individuals of plagioclase (photo SEM, BSE image). **PI** – plagioclase, **Mic** – mica, **Ilm** – ilmenite. Roman numbers indicate generation numbers

В центральной части жилы занорышей меньше, однако размеры их возрастают [Загорский, 1999]. Миароловая минеральная ассоциация представлена дымчатым кварцем (рис. 7, *a*), морионом, калиевым полевым шпатом, слюдой, цветным и полихромным турмалином. В этом же комплексе обнаружен ряд редких и новых минералов: гюбнерит ($Mn[WO_4]$), стибиоколумбит ($SbNbO_4$), прозрачный ярко-красный пирохлор ($(Ca,Na)_2Nb_2O_6(OH,F)$ с высоким содержанием вольфрама (до 11,4% WO_3), иксиолит ($(Ta,Nb,Sn,Fe,Mn)_4O_8$, еремеевит $Al_6(BO_3)_5(OH,F)$,

гамбергит $Be_2(BO_3)OH$, полуцит $Cs(AlSi_2O_6)$ и витьемит $Na(Ca,Mn)Al(PO_4)(F,OH)_3$ [Коноваленко и др., 1981]. Кроме того, в миаролах Вездаринской жилы был открыт новый минерал корогоит $Mn_3(Nb,Ta)_3(Nb,Mn)_2W_2O_{20}$ [Коноваленко, 2015]. Для этого комплекса характерны друзовая текстура и текстура обрастания. Последняя часто наблюдается в турмалиновых агрегатах, где кристаллы шерла обрастают эльбаитом, между которыми наблюдаем неровную корродированную границу (рис. 7, *b*).

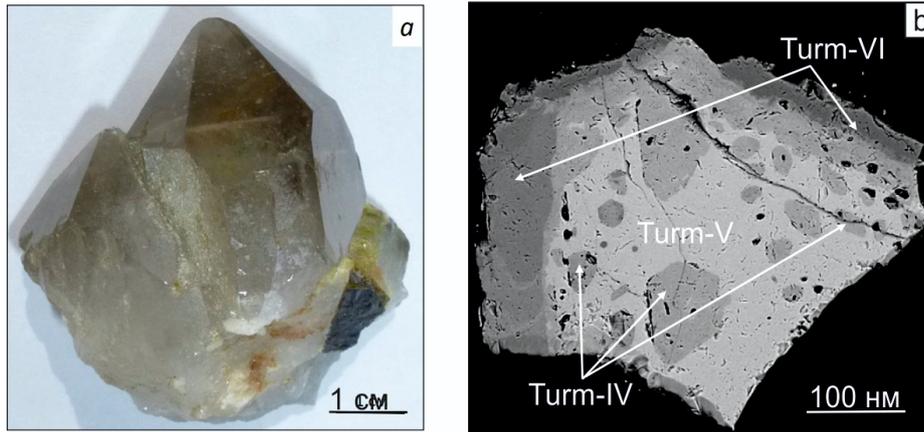


Рис. 7. Структурно-текстурные особенности миаролового комплекса Вездаринской жилы

a – крупнозернистый кристалл дымчатого кварца; *b* – сросток турмалинов (фото РЭМ, BSE-изображение). **Turm** – турмалин. Римскими цифрами указаны номера генераций

Fig. 7. Structural and textural features of the miarolitic complex of the Vezdarinskaya vein

a – coarse-grained smoky quartz crystal; *b* – tourmaline spice (photo SEM, BSE image). **Turm** – tourmaline. Roman numerals indicate generation numbers

Трещинно-прожилковый комплекс занимает секущее положение относительно остальных комплексов пегматитового тела, выполняет межзерновое пространство минералов, трещины спайности и наложенные трещины (рис. 8, *a*). Минеральная ассоциация комплекса практически аналогична околониароловому и представлена альбитом (VII генерация, $Pl_{№15}$, угол погасания 7°), кварцем, слюдой, второстепенным турмалином и рядом аксессуарных минералов (апатитом, магнетитом, пиритом, арсенопиритом, самородным серебром). Зерна альбита с полисинтетическими двойниками образуют тонкие пластинчатые кристаллы, растущие от стенок трещины к ее центральной части. Кварц трещинно-прожилкового комплекса наиболее прозрачен по сравнению с кварцем остальных комплексов. Слюда комплекса образует светлые лейсты размером до 1 см. Количество альбита, кварца и слюды в трещинно-прожилковом комплексе, не постоянно и напрямую зависит от комплекса пегматитового тела, который содержит поздние прожилки. Так, в агрегате трещинно-прожилкового комплекса, секущем

блоковый калишпатовый комплекс, альбита содержится 60%, кварца 30%, слюды около 10% (рис. 8, *b*). В агрегате, секущем пегматоидный комплекс, количество альбита около 30%, кварца 40%, слюды 30% (рис. 8, *c*). В случае кварц-плаггиоказового комплекса количество альбита не более 5%, вплоть до полного выполнения прожилка кварцем с содержанием слюды около 20% (рис. 8 *d*).

