УДК 553.411.071 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-3-63-73

Кварцевые жилы и поздние зоны дробления Куларского золотоносного района, Якутия (микроструктуры и рентгенолюминесценция кварца)

Олег Анатольевич СУСТАВОВ*

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Цель работы – изучение типоморфных особенностей кварца безрудных и золотоносных кварцевых жил и несущих золотосеребряное оруденение поздних зон дробления центральной части Куларского золотоносного района (Якутия).

Материалы и методы. Изучались пробы кварца из жил и зон дробления, отобранные при минералогическом картировании обнаженных участков местности и из керна скважин ПГО «Якутскгеология». Описано 380 шлифов кварца с определением размеров, формы и характера ориентировки *c*-осей кварца, степени его перекристаллизации (П), а также размеров, формы и характера локализации зерен П кварца. Измерена рентгенолюминесценция (РЛ) кварца отобранных проб в области 350–550 нм.

Результаты и выводы. В углеродисто-терригенных осадочных породах района, метаморфизованных в условиях низов зеленосланцевой фации, присутствуют ранние поперечно секущие кварцевые жилы $Ж_1$, образовавшиеся до или в самом начале коллизионного сжатия, и более поздние субсогласные раннеколлизионные кварцевые жилы $Ж_2$. Кварц $Ж_1$ подвержен относительно крупнозернистой (0,05–0,18 мм) П, а кварц $Ж_2$ – более низкотемпературной относительно мелкозернистой (0,02–0,07 мм) П. От $Ж_2$, не несущих оруденения, золоторудные $Ж_2$ месторождения Кыллах отличаются связью с зонами скалывания (shear zones), наличием кварца полосчатой текстуры и интенсивным развитием стилолитовых швов. Близость ориентировки штрихов скольжения на стенках и внутри Au-кварцевых $Ж_2$ к направлению региональной линейности растяжения вмещающих пород отвечает образованию этих $Ж_2$ при формировании жиловмещающего надвига. Нередкая приуроченность Au к стилолитовым швам в кварце указывает на выделение по крайней мере части золота при или после эпизодов поперечного сжатия субсогласных кварцевых жил. Гипидиоморфный и гребенчатый кварц поздних зон дробления является индикатором постскладчатых разломов, с которыми связано эпитермальное Au–Ag оруденение. РЛ кварца $Ж_1$ и $Ж_2$ в области 300–550 нм характеризуется пиком РЛ 490 нм, а РЛ кварца поздних зон дробления – 390–415 нм. Кварц с РЛ 390–415 нм отличается кварца с РЛ 490 нм более высокими содержаниями Li.

Ключевые слова: Восточная Якутия, жильный кварц, кварцевые жилы, зоны дробления, рентгенолюминесценция, перекристаллизация, золоторудные месторождения.

Введение

Куларский район – один из крупных золотоносных районов Якутии, где из россыпей извлечено 170 т золота [1, 2]. Здесь имеются также отдельные относительно слабо изученные коренные золоторудные месторождения [3] и проявления золотосеребряной минерализации [1, 4].

Данный район располагается в северной части Кулар-Нерского турбидитового террейна Верхояно-Колымской складчатой области, сложенного терригенно-осадочными породами пермского и триасового возраста, смятыми в складки в позднеюрском–раннемеловом периоде при коллизии Сибирского кратона и Колымо-Омолонского супертеррейна.

Среди геологических структур здесь устанавливается несколько крупных кулисообразно расположенных опрокинутых складок северо-восточного простирания, разделенных надвигами и взбросами северо-западной вергентности, в том числе ориентированная в северо-северо-восточном направлении Улахан-Сисская антиклиналь длиной более 100 км и шириной до 20 км (рис. 1). Крылья антиклинали образованы породами туогучанской, а ядро – тарбаганнахской свиты пермского возраста. В своде данной складки предполагается невскрытый крупный интрузив гранитоидного состава. С запада и востока антиклиналь окаймляется относительно узкими (10–15 км) сложнодислоцированными синклиналями, сложенными породами триаса, отделенными от пермских пород продольными взбросо-надвигами.

✉fgg.mpg@m.ursmu.ru

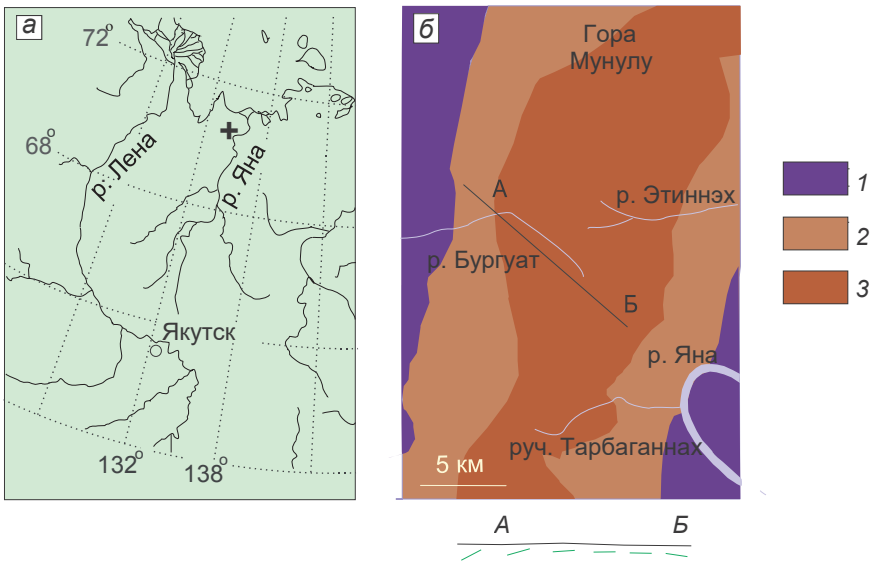

Рисунок 1. Географическое положение (+) района (*а*) и схема геологического строения северной части Улахан-Сисской антиклинали (*б*); схематизировано по геологической карте масштаба 1 : 1 000 000: *1* – триас; *2* – туогучанская свита пермского возраста; *3* – тарбаганнахская свита пермского возраста; внизу – ориентировка кливажа S_1 [5] в разрезе по *АБ* (*Б* – золоторудное месторождение Кыллах)

Figure 1. Geographical position (+) of the area (*a*) and the scheme of the geological structure of the northern part of the Ulakhan-Sis anticline (*б*); schematized according to a geological map of a scale of 1 : 1,000,000: *1* – Triassic; 2 – Tuoguchan formation of Permian age; *3* – Tarbagannakh formation of Permian age; at the bottom is the orientation of cleavage S_1 [5] in the section along the *АБ* (*Б* – Kyllakh gold deposit)

Статья посвящена рассмотрению кварцевых жил и более поздних минерализованных зон дробления [1] (mineralized crush zones [2]), распространенных в северной части свода Улахан-Сисской антиклинали между ручьем Тарбаганнах на юге и горой Мунулу на севере. Это площадь развития углеродисто-терригенных пород тарбаганнахской свиты пермского возраста – аргиллитов и алевролитов с редкими прослоями песчаников. Наблюдается кливаж S_1, ориентированный субпараллельно слоистости (рис. 1, *б*). Породы подвержены метаморфизму зеленосланцевой фации – от наиболее широко развитой мусковит-хлоритовой субфации до местами отмечающейся биотитовой субфации [6].

В статье приводятся ранее не опубликованные данные, полученные на основании обобщения материалов и нового изучения проб кварца и вмещающих пород, отобранных при проведении минералогического картирования в ходе поисковых работ на золото в данном районе. Продолжение исследований было стимулировано возможностью использования некоторых новых методов изучения вмещающих пород и жильного кварца, появлением новых представлений о процессах образования кварцевых жил и новых данных по геологии района, прогрессом в изучении типоморфизма жильного кварца, а также проведением широких площадных исследований аналогичных кварцевых жил в других регионах.

