



УДК 321, 549.514

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-2-2

## СВИДЕТЕЛЬСТВА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ КВАРЦЕВОЙ ЖИЛЫ БЕРКУТИНСКАЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ) ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДИНАМОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Л.Я. Кабанова

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и экологии УрО РАН,  
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; [kablar39@mail.ru](mailto:kablar39@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 25.03.2024 г., после доработки 13.05.2024 г., принята к печати 27.05.2024 г.

**Аннотация.** В статье рассмотрены петрография и минералогия пород Беркутинской кварц-полевошпатовой жилы на Южном Урале, которая отличается от многочисленных кварцевых жил Кыштымского блока интенсивной деформацией. На основе полученных данных выявлена последовательность формирования и преобразования пород и минералов Беркутинской жилы. Жила является типичной жилой замещения, сложенной блоками кварца и гранитных пород, и содержит включения вмещающих амфиболитов и гнейсов. Нами установлены изменения пород и минералов под тектоническим воздействием, а также механизмы деформации, среди которых, наряду с хрупким разрушением, ведущую роль сыграла пластическая деформация и процессы растворения минералов под давлением. Преобразования жилы происходили, преимущественно, в процессе регионального метаморфизма на уровне эпидот-амфиболитовой фации. При растворении и дальнейшем отложении и кристаллизации возникли минералы новых генераций (кварц, альбит, олигоклаз) и нередко минералы другого состава (биотит по амфиболу). Последующий постметаморфический метасоматоз ответственен за появление других генераций минералов (кварц, альбит, мусковит, эпидот, цоизит и клиноцоизит), отличающихся морфологией и кристаллооптическими свойствами.

**Ключевые слова:** кварц-полевошпатовая жила, граниты, пегматиты, гнейсы, амфиболиты, механизмы деформации, структуры растворения.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (тема № 122040600006-1).

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

**Вклад авторов.** Л.Я. Кабанова – разработка концепции, исследование, написание черновика рукописи, визуализация, редактирование финального варианта рукописи. Автор одобрил финальную версию статьи перед публикацией.

**Для цитирования:** Кабанова Л.Я. Свидетельства деформационного преобразования минералов кварцевой жилы Беркутинская (Южный Урал) под действием динамометаморфических процессов. Минералогия, 10(1), 26–45. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-2-2.

## EVIDENCES OF DEFORMATIONS OF MINERALS OF THE BERKUT QUARTZ VEIN (SOUTH URALS) AFFECTED BY DYNAMOMETAMORPHIC PROCESSES

L.Ya. Kabanova

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,  
Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; [kablar39@mail.ru](mailto:kablar39@mail.ru)

Received 25.03.2024, revised 13.05.2024, accepted 27.05.2024

**Abstract.** The article examines petrography and mineralogy of rocks of the Berkut quartz-feldspar vein in the South Urals, which is characterized by intense deformation in comparison with numerous quartz veins

of the Kyshtym block. These data allowed the sequence of formation and transformation of the Berkut vein. The vein is a typical vein of replacement, which is composed of blocks of quartz and granite rocks, and contains relics of host rocks (amphibolites and gneisses). Our studies revealed the tectonic transformations of rocks and minerals, as well as the deformation mechanisms with leading plastic deformation and processes of dissolution of minerals under pressure together with brittle fracturing. Dissolution and further deposition led to the crystallization of minerals of new generations (quartz, albite, and oligoclase) and often minerals of different composition (biotite after amphibole). Subsequent metasomatism is responsible for new generations of minerals (quartz, albite, microcline, muscovite, epidote, zoisite, and clinozoisite) with different morphology and crystal optical properties.

**Keywords:** quartz-feldspar vein, granites, pegmatites, gneisses, amphibolites, deformation mechanisms, dissolution structures.

**Funding.** This work was supported by state contract of the South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS no. 122040600006-1.

**Conflict of interest.** The author declares that she has no conflicts of interest.

**Author contribution.** L.Ya. Kabanova – conceptualization, investigation, writing – original draft, visualization, writing – review & editing. The author approved the final version of the manuscript prior to publication.

**For citation:** Kabanova L.Ya. Evidences of deformations of minerals of the Berkut quartz vein (South Urals) affected by dynamometamorphic processes *Mineralogy*, **10**(2), 26–45. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-2-2.

## ВВЕДЕНИЕ

Беркутинская жила на Южном Урале занимает крайнее южное положение среди многочисленных жил Кыштымского месторождения кварца. Жилы месторождения, в том числе, и Беркутинская, сложены агрегатами разнозернистого кварца, обычно интенсивно деформированного и преобразованного под воздействием метаморфических и метасоматических процессов. Многолетние исследования специалистов, изучавших особенности строения и характер преобразований минеральных агрегатов в жилах, выявили неоднократность действия этих процессов. Совместное нахождение жил, сложенных разными типами кварца, в том числе, гранулированным, объясняется многоэтапностью формирования комплексов, в которых эти жилы размещаются (Мельников, 1988; Белковский, 2004, 2011; Огородников и др., 2011, 2016, 2018; Поленов, 2008). Исследователи связывают закономерности размещения жил, содержащих гранулированный кварц, с метаморфическим фактором. Особая роль отводится процессам перекристаллизации ранее образованного первично-зернистого кварца в средне-крупнозернистый кварц. Такие кварцевые жилы перекристаллизации изучены на Кыштымском месторождении Ю.А. Поленовым (Поленов, 2008) и В.Н. Огородниковым (Огородников и др., 2007). По мнению этих авторов, жилы перекристаллизации образуются на начальной стадии метаморфогенно-метасоматических преобразований.

Особенность Беркутинской жилы – интенсивная деформация и присутствие многочисленных включений амфиболитов и гнейсов, кварц-полевошпатовых обособлений и тел гранитоидного состава разной мощности. Длительное тектоническое воздействие на породы и минералы жилы выразилось в ряде признаков, характерных для процессов деформации. Несмотря на то, что многими исследователями признается важная роль тектоники в формировании генераций минералов, распределении и локализации кварцево-жильного материала (Поленов, 1977), структурно-тектоническая сторона в генезисе кварца менее разработана и во многих случаях конкретная информация об особенностях кристаллизации минералов в условиях тектонического воздействия отсутствует. Беркутинская жила характеризуется крайне неоднородным строением. Микро-мелкозернистый гранулированный кварц, который является главным источником высокочистого кварцевого сырья, соседствует с мелко-среднезернистым кварцем другой морфологии. Также в жиле встречается прозрачный и полупрозрачный средне-крупнозернистый агрегат кварцевых зерен с полигональной структурой. Предыдущие исследования Беркутинской жилы, в основном, касались гранулометрических особенностей, включений и примесей в кварце (Игуменцева, 2012; Корекина, Савичев, 2023) и структурных особенностей для выделения типов кварца (Поленов, 2008; Огородников и др., 2018).

Основной задачей исследования стало изучение морфологии, структурных особенностей минералов и механизмов деформации, вызывающих формирование этих структур. Чтобы выявить характер взаимоотношений, последовательность и условия образования разных морфологических видов кварца и других пороодообразующих минералов, проведено минералогическое картирование и детальное петрографическое изучение кварцевых агрегатов Беркутинской жилы. Выяснение характера взаимоотношений минералов в кварц-полевошпатовых обособлениях, реликтовых телах амфиболитов и гнейсов, кварцевых агрегатах, содержащих эти обособления, а особенно их изменение под действием давления, позволяет понять их генезис и выяснить последовательность формирования кварцевых генераций.

#### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА

Кыштымское месторождение гранулированного кварца расположено на восточном склоне Южного Урала к западу от г. Кыштыма Челябинской области в Уфалейском высокобарическом блоке, условно отнесенном к Тагильской мегазоне (рис. 1). Месторождение содержит огромное количество кварцевых жил на площади около 20 км<sup>2</sup>, из которых разведано более 100 (Савичев, Красильников, 2019). Большая часть жил имеет полевошпат-кварцевый состав, содержит тела и отдельные блоки гранитов и пегматитов (жилы №№ 2016, 175, 191, 415) и характеризуется сложной историей формирования. Беркутинская жила расположена в 20 км юго-западнее г. Кыштыма, в 2 км севернее оз. Большой Агардыш, на западном склоне г. Беркут. Она занимает крайнее южное положение на площади месторождения.

Жила представляет собой тело сложного строения, состоящее из отдельных разнотекстурных кварцевых и кварц-полевошпатовых блоков с реликтами вмещающих пород (рис. 2). Кварц большей частью белый, преимущественно, крупнозернистый, местами серый, иногда с пятнами светло-серого или белого цвета. Встречается желтоватый кварц, окрашенный охрами железа (рис. 3). Блоки, залегающие, в основном, кулисообразно или субпараллельно друг другу, чаще имеют неправильную форму. Протяженность жилы 200 м при максимальной мощности 5 м. Простирается субмеридиональное, падение на юго-запад под углом 55°–60°.

Жила, включения в ней и вмещающие породы интенсивно деформированы. Многочисленные трещины разного направления (субширотные и субмеридиональные) часто пересекаются, сопровождаются зонами дробления, милонитизации, кливажными зонами и швами. Вмещающие породы беркутинской подтолщи слюдяногорской подсвиты (PR<sub>3</sub> Pz), представленные интенсивно деформированными амфиболитами и биотитовыми, двуслюдяными и амфибол-биотитовыми гнейсами, встречаются в виде реликтов в жиле.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Во время полевых работ из вмещающих пород, а также молочно-белого, светло-серого, серого и желтоватого кварца и его агрегатов с переменным содержанием полевых шпатов из разных участков жилы были отобраны штуфы, из которых изготовлено 120 прозрачных шлифов, детально изученных на микроскопе Axiolab ZS Carl Zeiss с цифровой камерой.

Включения вмещающих амфиболитов и гнейсов в кварцевой жиле наблюдаются в виде линз и обособлений разной формы и размера. Отдельные кварцевые или кварц-полевошпатовые блоки жилы рассекаются поздними гранитами и пегматитами.

Амфиболиты с массивной или полосчатой текстурой встречаются в жиле в виде линз и обособлений неправильной формы размером от 5.0–10.0 см до 1.0–1.5 м. Обычно они резко выделяются на фоне светлых кварцевых агрегатов темной окраской. Амфиболиты с полосчатой текстурой представлены чередованием лейкократовых и меланократовых полос. Составляющие их минералы, особенно биотит и гранат (альмандин), характеризуются переменным количеством. Вкрапленность граната неравномерная, мелкие зерна размером 2–3 мм выделяются малиново-фиолетовой окраской на темном фоне основной ткани породы.

Лейкократовые полосы имеют кварц-полевошпатовый состав и характеризуются переменным содержанием всех минералов. Мощность слоев варьирует от долей миллиметра до 2–5 см. Местами в них встречаются линзовидные слойки, сложенные тонкозернистыми сростками чешуек биотита, пластинок хлорита и точечных зерен рудного минерала. Длина слойков не превышает 2–3 мм при ширине 0.1–0.5 мм. Границы с темными слоями нерезкие, порода по внешнему виду напоминает теневой мигматит.