Обсуждение

В самых первых трудах о пегматитах, ставших классическими, процесс формирования этих тел представлялся как многостадийный, что непосредственно фиксировалось в смене структурно-текстурных особенностей минеральных ассоциаций. Все авторы гипотез образования гранитных малоглубинных пегматитов указывают на наличие кислого расплава, но существенное отличие заключается в определении источника пневматолит-гидротермального раствора и масштабе проявления метасоматических процессов [Ферсман, 1960; Коржинский, 1968]. Природа поло-

стей (занорышей) в теле пегматитов исследователями трактуется по-разному: как остаточные полости кристаллизации [Ферсман, 1960], полости выщелачива-

ния и перекристаллизации [Заварицкий, 1944], результат первичной кристаллизации гетерогенного обогащенного флюидом расплава [Смирнов, 2015].

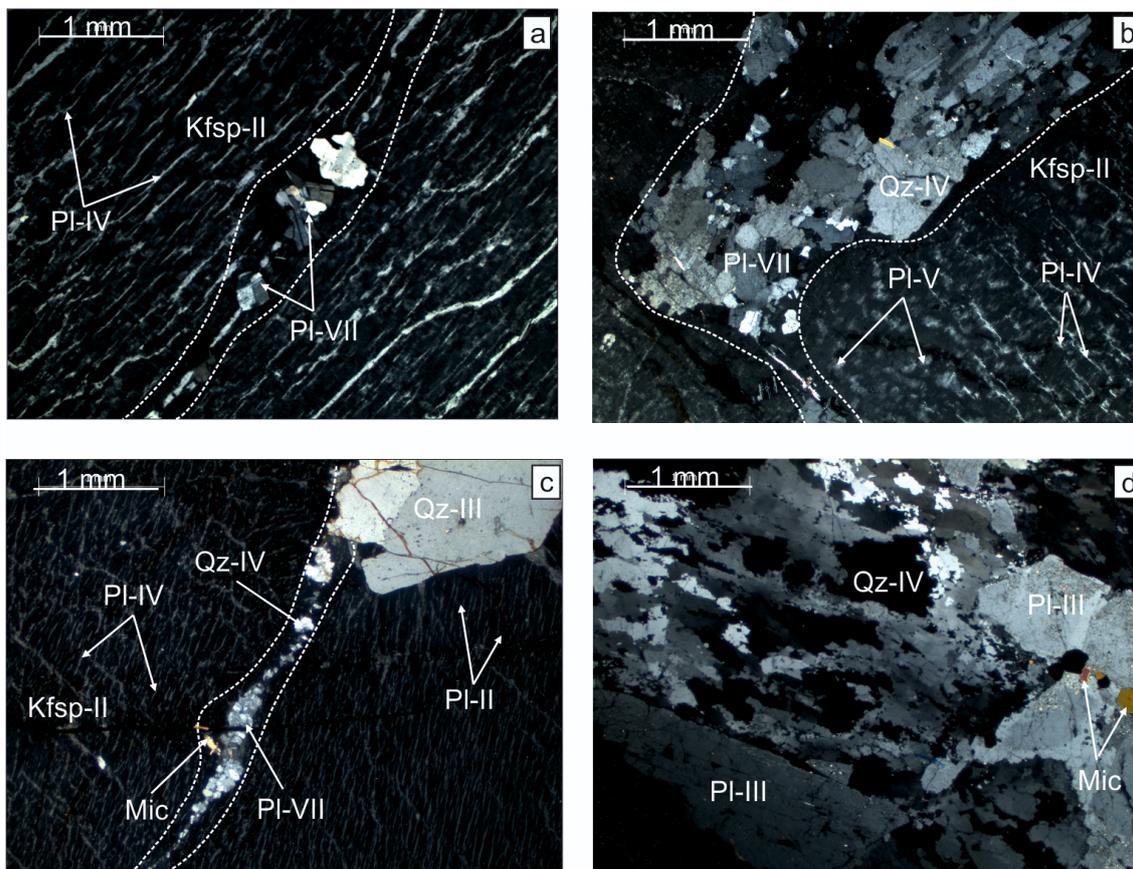


Рис. 8. Структурно-текстурные особенности трещинно-прожилкового комплекса Вездаринской жилы

a – развитие трещинно-прожилкового комплекса в пределах блокового комплекса (жилка выполнена альбитом); *b* – развитие трещинно-прожилкового комплекса в пределах блокового комплекса; *c* – развитие трещинно-прожилкового комплекса в пределах блокового комплекса пематоидного комплекса, *d* – развитие трещинно-прожилкового комплекса в пределах кварц-плагиоклазового комплекса (жилка выполнена поздним кварцем). **PI** – плагиоклаз, **Kfsp** – калиевый полевой шпат, **Mic** – слюда, **Qz** – кварц. Римскими цифрами указаны номера генераций

Fig. 8. Structural and textural features of the fissure-vein complex of the Vezdarinskaya vein

a – Development of a fissure-vein complex within a block complex (vein is made with albite); *b* – Development of a fissure-vein complex within a block complex; *c* – Development of a fissure-vein complex within a block complex of a hematoid complex, *d* – Development of a fissure-vein complex within a quartz-plagioclase complex (vein made by late quartz). **PI** – plagioclase, **Kfsp** – potassium feldspar, **Mic** – mica, **Qz** – quartz. Roman numbers indicate generation numbers