Методы исследования

Полевые наблюдения кварцевых жил, зон дробления и отбор проб для исследования производились при минералогическом картировании изучаемой площади с отбором проб кварца в процессе исхаживания обнаженных участков местности по широтным профилям, располагающимся через 50 м друг от друга, а также при изучении керна скважин Куларской поисково-разведочной партии ПГО «Якутскгеология». На золоторудном месторождении Кыллах измерялась ориентировка кливажа и линейности во вмещающих породах, а также поверхностей скольжения и штрихов скольжения на стенках и внутри золотокварцевых жил.

Из отобранных проб было изготовлено 380 шлифов кварца. Шлифы вырезались поперек стенок жил, в отдельных случаях из одного образца изготавливались шлифы по трем взаимно перпендикулярным направлениям. В шлифах производились исследование разновидностей кварца, минеральных примесей и флюидных включений в кварце жил и зон дробления, изучение стилолитовых швов и распределения микровключений золота в рудоносном кварце.

При изучении под микроскопом шлифов кварца определялись размеры, форма и характер ориентировки *c*-осей индивидов кварца, а также степень перекристаллизации (П) кварца, размеры, форма и характер локализации зерен П в индивидах исходного кварца. За размер зерен П принимался поперечник выбранного в шлифе зерна, имеющего визуально средние для изучаемой совокупности зерен размеры. В качестве справочных пособий при описании в шлифах особенностей микроструктур, деформации кварца и примесей в нем использовались работы [7–10].

Измерения рентгенолюминесценции кварца в области 350–550 нм проведены в Институте геологии и геохимии УрО РАН под руководством С. Л. Вотякова по методике, описанной в работе [11].

Результаты исследования

Кварцевые жилы

Среди терригенно-осадочных пород на изученной площади широко распространены кварцевые жилы.

В данной статье рассматриваются две главные группы кварцевых жил, выделяемые по относительному возрасту, условиям залегания и характеру жильного кварца.

Первая группа – ранние [12] жилы ($Ж_1$) мощностью до 0,4 м, пересекающие песчаники и алевролиты под углом 60–90° к слоистости. Эти жилы сложены кварцем, индивиды которого (до 1 см в поперечнике) преимущественно вытянуты поперек стенок жил.

Кварц $Ж_1$ подвержен пластической деформации. Изгибы кристаллической решетки кварца, возникшие в индивидах при пластической деформации, преобразованы в совокупности слабо разориентированных между собой субзерен полигонизации (рис. 2).

Кроме того, кварц $Ж_1$ подвергся перекристаллизации ($П_1$). Зерна $П_1$ образуют преимущественно полосы между индивидами исходного кварца. Внутри индивидов зерна $П_1$ встречаются реже [6] и в данной статье не рассматриваются. Степень $П_1$ изменяется от 10 до 90 %, размеры зерен $П_1$ 0,05–0,18 мм (рис. 2, *а*).

Вторая группа кварцевых жил ($Ж_2$) – наиболее распространенные более поздние, чем $Ж_1$ (пересекают под-

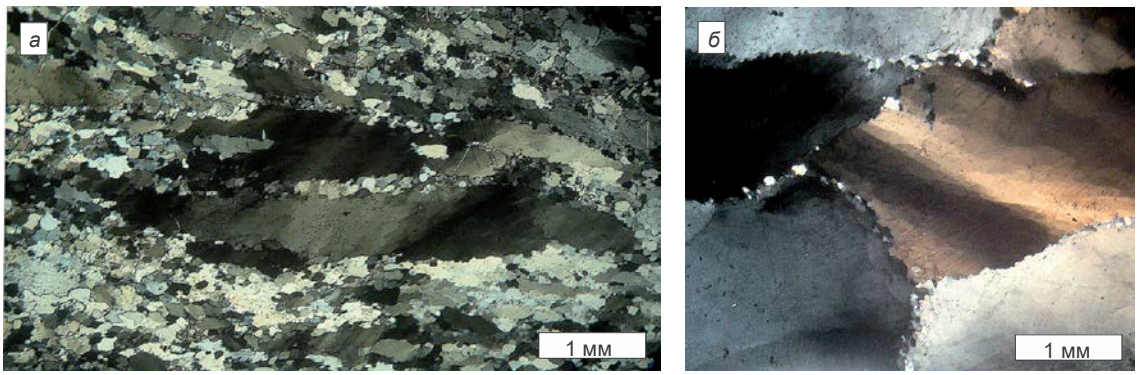

Рисунок 2. Перекристаллизация (мелкие зерна) и полигонизация (в полосах волнистого угасания) кварца: *а* – $П_1$; *б* – $П_2$ (см. текст); николи скрещены

Figure 2. Recrystallization (fine grains) and polygonization (in bands of wavy extinction) of quartz: *а* – $П_1$; *б* – $П_2$ (see text); nichols are crossed

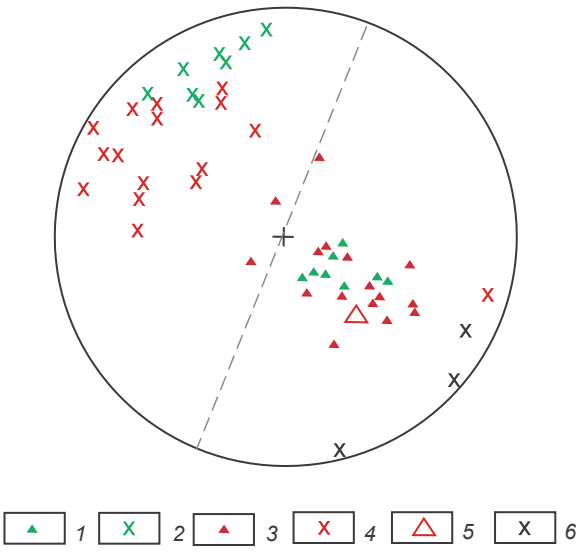

Рисунок 3. Ориентировка кливажа *1* и линейности *2* вмещающих пород вблизи от золотокварцевой жилы месторождения Кыллах, а также поверхностей скольжения *3* и штрихов скольжения *4* на стенках и внутри жилы; *5* – общая ориентировка жилы; *6* – ориентировка линейности в породах северной части профиля *АБ* (рис. 1); пунктир – направление оси Улахан-Сисской антиклинали по рис. 1

Figure 3. Orientation of the cleavage *1* and lineation *2* of the host rocks near the gold-quartz vein of the Killah deposit, as well as sliding surfaces *3* and sliding strokes *4* on the walls and inside the vein; *5* – general orientation of the vein; *6* – orientation of lineation in the rocks of the northern part of the *АБ* profile (Fig. 1); dotted line – the direction of the axis of the Ulakhan-Sis anticline according to fig. 1

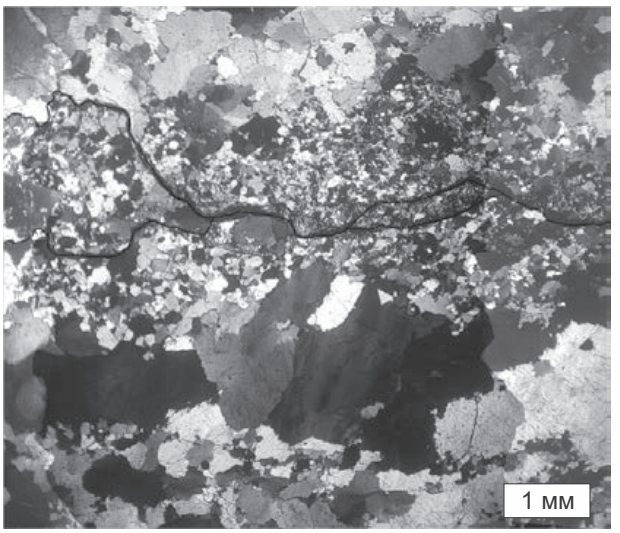

Рисунок 4. Полосчатый кварц месторождения Кыллах. К углеродистому стилолитовому шву (черный) прилегает грязный (с примесями рассеянного углеродистого вещества и серицита) метасоматический кварц с размером зерен около 0,08 мм, с переходами с удалением от стилолитового шва к более чистому перекристаллизованному кварцу с размером зерен до 0,12 мм, а затем к полосам исходного крупнозернистого кварца с размером индивидов до 1 мм и более

Figure 4. Banded quartz of the Killah deposit. Adjacent to the carbonaceous stylolite seam (black) is dirty (with admixtures of dispersed carbonaceous matter and sericite) metasomatic quartz with an average grain size near of 0.08 mm, with transitions moving away from the stylolite seam to purer recrystallized quartz with an average grain size near of 0,12 mm, and then to bands of the original coarse-grained quartz with an individual size of up to 1 mm and more

вергшиеся перекристаллизации $Ж_1$), согласные и секущие жилы мощностью до 2–3 м, сложенные аллотриоморфным кварцем. Индивиды (иногда размерами до 1 см и более в поперечнике) в этих жилах имеют неправильные ограничения и нередко близкую к изометричной форму. Характерны мелкозубчатые границы индивидов (рис. 2, *б*). Кварц $Ж_2$ содержит двух- и трехфазовые (с самостоятельной фазой жидкой CO_2) флюидные включения с температурами гомогенизации 280–310 °С (9 проб).