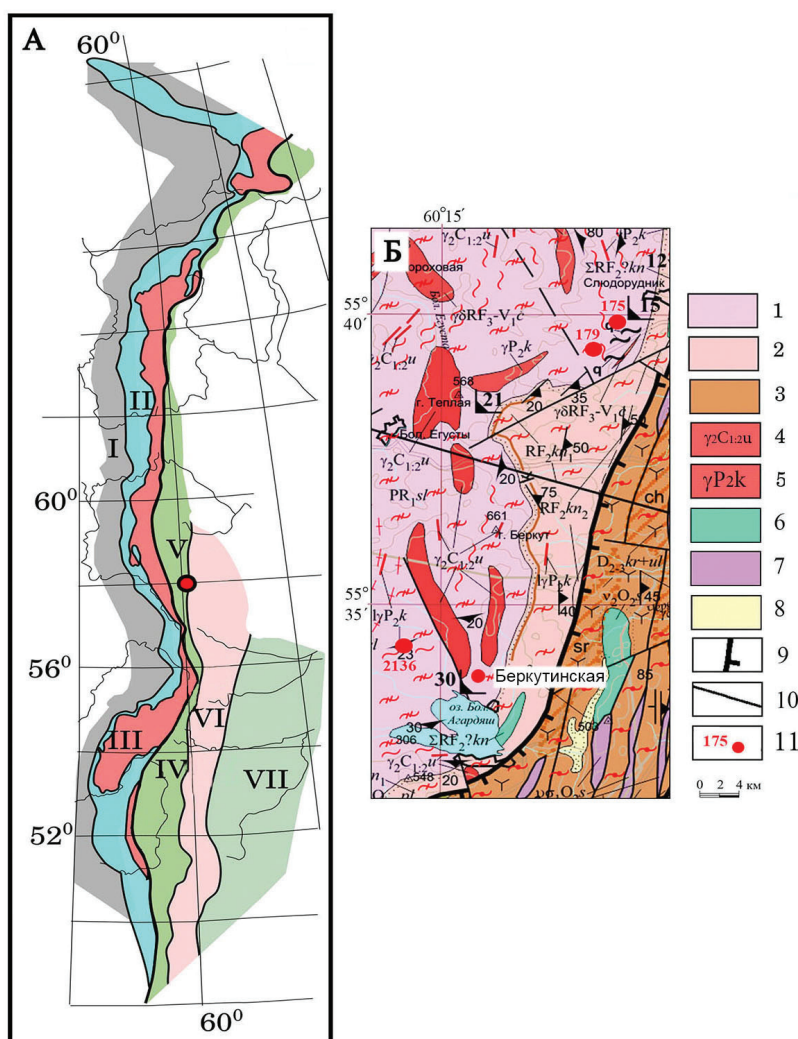


Рис. 1. Схема структурно-формационного районирования Урала (А) и карта геологического строения района работ (Б), по (Кузнецов и др., 2008) с дополнениями автора.

I – Предуральский прогиб; II – Западно-Уральская зона; III – Центрально-Уральская зона; IV, V – Магнитогорско-Тагильская зона; VI – Восточно-Уральская зона; VII – Зауральская зона. Красная точка – положение Беркутинской жилы.

1 – Гнейсы (PR<sub>2</sub>kl); 2 – гнейсы с прослоями амфиболитов (RF<sub>2</sub> kn<sub>2</sub>); 3 – вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы (D<sub>2-3</sub>); 4 – граниты и гранодиориты с пегматитовыми жилами (C<sub>1-2</sub>); 5 – лейкократовые граниты (P<sub>2</sub> k); 6 – базальты и трахибазальты (O<sub>2</sub>); 7 – ультраосновные серпентинизированные породы; 8 – четвертичные отложения; 9 – линия Главного уральского разлома; 10 – линии тектонических разломов; 11 – номера и названия жил.

Fig. 1. Scheme of lithotectonic zoning of the Urals (A) and map of geological structure of the working area (B), modified after (Kuznetsov et al., 2008).

I – Cis-Urals Trough; II – West Urals Zone; III – Central Urals Zone; IV, V – Magnitogorsk–Tagil Zone; VI – East Urals Zone; VII – Transuralian Zone. The red dot shows the position of the Berkut vein.

1 – Gneiss (PR<sub>2</sub>kl); 2 – gneiss with interlayers of amphibolites (RF<sub>2</sub> kn<sub>2</sub>); 3 – volcanic and volcanosedimentary rocks (D<sub>2-3</sub>); 4 – granite, granodiorite with pegmatite veins (C<sub>1-2</sub>); 5 – leucocratic granite (P<sub>2</sub> k); 6 – basalt, trachybasalt (O<sub>2</sub>); 7 – ultramafic serpentinitized rocks; 8 – Quaternary deposits; 9 – Main Urals Fault Zone; 10 – faults; 11 – vein numbers and names.

Меланократовые слои сложены, преимущественно, амфиболом с небольшим количеством кварца и плагиоклаза. Наблюдается катакластическая, местами плейчатая текстура. В отдельных участках минералы интенсивно деформированы, часто фрагментированы. В участках с плейча-

той текстурой встречаются отдельные участки со структурами вращения зерен и формированием в центре порфиробластов амфибола, окруженных новообразованными зернами амфибола, иногда в ассоциации с биотитом и гранатом.



Рис. 2. Фрагмент обнажения восточной стенки карьера.

Fig. 2. Fragment of an outcrop of the eastern wall of the quarry.



Рис. 3. Кварцевая жила с включениями гранитоидов (Q-Fsp) на контакте с амфиболитами (Amf).

Fig. 3. Quartz vein with granitoid relics (Q-Fsp) at the contact with amphibolites (Amf).

В шлифах все минералы амфиболитов в разной степени деформированы: одни содержат внутризерновые трещины хрупкой деформации, другие – раздроблены и фрагментированы. В них наблюдаются признаки пластической деформации, проявленные в волнистом погасании. В этом отношении наиболее показательным минералом является белый кварц. Он представлен двумя генерациями. Кварц первой генерации размером от 0.1 до 2.0–3.0 мм имеет коррозионные границы и волнистое погасание. В зернах наблюдаются внутризерновые трещины хрупкой деформации и полости, каналы и щелевидные трещины растворения. В кварце встречаются включения апатита размером 0.1–1.0 мм, в щелевидных трещинах – новообразованный кварц второй генерации (рис. 4а). Кварц второй генерации присутствует в полостях в виде мелких зерен с прямолинейными границами и характеризуется однородным погасанием, не содержит флюидных включений и следов деформации.

Плагиоклаз и ортоклаз также интенсивно деформированы. В плагиоклазе отмечены полости растворения и коррозионные границы на контакте с другими минералами, свидетельствующие о растворении под давлением (рис. 4б). Исходный плагиоклаз, представлен олигоклазом ( $An_{26-28}$ ), новая генерация – альбит-олигоклазом ( $An_{10-12}$ ). В зернах деформированного ортоклаза отмечаются признаки хрупкой и пластической деформации, выраженные в пятнистом погасании. Признаки растворения наблюдаются в виде щелевидных полостей и теневых зон (рис. 4в). Зерна амфибола в большинстве случаев интенсивно деформированы, местами фрагментированы, содержат трещины хрупкой деформации, а некоторые зерна – полосы пластической деформации, подчеркнутые пленками гематита. Местами по этим трещинам и полосам развивается биотит (рис. 4г), обычно интенсивно деформированный: некоторые пластинки фрагментированы, часто изогнуты, в некоторых встречаются микрокливажные зоны.

Гнейсы также часто встречаются в виде реликтов в кварце. Это светло-серые с бледно-розовым оттенком породы с гнейсовидной, часто полосчатой текстурой, подчеркнутой скоплениями пластинок слюды и присутствием кварц-полевошпатовых полос с переменным содержанием и главных породообразующих минералов. Породы интенсивно деформированы, местами содержат зоны бластомилонитизации.

В шлифах порода характеризуется гранобластовой, местами лепидогранобластовой структурой.

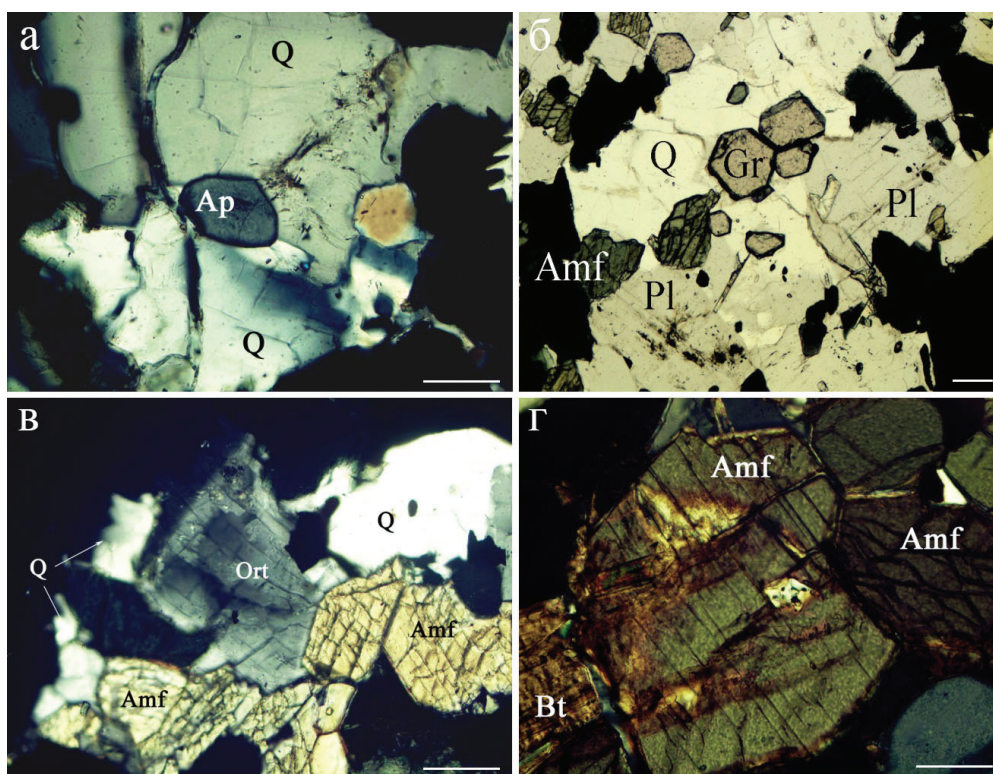


Рис. 4. Признаки деформации и растворения в амфиболитах: а – трещины хрупкой деформации в зернах кварца (Q) и признаки растворения в виде каналов и щелей; б – деформированные зерна плагиоклаза и кварца с включениями амфибола и граната; в – трещины деформации, следы растворения и теневые зоны в зернах ортоклаза (Ort); г – полосы деформации в амфиболе, со следами растворения и биотитом (Bt), замещающим амфибол.