Авторы работы являются сторонниками начальной гетерогенности пегматитообразующей среды, что, по их мнению, отражается в структурных и текстурных характеристиках агрегатов пегматитового тела. На основе этих особенностей были выделены две траектории минералообразования пегматита Вездаринской жилы. Первая включает в себя образование основного объема пегматита, которое происходило в результате кристаллизации в течение собственно магматической и пневматолит-гидротермальной стадий. Вторая траектория связана с образованием миароловых пустот и комплексов, ассоциирующих с поздними процессами, и включает пнев-

матолитово-гидротермальную, гидротермально-метасоматическую и гидротермальную стадии. При формировании пегматитового тела метасоматические процессы шли постоянно, в некоторых случаях практически параллельно, с небольшим временным интервалом от основного процесса кристаллизации первой и второй траектории.

На контакте с вмещающими породами развит кварц-двуполевошпатовый комплекс с характерной для магматических кислых пород гранитной структурой (гиподиоморфными зернами полевых шпатов и ксеноморфным кварцем). В индивидах калиевых полевых шпатов присутствуют пертиты распада

твердых растворов совместно с обособленными индивидами натриевого полевого шпата, что является признаком кристаллизации обогащенного водой расплава, в котором на фоне снижения температуры увеличивается флюидное давление. Наличие гранофирной структуры [Коваленко, 1964] свидетельствует о составе расплава, близкого к эвтектике. При эвтектической кристаллизации небольшого количества темноцветных минералов, ортоклаза и кварца происходило повышение кремнекислотности расплава, что приводило к образованию округлых выделений кварца в результате его резорбции ранее выкристаллизовавшегося полевого шпата.

Таким образом, первая стадия (собственно магматическая) в пегматитовом этапе зафиксирована в минеральной ассоциации первого кварц-двуполевошпатового комплекса. Наличие в расплаве водного флюида фиксируется присутствием специфической метасоматической структуры – мирмекитовым срастанием. Кварцевые вроски, прорастающие плагиоклазовую матрицу, представляют собой редкие, причудливой формы выделения, где тонкие «веточки» обращены к калиевому полевошпату (КПШ). Мирмекиты возникают путем замещения ранее образованного КПШ под воздействием водного флюида, который находится в равновесии с остаточным котектическим расплавом. Мирмекитовые срастания указывают на то, что на стадии кристаллизации расплава сохранялся водный флюид, который скапливался на границах зерен. Мирмекитовые обособления контролируются зонами повышенной проницаемости и трассируют пути проникновения скопившегося флюида [Попов, Богатов, 1998]. Важной особенностью мирмекита является его ассоциация с распавшимся упорядоченным полевым шпатом (не менее, чем низкий ортоклаз). Провоцируют формирования мирмекитов физико-химические реакции, которые происходят на границе замещаемого минерала и контролируются скачком потенциалов, что приводит, в свою очередь, к диффузии. При замещении калиевого полевого шпата кремнезем мигрирует в сторону плагиоклаза, характеризуя последнего как анод. В сторону КПШ (катод) переносится натрий, в меньшей степени кальций [Хайреидинов, 1982].

Формирование основного объема пегматита связано с пневматолит-гидротермальной стадией, в процессе которой, на фоне возрастающей роли водного флюида, происходило образование последующих комплексов (пегматоидного, кварц-плагиоклазового и калишпатового блокового). Эти данные подтверждены результатами исследований включений, которые показали, что первичный гетерогенный пегматитовый расплав, без сомнения, был обогащен флюидом [Смирнов, 2015]. Пневматолит-гидротермальная стадия пегматитообразования прекрасно маркируется в структурно-текстурных особенностях