Как и кварц $Ж_1$, кварц $Ж_2$ повсеместно подвержен пластической деформации и перекристаллизации ($П_2$), хотя и значительно более слабым, чем наблюдаемые в $Ж_1$. Ниже рассматривается $П_2$, приуроченная к границам между индивидами $Ж_2$ (рис. 2, *б*). Размеры зерен $П_2$ преимущественно 0,02–0,06 мм. Степень $П_2$ чаще всего не превышает 5–10 % от общего количества присутствующего в жиле кварца.

В восточной части Улахан-Сисской антиклинали на приуроченном к надвигу [2, 3] золоторудном месторождении Кыллах (рис. 1, *б*) распространены золотоносные субсогласные $Ж_2$.

Одна из наиболее крупных золотокварцевых жил (протяженностью до 700 м и мощностью до 2–3 м) пересекает слоистость и ориентированный субпараллельно слоистости кливаж вмещающих пород под углом 15–20° (рис. 3). Во вмещающих породах возле жилы, на ее стенках и внутри жилы наблюдаются многочисленные располагающиеся субпараллельно стенкам жилы поверхности скольжения. Штрихи на поверхностях скольжения ориентированы в северо-западном направлении, в среднем под 20–30° к направлению наблюдаемой во вмещающих породах линейности растяжения [5], отклоняясь от этого направления в сторону нормали к оси Улахан-Сисской антиклинали (рис. 3).

В рудоносных жилах месторождения наряду с кварцем массивной текстуры (подобном $Ж_2$, распространенному за пределами месторождения, – рис. 2, *б*) присутствует полосчатый [13] кварц (рис. 4), образованный многочисленными, параллельными стенкам жил, полосами кварца толщиной до 1 см – *laminated* [7, 14], *ribbon* [15] *quartz*. Охарактеризованная ранее крупная золотокварцевая жила в осевой части сложена массивным, а у стенок – полосчатым кварцем.

Подобный полосчатый кварц присутствует на многих приуроченных к разломам золоторудных месторождениях [7, 13–15]. На некоторых месторождениях к этому кварцу тяготеют почти все имеющие практическое значение золотоносные руды [13, 15]. На месторождении Кыл-

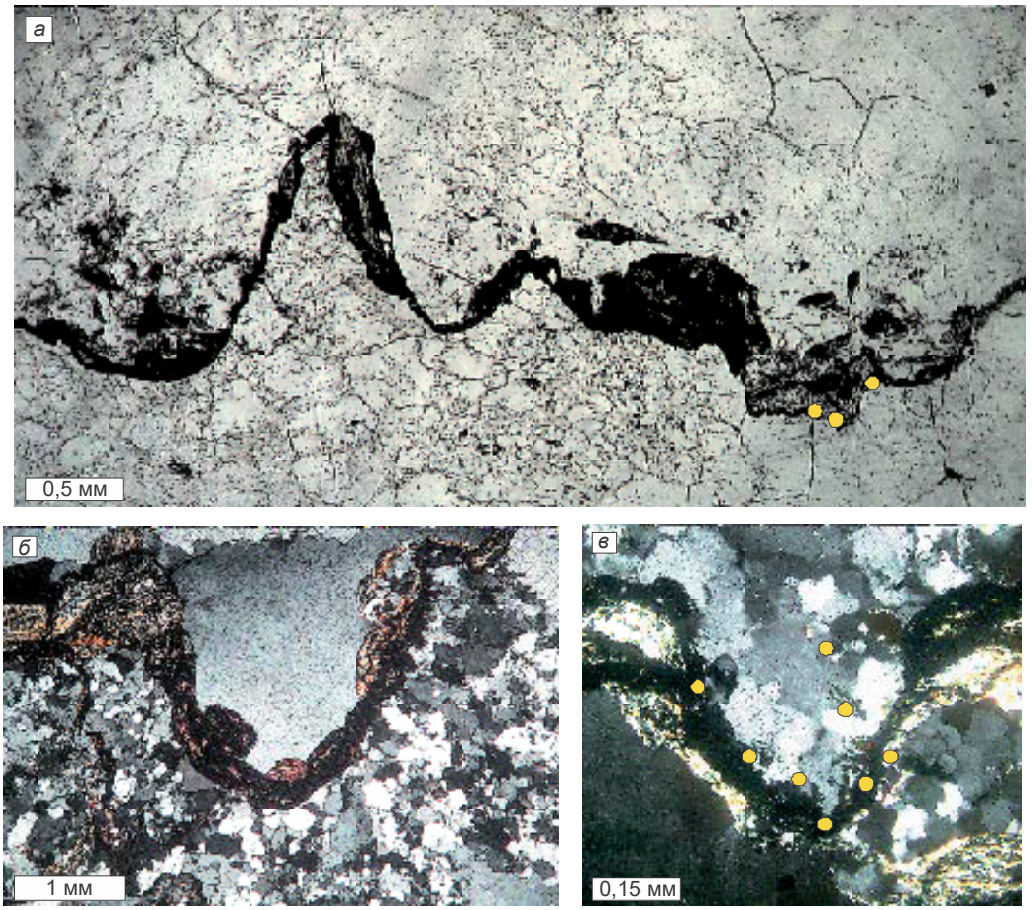

Рисунок. 5. Углеродисто-серицитовые и углеродистые стилолитовые швы с обломками углеродизированных и серицитизированных аргиллитов (желтые кружки – места нахождения выделений золота размерами 0,002–0,03 мм) в полосчатом кварце месторождения Кыллах: *а* – без анализатора; *б*, *в* – николи скрещены

Figure 5. Carbonaceous-sericite and carbonaceous stylolite seams with fragments of carbonized and sericitized mudstones (yellow circles are the locations of gold grains measuring 0,002–0,03 mm) in the banded quartz of the Killah deposit: *а* – without an analyzer; *б*, *в* – nichols crossed

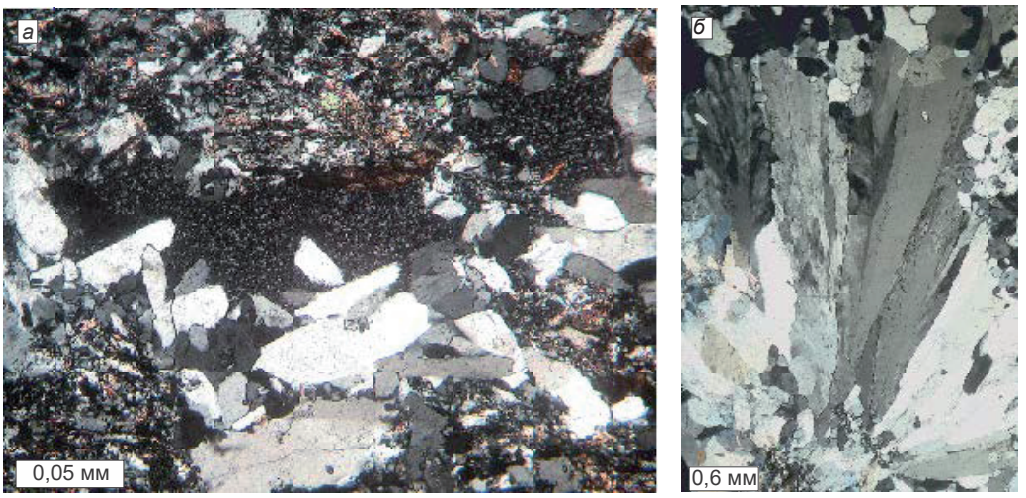

Рисунок 6. Кварц поздних зон дробления: *а* – гнездо нерасщепленного гипидиоморфного кварца (белое) с каолинитом (темное в центре) в метаалевролите; *б* – гребенчатый кварц; николи скрещены
Figure 6. Quartz from the late crushing zones: *а* – crystals of hypidiomorphic quartz (white) with kaolinite (dark in the center) in a metasiltstone; *б* – comb quartz; nichols are crossed

лах полосчатому кварцу также свойственна наиболее высокая золотоносность [1].

