Ранние поперечные к слоистости кварцевые жилы в северной части Куларского района, Якутия: продольное укорочение жил и перекристаллизация кварца

Олег Анатольевич СУСТАВОВ*

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность. При реконструкции некоторых особенностей тектонических процессов нередко используются кварцевые жилы. Они служат маркерами и кинематическими индикаторами, несущими сведения о тектонических движениях и их последовательности. Существенная информация может быть получена при изучении обусловленных тектоническими процессами деформационных структур и текстур жильного кварца в шлифах под микроскопом. Для использования подобной информации требуется знание процессов образования деформационных структур и текстур кварца в жилах, образовавшихся в различных условиях и на разных стадиях тектонических процессов. В настоящей статье приводятся новые данные о происходящих в начале коллизионного процесса образовании и деформации кварцевых жил в слабометаморфизованных терригенно-осадочных породах.

Цель исследования – изучение геологической позиции рассматриваемых кварцевых жил и их макро- и микродеформаций при формировании кливажа, исследование механизмов перекристаллизации жильного кварца.

Методы исследования – отбор образцов из кварцевых жил при минералогическом картировании северной части Куларского золотоносного района с последующим микроскопическим изучением шлифов жильного кварца.

Результаты и выводы. Рассматриваются поперечно-секущие слоистость кварцевые жилы, образовавшиеся в слабометаморфизованных терригенно-осадочных породах в начале коллизии. В ходе коллизионного сжатия и формирования в породах кливажа происходит продольное укорочение данных жил с приобретением их стенками конфигурации фестончато-лопастных складок. При этом слагавший жилы исходный крупнокристаллический кварц подвергается кристаллопластической деформации, сопровождаемой динамическим возвратом и перекристаллизацией (П). Перекристаллизованный кварц (ПК) с размерами зерен 0,06–0,45 мм образуется между и внутри реликтов исходного кварца. Механизм П – главным образом вращение субзерен. На это указывают развитие ПК каймами вокруг реликтов («структура ядра и мантии») и присутствие в реликтах исходного кварца субзерен, близких по размерам к зернам перекристаллизации (ЗП). Формирование межреликтовых ЗП, вытянутых под углом к направлению кливажа, а также внутриреликтовая П с образованием ЗП, которым свойственна близость размеров к поперечнику субзерен полигонизации в реликтах, а также ориентировка с-осей кварца под небольшими углами к с-осям вмещающих реликтов происходила при некоаксиальной деформации кварца. Относительно редкие ЗП неправильной формы с зубчатыми границами, значительно более крупные, чем субзерна матрицы, и которым не свойственна близкая ориентировка с-осей кварца к с-осям вмещающих реликтов, возникают при внутриреликтовой миграционной П. Разновидности ПК, присутствующие в рассматриваемых жилах, являются более крупнозернистыми, чем ПК в более поздних кварцевых жилах изученного района, что можно связывать с высокими температурами метаморфизма в начале коллизии.

Ключевые слова: кварцевые жилы, продольное укорочение жил, фестончато-лопастные складки, микроструктуры жильного кварца, перекристаллизация вращением субзерен, миграционная перекристаллизация кварца.

Введение

При реконструкции отдельных особенностей тектонических процессов одним из предметов исследования в ряде случаев являются кварцевые жилы. Они служат маркерами и кинематическими индикаторами, несущими сведения о тектонических движениях и их последовательности [1–5]. Существенная информация может быть получена при изучении обусловленных тектоническими процессами деформационных структур и текстур жильного кварца в шлифах под микроскопом [1, 4, 6–9]. Для интерпретации подобной информации требуется

[⊠]fgg.mpg@m.ursmu.ru



Рисунок 1. Схема геологического строения северной части Улахан-Сисской антиклинали (схематизировано по геологической карте масштаба 1 : 1 000 000): 1 - четвертичные отложения; 2 - триас; 3 - туогучанская свита верхней перми; 4 - тарбаганнахская свита верхней перми; 5 - река Яна; белая рамка – изученная площадь, внизу – ориентировка кливажа S_1 в разрезе по AE [12] Figure 1. The scheme of the geological structure of the Northern part of the Ulakhan-Sissky antiform (according to the geological map of the scale 1 : 1 000 000): 1 - quaternary deposits; 2 - lower Triassic; 3 - Tuoguchansky suite of upper Permian; 4 - Tarbagannahsky suite of upper Permian; 5 - Yana River; white frame – the studied area, at the bottom – the orientation of cleavage S_1 in the section AE [12]

знание процессов образования деформационных структур и текстур кварца в жилах, образовавшихся в различных условиях и на разных стадиях тектонических процессов.

В настоящей статье приводятся новые данные об отчасти охарактеризованных ранее [7, 10] процессах деформации кварцевых жил, поперечно секущих слабометаморфизованные терригенные породы в северной части Куларского золотоносного района Якутии.