комплексов, в частности крупно-гигантозернистые и крупнозернистые графические структуры. Так, крупнозернистые индивиды плагиоклаза в кварц-плагиоклазовом комплексе, возможно, связаны с процессом собирательной перекристаллизации деформированных или дефектных мелкозернистых индивидов, выросших из флюида. Наличие мелкозернистых агрегатов, имеющих большую суммарную поверхность большого количества зерен в единицу объема, является слабоустойчивым и в присутствии растворов может таять и поставлять материал для крупных энергетически более устойчивых зерен [Захарченко, 1955]. В поровом растворе, в условиях диффузионно-лимитируемого режима, происходит предпочтительное растворение мелких зерен. В результате в области роста-растворения раствор, насыщенный в отношении зерен средней величины, будет недосыщенным – в отношении более мелких кристаллов и пересыщенным в отношении наиболее крупных зерен [Хайреидинов, 1982]. Происходит постепенное переотложение вещества с одних зерен на другие. Сокращение площади поверхности зерен в кристаллическом агрегате (укрупнение зерен) сопровождается освобождением части энергии выше и приводит к уменьшению суммарной поверхностной энергии зерен в растущем агрегате [Хайреидинов, 1982; Краснова, Петров, 1995]. Крупнозернистая графическая структура в пегматоидном комплексе также есть результат собирательной перекристаллизации продуктов (полевого шпата, кварца), центры роста которых формировались во флюиде. Наличие индукционной штриховки на поверхности сросшихся минералов, безусловно, свидетельствует об одновременном росте полевого шпата и кварца, но не является однозначным признаком одновременной кристаллизации из расплава [Руденко, 1975]. Псевдографические срастания кварца с шерлом или с альмандином есть процесс деферризации пегматита, но что, относительно шерла, указывал в своих работах А.Е. Ферсман [Ферсман, 1960]. В пневматолит-гидротермальную стадию в отдельных участках гетерогенного флюида присутствовал бор, в других нет. Это и определяет появление либо шерл-кварцевой, либо гранат-кварцевой псевдографических структур. В целом данная стадия в процессе кристаллизации пегматоидных агрегатов имеет более щелочной характер (Na преобладает над K). Во флюиде может присутствовать ряд подвижных соединений (например, кремнекислый натрий Na_2SiO_3 и хлористый алюминий AlCl_3 , оксид железа, вода, ортоборная кислота H_3BO_3). Эти ингредиенты и приводили к образованию участков с шерлом или гранатом. Подвижное поведение щелочей, извлечение их из флюида в кристаллическую структуру минерала приводили к высвобождению избыточного кремния и появлению кварца в сочетании с грана-

том или турмалином. Рост агрегата калишпатового блокового комплекса происходит на фоне высокой щелочности среды минералообразования, что не позволяет кристаллизоваться кварцу, делая кремнезем очень подвижным. Наблюдаемые в калишпатовой матрице пертиты трех типов могут говорить о следующих условиях кристаллизации: первые, тонко лейстовые ламели могут быть результатом эвтектической (одновременной) кристаллизации двух полевых шпатов. Кристаллизация в пневматолит-гидротермальной среде гетерогенного полевошпатового раствора приводит к образованию закономерных сростков альбита и ортоклаза (эндотактических или синтаксических) [Григорьев, Жабин, 1975]. Образование структуры «шахматный альбит» ряд исследователей связывает с влиянием метасоматических процессов (альбитизации) и относят их к пертитам перекристаллизации [Руденко, 1954; Краснова, Петров, 1995]. Однако, на наш взгляд, появление ориентированных индивидов альбита (гаснут одновременно) с полисинтетическим двойникованием метасоматической природы проблематично. Тем более, что процесс альбитизации калиевого полевого шпата сопровождается выделением кварца [Захарченко, 1955]. Процесс альбитизации наступает чуть позже.

Одновременно с описанной первой ветвью процесса пегматитообразования происходит развитие стадий второй ветви, отправная точка которой фиксируется еще до внедрения пегматитовой магмы во вмещающие породы. Согласно И.С. Перетяжко [Перетяжко, 2010], в это время в очаге зарождения гетерогенного расплава в ходе дегазации гранитной (пегматитовой) магмы формируются флюидные обособления, которые представляли собой будущие миаролы. В последующем внутри обособленных миарол идет формирование друзовых миароловых комплексов из флюида в условиях замкнутой пневматолито-гидротермальной кристаллизации. Следствием чего являются крупно- и гигантозернистая структура, структура обрастания и другие.

Со временем замкнутость системы миарол нарушалась, что могло быть вызвано естественным процессом усадки твердотелых агрегатов. Возникающие трещинки способствовали высвобождению остаточного раствора. Распространяясь за пределы миаролового пространства, высвобожденный раствор воздействовал на ранее образованные породы кварц-полевошпатовых комплексов и формировал продукты гидротермально-метасоматической стадии. В результате область вокруг миарол подверглась мощной альбитизации. Эти участки отбиваются по ноздреватой текстуре, обусловленной наличием каверн выщелачивания. В стадию выщелачивания происходит серицитизация ортоклаза и особенно пертитовых

вростков в нем. При более интенсивном метасоматическом процессе ортоклаз полностью замещается агрегатом кварца и серицита. В случае богатого Li остаточного флюида образуется Li-слюда.

Трещины усадки, границы зерен и межзерновое пространство содействовали распространению водного флюида и формированию трещинно-прожилкового комплекса в ходе гидротермальной стадии. Попадая в другие комплексы пегматитовой жилы, активный флюид взаимодействует с ранними ассоциациями. В этих щелочных растворах переносится кремнезем, который благодаря уменьшению щелочности становится малоподвижным и в результате быстрой кристаллизации в стесненных условиях образуются индивиды кварца с зазубренными границами. Шерл ранних комплексов обрастает турмалином эльбаит-тсिलाизит-лидокоатитового состава. Реакционные границы минеральных фаз турмалина указывают на неполный обмен компонентами в ходе метасоматоза [Краснова, Петров, 1995]. Появляются поздние собственные фазы турмалина в виде цветного эльбаита. С щелочным флюидом, который сохранялся в межзерновом пространстве, распространялся по трещинам усадки, связан процесс альбитизации и появление редкометальной минерализации.