В полосчатом кварце вдоль границ между полосами кварца часто наблюдаются стилолитовые швы. Толщина последних до 0,2 мм, глубина стилолитовых зубцов – до 1–2 мм. Внутри швов, у их краев и вблизи от них могут присутствовать отдельные достаточно крупные уплощенные фрагменты и (или) мелкие обломки вмещающих пород (рис. 5), подверженных окварцеванию, серицитизации, углеродизации, реже хлоритизации. Интенсивное развитие стилолитовых швов является одним из отличий золотокварцевых жил месторождения от прочих кварцевых жил данного района.

Стилолитовые швы сложены главным образом серицитом и углеродистым веществом. Серицит преимущественно представлен в разной степени сохранившимися остатками включений серицитизированных пород (рис. 5). Углеродистое вещество может быть рассеянным в обломках пород и располагаться по границам этих обломков (рис. 5, *в*), хотя чаще всего оно образует чисто углеродистые стилолитовые швы и чисто углеродистые части серицит-углеродистых швов, в том числе пересекающие серицитизированные обломки пород (рис. 5, *в*, *г*). Нередко чисто углеродистые стилолиты идут по краям полос серицитсодержащих обломков породы.

Золотое оруденение на месторождении связано с арсенопирит-кварцевой и преобладающей галенит-сфалерит-халькопиритовой с Au минеральными ассоциациями. Выделения Au в полосчатом кварце приурочены к гнездам относительно мелкозернистого кварца, к стыкам индивидов и трещинам в кварце (нередко вместе с галенитом), а также (рис. 5, *а*, *в*) к стилолитовым швам (особенно наиболее крупным).

Поздние зоны дробления

Улахан-Сисская антиклиналь разбита многочисленными постскладчатыми разрывами северо-западного простирания – преимущественно сбросами со сдвиговой составляющей [3, 16]. К этим разломам приурочены минерализованные зоны дробления, которые являются более поздними, чем кварцевые жилы $Ж_1$ и $Ж_2$. Эти зоны дробления пересекают $Ж_1$ и $Ж_2$, в них нередко встречаются обломки кварца этих жил. В восточной части изученной площади (в районе золоторудного месторождения Кыллах) к поздним зонам дробления приурочено эпитермальное золотосеребряное оруденение стефанит-пираргиритового минерального типа – рудопроявление Альфа [1, 4].

В поздних зонах дробления присутствуют сцементированные кварцем гидротермальные инъекционные брекчии. В наиболее ранних брекчиях цемент обычно мелкозернистый, загрязненный многочисленными мелкими частицами вмещающих пород. Брекчии с грязным мелкозернистым цементом часто подвержены неоднократному повторному (более грубому) брекчированию. Кварц, отлагающийся в виде цемента в брекчиях и в жилах после повторных актов дробления, обычно значительно более крупнозернистый и чистый.

По структуре можно выделить наиболее распространенный *гипидиоморфный* кварц – сложенный ориентированными под различными углами друг к другу, в той или иной степени вытянутыми по оси *с* призматическими индивидами (рис. 6, *а*). Встречается также *гребенчатый* кварц – сложенный вытянутыми по оси *с* клиновидными шестоватыми индивидами, ориентированными поперек обрастаемых поверхностей (рис. 6, *б*). Характерно расщепленное строение его индивидов – наличие участков с «перистым» угасанием, образованных слабо разориентированными между собой субиндивидами роста (рис. 6, *б*). В случаях совместного нахождения с гипидиоморфным кварцем гребенчатый кварц является более поздним.

Иногда встречается также *халцедоновидный* кварц, сложенный субизометричными или слабовытянутыми расщепленными зернами кварца размерами до 0,2 мм. Он обычно отлагается вслед за гребенчатым кварцем, окружая кристаллы последнего или цементируя его обломки (рис. 6, *б*). Следует отметить, что данные разновидности кварца присутствуют и в других районах развития сходного эпитермального Au–Ag оруденения [17, 18].

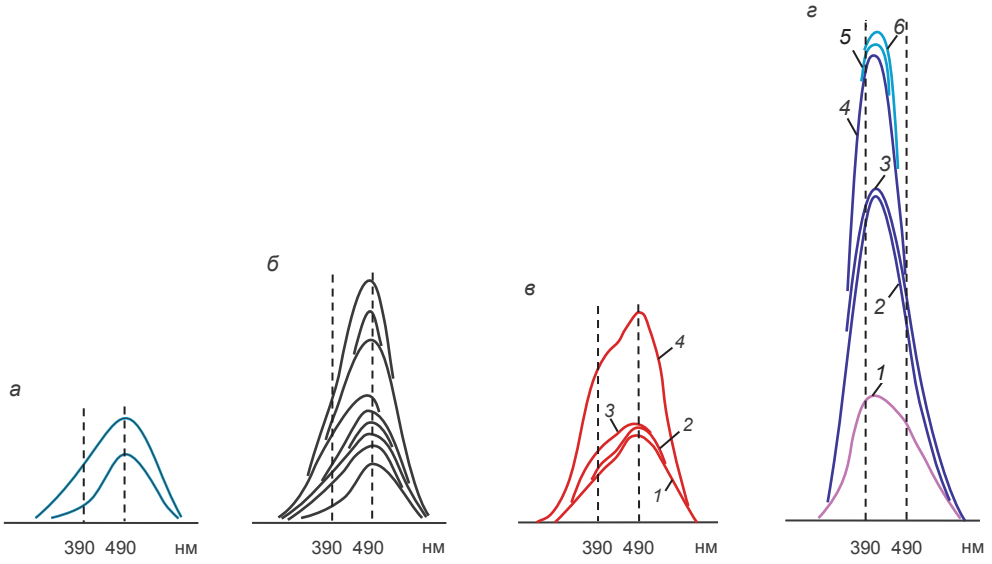

Рисунок 7. Кривые рентгенолюминесценции кварца: *а, б* – из жил, не несущих оруденения (*а* – Ж1, *б* – Ж2); *в* – Ж2 с видимым золотом (*1–3* – молочно-белый кварц, в том числе *1* – из месторождения Кыллах; *4* – незамутненный кварц, образующий кайму вокруг золотоносного галенита в молочно-белом кварце); *г* – кварц поздних зон дробления (*1, 5* – прожилки прозрачного кварца, пересекающие молочно-белый кварц; *2, 4* – гребенчатый кварц; *3, 6* – гипидиоморфный кварц)

Figure 7. Quartz X-ray luminescence curves: *а*, *б* – from veins that do not carry mineralization (*а* – Ж1, *б* – Ж2); *в* – Ж2 with visible gold (*1–3* – milky–white quartz, including *1* – from the Killah deposit; *4* – clear quartz forming a rim around gold-bearing galena in milky-white quartz); *г* – quartz of the late crushing zones (*1, 5* – small transparent quartz veins crossed milky-white quartz; *2*, *4* – comb quartz; *3*, *6* – hypidiomorphic quartz)

В отличие от кварца $Ж_1$ и $Ж_2$, кварц поздних зон дробления не подвержен пластической деформации и перекристаллизации; границы индивидов в зонах дробления не мелкозубчатые, как это свойственно $Ж_2$, а значительно более ровные (рис. 6). В отличие от флюидных включений, присутствующих в кварце $Ж_1$ и $Ж_2$, флюидные включения в кварце зон дробления более мелкие, двухфазовые, без жидкой CO_2, со степенью наполнения 0,6–0,9, иногда с резкими колебаниями степени наполнения. Температуры гомогенизации флюидных включений в кварце Au–Ag рудопроявления Альфа 150–260 °С [19].