Фото шлифа с анализатором. Масштаб 0.1 мм.

Fig. 4. Features of deformation and dissolution in amphibolites: а – brittle deformation fractures in quartz grains (Q) and features of dissolution in the form of channels and fissures; б – deformed plagioclase and quartz with amphibole and garnet; в – deformation fractures, traces of dissolution and shadow zones in orthoclase grains (Ort); г – deformation bands in amphibole with dissolution traces and biotite (Bt) after amphibole.

Thin section with analyzer. Scale bar is 0.1 mm.

рой, гнейсовидной текстурой, подчеркнутой ориентированно расположенными зернами магнетита и пластинками биотита, местами хлоритизированными, часто изогнутыми, в разной степени деформированными (рис. 5а). В гнейсе отмечено несколько генераций кварца. Кварц первой генерации представлен ксеноморфными зернами, близкими к изометричным, размером до 2.0–3.0 мм, часто с коррозионными границами. Погасание волнистое, свидетельствующее о пластических деформациях. Зерна кварца разбиты трещинами хрупкой деформации. Кварц содержит флюидные включения, составляющие в разных зернах от 3–5 до 10–15 % площади шлифа. В таком кварце присутствуют признаки растворения, которые представлены отдельными тенями растворения и реже вытянутыми зонами, в которых встречаются углубления, характерные для растворения кварца (рис. 5б).

Встречаются скелетные кристаллы кварца второй генерации, иногда приуроченные к трещинам растворения и располагающиеся в них в виде цепочки разрозненных индивидов, или отложенных в полостях растворения. Кварц этой генерации образует мелкие зерна размером менее 0.01 мм скелетной формы с однородным погасанием, без следов деформации и флюидных включений.

Отдельные зерна кварца под действием давления полностью изменяют форму. Происходит их фрагментация с образованием коррозионной границы в местах растворения (рис. 5в). Следы растворения наблюдаются на границе зерен кварца и плагиоклаза, в самих зернах плагиоклаза в виде теней растворения и щелевидных углублений (рис. 5г). Зерна кварца со следами хрупкой и пластической деформации в краевой части растворяются, образуя промежуточные зоны с частично растворенными

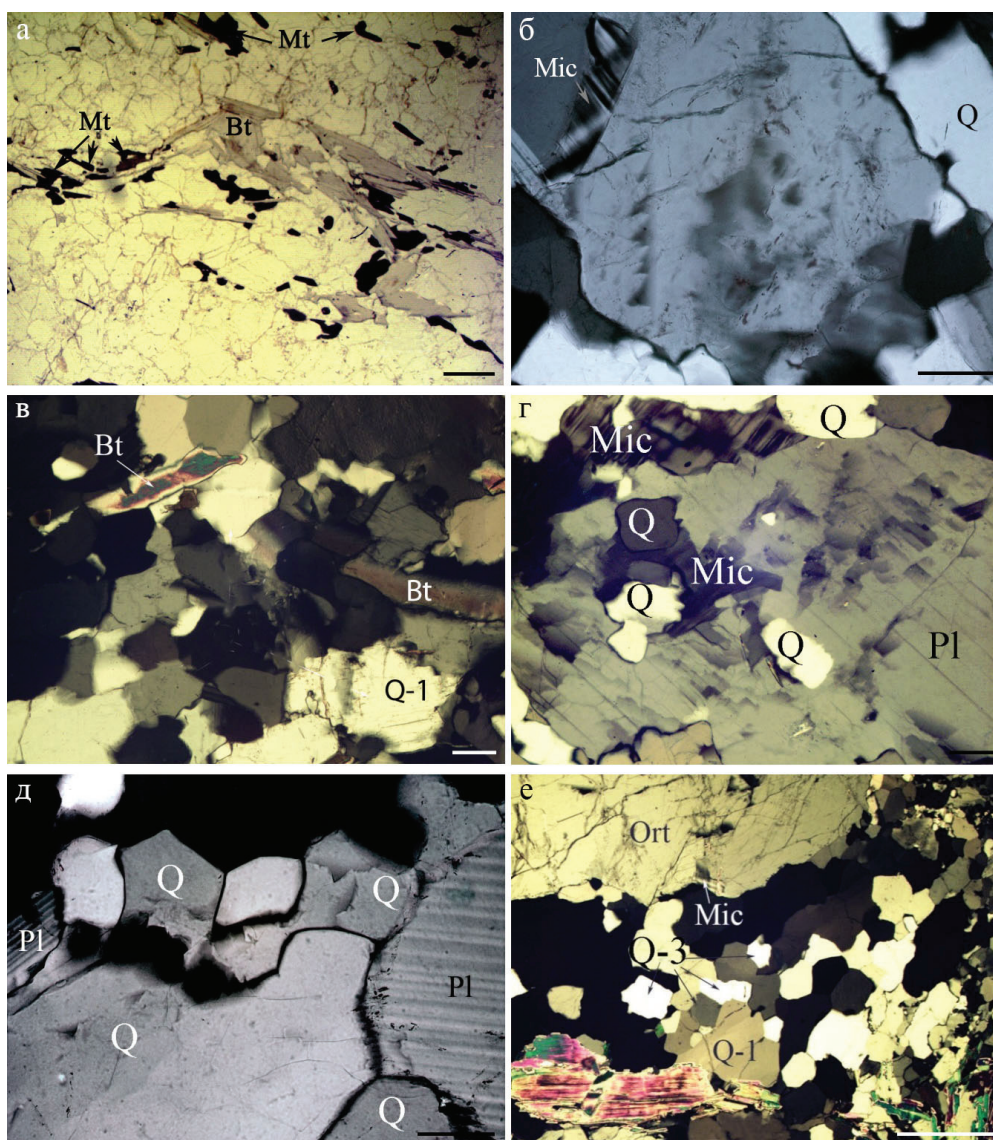


Рис. 5. Признаки деформации и растворения в гнейсах: а – гнейсовидная текстура с ориентированным расположением биотита (Bt) и магнетита (Mt); б – теневые зоны – следы растворения в кварце (Q) и микроклине (Mic) на границе с плагиоклазом; в – признаки растворения в зернах кварца (Q-1) с образованием коррозионной границы; г – следы растворения в зернах плагиоклаза; д – полости растворения кварца и участки с полигональной структурой; е – участок с агрегатом кварца полигональной структуры (Q-3) и реликтами исходного кварца (Q-1).

Фото шлифа с (б–е) и без (а) анализатора. Масштаб 0.5 (а), 0.1 (б–д) и 1 (е) мм.

Fig. 5. Features of deformation and dissolution in gneiss: а – gneiss texture with oriented biotite (Bt) and magnetite (Mt); б – shadow zones – traces of dissolution in quartz (Q) and microcline (Mic) at the contact with plagioclase; в – features with dissolution in quartz grains (Q-1) and corrosion boundary; г – traces of dissolution in quartz grains and plagioclase; д – dissolution cavities in quartz and areas with a polygonal structure; е – area with quartz aggregate of polygonal structure (Q-3) and relics of original quartz (Q-1).

Thin section with (б–е) and without (а) analyzer. Scale bar is 0.5 (а), 0.1 (б–д), and 1 (е) mm.

частями исходного зерна, сменяющимися зонами перекристаллизации с образованиями кварца полиэдрической и ромбоидальной формы (рис. 5д). В случае, когда исходный кварц не содержит флюидных включений или их немного, рекристаллизация происходит без растворения. Образуются

участки, в которых зерна кварца имеют прямолинейные границы и однородное погасание. Такие зерна практически не содержат включений и следов деформации (рис. 5е).

Граниты в кварцевом агрегате жилы образуют включения неправильной и линзовидной формы

размером от 2.0–5.0 см до 0.5–1.0 м. Отмечаются отдельные включения полевого шпата и плагиоклаза размером до 2.5 см. Граниты характеризуются невыдержанным минеральным составом и структурно-текстурными особенностями. Пегматитовые включения с крупными зернами полевых шпатов, представленные большей частью плагиоклазом, реже калиевым полевым шпатом, имеют неравномернозернистую, часто порфирировидную структуру. Лейкократовые и аплитовые граниты отличаются среднезернистой или мелкозернистой структурой, соответственно. Текстура катакластическая, иногда брекчиевая, редко массивная. Местами встречаются гнездовидные скопления слюды размером от 2.0–3.0 см до 0.3–0.5 м.

В одном из гранитных включений размером около 50 см изучены породообразующие минералы. Внешне структура породы неравномернозернистая, участками порфирировидная с отдельными вы-

делениями полевых шпатов размером до 1.0–1.5 см. В шлифе все минералы породы интенсивно деформированы и в разной степени преобразованы. Количество главных породообразующих минералов в разных участках обособления переменное, везде плагиоклаз преобладает. Он образует крупные зерна размером до 3–4 мм. По составу исходный плагиоклаз отвечает олигоклазу  $An_{24-26}$ . Зерна плагиоклаза содержат многочисленные трещины, местами разбившие их на фрагменты. Большая часть зерен содержит следы растворения, представленные щелевидными полостями и теневыми зонами (рис. 6а). Встречаются полости растворения, в которых находятся зерна новообразованного кварца, альбита и олигоклаза  $An_{18-20}$ . (рис. 6б).

Новообразованные минералы представлены кварц-мусковитовыми симплектитами. Зерна кварца в них имеют такую же форму, как и в мирмекитах, но в симплектиках чаще отмечаются

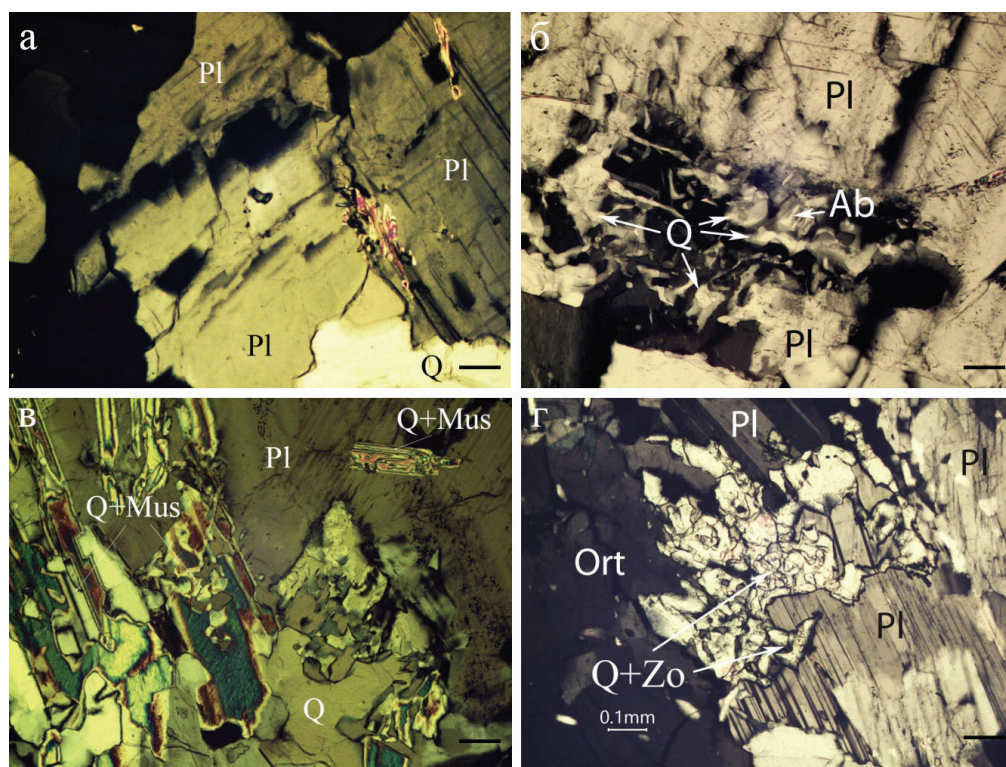


Рис. 6. Обособление гранитного состава: а – деформированные зерна плагиоклаза (Pl) со щелевидными следами растворения; б – полость растворения в плагиоклазе с кварц-альбитовым агрегатом (Ab+Q); в – плагиоклаз (Pl) со следами растворения и кварц-мусковитовым симплектитом (Q+Mus); г – плагиоклаз (Pl) со следами деформации, растворения и коррозионными границами на контактах с ортоклазом (Ort), кварц-цоизитовый симплектит (Q+Zo).