Заключение

В результате проведенных исследований были проанализированы минералогические и структурно-текстурные характеристики Вездаринской пегматитовой жилы, в которой было выделено восемь структурно-вещественных комплексов: кварц-двуполевошпатовый, кварц-плаггиоклазовый с турмалином или гранатом, кварц-полевошпатовый пегматоидный, калишпатовый блоковый, миароловый, околомароловый и трещинно-прожилковый. Изложенный в работе фактический материал позволяет рассматривать процесс пегматитообразования безусловно как многостадийный, но в силу изначальной вещественной неоднородности расплава, обусловленной обогащенностью отдельных его частей флюидом, образование минеральных комплексов шло частично одновременно (формирование пегматита и формирование миарол). Метасоматические процессы протекают постоянно на протяжении кристаллизации всей пегматитовой ассоциации.

Авторы работы бережно хранят память о прекрасном минералоге Сергее Ивановиче Коноваленко, который свои научные предпочтения всегда оставлял за пегматитами и привил эту страсть своим ученикам.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-5367.2016.

ЛИТЕРАТУРА

- Бакуменко И.Т., Коноваленко С.И.** Особенности формирования миароловых пегматитов и их положение среди гранитных пегматитов // Термобарогеохимические исследования процессов минералообразования. Новосибирск : Наука, 1988. С. 123–135.
- Герасимов В.К., Коноваленко С.И.** Ювелирное сырье Малханского пегматитового поля Центрального Забайкалья // Геммология : материалы седьмой науч. конф. Томск : ТЦНТИ, 2015. С. 39–45.
- Григорьев Д.П., Жабин А.Г.** Онтогенез минералов. Индивидуумы. М. : Наука, 1975. 340 с.
- Жабин А.Г.** Онтогенез минералов (агрегаты). М. : Наука, 1979. 275 с.
- Загорский В.Е.** Миароловые пегматиты. Новосибирск : Наука, 1999. 488 с.
- Загорский В.Е.** Минералогия миарол в пегматитах Малханского месторождения турмалина в Забайкалье: полевые шпаты жилы Соседка // Геология и геофизика. 2012. № 6. С. 683–697.
- Заварицкий А.Н.** Основной вопрос физической химии процесса образования пегматитов // Известия АН СССР. 1944. № 5.
- Захарченко А.И.** Минералообразующие растворы и генезис кварцевых жил на опыте изучения кварцевых жил Памира и включений растворов в минералах. М. : Госгеолтехиздат, 1955. 106 с.
- Коваленко В.И.** Особенности метасоматических процессов в аляскитах Огнитского комплекса // Геохимия редких элементов в изверженных горных породах : сб. тр. М. : Наука, 1964. С. 63–83.
- Коноваленко С.И.** Типы миароловых пегматитов кристаллической толщи Юго-Западного Памира // Геммология : материалы второй науч. конф. Томск : ТЦНТИ, 2006. С. 69–75.
- Коноваленко С.И.** Турмалин пегматитов Памирской камнесамоцветной провинции // Геммология. Материалы седьмой научной конференции. Томск : ТЦНТИ, 2015. С. 106–113.
- Коноваленко С.И., Россовский Л.Н., Ананьев С.А., Пегухов Е.П.** Первая находка гамбергита в пегматитах СССР // Докл. АН СССР. 1981. Т. 269, № 4. С. 992–996.
- 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 науч. конф. Томск, 2001. Вып. 2. С. 226–228.
- Коржинский Д.С.** Трансмагматические потоки растворов подкорового происхождения и их роль в магматизме и метаморфизме // Кора и верхняя мантия Земли. М. : Наука, 1968. С. 69–74.
- Косухин О.Н., Бакуменко И.Т., Чупин В.П.** Магматический этап формирования гранитных пегматитов. Новосибирск : Наука, 1984. 136 с.
- Краснова Н.И., Петров Т.Г.** Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб. : Невский курьер, 1995. 228 с.
- Лозиев В.П., Саидов М.С.** Геоморфологическая карта Республики Таджикистан (лист J-42-XVI) 1:200 000. М. : ГУГК, 1989. 1 л.
- Мираков М.А., Паутов Л.А., Шодибеков М.А., Плечов П.Ю., Карпенко В.Ю.** Новая скандийсодержащая разновидность тушонита с восточного Памира (Таджикистан) // Записки Российского минералогического общества. 2018. Т. 147, № 4. С. 84–96.
- Перетяжко И.С.** Условия образования минерализованных полостей (миарол) в гранитных пегматитах и гранитах // Петрология. 2010. Т. 18, № 2. С. 195–222.
- Перетяжко И.С.** Флюидно-магматические среды в процессах формирования гранитоидных пород: P-V-T-X свойства флюидов, данные изучения включений в минералах, петрологические следствия // Металлогения древних и современных океанов. 2015. № 21. С. 186–190.
- Попов В.С., Богатов В.И.** Происхождение мирмекита в свете фазовых соотношений в кварц-полевошпатовой системе // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1998. № 5. С. 1–13.
- Россовский Л.Н., Коноваленко С.И.** О Южно-Азиатском пегматитовом поясе // Доклады АН СССР. 1976. Т. 229, № 3. С. 695–698.
- Руденко С.А.** Морфолого-генетическая классификация пертитовых сростаний // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1954. № 1. С. 23–36.
- Руденко С.А.** Типоморфные особенности минералов пегматитов // Минералы индикаторы особенностей, вмещающих их среды. Труды АН СССР. Л. : Наука, 1975. С. 9–34.
- Сазонов А.М.** Лабораторный практикум по петрографическим методам исследования : учеб. пособие для вузов. Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-та, 1999. 184 с.
- Смирнов С.З.** Флюидный режим кристаллизации водонасыщенных гранитных и пегматитовых магм: физико-химический анализ // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 9. С. 1643–1663.
- Соколова Е.Н., Смирнов С.З., Кунгулова Э.Н., Королюк 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.
- Ферсман А.Е.** Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. VI. 742 с.
- Франк-Каменецкий В.А.** Рентгенография основных типов породообразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты). Л. : Недра, 1983. 359 с.
- Хайреидинов И.А.** Основы электро-геохимии литогенеза и гидротермального процесса. М. : Наука, 1982. 264 с.
- Cerny P., Ercit T.S.** The classification of granitic pegmatites revisited // Canadian Mineralogist. 2005. V. 43. P. 2005–2026.
- London D.** Granitic pegmatites: an assessment of current concepts and directions for the future // Lithos. 2005. V. 80. P. 281–303.
- Mona-Liza C. Sirbescu, Elizabeth G. Krukowski, Christian Schmidt, Rainer Thomas, Iain M. Samson, Robert J. Bodnar** Analysis of boron in fluid inclusions by microthermometry, laser ablation ICP-MS, and Raman spectroscopy: Application to the Cryo-Genie Pegmatite, San Diego County, California, USA // Chemical Geology. 2013. V. 342. P. 138–150.