В цементе и в пересекающих брекчии прожилках наряду с кварцем нередко присутствуют также адуляр, каолинит, реже хлорит, кальцит, сидерит. Наиболее распространенные сопутствующие кварцу минералы – адуляр и каолинит. Адуляр отлагается совместно с гипидиоморфным кварцем (отмечен в 30 из 100 изученных шлифов гипидиоморфного кварца), причем он может выделяться до, одновременно и после данного кварца. Совместно с гребенчатым кварцем адуляра не наблюдалось.

Каолинит обычно выделяется после кварца и адуляра, заполняя пустоты между кристаллами кварца (рис. 6, *а*) и адуляра. Иногда он также корродирует адуляр и образует включения в наружных зонах роста кристаллов гипидиоморфного и гребенчатого кварца.

Рентгенолюминесценция кварца

Одной из информативных характеристик жильного кварца, которые имеют высокую чувствительность к смене условий минералообразования и могут быть использованы в качестве типоморфных признаков кварца, является рентгенолюминесценция (РЛ) кварца в области 350–550 нм [11].

В указанной области интенсивно перекристаллизованному кварцу ранних поперечно секущих жил $Ж_1$ свойственна РЛ с малоинтенсивным максимумом 490 нм (рис. 7, *а*).

Для кварца наиболее широко распространенных на изученной площади более поздних жил $Ж_2$ (как не содержащих видимого золота – рис. 7, *б*, так и золотоносных – рис. 7, *в*) также характерна РЛ с максимумом 490 нм, таким же малоинтенсивным или несколько более сильным, чем у кварца $Ж_1$. При этом у отдельных проб золотоносного кварца наблюдается некоторая асимметрия пика РЛ 490 нм (в том числе у не замутненного флюидными включениями кварца, образующего в молочно-белом кварце ореолы вокруг выделений золотоносного галенита – рис. 7, *в – 4*).

В отличие от наблюдающейся у кварца $Ж_1$ и $Ж_2$ РЛ в области 490 нм, кварцу поздних зон дробления свойственна РЛ с длиной волны 390–415 нм, причем преимущественно значительно более интенсивная, чем РЛ в области 490 нм у $Ж_1$ и $Ж_2$ (рис. 7, *г*).

Обсуждение результатов

Кварцевые жилы

При формировании складчато-надвиговых поясов первыми трещинами, появляющимися на поздней стадии погружения осадочных бассейнов в самом начале зарождающегося регионального коллизионного сжатия, обычно являются вертикальные трещины отрыва [20]. В связи с этим одним из самых ранних проявлений начала коллизионных процессов является поперечное к слоистости пород кварцевое жилообразование [21, 22]. С данным процессом можно связывать образование рассматриваемых в данной статье ранних поперечно секущих $Ж_1$. Субсогласные $Ж_2$ возникали при параллельном слоистости надвигообразовании в начале сжимающего тектониче-

ского режима после образования $Ж_1$, как это отмечено и в других районах [21].

Рассматриваемые кварцевые жилы залегают среди терригенно-осадочных пород, подверженных метаморфизму зеленосланцевой фации [6]. Этот метаморфизм обычно сопровождается широким развитием перекристаллизации породообразующего и жильного кварца [9]. В кварце $Ж_1$ и $Ж_2$ с метаморфизмом зеленосланцевой фации связаны соответственно процессы перекристаллизации $П_1$ и $П_2$.

$П_1$ происходит при более высоких температурах, чем $П_2$. Этому отвечают более крупные размеры зерен $П_1$, а также иногда наблюдаемое присутствие в жилах, подвергшихся $П_1$ (в отличие от жил, подвергшихся $П_2$), ильменита, а также биотита [6] – минерала, фиксирующего максимальный уровень метаморфизма пород в изучаемом районе. В случае, описанном М. Стипп и К. Кунце [9], подобная $П_1$ перекристаллизация кварца происходила при 400–510 °С, а перекристаллизация, аналогичная $П_2$ – при 280–400 °С (и (или) при более высоких скоростях деформации).

Так как $Ж_1$ возникают, как отмечено ранее, близко во времени к поздней стадии погружения осадочного бассейна и пересекаются (после $П_1$) раннеколлизионными $Ж_2$, относительно высокотемпературный метаморфизм, сопровождаемый $П_1$, происходил перед коллизией или в самом ее начале. Повышение температуры перед коллизией выше температуры последующего коллизионного метаморфизма в других районах отмечено С. Киддер с соавторами [22], К. Кренн и Х. Фритц [23].

Золоторудное месторождение Кыллах

Месторождение относится [2] к раннеорогенным верхнеюрско-раннемеловым золотокварцевым месторождениям в зонах сдвига (*gold-quartz deposits in shear zones*). На таких месторождениях формирование рудоносных жил происходит при многочисленных повторных эпизодах раскрытия жиловмещающих разломов и скольжении по разломам [7, 14, 15].

Ориентировка штрихов на поверхностях скольжения в рассмотренной золотокварцевой жиле месторождения Кыллах подобна ориентировке линейности растяжения во вмещающих породах (рис. 3) и отвечает общему северо-западному [16] направлению надвигания при образовании главных геологических структур района. Сходство направления штрихов скольжения в золотокварцевых жилах с региональной линейностью вмещающих пород и с направлением перемещения надвигов отмечается и в других районах [15, 24].

Отсутствие точного совпадения направления штрихов скольжения в изученной золотокварцевой жиле и вблизи от нее с линейностью растяжения пород (рис. 3) наблюдается для подобных золотокварцевых жил и в других районах [14], что указывает по последнему автору на некоторое несоответствие ориентировки поля напряжений до и при жилообразовании.

С эволюцией жиловмещающих разломов тесно связано и образование полосчатого кварца месторождения Кыллах. Наличие на стенках и внутри жилы многочисленных поверхностей скольжения указывает на многочисленные акты субпараллельного стенкам жилы скольжения при образовании кварцевых пластин и после него. Кроме того, при образовании полосчатого кварца происходит чередование скольжения вдоль разломов и растяжения поперек разломов. Одни полосы могут образовываться множественными приоткрываниями, другие – одностадийным растяжением и залечиванием. Одни полосы образуются повторным растяжением субперпендикулярно поверхности разлома, а другие – циклическим смещением под небольшими углами к разлому [7, 14].

Акты скольжения при образовании полосчатого кварца приурочены преимущественно к контактам ранее образованной части жилы с вмещающей породой и сопровождаются срывом вдоль контактов тонких полос породы, нередко брекчированной. При последующих эпизодах укорочения под большими углами к поверхностям скольжения по разлому [7] эти полосы породы и зоны брекчирования могут преобразовываться в стилолитовые швы.

Нередкая приуроченность к стилолитовым швам золота (рис. 5, *а*, *в*) показывает, что последнее могло выделяться при образовании данных швов или после него. Тяготение Au к стилолитовым швам отмечено и на других золоторудных месторождениях [25]; последними авторами это связывается с повышенной пористостью кварца в непосредственной близости от стилолитовых швов.

Поздние зоны дробления

Рассматриваемые в данной статье поздние зоны дробления являются постаккреционными [2, 26]. Их образование контролируется отмеченными ранее постскладчатыми сбросами, возникающими при растяжении на континентальном продолжении Усть-Ленского океанического рифта. Наличие сдвиговой составляющей у постскладчатых сбросов может свидетельствовать о том, что рифтогенез отчасти перекрывался во времени с малоамплитудными сдвиговыми перемещениями располагающегося к востоку Колымо-Омолонского супертеррейна [6].

Образование поздних зон дробления происходило в эпитермальной обстановке, при переходе вмещающих толщ (эксгумации) на меньшие, чем при образовании кварцевых жил, глубины (до 1–2 км от поверхности). Этому отвечает, в частности, повсеместное брекчирование горных пород и более раннего кварца $Ж_1$ и $Ж_2$ в зонах дробления. Падение температуры, давления и дегазация растворов приводят к их пересыщению кремнеземом и отложению кварца. Потерей CO_2 в результате высокой проницаемости геологической среды обусловлено и отмеченное отсутствие CO_2 во флюидных включениях в кварце зон дробления [17].