Фото шлифа с анализатором. Масштаб 0.1 мм.

Fig. 6. Granitic relic: а – deformed plagioclase (Pl) grains with slit-like dissolution traces; б – cavity of dissolution in plagioclase with quartz-albite aggregate (Ab+Q); в – plagioclase (Pl) with traces of dissolution and quartz-muscovite symplectite (Q+Mus); г – plagioclase (Pl) with traces of deformation, dissolution and corrosion boundaries at the contacts with orthoclase (Ort) and quartz-zoisite symplectite (Q+Zo).

Thin section with analyzer. Scale bar is 0.1 mm.

удлиненные и скелетные зерна (рис. 6в). Встречаются также кварц-цоизитовые (клиноцоизитовые), кварц-альбит-цоизитовые и микроклин-цоизитовые симплектиты (рис. 6г).

Поздние жилы пегматитов и гранитов, пересекающие кварцевую жилу, также интенсивно деформированы, в отдельных участках фрагментированы. Структура неравномернотекстурированная, текстура катакlastическая. В наиболее деформированных участках отмечается окварцевание, местами гематитизация. Состав породы (об. %): плагиоклаз 50–69, кварц 15–40, ортоклаз 10–30, слюда 5–10, клиноцоизит 1–5. В шлифах порода характеризуется порфирированной структурой, катакlastической текстурой. Крупные зерна плагиоклаза размером до 0.5–1.0 см представлены олигоклазом ( $An_{22-26}$ ).

Плагиоклаз деформирован, часто фрагментирован, местами между фрагментами встречаются кварц или скопления мелких чешуек бесцветной слюды, иногда в ассоциации с кварцем, образующим линзовидные прожилки (рис. 7а). Размер зерен 0.01–0.03 мм, местами до 0.1–0.3 мм.

Линзовидные и ксеноморфные скопления биотита и мусковита (часто с преобладанием последнего) приурочены к интенсивно деформированным участкам, где слюды выполняют трещины в плагиоклазе (рис. 7б). Более крупные пластинки мусковита часто изогнуты, иногда фрагментированы. Плагиоклаз деформирован, местами в нем встречаются механические двойники. Границы зерен зубчатые, коррозионные (рис. 7в). Исходные зерна кварца разбиты трещинами, часто раздроблены и фрагментированы, в некоторых видны следы растворения. Признаки растворения отмечаются и в плагиоклазе (рис. 7г). На границе кварца и плагиоклаза встречаются кварц-мусковитовые симплектиты с неоднородным строением. Центральные части сростков существенно мусковитовые, краевые части сложены срастаниями тонких пластинок мусковита с мелкими каплевидными зернами кварца (рис. 7г). Здесь же наблюдаются кварц-клиноцоизитовые симплектиты, в которых кварц имеет преимущественно скелетную форму (рис. 7д). В других участках отмечаются кварц-мусковитовые и кварц-клиноцоизитовые симплектиты. Кварц-мусковитовые симплектиты повсеместно деформированы и фрагментированы. Между фрагментами могут находиться кварц-клиноцоизитовые симплектиты без следов деформации. Судя по характеру взаимоотношений, кварц-клиноцоизитовый симплектит образовался позже кварц-мусковитового (рис. 7е).

Кварц, составляющий большую часть жилы, характеризуется разными структурными особенностями, отличаясь по цвету, прозрачности, размеру и форме зерен. Преобладает молочно-белый кварц, в котором встречаются участки разной формы, сложенные светло-серым и серым кварцем. Желтоватый цвет кварцевых зерен обусловлен присутствием пленок гидроксидов железа, обычно приуроченных к зонам трещиноватости и дробления. Нередко в сером кварце заключены зерна белого кварца. Прозрачные и полупрозрачные разновидности отмечаются в кварцевых агрегатах любой окраски.

В шлифах агрегат молочно-белого кварца обычно неравномернотекстурированный, в разной степени преобразованный. Структура агрегатов варьирует от мелко-среднезернистой микрогранобластовой до средне-крупнозернистой гранобластовой, местами псевдопорфирированной и порфирированной. Текстура катакlastическая (рис. 8а). Зерна отличаются формой сечений, степенью деформации и количеством включений, как флюидных, так и минеральных. В участках с неравномернотекстурированной структурой отчетливо проявлены коррозионные границы на контактах зерен и деформационные полосы (рис. 8б). В краевых частях наблюдаются зерна с прямолинейными, местами коррозионными границами (рис. 8в) и встречается ленточный кварц, приуроченный к ранним щелям растворения, разбитый трещинами позднего воздействия на фрагменты (рис. 8г).

Кварц-полевошпатовые агрегаты в жиле имеют переменное количество минералов и различную зернистость. Степень тектонического воздействия на них проявлена по-разному. Наиболее интенсивное преобразование минералов отмечается в зонах дробления и милонитизации. Изменяется структура от исходной гипидиоморфнозернистой, характерной для гранитов, до микрогранобластовой в комбинации с микрогранобластовой, состоящей из зерен размером от 0.01 до 1.0 мм. Наряду с обломками зерен кварца и плагиоклаза повсеместно встречаются новообразованные индивиды этих минералов, отличающиеся по форме и размеру, обычно более мелкие, чем исходные. Более крупные зерна кварца размером 0.10–0.15 мм местами раздроблены и фрагментированы (рис. 9а). В зоне интенсивного растворения граница между кварцевым агрегатом и плагиоклазом зубчатая. В плагиоклазе наблюдаются продольные и поперечные каналы растворения (рис. 9б) и включения кварца каплевидной формы (рис. 9в).

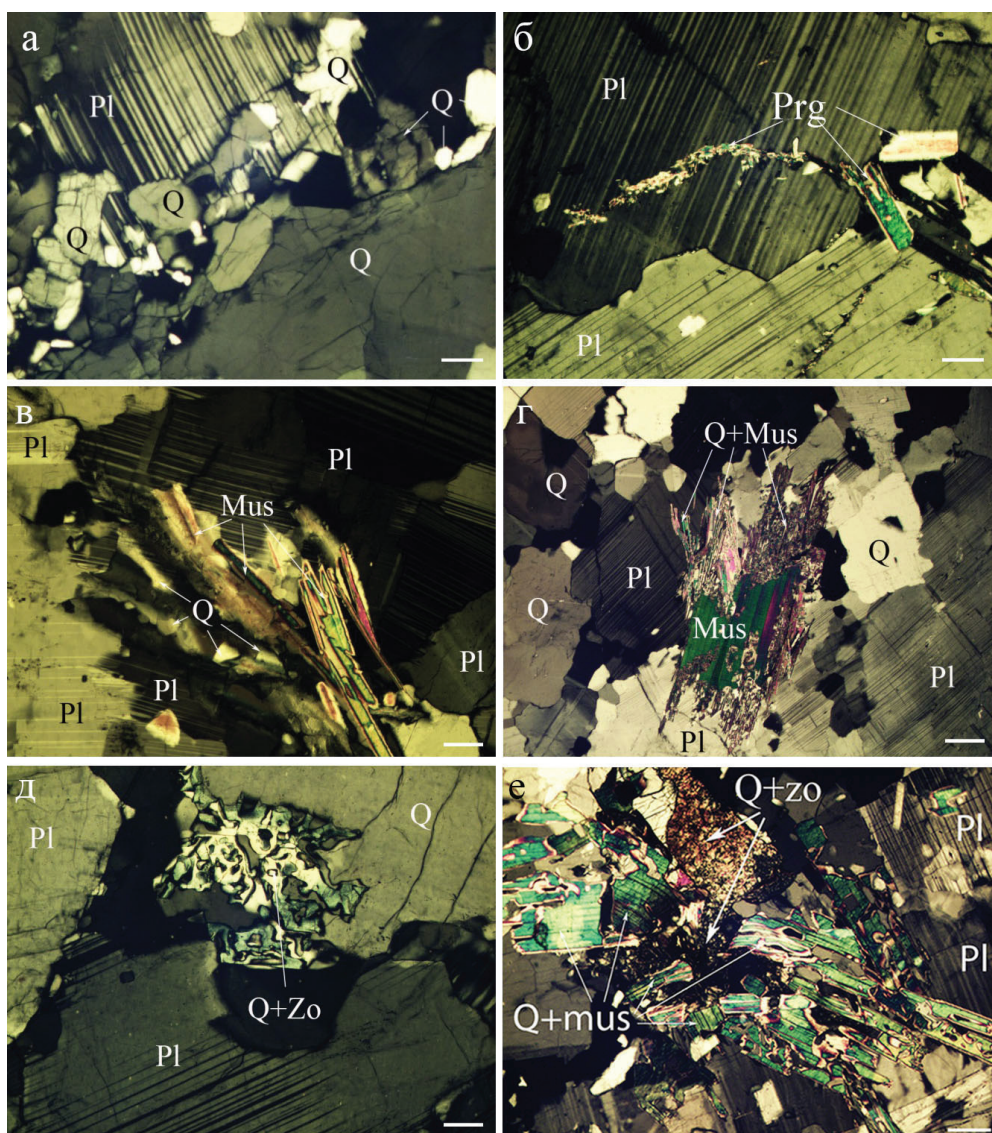


Рис. 7. Пегматит: а – интенсивно деформированные зерна плагиоклаза (Pl); б – трещины в плагиоклазе (Pl), vyplненные мелкошелушчатом мусковитом (Prg); в – трещины деформации, следы растворения и теневые зоны в зернах ортоклаза (Ort); г – полосы деформации в амфиболе, со следами растворения и биотитом (Bt), замещающим амфибол. г – кварц-мусковитовый симплектит (Q+Mus) и деформированные со следами растворения зерна кварца (Q) и плагиоклаза (Pl); д – кварц-клинозоизитовый симплектит (Q+Zo); е – деформированный кварц-мусковитовый симплектит (Q+Mus) и кварц-клинозоизитовый симплектит (Q+Zo) между его фрагментированными частями.