Авторы:

Кунгулова Эльвира Нурфасовна, аспирант 2-го года обучения, младший научный сотрудник, лаборатория геохронологии и геодинамики, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия. E-mail: kun2609@mail.ru

Бухарова Оксана Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра минералогии и геохимии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.
E-mail: getina@ggf.tsu.ru

Geosphere Research, 2019, 3, 6–19. DOI: 10.17223/25421379/12/1

E.N. Kungulova, O.V. Bukharova

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

COMPOSITION CHARACTERISTICS OF THE VEZDARINSKAYA PEGMATITE VEIN (SOUTH-WESTERN PAMIR)

The paper presents the results of studies of the structural and texture features of the mineral aggregates of the Vezdarinskaya vein (South-Western Pamir), which is a typical representative of shallow tourmaline-bearing pegmatite's of the miarolitic facies. In the course of investigation, the relationships between minerals and aggregates analyzed at the macro and micro levels using a petrographic microscope and a scanning electron microscope combined with an energy dispersive detector. The composition of feldspars verified by X-ray diffraction analysis.

In the Vezdarinskaya pegmatite vein, 8 structural-material complexes distinguished, differing from each other by the persistence of the mineral composition, typomorphic structural and textural features. Based on the characteristic structural and textural features of the selected mineral aggregates, the process of pegmatite formation reconstructed. It has established that the microstructural characteristics of aggregates mark the features of the mineral formation environment and make it possible to distinguish the generation of rock-forming and minor mineral species.

Two development paths characterize the pegmatite formation process. The first trajectory reflects the magmatic crystallization of the primary products of the pegmatite melt, with a subsequent increase in the influence of aqueous fluid under the conditions of the pneumatolithe-hydrothermal stage. The signs of magmatic crystallization are the granite and granophyre structures of the marginal quartz-bisexual feldspar complex. The presence of decay perthites in this complex in individuals of potassium feldspar and myrmekite intergrowths indicates the presence of an aqueous fluid in the melt. The formation of the main volume of pegmatite is associated with the pneumatolithe-hydrothermal stage, the various features of which well represented in the structural and texture characteristics of the aggregates. In particular, the coarse-grained structure and pseudographic intergrowths of quartz with schorl or with almandine within the quartz-plagioclase complex. Coarse-grained graphic structure in a pegmatoid complex. The presence of pegmatoid and block complexes of perthites of three types in the feldspar matrix.

The second trajectory, in turn, characterizes the process of formation of miarolitic voids and complexes associated with late processes, and includes pneumatolithe-hydrothermal, hydrothermal-metasomatic and hydrothermal stages. The crystallization of the drusy miarolitic complex appears as a result, of the pneumatolithe-hydrothermal stage in a closed void system. The consequence of this is a coarse and gigantic structure, fouling structure, and others. After the closure of the miarolitic system was broken, cracks arose that contributed to the release of the residual solution. Spreading beyond the miarolitic space, the released solution acted on previously formed rocks of quartz-feldspar complexes and formed the products of the hydrothermal-metasomatic stage. As a result, the area around miarol undergoes powerful albitization. These areas beaten by the nostril texture due to the presence of leaching caverns. Further distribution of the aqueous fluid also contributed to the formation of a fissure-vein complex during the hydrothermal stage. As a result, quartz individuals with jagged boundaries formed. Once in other complexes of the pegmatite vein, the active fluid interacts with early associations, which contributes to the emergence of new generations of tourmaline and rare-metal mineralization.