Наиболее широко в зонах дробления распространен нерасщепленный гипидиоморфный кварц (рис. 6, *а*), который мог кристаллизоваться в длительные периоды относительно медленного «квазиустойчивого» течения растворов, относительно слабо пересыщенных кремнеземом. Эти периоды в эпитермальной обстановке обычно разделены короткими импульсами сильного течения, поступавшими с более глубоких горизонтов высокотемпературных растворов, сильнее пересыщенных кремнеземом [8, 27]. С такими импульсами течения растворов может быть связано образование расщепленных гребенчатого и халцедоновидного (рис. 6, *б*) кварца [18].

Рентгенолюминесценция кварца

Как показано ранее, кварцу $Ж_1$ и $Ж_2$ в интервале 350–550 нм свойственна РЛ 490 нм, а кварцу поздних зон дробления – РЛ 390 (410–415) нм. В литературе РЛ 490 и 390 нм чаще всего связываются с присутствием в кристаллической решетке кварца компенсированных щелочью или водородом $[AlO_4/M^+]$-центров [10, 28].

В кварце Якутии РЛ 490 нм ранее отмечена у подобного кварцу $Ж_2$ молочно-белого кварца из жил, залегающих в терригенно-осадочных породах вблизи от располагающегося к юго-западу от данного района Солурского гранитного штока и у многих жил Адыча-Тарынской металлогенической зоны Верхне-Индигирского района. В последнем случае в кварце с РЛ 490 нм устанавливаются низкие – ниже 1 г/т – содержания Li [29]. Низкие содержания Li свойственны кварцу, подобному кварцу $Ж_2$ на многих мезотермальных золоторудных месторождениях Якутии [19], а также характерны для аналогичного кварца ряда других районов [30, 31].

РЛ в области 390 (410–415) нм в данном районе свойственна кварцу поздних зон дробления (рис. 7, *г*). Подобные спектры РЛ с максимумом 390–415 нм наблюдались в Восточной Якутии также у гребенчатого кварца серебряного рудопроявления Аид и серебросодержащих жил золоторедкометалльного месторождения Эргелях. В последнем случае гребенчатому кварцу, по результатам ИСП–МС, свойственны очень высокие – до сотен г/т – содержания Li [32]. Подобные высокие содержания Li в кварце данных и других Au–Ag объектов Восточной Якутии, в том числе в кварце поздних зон дробления, находящемся на рассматриваемой в настоящей статье площади Au–Ag рудопроявления Альфа, установлены Г. Н. Гамяниным [19].

В целом из приведенных данных можно заключить, что для подобных разновидностей кварца РЛ в области 490 нм и 390 (410–415) нм отражает содержания Li в кварце, при РЛ 390 (410-415) нм значительно более высокие, чем при РЛ 490 нм.

Выводы

1. В углеродисто-терригенных осадочных породах изученного района, подвергшихся метаморфизму низов зеленосланцевой фации, присутствуют ранние поперечно секущие кварцевые жилы, образовавшиеся до или в самом начале коллизионого сжатия, и более поздние субсогласные раннеколлизионные кварцевые жилы.

2. Кварц ранних поперечно секущих жил подвержен происходившей до коллизионного сжатия или в самом его начале относительно высокотемпературной перекристаллизации, а кварц более поздних субсогласных жил – протекавшей в процессе коллизии более мелкозернистой низкотемпературной перекристаллизации.

3. Субсогласные раннеколлизионные золотокварцевые жилы месторождения Кыллах отличаются от кварцевых жил района, не несущих золотого оруденения, наличием кварца полосчатой текстуры и интенсивным развитием субпараллельных стенкам жил поверхностей скольжения и стилолитовых швов.

4. Соответствие направления штрихов скольжения на стенках и внутри крупной золотокварцевой жилы месторождения Кыллах линейности растяжения вмещающих пород связано с образованием золотокварцевых жил при формировании жиловмещающего надвига.

5. Приуроченность золота к стилолитовым швам в кварце указывает на выделение по крайней мере части золота при или после эпизодов приводящего к стилолитообразованию поперечного сжатия субсогласных кварцевых жил.

6. Присутствующий в поздних зонах дробления гипидиоморфный и гребенчатый кварц является индикатором постскладчатых разломов, с которыми связано эпитермальное золотосеребряное оруденение.

7. Рентгенолюминесценция (РЛ) кварца из золотоносных и незолотоносных кварцевых жил района характеризуется в области 300–550 нм пиком РЛ 490 нм, а кварцу поздних зон дробления свойственна РЛ при 390–415 нм. В данном случае РЛ отражает содержания Li в кварце, при РЛ 390 (410–415) нм значительно более высокие, чем при РЛ 490 нм.

Благодарности

Автор благодарен С. Л. Вотякову (Институт геологии и геохимии УрО РАН) за проведение комплекса рентгенолюминесцентных измерений, а также А. Ф. Бушмакину, С. Г. Суставову и Ф. З. Нурмухаметову за участие в полевых работах и отборе проб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячев Н. А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 210 с.
2. Fridovsky V. Y. Structural control of orogenic gold deposits of the Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia // Ore Geology Reviews. 2018. Vol. 103. P. 38–55. http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.006
3. Фридовский В. Ю. Куларская металлогеническая зона: метаморфогенные Au кварцевые месторождения // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Л. М. Парфенов, М. И. Кузьмин (ред.). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 350–353.
4. Суставов О. А. Расщепление кварца при формировании золото-серебряного оруденения в терригенных толщах (Восточная Якутия) // Докл. АН СССР. 1991. Т. 318. № 3. С. 717–720.
5. Суставов О. А. Микроструктуры кливажа и индикаторы растяжения в черносланцевых породах северной части Улахан-Сисской антиформы (Куларский район, Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 3. С. 31–42. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31-42; https://www.elibrary.ru/tvzgxf
6. Суставов О. А. Метаморфизм (низы зеленосланцевой фации) терригенных пород северной части Куларского золотоносного района, Якутия: соотношения минералов с кливажем // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. Т. 29. №1. С. 7–19. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-7-19
7. Cox S. F., Sun S. S., Etheridge M. A., Wall V. J., Potter T. F. Structural and geochemical controls on the development of turbidite-hosted gold quartz vein deposits, Wattle Gully Mine, Central Victoria, Australia // Economic Geology. 1995. Vol. 90. No. 6. P. 1722–1746. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.6.1722
8. Simmons S. F., White N. C., John D. A. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits // One Hundredth Anniversary Volume / ed. by J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, J. P. Richards. Littleton, Colorado, USA: Society of Economic Geologists, 2005. P. 485–522. https://doi.org/10.5382/av100.16