Фото шлифа с анализатором. Масштаб 0.1 мм.

Fig. 7. Pegmatite: а – intensely deformed plagioclase grains (Pl); б – fractures in plagioclase (Pl) filled by fine-scaled muscovite (Prg); в – deformation fractures, traces of dissolution and shadow zones in orthoclase grains (Ort); г – deformation bands in amphibole with dissolution traces and biotite (Bt) after amphibole; г – quartz-muscovite simplectite (Q+Mus) and deformed of quartz grains (Q) with traces of dissolution and plagioclase (Pl); д – quartz-clinozoisite simplectite (Q+Zo); е – deformed quartz-muscovite simplectite (Q+Mus) and quartz-clinozoisite simplectite (Q+Zo) between its fragmented parts.

Thin section with analyzer. Scale bar is 0.1 mm

Механические двойники в плагиоклазе проявлены особенно отчетливо в наиболее интенсивно деформированных участках, где образуются зоны милонитизации. Они выражены в параллельных полосах, напоминающих полисинтетические двойники, но отличающихся толщиной полос, которая

часто изменяется при изгибе. Концы таких полос бывают срезаны трещинками, которые являются конечным результатом деформации (рис. 9в). Местами на границе кварц-плагиоклаз образуется полоса новообразованных зерен плагиоклаза и кварца шириной 0.05–0.1 мм (рис. 9г).

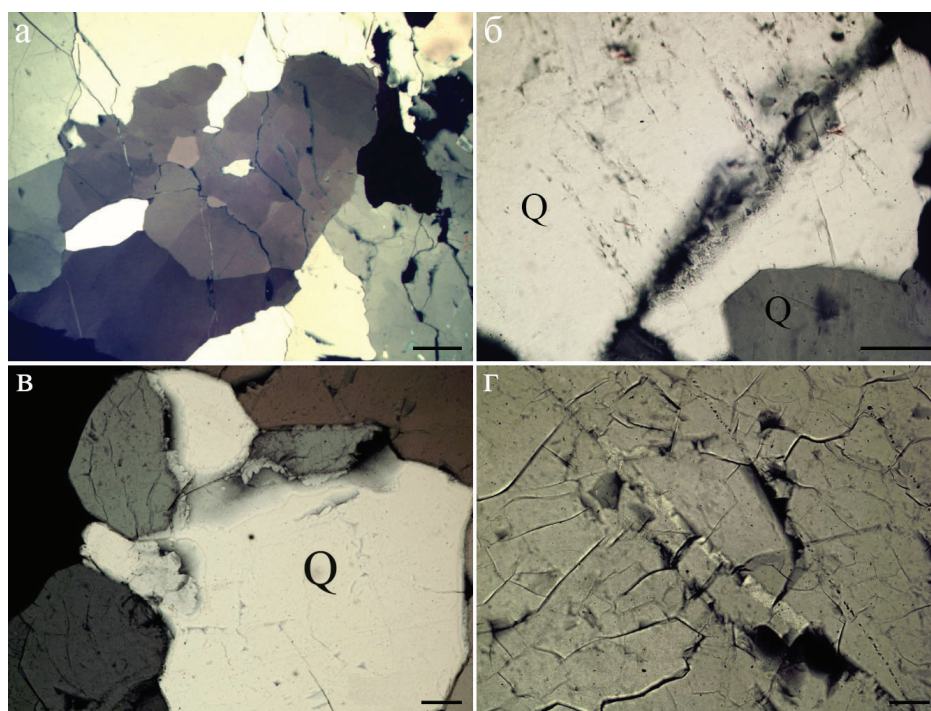


Рис. 8. Текстурно-структурные особенности кварца: а – катакластическая текстура с фрагментированием зерен; б – структура растворения со щелевидными полостями и деформационными полосками; в – структура растворения с коррозионной границей на контакте зерен; г – ленточный кварц со следами деформации и растворения в зерне исходного кварца (в центре).

Фото шлифа с анализатором. Масштаб 0.5 (а) и 0.1 (б–г) мм.

Fig. 8. Textural and structural features of quartz: а – cataclastic texture with grain fragmentation; б – dissolution structure with slit-like voids and deformation strips; в – dissolution structure with a corrosion boundary at the grain contact; г – ribbon quartz with traces of dissolution in the grain of primary quartz (in the center).

Thin section with analyzer. Scale bar is 0.5 (а) and 0.1 (б–г) mm.

В кварц-полевошпатовом агрегате, подвергнутом интенсивному тектоническому воздействию, встречаются зерна альбита, граната и микроклина, пластинки мусковита и биотита, кварц-мусковитовые и кварц-цоизитовые симплектиты. Вокруг микроклина иногда формируются гранофировые каймы, сложенные альбитом и кварцем (рис. 10а). Такой же кварц-альбитовый состав имеет система кулисных прожилков внутри зерен микроклина, образованных по трещинам скола, местами с сигмоидальным изгибом в центре (рис. 10б). В зонах милонитизации встречаются кварц-мусковитовые симплектиты, в которых зерна кварца имеют различную форму от каплевидной и скелетной до червеобразной (рис. 10в). В участках, где растворение кварцевых зерен подтверждается присутствием каналов растворения, коррозионными границами и полостями растворения, отмечаются пластинки мусковита, а местами кварц-мусковитовые симплектиты (рис. 10г).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Петрографическое изучение комплекса пород, слагающих Беркутинскую жилу, позволило выявить многоэтапность ее формирования и последующие изменения. Реликты вмещающих амфиболитов и гнейсов свидетельствуют о том, что жила является типичной жилой замещения. Реликты вмещающих пород интенсивно изменены при процессах динамометаморфизма и регионального метаморфизма.

*Механизмы деформации в амфиболитах.* В амфиболитах под действием стрессового давления изменяются структуры и текстуры. Нематогранобластовая структура в процессе биотитизации амфибола превращается в лепидогранобластовую, полосчатая текстура переходит в пльчатую, часто с элементами сланцеватой. Встречаются структуры вращения с центральным зерном, окаймленным «мантией» новообразованных зерен, формирующих порфирокластовую структуру.

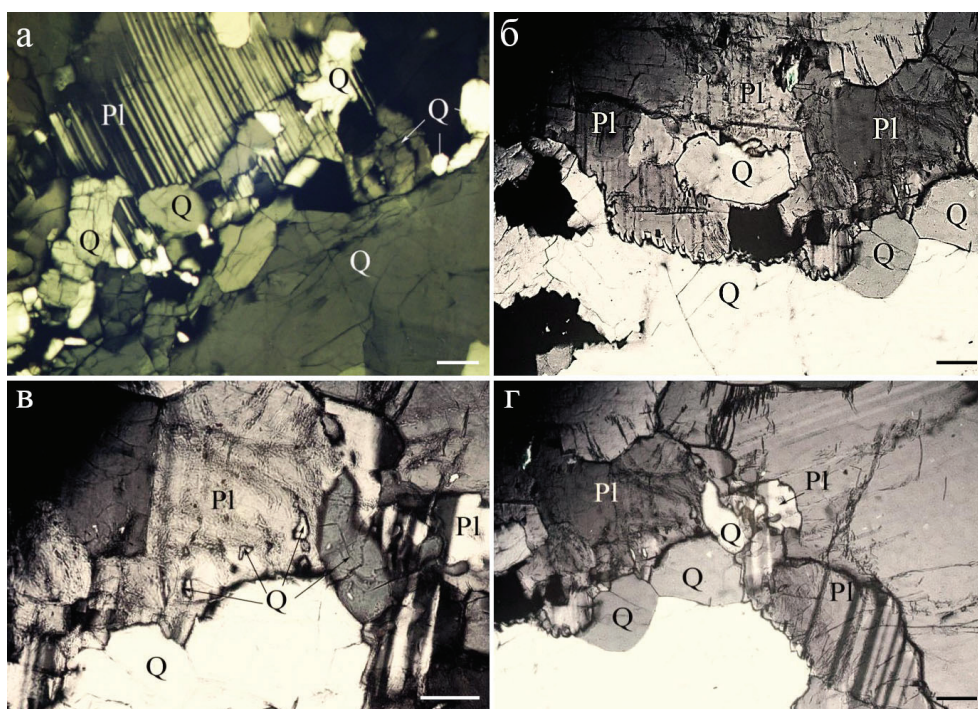


Рис. 9. Структурные особенности деформационных изменений в зернах кварца и плагиоклаза: а – катаклазированные участки со следами растворения зерен кварца и плагиоклаза и микрогранокластовой структурой в комбинации с микрогранобластовой структурой; б – миграция границы зоны растворения в сторону плагиоклаза; в – следы растворения и деформации плагиоклаза с пятнами волнистого погасания, полосами деформации, каналами растворения и механическими двойниками (правый нижний угол фото); г – полоса растворения и отложения зерен кварца и плагиоклаза на границе кварц-плагиоклаз.

Фото шлифа с анализатором. Масштаб 0.1 (а, б, г) и 0.05 (в) мм.

Fig 9. Structural features of deformation transformations in grains of feldspar-quartz aggregate:

а – cataclastic areas with traces of dissolution of quartz grains and plagioclase and microgranoclastic structure in combination with microgranoblastic structure; б – migration of the boundary of the dissolution zone towards plagioclase; в – traces of dissolution and deformation of plagioclase with spots of wavy extinction, deformation bands, dissolution channels and mechanical twins (lower right corner of the photo); г – dissolution and deposition band of quartz and plagioclase grains at the quartz-plagioclase boundary.

Thin section with analyzer. Scale bar is 0.1 (а, б, г) and 0.05 (в) mm.

Главные породообразующие минералы деформируются под действием давления. Одни зерна раздроблены или фрагментированы, в других – отчетливо проявлены следы хрупкой и пластической деформации или признаки растворения и отложения (табл. 1). По экспериментальным данным (Вернон, 1980) под давлением кварц растворяется в широком интервале температур от 200–300 °С до 500–600 °С. Дислокационное скольжение в кварце, проявленное в волнистом погасании зерен, является ведущим механизмом при температурах 300–400 °С (Кирмасов, 2011). Плагиоклаз и ортоклаз под давлением в низкотемпературных условиях подвергаются дроблению, а при температуре около 500 °С в них отмечается дислокационная ползучесть (Tulles et al., 1973). Преобразования амфибола и биотита также свидетельствуют о тектоническом воздей-

ствии, в результате которого отмечаются признаки растворения в зернах амфибола, дислокационное скольжение в пластинках биотита и появление в них микрокливажных зон и микроскладок.