Thus, on the basis of microstructural characteristics of the selected aggregates, the initial heterogeneity of the pegmatite-forming medium is justified.

Keywords: *miarolitic pegmatite, Vezdarinskaya vein, structural and textural characteristics of aggregates, generations, pegmatite formation.*

References

- Bakumenko I.T., Konovalenko S.I. *Osobennosti formirovaniya miarolovykh pegmatitov i ikh polozheniye sredi granitnykh pegmatitov* [Features of the formation of miarolitic pegmatites and their position among granite pegmatites] // Thermobarogeochemical studies of mineral formation processes. Novosibirsk: Nauka, 1988. pp. 123–135. In Russian
- Gerasimov V.K., Konovalenko S.I. *Yuvelirnoye syr'ye Malkhanskogo pegmatitovogo polya Tsentral'nogo Zabaykal'ya* [Jewelry raw materials of the Malkhan pegmatite field of Central Transbaikalia] // Gemology. Materials of the 7th scientific conference. Tomsk: TTSNTI, 2015. pp. 39–45. In Russian
- Grigoriev D. P., Zhabin A.G. *Ontogeniya mineralov. Individy* [Ontogeny of minerals. Individuals]. Moscow : Nauka, 1975. 340 p. In Russian
- Zhabin A.G. *Ontogeniya mineralov (agregaty)* [Ontogeny of minerals (aggregates)]. Moscow : Nauka, 1979. 275 p. In Russian
- Zagorsky V.E. *Miarolovyye pegmatity* [Miarolitic pegmatites]. Novosibirsk: Nauka. Siberian Publishing Company RAS, 1999. 488 p. In Russian
- Zagorsky V.E. Mineralogy of pockets of the Malkhan tourmaline deposit (Transbaikalia): Feldspars of the Sosedka vein // Russian Geology and geophysics. 2012. № 6. pp. 522–534. In Russian
- Zavaritsky A.N. *Osnovnoy vopros fizicheskoy khimii protsessov obrazovaniya pegmatitov* [The main question is the physical chemistry of the formation of pegmatites]. AN SSSR reports. 1944. № 5. In Russian
- Zaharchenko A.I. *Mineraloobrazuyushchiye rastvory i genesis kvartsevykh zhil na opyte izucheniya kvartsevykh zhil Pamira i vklucheniye rastvorov v mineralakh* [Mineral-forming solution and the genesis of quartz veins on the experience of studying the Pamir quartz veins and inclusions of solutions in minerals]. Moscow: Gosgeoltekhizdat. 1955. 106 p. In Russian
- Kovalenko V.I. *Osobennosti metasomaticheskikh protsessov v alyaskitakh Ognitskogo kompleksa* [Features of metasomatic processes in the alaskites of the Ognite complex] // Geochemistry of rare elements in igneous rocks. Collection of works. Moscow: Nauka, 1964. pp. 63–83. In Russian

Konovalenko S.I. *Tipy miarolitykh pegmatitov kristallicheskoy tolshchi Yugo-Zapadnogo Pamira* [Types of miarolitic pegmatites in the crystalline sequence of the Southwestern Pamir] // *Gemmologiya. Materialy vtoroy nauchnoy konferentsii*. Tomsk: TTSNTI, 2006. pp. 69–75. In Russian

Konovalenko S.I. *Turmalin pegmatitov Pamirskoy kamnesamotsvetnoy provintsii* [Pegmatite tourmaline of the Pamir stone-gem province] // *Gemology. Materials of the seventh scientific conference*. Tomsk: TTSNTI, 2015. pp. 106–113. In Russian

Konovalenko S.I., Rossovsky L.N., Ananiev S.A., Petukhov E.P. *Pervaya nakhodka gambergita v pegmatitakh SSSR* [The first discovery of hambergite in the pegmatites of the USSR] // *AN SSSR reports*. 1981. V. 269. №4. pp. 992–996. In Russian

Konovalenko S.I., Sazontova N.A., Smirnov S.Z. *Sostav, stroyeniye i rezhim formirovaniya miarolitykh pegmatitov Leskhozovskoy zhily (Yugo-Zapadnyy Pamir)* [Composition, structure and formation mode of miarolitic pegmatites of the Leskhoz veins (Southwestern Pamir)] // *Petrology of igneous and metamorphic complexes. Materials of the scientific conference*. Tomsk, 2001. V. 2. pp. 226–228. In Russian

Korzhinsky D.S. *Transmagmaticheskiye potoki rastvorov podkorovogo proiskhozhdeniya i ikh rol' v magmatizme i metamorfizme* [Transmagmatic flows of solutions of subcrustal origin and their role in magmatism and metamorphism // *Earth's crust and upper mantle*]. Moscow : Nauka, 1968. pp. 69–74. In Russian