9. Stipp M., Kunze K. Dynamic recrystallization near the brittle-plastic transition in naturally and experimentally deformed quartz aggregates // Tectonophysics. 2008. Vol. 448. Issues 1–4. P. 77–97. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.041
10. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics / ed. by J. Götze, R. Möckel. Berlin; Heidelberg, Germany: Springer, 2012. 360 p.
11. Люминесцентный анализ структурного совершенства кварца / С. Л. Вотяков [и др.]. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. 70 с.
12. Суставов О. А. Ранние поперечные к слоистости кварцевые жилы в северной части Куларского района, Якутия: продольное укорочение жил и перекристаллизация кварца // Известия УГГУ. 2024. Вып. 1(72). С. 75–83. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-75-83
13. Строна П. А. Об условиях образования некоторых полосчатых текстур руд // Геология рудных месторождений.1960. № 3. С. 75–87.
14. Robert F., Boullier A.-M., Firdaous K. Gold-quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1995. Vol. 100. Issue B7. P. 12861–12879. https://doi.org/10.1029/95JB00190
15. Moritz R., Crocket J. H. Mechanics of formation of the gold-bearing quartz-fuchsite vein at the Dome mine, Timmins area, Ontario // Canadian Journal of Earth Sciences. 2011. Vol. 27. No. 12. P. 1609–1620. https://doi.org/10.1139/e90-171
16. Константинов М. М., Константиновский А. А., Наталенко М. В. Типизация золоторудных районов в терригенно-сланцевых поясах России // Региональная геология и металлогения. 2013. Т. 54. Р. 75–88.
17. Гончаров В. И., Сидоров А. А. Термобарогеохимия вулканогенного рудообразования. М.: Наука, 1979. 205 с.
18. Суставов О. А. Микроструктуры жильного кварца эпитермального серебряного рудопроявления Аид (Тарынский субвулканический массив, Восточная Якутия) // Известия УГГУ. 2016. Вып. 3(43). Р. 50–53. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-50-53
19. Гамянин Г. Н. Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозоид. М.: ГЕОС, 2001. 222 с.
20. Ferill D. A., Smart K. J., Cawood A. J., Morris A. P. The fold-thrust belt stress cycle: Superposition of normal, strike-slip, and thrust faulting deformation regimes // Journal of Structural Geology. 2021. Vol. 148. P. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104362
21. Van Noten K., Muchez P., Sintubin M. Stress-state evolution of the brittle upper crust during compressional tectonic inversion as defined by successive quartz vein types (High-Ardenne slate belt, Germany) // Journal of the Geological Society. 2011. Vol. 168. P. 407–422. https://doi.org/10.1144/0016-76492010-112
22. Kidder S., Avouac J.-P., Chan Y.-C. Application of titanium-in-quartz thermobarometry to greenschist facies veins and recrystallized quartzites in the Hsüehshan range, Taiwan // Solid Earth. 2013. Vol. 4. Issue 1. P. 1–21. https://doi.org/10.5194/se-4-1-2013
23. Krenn K., Fritz H., Mogessie A., Schaflechner J. Late Cretaceous exhumation history of an extensional extruding wedge (Graz Paleozoic Nappe Complex, Austria) // International Journal of Earth Sciences (GR Geologische Rundschau). 2008. Vol. 97. P. 1331–1352. https://doi.org/10.1007/s00531-007-0221-z
24. Ujiie K., Saishu H., Fagereng Å., Nishiyama N., Otsubo M., Masuyama H., Kagi H. An explanation of episodic tremor and slow slip constrained by crack-seal veins and viscous shear in subduction mélange // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45. P. 5371–5379. https://doi.org/10.1029/2018GL078374
25. Voisey C. R., Willis D., Tomkins A. G., Wilson C. J. L., Micklethwaite S., Salvemini F., Bougoure J., Rickard W. D. A. Aseismic Refinement of Orogenic Gold Systems // Economic Geology. 2020. Vol. 115. P. 33–50. https://doi.org/10.5382/econgeo.4692
26. Фридовский В. Ю., Полуфунтикова Л. И., Гамянин Г. Н., Соловьев Е. Э. Орогенные золоторудные месторождения со значительным ресурсным потенциалом центральной части Яно-Колымского пояса // Разведка и охрана недр. 2015. № 11. С. 3–9. https://elibrary.ru/uxspyj
27. Rowland J. V., Simmons S. F. Hydrologic, magmatic, and tectonic controls on hydrothermal flow, Taupo Volcanic Zone, New Zealand: implications for the formation of epithermal vein deposits // Economic. Geology. 2012. Vol. 107. Issue 3. P. 427–457. https://doi.org/10.2113/econgeo.107.3.427
28. Perny B., Eberhardt P., Ramseyer K., Mullis J., Pankrath R. Microdistribution of Al, Li, and Na in *α*-quartz: Possible causes and correlation with short-lived cathodoluminescence // American Mineralogist. 1992. Vol. 77. No. 5–6. P. 534–544.
29. Суставов О. А. Кварцевые жилы южной части Адыча-Эльгинского антиклинория и зоны Адыча-Тарынского разлома, Якутия // Литосфера. 2018. № 1. С. 111–126. https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-111-126
30. Wolff W. R. G. Microstructures and trace element signatures of orogenic quartz veins in the Klondike district, Yukon territory, Canada: Undergraduate Honours Thesis. Vancouver, BC Canada: University of British Columbia, Department of Earth and Ocean Sciences. 2012. 68 p. https://doi.org/10.14288/1.0053612
31. Oliver N. H. S., Thomson B., Freitas-Silva F. H., Holcombe R. J., Rusk B., Almeida B. S., Faure K., Davidson G. R., Esper E. L., Guimarães P. J., Dardenne M. A. Local and Regional Mass Transfer During Thrusting, Veining, and Boudinage in the Genesis of the Giant Shale-Hosted Paracatu Gold Deposit, Minas Gerais, Brazil // Economic. Geology. 2015. Vol. 110. P. 1803–1834. https://doi.org/10.2113/econgeo.110.7.1803
32. Суставов О. А., Киселева Д. В., Шагалов Е. С. Элементы-примеси в кварце жил с вольфрамовой, золоторедкометалльной и серебряной минерализацией (Беккемский и Эргеляхский гранитные массивы, Восточная Якутия) // Известия вузов. Геология и разведка. 2017. № 4. С. 19–26. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2017-4-19-26

Статья поступила в редакцию 30 мая 2025 года

UDC 553.411.071 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-3-63-73

Quartz veins and late crush zones of the Kularsky gold-bearing district, Yakutia (quartz microstructures and X-ray luminescence)

Oleg Anatol'evich SUSTAVOV*

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

The purpose of the work. Study of the typomorphic features of quartz of oreless and gold-bearing quartz veins and bearing gold-silver mineralization the late crush zones of the central part of the Kularsky gold-bearing district of Yakutia.

Materials and methods. Quartz samples from veins and crush zones were taken during mineralogical mapping of exposed areas and from the core of wells of the PGO "Yakutskgeologiya". 380 quartz thin sections are described with the determination of the size, shape and orientation of quartz *c*-axes, the degree of recrystallization (R), as well as the size, shape and localization of R-grains. Quartz X-ray luminescence (XL) was measured in the area of 350–550 nm.

Results and conclusions. In the carbonaceous-terrigenous sedimentary rocks of the area, metamorphosed in the conditions of the lower greenschist facies, there are early cross quartz veins V_1, formed before or at the very beginning of the collisional compression, and later sub-conconcordants early collisional quartz veins V_2. Quartz V_1 is subject to relatively coarse-grained (0.05–0.18 mm) R, and quartz V_2 is subject to a lower-temperature relatively fine–grained (0.02–0.07 mm) R. The gold-bearing V_2 of Kyllakh deposits differ from V_2, which do not carry mineralization, in their connection with shear zones, the presence of banded quartz and the intensive development of stylolite seams. The proximity of the orientation of the slip strokes on the walls and inside the Au-quartz V_2 to the direction of the regional extension lineation in the host rocks corresponds to the formation of these V_2 during the formation of a vein-containing thrust. The frequent association of Au with stylolite seams in quartz indicates the precipitation of at least part of the gold at during or after episodes of transverse compression of sub-concordant quartz veins. The hypidiomorphic and comb quartz of the late crush zones are indicators of post-folded faults associated with epithermal Au–Ag mineralization. The RL of quartz V_1 and V_2 in the area 300–550 nm is characterized by a peak RL of 490 nm, and the RL of quartz in the late crush zones happen with 390–415 nm. Quartz with a RL of 390–415 nm differs from quartz with a RL of 490 nm in higher Li contents.