*Механизмы деформации в гнейсах.* В гнейсах минералы подвергаются таким же преобразованиям под тектоническим воздействием, что и минералы в амфиболитах (табл. 2). Кварц является наиболее информативным минералом не только о происхождении, зарождении и росте, но и о дальнейшем изменении вплоть до полного перерождения (Кабанова, 2011). В гнейсах зерна исходного кварца под действием давления рекристаллизованы, местами растворены. Рекристаллизация является начальным этапом перекристаллизации и проявлена образованием и ростом мелких идиоморфных зерен в деформированных крупных индивидах того

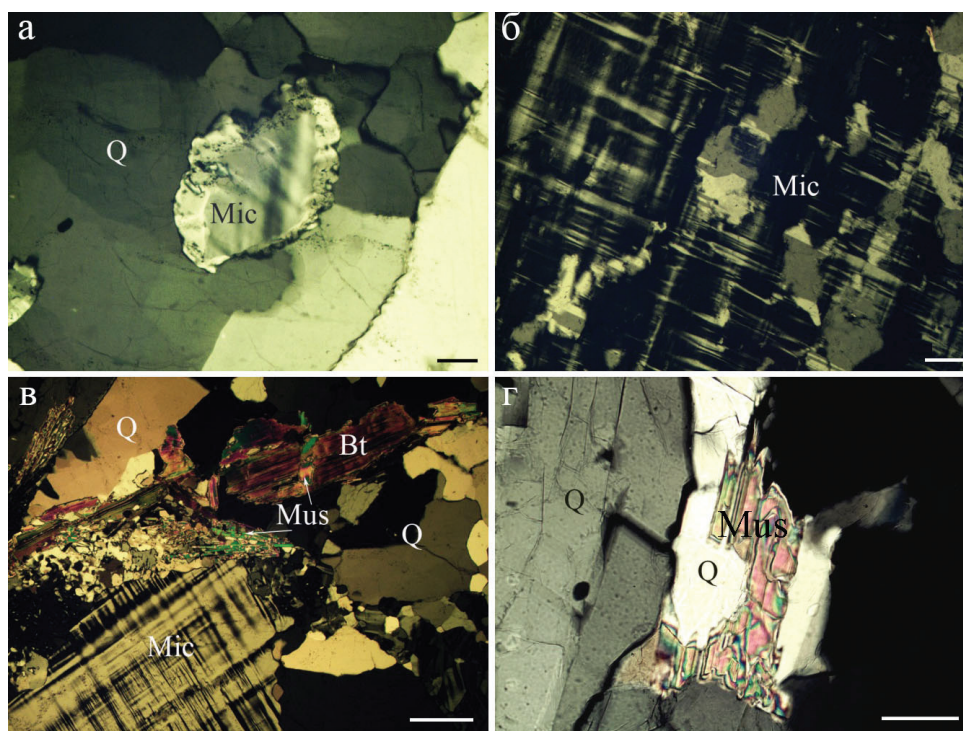


Рис. 10. Признаки метасоматического преобразования в кварцевом агрегате: а – образование альбит-кварцевой каймы вокруг микроклина; б – прожилки кварц-альбитового состава в деформированном зерна микроклина; в – зона перекристаллизации на границе микроклин-кварц с образованием мусковит-кварцевого симплектита; г – мусковит в участке растворения кварца.

Фото шлифа с анализатором. Масштаб 0.1 (а, б, г) и 0.5 (в) мм.

Fig. 10. Features of metasomatic transformation in quartz aggregate: а – formation of an albite-quartz contact around microcline; б – veins of quartz-albite composition in deformed microcline grains; в – zone of mylonitization and recrystallization at the microcline-quartz boundary with the formation of muscovite-quartz simplectite; г – muscovite in the quartz dissolution area.

Thin section with analyzer. Scale bar is 0.1 (а, б, г) and 0.5 (в) mm.

же минерала. Возникает неравномернозернистый агрегат со сложными границами между индивидами (Попов, 2011). Присутствие такого кварца и фрагментация по краям зерен с перемещением их в тыльные части свидетельствует о совместном действии метаморфической дифференциации и деформационных процессов (Кирмасов, 2011).

Кварц, возникший по исходному кварцу, содержащему значительное количество флюидных включений, образуется в процессе рекристаллизации с растворением. Его зерна мелкие, с прямолинейными или закругленными границами каплевидной, бугорчатой, иногда скелетной формы, местами с зубчатыми границами. В них может проявляться дислокационное скольжение, но большей частью зерна характеризуются однородным погасанием и не содержат следов деформации.

Если исходные зерна кварца не содержат флюидных включений, то рекристаллизация происходит без растворения. В низкотемпературных ус-

ловиях при высоких скоростях деформации кварц подвергается хрупкому разрушению и пластической деформации, которая выражается в волнистом или мозаичном погасании, как следствие разориентировки кристаллической решетки в разных частях зерна. Под действием давления в зернах возникают полосы или зоны деформации, по которым обычно кристаллизуется тонко-мелкозернистый агрегат кварцевых зерен.

Кварц четвертой генерации – кварц перекристаллизации, которая сопровождается изменением формы и величины кристаллов «без привноса – выноса вещества из рассматриваемого объема и без изменения минерального состава системы» (Попов, 2011).

*Механизмы деформации в гранитах.* Во включениях гранитов и поздних жилах пегматитов и гранитов выявлены признаки, свидетельствующие о постоянном, но разном по интенсивности воздействии давления на породы в стадию регио-

Таблица 1

Механизмы деформации минералов в амфиболитах

Table 1

Mechanisms of mineral deformation in amphibolites

| Минералы   | Хрупкое разрушение                                                   | Растворение под давлением                     | Дислокационное скольжение                                         | Рекристаллизация                              | Форма зерен и кристаллов                                     |
|------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Амфибол    | Внутризерновые трещины, дробление                                    | Тени растворения, щелевидные трещины          | Волнистое погасание субзерновые структуры, структуры фрагментации | —                                             | Призматическая, преимущественно ксеноморфная                 |
| Плагиоклаз | Внутризерновые трещины, дробление                                    | Щелевидные полости, коррозионные границы,     | Волнистое погасание                                               | Образование тонких альбит-кварцевых агрегатов | Гипидиоморфная ксеноморфная                                  |
| Ортоклаз   | Дробление, трещины хрупкой деформации                                | Тени растворения, щелевидные полости          | Волнистое погасание                                               | —                                             | Гипидиоморфная и ксеноморфная                                |
| Биотит     | Дробление, внутризерновые трещины, микрокливажные зоны, микроскладки | Тени растворения                              | Волнистое погасание, микрокливажные зоны                          | —                                             | Пластинчатая, таблитчатая, ксеноморфная                      |
| Гранат     | Внутризерновые трещины, дробление                                    | —                                             | Субзерновые структуры с вращением                                 | —                                             | Ромбоэдрическая, трапецевидная, гексогональная, ксеноморфная |
| Кварц-1    | Внутризерновые трещины, дробление, блокирование                      | Тени растворения, полости, щелевидные трещины | Волнистое погасание, деформационные ламели                        | Рекристаллизация с миграцией границ зерен     | Ксеноморфная, близкая к изометричной                         |
| Кварц-2    | —                                                                    | —                                             | —                                                                 | —                                             | Округлая                                                     |

нального метаморфизма. Тектоническая нагрузка и температурный режим отличались в разных частях жилы, в результате чего произошло не только тектоническое преобразование исходных минералов в породе, но и появление новых генераций и новых минералов (табл. 3). Полевые шпаты несут признаки воздействия и преобразования. Интенсивно деформированные зерна плагиоклаза-олигоклаза содержат не только трещины хрупкой деформации, но и трещины и полости растворения. В полостях отлагается кварц и альбит, что свидетельствует о рекристаллизации с растворением и химическими превращениями. В зернах плагиоклаза, в которых механические двойники отсутствуют, рекристаллизация происходила в низкотемпературных условиях. Зерна плагиоклаза с механическими двойниками и

мозаичным или волнистым погасанием свидетельствуют о преобразовании в условиях более высокой температуры (около 900 °C) и умеренных деформаций (Tullis et al., 2000). Такие же преобразования в зернах плагиоклаза отмечены в жилах гранитов и пегматитов. В них, наряду с отдельными проявлениями кварц-альбитовых агрегатов в пустотах растворения, встречаются линзовидные прожилки, в которых в ассоциации с кварцем и альбитом встречается мусковит. В зернах кварца признаки растворения подтверждаются появлением лентовидного кварца, образование которого происходит в условиях растворения и быстрой рекристаллизации при температуре свыше 800 °C (Вернон, 1980).

*Механизмы деформации в жильном кварце.*

В зернах кварца проявлены основные механизмы

Таблица 2

## Механизмы деформации минералов в гнейсах

Table 2

## Mechanisms of deformation of minerals in gneiss

| Минералы                 | Хрупкое разрушение                                                                          | Растворение под давлением                                            | Дислокационное скольжение                    | Рекристаллизация                                                                        | Форма зерен и кристаллов                                |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Плагиоклаз               | Внутризерновые трещины, дробление, фрагментирование, механические (деформационные) двойники | Щелевидные трещины, тени растворения, коррозионные границы,          | Волнистое, косое погасание                   | Образование кварц-альбитовых агрегатов                                                  | Гипидиоморфная, ксеноморфная                            |
| Ортоклаз                 | Внутризерновые трещины                                                                      | Тени растворения, щелевидные трещины                                 | Косое погасание                              | Образование микроклина                                                                  | Гипидиоморфная, ксеноморфная                            |
| Слюды (биотит, мусковит) | Дробление, внутризерновые трещины, микрокливажные зоны, микроскладки                        | Следы растворения в виде щелевидных полостей                         | Волнистое погасание                          | —                                                                                       | Таблитчатая, пластинчатая, чешуйчатая                   |
| Кварц 1                  | Трещины хрупкой деформации, дробление, блокирование                                         | Тени растворения, щелевидные полости и трещины, коррозионные границы | Волнистое погасание, Фрагментарное погасание | Миграция границ зерен, образование на границе с плагиоклазом кварц-альбитовых агрегатов | Ксеноморфная, близкая к изометричной                    |
| Кварц 2                  | Внутризерновые трещины                                                                      | Следы растворения                                                    | Волнистое погасание                          | —                                                                                       | Каплевидная с прямолинейными или скругленными границами |
| Кварц 3                  | —                                                                                           | —                                                                    | —                                            | —                                                                                       | Близкая к изометричной                                  |
| Кварц 4                  | —                                                                                           | —                                                                    | —                                            | —                                                                                       | Полигональная                                           |

деформации и структуры растворения и отложения. Рекристаллизация с растворением и без растворения с образованием двух генераций происходила во всех разновидностях кварца.