Kosukhin O.N., Bakumenko I.T., Chupin V.P. *Magmaticheskiy etap formirovaniya granitnykh pegmatitov* [Magmatic stage of granite pegmatite formation]. Novosibirsk: Nauka, 1984. 136 p. In Russian

Krasnova N. I., Petrov T. G. *Genezis mineral'nykh individov i agregatov* [The genesis of mineral individuals and aggregates]. St-Petersburg: Publishing house «Nevskii kuryer», 1995. 228 p. In Russian

Loziev V.P., Saidov M.S. *Geomorfologicheskaya karta Respubliki Tadjikistan* [Geomorphological map of the Republic of Tajikistan] (J-42-XVI) - 1 200 000. Moscow: GUGK. 1989 In Russian

Mirakov M.A., Pautov L.A., Shodibekov M.A., Plechov P.Yu., Karpenko V.Yu. A new scandium-containing variety of tusionite from the eastern Pamirs (Tajikistan) // *Zapiski of the Russian Mineralogical Society*. 2018. V. 147. № 4. pp. 84–96. In Russian

Peretyazhko I.S. Conditions for the formation of mineralized cavities (miarol) in granite pegmatites and granites // *Petrology*. 2010. V. 18. № 2. pp. 183–208.

Peretyazhko I.S. Fluid-magmatic media in the processes of formation of granitoid rocks: P-V-T-X fluid properties, data on inclusions in minerals, petrological consequences // *Metallogeny of ancient and modern oceans*. 2015. № 21. pp. 186–190.

Popov V.S., Bogatov V.I. *Proiskhozhdeniye mirmekita v svete fazovykh sootnosheniy v kvarts-polevoshpatovoy sisteme* [The origin of myrmekite in the light of phase relationships in the quartz-feldspar system] // *Zapiski of the All-Union Mineralogical Society*. 1998. № 5. pp. 1–13. In Russian

Rossovsky L.N., Konovalenko S.I. *O Yuzhno-Aziatskom pegmatitovom poyase* [On the South Asian pegmatite belt] // *AN SSSR reports*. 1976. V. 229. № 3. P. 695–698. In Russian

Rudenko S.A. *Morfologo-geneticheskaya klassifikatsiya pertitovykh srastaniy* [Morphological and genetic classification of perthite intergrowths] // *Zapiski of the All-Union Mineralogical Society*. 1954. № 1. pp. 23–36. In Russian

Rudenko S.A. *Tipomorfnyye osobennosti mineralov pegmatitov* // *Mineraly indikatory osobennostey, vmeshchayushchikh ikh sredy*. [Typomorphic features of pegmatite minerals. Minerals are indicators of the features that host their environment] // *AN SSSR reports*. Leningrad: Nauka, 1975. pp. 9–34. In Russian

Sazonov A.M. *Laboratornyy praktikum po petrograficheskim metodam issledovaniya: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Laboratory workshop on petrographic research methods: textbook. manual for universities]. Krasnoyarsk: Publishing House Krasnoyarsk University, 1999. 184 p. In Russian

Smirnov S.Z. The fluid regime of crystallization of water-saturated granitic and pegmatitic magmas: A physicochemical analysis // *Russian Geology and Geophysics*. 2015. V. 56. № 9. pp. 1292–1307.

Sokolova E.N., Smirnov S.Z., Kungulova E.N., Korolyuk V.N., Konovalenko S.I. Rare alkaline metals in micas of miarolitic pegmatites from the Shakhdarinskaya vein (South-Western Pamir) // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017. V. 328. № 5. pp. 83–96. In Russian

Fersman A.E. *Izbrannyye trudy* [Selected Works]. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1960. V. VI. 742 p. In Russian

Frank-Kameneckii V.A. *Rentgenografiya osnovnykh tipov porodoobrazuyushchikh mineralov (sloistyye i karkasnyye silikaty)* [X-ray diffraction of the main types of rock-forming minerals (layered and framework silicates)]. Leningrad: Nedra, 1983. 359 p. In Russian

Khaididinov I.A. *Osnovy elektro-geokhimii litogeneza i gidrotermal'nogo protsessa* [Fundamentals of electro-geochemistry of lithogenesis and hydrothermal process]. Moscow : Nauka, 1982. 264 p. In Russian

Cerny P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited // *Canadian Mineralogist*. 2005. V. 43. pp. 2005–2026.

David London Granitic pegmatites: an assessment of current concepts and directions for the future // *Lithos*. 2005. V. 80. pp. 281–303.

Mona-Liza C. Sirbescu, Elizabeth G. Krukowski, Christian Schmidt, Rainer Thomas, Iain M. Samson, Robert J. Bodnar Analysis of boron in fluid inclusions by microthermometry, laser ablation ICP-MS, and Raman spectroscopy: Application to the Cryo-Genie Pegmatite, San Diego County, California, USA // *Chemical Geology*. 2013. V. 342. pp. 138–150.

Authors:

Kungulova Elvira N., graduate student 2-year, Junior Researcher, Laboratory of Geochronology and Geodynamics, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: kun2609@mail.ru

Bukharova Oksana V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Mineralogy and Geochemistry, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: getina@ggf.tsu.ru