Keywords: East Yakutia, veined quartz, quartz veins, crush zones, X-ray luminescence, recrystallization, gold deposits

REFERENCES

1. Goryachev N. A. 1998, Geology of Mesozoic gold-quartz vein belts of Northeast Asia. Magadan, 210 p. (*In Russ*.)
2. Fridovsky V. Y. 2018, Structural control of orogenic gold deposits of the Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia. *Ore Geology Reviews*, vol. 103, pp. 38–55. http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.006
3. Fridovsky V. Y. 2001, Kularsky metallogenic zone: metamorphogenic Au and quartz deposits. Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). L. M. Parfenov, M. I. Kuzmin (eds). Moscow, pp. 350–353. (*In Russ*.)
4. Sustavov O. A. 1991, Quartz splitting during the formation of gold–silver mineralization in terrigenous strata (Eastern Yakutia). *Doklady Academii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], vol. 318, no. 3, pp. 717–720. (*In Russ*.)
5. Sustavov O. A. 2021, Cleavage microstructures and stretching indicators in black shale rocks of the northern part of Ulakhan-Sis antiform (Kularsky district, Yakutia). *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki* [Natural resources of the Arctic and Subarctic], vol. 26, no. 3, pp. 31–42. (*In Russ*.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31-42; https://www.elibrary.ru/tvzgxf
6. Sustavov O. A. 2024, Metamorphism (lower reaches of the green shale facies) of terrigenous rocks of the northern part of the Kularsky gold-bearing region, Yakutia: mineral ratios with cleavage. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki* [Natural resources of the Arctic and Subarctic], vol. 29, no. 1, pp. 7–19. (*In Russ*.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-7-19
7. Cox S. F., Sun S. S., Etheridge M. A., Wall V. J., Potter T. F. 1995, Structural and geochemical controls on the development of turbidite-hosted gold quartz vein deposits, Wattle Gully Mine, Central Victoria, Australia. *Economic Geology*, vol. 90, no. 6, pp. 1722–1746. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.6.1722
8. Simmons S. F., White N. C., John D. A. 2005, Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. One Hundredth Anniversary Volume / ed. by J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, J. P. Richards. Littleton, Colorado, USA: Society of Economic Geologists, pp. 485–522. https://doi.org/10.5382/av100.16
9. Stipp M., Kunze K. 2008, Dynamic recrystallization near the brittle-plastic transition in naturally and experimentally deformed quartz aggregates. *Tectonophysics*, vol. 448, issues 1–4, pp. 77–97. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.041
10. 2012, Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics / ed. by J. Götze, R. Möckel. Berlin; Heidelberg, Germany: Springer, 360 p.
11. Votyakov S. L. et al. 1993, Luminescent analysis of quartz structural perfection. Ekaterinburg, 70 p.
12. Sustavov O. A. 2024, Early quartz veins transverse to stratification in the northern part of the Kularsky district, Yakutia: longitudinal shortening of veins and quartz recrystallization. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 1(72), pp. 75–83. (*In Russ*.) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-75-83

✉fgg.mpg@m.ursmu.ru

13. Strona P. A. 1960, On the conditions of formation of some banded ore textures. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology ore deposits], no. 3, pp. 75–87. (*In Russ.*)
14. Robert F., Boullier A.-M., Firdaous K. 1995, Gold-quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 100, issue B7, pp. 12861–12879. https://doi.org/10.1029/95JB00190
15. Moritz R., Crocket J. H. 2011, Mechanics of formation of the gold-bearing quartz-fuchsite vein at the Dome mine, Timmins area, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 27, no. 12, pp. 1609–1620. https://doi.org/10.1139/e90-171
16. Konstantinov M. M., Konstantinovsky A. A., Natalenko M. V. 2013, Typification of gold mining areas in the terrigenous-shale belts of Russia. *Regional'naya geologiya i metallogewniya* [Regional geology and metallogeny], vol. 54, pp. 75–88. (*In Russ.*)
17. Goncharov V. I., Sidorov A. A. 1979, Thermobarogeochemistry of volcanogenic ore formation. Moscow, 205 p. (*In Russ.*)
18. Sustavov O. A. 2016, Microstructures of vein quartz of the epithermal silver ore occurrence of Aid (Taryn subvolcanic massif, Eastern Yakutia). *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 3(43), pp. 50–53. (*In Russ.*) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-50-53
19. Gamyanin G. N. 2001, Mineralogical and genetic aspects of the golden mineralization of the Verkhoyansk-Kolyma mesozoids. Moscow, 222 p. (*In Russ.*)
20. Ferill D. A., Smart K. J., Cawood A. J., Morris A. P. 2021, The fold-thrust belt stress cycle: Superposition of normal, strike-slip, and thrust faulting deformation regimes. *Journal of Structural Geology*, vol. 148, pp. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104362
21. Van Noten K., Muchez P., Sintubin M. 2011, Stress-state evolution of the brittle upper crust during compressional tectonic inversion as defined by successive quartz vein types (High-Ardenne slate belt, Germany). *Journal of the Geological Society*, vol. 168, pp. 407–422. https://doi.org/10.1144/0016-76492010-112
22. Kidder S., Avouac J.-P., Chan Y.-C. 2013, Application of titanium-in-quartz thermobarometry to greenschist facies veins and recrystallized quartzites in the Hsüehshan range, Taiwan. *Solid Earth*, vol. 4, issue 1, pp. 1–21. https://doi.org/10.5194/se-4-1-2013
23. Krenn K., Fritz H., Mogessie A., Schaflechner J. 2008, Late Cretaceous exhumation history of an extensional extruding wedge (Graz Paleozoic Nappe Complex, Austria). *International Journal of Earth Sciences (GR Geologische Rundschau)*, vol. 97, pp. 1331–1352. https://doi.org/10.1007/s00531-007-0221-z
24. Ujiie K., Saishu H., Fagereng Å., Nishiyama N., Otsubo M., Masuyama H., Kagi H. 2018, An explanation of episodic tremor and slow slip constrained by crack-seal veins and viscous shear in subduction mélange. *Geophysical Research Letters*, vol. 45, pp. 5371–5379. https://doi.org/10.1029/2018GL078374
25. Voisey C. R., Willis D., Tomkins A. G., Wilson C. J. L., Micklethwaite S., Salvemini F., Bougoure J., Rickard W. D. A. 2020, Aseismic Refinement of Orogenic Gold Systems. *Economic Geology*, vol. 115, pp. 33–50. https://doi.org/10.5382/econgeo.4692
26. Fridovsky V. Yu., Polufuntikova L. I., Gamyanin G. N., Solovyov E. E. 2015, Orogenic gold deposits with significant resource potential in the central part of the Yano–Kolyma belt. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], no. 11, pp. 3–9. (*In Russ.*) https://elibrary.ru/uxspyj
27. Rowland J. V., Simmons S. F. 2012б Hydrologic, magmatic, and tectonic controls on hydrothermal flow, Taupo Volcanic Zone, New Zealand: implications for the formation of epithermal vein deposits. *Economic. Geology*, vol. 107, issue 3, pp. 427–457. https://doi.org/10.2113/econgeo.107.3.427
28. Perny B., Eberhardt P., Ramseyer K., Mullis J., Pankrath R. 1992, Microdistribution of Al, Li, and Na in α-quartz: Possible causes and correlation with short-lived cathodoluminescence. *American Mineralogist*, vol. 77, no. 5–6, pp. 534–544.
29. Sustavov O. A. 2018, Quartz veins of the southern part of the Adych–Elgin anticlinorium and the zone of the Adych-Taryn fault, Yakutia *Litosfera* [Lithosphere], no. 1, pp. 111–126. (*In Russ.*) https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-111-126
30. Wolff W. R. G. 2012, Microstructures and trace element signatures of orogenic quartz veins in the Klondike district, Yukon territory, Canada: Undergraduate Honours Thesis. Vancouver, BC Canada: University of British Columbia, Department of Earth and Ocean Sciences, 68 p. https://doi.org/10.14288/1.0053612
31. Oliver N. H. S., Thomson B., Freitas-Silva F. H., Holcombe R. J., Rusk B., Almeida B. S., Faure K., Davidson G. R., Esper E. L., Guimarães P. J., Dardenne M. A. 2015, Local and Regional Mass Transfer During Thrusting, Veining, and Boudinage in the Genesis of the Giant Shale-Hosted Paracatu Gold Deposit, Minas Gerais, Brazil. *Economic. Geology*, vol. 110, pp. 1803–1834. https://doi.org/10.2113/econgeo.110.7.1803
32. Sustavov O. A., Kiseleva D. V., Shagalov E. S. 2017, Impurity elements in quartz of veins with tungsten, gold-rare-metal and silver mineralization (Bekkemsky and Ergelyakhsky granite massifs, Eastern Yakutia). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], no. 4, pp. 19–26. (*In Russ.*) https://doi.org/10.32454/0016-7762-2017-4-19-26

The article was received on May 30, 2025