Зерна кварца из кварц-полевошпатовых агрегатов подвергнуты тем же преобразованиям, что и зерна из реликтов вмещающих пород: разной степени деформации с трещинами, дроблением и брекчированием, рекристаллизации с растворением и без растворения, отложением новообразованных минералов, образованием порфировидных структур. По исходному кварцу первой генерации образуется рекристаллизованный кварц, который различается морфологией и присутствием или отсутствием включений. По исходному плагиоклазу-олигоклазу  $An_{24-26}$  образовались альбит и олигоклаз  $An_{18-20}$ .

В разных участках жилы интенсивность тектонического воздействия отличалась, что выразилось в разных текстурно-структурных особенностях. В зернах кварца с незначительным содержанием или вообще без флюидных включений при высоких скоростях деформации происходит хрупкое разрушение с образованием катакlastических и брекчиевых текстур (Кирмасов, 2011). Рекристаллизация происходит без растворения с образованием порфировидных и микрогранобластовых структур. В зернах с высоким содержанием флюидных включений рекристаллизация происходит с растворением, образованием коррозионных границ, деформационных полосок-ламелей и ленточного кварца.

Ленточный кварц, образованный по трещинам одного направления, в некоторых случаях ин-

Таблица 3

Механизмы деформации минералов в гранитах и пегматитах

Table 3

Mineral deformation mechanisms in granites and pegmatites

| Минералы                                                | Хрупкое разрушение                                                      | Растворение под давлением                                  | Дислокационное скольжение      | Рекристаллизация                          | Образование прожилков                                                                                 | Форма зерен и кристаллов                 |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Плагиоклаз                                              | Брекчирование, дробление, внутризерновые трещины, механические двойники | Тени растворения, щелевидные полости, коррозионные границы | Волнистое, мозаичное погасание | Образование кварца, альбита, парагонита   | Кварцевые, кварц-парагонитовые, мусковитовые, кварц-альбит-мусковитовые, кварц-микроклин-мусковитовые | Гипидиоморфная, таблитчатая              |
| Ортоклаз<br>Микроклин                                   | Дробление, брекчирование                                                | Тени растворения                                           | Пятнистое погасание            | —                                         | Кварцевые<br>Кварц-альбит-мусковитовые                                                                | Таблитчатая гипидиоморфная, ксеноморфная |
| Кварц 1                                                 | Дробление, блокование                                                   | Щелевидные трещины каверны                                 | Волнистое погасание            | Рекристаллизация с миграцией границ зерен | —                                                                                                     | Ксеноморфная, близкая к изометричной     |
| Кварц 2                                                 | —                                                                       | Следы растворения на границе с исходными зернами           | —                              | —                                         | —                                                                                                     | Округлая                                 |
| Кварц (в кварц-мусковитовом симплектите)                | Внутризерновые трещины                                                  | Тени растворения                                           | Волнистое погасание            | —                                         | —                                                                                                     | Удлиненная, удлиненно-скелетная          |
| Кварц (в кварц-цоизитовом, клиноцоизитовом симплектите) | Внутризерновые трещины                                                  | Тени растворения                                           | Волнистое погасание            | —                                         | —                                                                                                     | Каплевидная, червеобразная               |
| Мусковит                                                | Внутризерновые трещины, брекчирование                                   | Тени растворения                                           | Волнистое погасание            | —                                         | —                                                                                                     | Пластинчатая, чешуйчатая                 |
| Цоизит                                                  | Внутризерновые трещины                                                  | —                                                          | —                              | —                                         | —                                                                                                     | Удлиненная, призматическая, ксеноморфная |

тенсивно деформирован, вплоть до фрагментирования трещинами другого направления, что свидетельствует о длительности тектонического воздействия. Полевые шпаты в кварц-полевошпатовых агрегатах также содержат все признаки преобразования под воздействием давления. Плагиоклаз

содержит трещины хрупкой деформации, которые часто нарушают сплошность зерен, сдвигая отдельные части зерна, нередко с вращением. По данным экспериментальных исследований при высоком давлении (800 МПа) и относительно высокой степени деформации с увеличением температуры до

300 °С, горная порода на микроуровне претерпевает интенсивные хрупкие деформации с образованием трещин и дроблением зерен по плоскостям спайности (Tullis et al., 1973). Рекристаллизация с вращением, миграцией границ зерен и формированием порфиорокластических структур происходит при температуре около 700 °С (Кирмасов, 2011).

Механическое дробление зерен сопровождается хрупким разрушением. В условиях низкой ступени метаморфизма зерна кварца и полевых шпатов подвергаются дроблению, а при высоких скоростях деформации – хрупкому разрушению. Этот процесс создает катакластические текстуры. Пластические деформации вызывают разориентировку кристаллической решетки, что выражается в волнистом погасании. Растворение минералов под давлением и переотложение сопровождается фрагментацией зерен с образованием деформационных полосок-ламелей, границ коррозионного типа и зерен другой формы.

Механические (деформационные) двойники в плагиоклазе также являются показателями тектонического воздействия, которое по сравнению с дислокационным скольжением протекает быстро и требует более высоких напряжений (Кирмасов, 2011). Механические двойники проявлены особенно отчетливо в участках интенсивной деформации. По ряду признаков они отличаются от двойников роста (Григорьев, Жабин, 1975). Толщина двойниковых пластинок роста в зерне обычно колеблется в широких пределах, в то время как в механических двойниках толщина пластинок примерно одинакова в пределах каждой системы или в пределах зерна.

В кварцевых и кварц-полевошпатовых агрегатах, наряду с метаморфическими преобразованиями, отмечены и метасоматические (табл. 4). К ним относятся преобразования, связанные с формированием прожилков внутри зерен микроклина и плагиоклаза, образованных по трещинам скола, местами с сигмоидальным изгибом в центре. Такие жилы возникают в зонах хрупко-пластического скола, где происходит одновременное разрастание трещин и их раскрытие (Durney, Ramsay, 1973). Жилы приобретают сигмоидальный изгиб за счет разной величины вращения, изменяющейся от центральной части жилы к окончаниям. Свидетельством метасоматических преобразований являются симплектиты, образование которых связано с воздействием растворов или флюидов с K, Na, Ca, Fe и SiO<sub>2</sub> и изменением условий кристаллизации (Кабанова, 2016). Образование мирмекитов происходит

при замещении калиевых полевых шпатов кислым плагиоклазом в случаях циркуляции калий- и натрийсодержащих растворов.

В процессе метасоматоза кристаллизуются новые генерации минералов, отличающиеся от исходных формой, размером, нередко оптическими свойствами и, главное, включениями других минералов. Зерна метасоматического кварца обычно содержат включения слюды, пластинок гематита, иногда эпидота или цоизита. Погасание может быть волнистым или однородным в зависимости от условий кристаллизации. Если кристаллизация происходила под действием давления, то кристаллическая решетка новообразованных зерен могла деформироваться и погасание будет волнистым.

В процессе метасоматоза зерна плагиоклаза замещаются кварцем и микроклином, ортоклаз – плагиоклазом. В последнем случае образуются мирмекиты – сростки альбита с кварцем. Часто встречаются кварц-мусковитовые, кварц-альбит-мусковитовые или кварц-микроклин-мусковитовые и кварц-цоизитовые симплектиты. Кварц в них характеризуется разной формой зерен: наряду с каплевидной и червеобразной, как в мирмекитах, имеется удлиненная или скелетная форма и более крупные размеры зерен. Скелетные зерна в симплектитах могут образоваться из растворов, содержащих примеси, не входящие в кристаллическую структуру основного породообразующего минерала. Примеси оседают на гранях и тормозят их рост. Рост скелетных кристаллов возможен и в случае растворения исходных зерен, содержащих включения, и последующего отложения новообразованных зерен тех же минералов или минералов другого состава.

Микроклин образовался двумя путями. Один – в процессе растворения исходных полевых шпатов под давлением, где он встречается в парагенезисе с кварцем и альбитом, другой – метасоматическим путем вместе с кварцем, альбитом, мусковитом и цоизитом.

О неоднократном воздействии давления в процессе становления Беркутинской жилы свидетельствуют деформации, проявленные как в зернах исходных, так и метасоматических минералов. Так, пластинки мусковита из кварц-мусковитового симплектита интенсивно деформированы, часто фрагментированы. Между их фрагментами местами встречается тонкозернистый кварц, а в некоторых зернах отмечаются микрокливажные зоны.

Таблица 4

Стадии преобразования пород Беркутинской жилы

Table 4

Transformation stages of rocks the Berkut vein

| Породы     | Метаморфогенная            |                                                      |                                                    |                                                                                                        | Структуры и текстуры исходных пород                         | Структуры и текстуры измененных пород                                                                      |
|------------|----------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            | Автометаморфическая        | Пневмотолитовая                                      | Гидротермальная                                    | Метасоматическая                                                                                       |                                                             |                                                                                                            |
| Пегматиты  | Кварц-альбитовые мирмекиты | Альбитизация, грейзенизация.                         | Турмалинизация, кварц-турмалиновые прожилки        | Симплектиты и прожилки: кварц-мусковитовые, кварц-клиноцоизитовые                                      | Гипидиоморфная, порфиоровидная. Текстура массивная          | Структуры гранобластовая, порфиробластовая, порфирокластовая. Текстуры катакlastическая, брекчиевая        |
| Граниты    | Кварц-альбитовые мирмекиты | —                                                    | —                                                  | Симплектиты: кварц-мусковитовые, кварц-цоизитовые, кварц-альбит-цоизитовые, кварц-альбит-микроклиновые | Гипидиоморфная, порфиоровидная. Текстура массивная          | Структуры гранобластовая, порфиробластовая, порфирокластовая. Текстуры катакlastическая, брекчиевая        |
| Гнейсы     | —                          | Альбитизация калиевого полевого шпата, грейзенизация | Биотитизация амфибола, хлоритизация                | Прожилки: магнетит-кварцевые, магнетит-биотит-кварцевые, кварц-турмалиновые                            | Гранобластовая, лепидогранобластовая. Текстура гнейсовилная | Структура бластопорфировая. Текстуры катакlastическая, пльчатая, брекчиевая                                |
| Амфиболиты | —                          | Альбитизация калиевого полевого шпата, грейзенизация | Биотитизация амфибола, хлоритизация, амфиболизация | Апатит-кварцевые агрегаты                                                                              | Нематогранобластовая, порфиробластовая. Текстура полосчатая | Структуры порфиробластовая, порфирокластовая. Текстуры катакlastическая, брекчиевая, пльчатая, сланцеватая |

ВЫВОДЫ

Результаты детального петрографического изучения минеральных агрегатов Беркутинской жилы позволили выяснить роль процессов метаморфизма и метасоматоза в формировании и преобразовании главных пороодообразующих минералов жилы. Воздействие давления на минералы вызвало разную степень их преобразования, вплоть до полного изменения, сопровождающегося появлением новых генераций. Изменились не только структурно-текстурные особенности агрегатов, но и их количественно-минералогический состав. Ряд характерных признаков, обнаруженных в измененных минералах, позволили в них выделить несколько генераций на основании отличий морфологии,

размеров, характера погасания зерен и присутствия (или отсутствия), в них включений.

Установлены признаки, которые могут свидетельствовать о процессах, ответственных за образование каждой генерации минералов. Среди них главными являются структурно-текстурные, кристаллооптические, ассоциативные и некоторые другие (включения в минералах, их количество, состав и др.). Образование лейкократовых минералов нескольких генераций свидетельствует о разных условиях их кристаллизации. Особое место занимает гранулированный кварц нескольких генераций, обязанный своим происхождением процессам рекристаллизации (с растворением и без), отложения и перекристаллизации. Эти отличия свидетельствуют о перерывах в процессе их образования,

т. е. изменении условий кристаллизации. Наличие деформационных структур в породах и минералах разных генераций свидетельствует о длительности воздействия давления на всем протяжении формирования и преобразования жилы. Степень деформационных преобразований свидетельствует о раз- ных силе напряжений и температурном режиме в разных участках жилы. Приведенные выше данные свидетельствуют о широком температурном диапа- зоне до 700 °С, при котором происходили измене- ния пород и минералов Беркутинской жилы.

## ЛИТЕРАТУРА

- Белковский А.И. (2004) Кыштымское месторож- дение прозрачного жильного кварца: геодинамическая, «возрастная» позиция и генезис кварцевых жил (Сред- ний Урал). *Материалы Международного семинара «Кварц. Кремнезем»*. Сыктывкар, 189–191.
- Белковский А.И. (2011) Геология и минералогия кварцевых жил Кыштымского месторождения (Средний Урал). Миасс, ИМин УрО РАН, 234 с.
- Вернон Р.Х. (1980) Метаморфические процессы. М., Недра, 226 с.
- Григорьев Д.П., Жабин А.Г. (1975) Онтогенез ми- нералов (индивиды). М., Наука, 339 с.
- Игуменцева М.А. (2012) Кварц Кыштымского и Кузнечихинского месторождений: состав, структура, тех- нологические свойства. Екатеринбург, УрО РАН, 166 с.
- Кабанова Л.Я. (2011) Роль типоморфных особен- ностей кварца в оценке качества сырья. *Материалы Всероссийского совещания «Современные проблемы из- учения и использования минерально-сырьевой базы квар- цевого сырья»*. Миасс-Екатеринбург, ИМин УрО РАН, 81–86.
- Кабанова Л.Я. (2016) Симплектиты как показате- ли декомпрессионных условий образования. *Материа- лы 68-ой научной конференции «Наука ЮУрГУ»*. Челя- бинск, ЮУрГУ, 275–283.
- Кирмасов А.Б. (2011) Основы структурного ана- лиза. М., Научный мир, 368 с.
- Корекина М.А., Савичев А.Н. (2023) Элементы- примеси в кварце гидротермально-метаморфогенного и гидротермально-метаморфогенно-метасоматического генезиса (Южный Урал). *Известия Томского политех- нического университета. Инжиниринг ресурсов*, 334(2), 185–195.
- Кузнецов Н.С., Пужаков Б.А., Шох В.Д. и др. (2008) Государственная геологическая карта Российской федерации масштаба 1:200 000. Серия Южно-Уральская, лист N-41-1. Объяснительная записка. Челябинск, 320 с.
- Мельников Е.П. (1988) Геология, генезис и про- мышленные типы месторождений кварца. М., Недра, 216 с.
- Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. (2007) Минералогия шовных зон Урала, 3. Уфалейский гнейсово-амфиболитовый комплекс (Южный Урал). Ека- теринбург, ИГГ УрО РАН–УТГУ, 187 с.
- Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Сазонов В.Н. (2011) Онтогенетические типы кварца жил выполнения. Материалы Всероссийского совещания «Современные проблемы изучения и использования минерально-сырь- евой базы кварцевого сырья». Миасс-Екатеринбург, ИМин УрО РАН, 131–136.
- Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Недосекова И.А., Савичев А.Н. (2016) Гранитные пегматиты, карбонатиты и гидротермалиты Уфалейского метаморфического ком- плекса. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН–УТГУ, 283 с.
- Огородников В.Н., Савичев А.Н., Поленов Ю.А. (2018) Геолого-структурное положение кварцево-жиль- ных образований уфалейского гнейсо-мigmatитового комплекса (Южный Урал) как результат полихронного и полигенного генезиса. *Литосфера*, 18(1), 99–110.
- Поленов Ю.А. (1977) Кварцевые жилы перекри- сталлизации и их связь с процессами метаморфизма. *Геология, тектонический режим и металлогения мета- морфизма*. Свердловск, 2, 19–21.
- Поленов Ю.А. (2008) Эндогенные кварцево-жиль- ные образования Урала. Екатеринбург, УГГУ, 271 с.
- Попов В.А. (2011) Практическая генетическая ми- нералогия. Екатеринбург, УрО РАН, 167 с.
- Савичев А.Н., Красильников П.А. (2019) Стати- стическая характеристика элементов-примесей в особо чистом кварце уфалейского типа (Уфалейский кварце- во-жильный район, Южный Урал). *Минералогия*, 5(1), 46–56.
- Durney D.W., Ramsay J.G. (1973) Incremental strains measured by sintectonic crystal growth. *Gravity and Tectonics*, 67–96.
- Tullis J.A., Christie J.M., Griggs D.T. (1973) Microstructural and preferred orientation of experimentally deformed quartzites. *Bulletin of Geological Society of America*, 84, 297–314.
- Tullis J.A. (1983) Deformation of feldspar. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2, 297–323.
- Tullis J., Stunitz H., Teyssier C. et al (2000). Deformation microstructures in quartz-feldspathic rocks // Stress, Structure and Strain: A volume in honour of Win D. Means. Ed. by Mark Jessell, and Janos Urai. *Jornal of the Virtual Explorer, Electronic Edition*, ISSN 1441-8142, V.2, Pap. 16, doi: 10,3809/jvirtex, 200, 00019

## REFERENCES

- Belkovsky A.I. (2004) Kyshtym deposit of transparent vein quartz: geodynamic, “age” position and genesis of quartz veins (Central Urals). *Materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya “Kvarts. Kremnezem” (Materials of the International Seminar “Quartz. Silica”)*. Syktyvkar, 189–191. (in Russian)

- Belkovsky A.I. (2011) Geology and mineralogy of quartz veins of the Kyshtym deposit (Central Urals). Miass, IMin UrO RAN, 234 p. (in Russian)
- Grigoriev D.P., Zhabin A.G. (1975) Ontogeny of minerals (individuals). Moscow, Nauka, 339 p. (in Russian)
- Igumentseva M.A. (2012) Quartz of the Kyshtym and Kuznechikha deposits: composition, structure, and technological properties. Yekaterinburg, UrO RAN, 166 p. (in Russian)
- Kabanova L.Ya. (2011) The role of typomorphic features of quartz in assessment of quality of raw materials. *Materialy Vserossiiskogo soveshchaniya "Sovremennye problemy i ispolzovaniya mineralno-syr'evoi bazy kvartseвого syr'ya"* (Materials of the All-Russian meeting "Modern problems of studying and using the mineral resource base of quartz raw materials"). Miass-Yekaterinburg, IMin UrO RAN, 81–86. (in Russian)
- Kabanova L.Ya. (2016) Simplectites as indicators of decompression formation conditions. *Materialy 68-i nauchnoi konferentsii "Nauka YuUrGU"* (Materials of the 68th Scientific Conference "Science of the SUSU"). Chelyabinsk, YuUrGU, 275–283. (in Russian)
- Kirmasov A.B. (2011) Fundamentals of structural analysis. Moscow, Nauchny Mir, 368 p. (in Russian)
- Koryakina M.A., Savichev A.N. (2023) Trace elements in quartz of hydrothermal-metamorphogenic and hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic genesis (South Urals). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 334(2), 185–195. (in Russian)
- Kuznetsov N.S., Puzhakov B.A., Shokh V.D., et al. (2008) State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. Series South Urals, sheet N-41-1. Explanatory note. Chelyabinsk, 320 p. (in Russian)
- Melnikov E.P. (1988) Geology, genesis and economic types of quartz deposits. Moscow, Nedra, 216 p. (in Russian)
- Ogorodnikov V.N., Sazonov V.N., Polenov Yu.A. (2007) Mineralogy of suture zones of the Urals, 3. Ufaley gneiss amphibolite complex (South Urals). Yekaterinburg, IGG UrO RAN–UTGU, 187 p. (in Russian)
- Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Sazonov V.N. (2011) Ontogenetic types of quartz veins *Materialy Vserossiiskogo soveshchaniya "Sovremennye problemy i ispolzovaniya mineralno-syr'evoi bazy kvartseвого syr'ya"* (Materials of the All-Russian meeting "Modern problems of studying and using the mineral resource base of quartz raw materials"). Miass-Yekaterinburg, IMin UrO RAN, 131–136. (in Russian)
- Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Nedosekova I.A., Savichev A.N. (2016) Granite pegmatites, carbonatites and hydrothermalites of the Ufaley metamorphic complex. Yekaterinburg, IGG UrO RAN–UTGU, 283 p. (in Russian)
- Ogorodnikov V.N., Savichev A.N., Polenov Yu.A. (2016) Geological and structural setting of quartz-vein formations of the Ufaley gneiss-migmatite complex (South Urals) as a result of polychronous and polygenic genesis. *Litosfera (Lithosphere)*, 18(1), 99–110. (in Russian)
- Polenov Yu.A. (1977) Quartz veins of recrystallization and their connection with the processes of metamorphism. *Geologiya, tektonicheskii rezhim i metallogeniya metamorfizma (Geology, Tectonic Regime and Metallogeny of Metamorphism)*, 2, 19–21. (in Russian)
- Polenov Yu.A. (2008) Endogenous quartz veins of the Urals. Yekaterinburg, UGGU, 271 p. (in Russian)
- Popov V.A. (2011) Practical genetic mineralogy. Yekaterinburg, UrO RAN, 167 p. (in Russian)
- Savichev A.N., Krasilnikov P.A. (2019) Statistic characteristic of trace elements in especially pure quartz of the Ufalei type (Ufalei quartz vein region, South Urals). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 5(1), 46–56. (in Russian)
- Durney D.W., Ramsay J.G. (1973) Incremental strains measured by sintectonic crystal growth. *Gravity and Tectonics*, 67–96.
- Tullis J.A., Christie J.M., Griggs D.T. (1973) Microstructural and preferred orientation of experimentally deformed quartzites. *Bulletin of Geological Society of America*, 84, 297–314.
- Tullis J.A. (1983) Deformation of feldspar. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2, 297–323.
- Vernon R.H. (1980) Metamorphic processes. M.: Nedra, 226 p. (in Russian)

### Информация об авторе

Л.Я. Кабанова – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Ильменского государственного заповедника, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, [kablar39@mail.ru](mailto:kablar39@mail.ru)

### Information about the author

L.Ya. Kabanova – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher of the Ilmeny State Reserve, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia, [kablar39@mail.ru](mailto:kablar39@mail.ru)