Район располагается на северо-западном фланге Кулар-Нерского сланцевого пояса Верхояно-Колымской орогенной области, сложенном углеродистыми сланцами и турбидитами склона и подножия Верхоянской пассивной континентальной окраины. Породы подвержены складчатости в поздней юре-раннем мелу при коллизии Сибирского кратона и Колымо-Омолонского супертеррейна [11]. Здесь находится сложенная породами пермского возраста Улахан-Сисская антиклиналь северо-восточного простирания, длиной более 100 км и шириной до 20 км. Углы падения слоев и субпараллельного им кливажа S₁ в сводовой части антиклинали (тарбаганнахская свита верхнепермского возраста) не превышают 3-7°. В данной статье рассматриваются кварцевые жилы, поперечно секущие слоистость пород тарбаганнахской свиты в северной части Улахан-Сисской антиклинали (на левобережье реки Яна между ручьями Тарбаганнах, Батор-Юрэх на юге и горой Мунулу на севере), рис. 1.

Материалы и методы

Образцы поперечно секущих кварцевых жил и слагающего их деформированного жильного кварца (35 образцов) отобраны при изучении обнаженных участков местности в процессе минералогического картирования северной части Куларского золотоносного района [7]. Для микроскопических исследований из данных образцов изготовлено 46 шлифов. Шлифы вырезались поперек стенок жил, перпендикулярно шарнирам присутствующих на стенках жил сближенных фестончато-лопастных складок (см. далее). В отдельных случаях из одного образца изготавливались шлифы по трем взаимно перпендикулярным направлениям. При изучении под микроскопом шлифов кварца определялись степень перекристаллизации (П) кварца, размеры зерен перекристаллизации (ЗП) и характер локализации перекристаллизованного кварца (ПК), находящегося между и внутри реликтов исходного кварца. За размер ЗП принимался поперечник выбранного в шлифе зерна, имеющего визуально средние для изучаемой совокупности зерен размеры. Изучались различия размеров меж- и внутриреликтовых ЗП, соотношения между ЗП и субзернами полигонизации в реликтах. Выделялись разновидности ЗП по размеру, форме, характеру ориентировки с-осей кварца (в скрещенных николях под микроскопом с использованием гипсового компенсатора) и расположению внутри реликтов.

Результаты

Тарбаганнахская свита верхнепермского возраста, к которой приурочены рассматриваемые кварцевые жилы, в изученном районе сложена углеродистыми сланцами (преимущественно метааргиллитами и метаалевролитами), среди которых залегают отдельные пласты метапесчаников.

Углеродистые сланцы состоят в основном из кварца, серицита, углеродистого вещества и хлорита. Метапесчаники главным образом мелко- и тонкозернистые (размер обломков преимущественно 0,2–0,05 мм) граувакковые (наряду с обломками кварца и плагиоклаза в них содержится более 25 % обломков пород); могут также присутствовать, преимущественно в матриксе, серицит, хлорит, карбонаты и углеродистое вещество. В породах развит субпараллельный слоистости кливаж S_1 [12] (рис. 1); в метапесчаниках он наблюдается в виде совокупности срезающих края обломочных зерен серицит-углеродистых кливажных зон толщиной в тысячные доли миллиметра, которые отстоят между собой на расстояния до 0,1–0,2 мм («межзерновой» кливаж) [4].

Породы тарбаганнахской свиты метаморфизованы в условиях мусковит-хлоритовой и биотитовой субфаций зеленосланцевой фации [7, 13], в связи с чем кварц в породах в той или иной степени перекристаллизован [13]. В метапесчаниках ЗП размерами преимущественно 0,04–0,06 мм образуются по краям обломков кварца, реже наблюдается полная перекристаллизация обломков.

В породах тарбаганнахской свиты наряду с другими кварцевыми жилами [7] встречаются поперечно секущие кливаж S_1 (преимущественно под углом 70–90°) жилы мощностью до 0,4 м, стенки которых имеют форму фестончато-лопастных (cuspate-lobate) [4, 14] складок. Таким складкам свойственно чередование острых шарниров – «фестонов» (cusps) и округлых изгибов – «лопастей» (lobes). Согласно [14], данные складки могут образовываться при продольном укорочении жесткого слоя, погруженного в менее вязкое вещество (при малом контрасте вязкости), когда происходит сильное уменьшение длины слоя и увеличение его мощности. Фестончато-лопастные (ф.-л.) складки проявляются в конфигурации границ жесткого слоя – рис. 2 («муллионы» [4, 15]).

Расстояния между смежными шарнирами субпараллельных ф.-л. складок на стенках рассматриваемых жил изменяются от долей миллиметра до 1–3 см (рис. 3, δ). При этом вершины фестонов направлены в сторону жилы, а лопасти (обычно более широкие, чем фестоны) – в сторону вмещающей породы.

Как показывают наблюдения под микроскопом, первоначально данные жилы были сложены достаточно крупнозернистым (размер зерен более 1 мм в поперечнике) грубошестоватым кварцем (агрегатом вытянутых поперек стенок жил индивидов размерами более 1 мм в поперечнике), местами переходящим в кварц аллотриоморфной структуры (рис. 3, в). При продольном укорочении жил слагающий их кварц подвергался интенсивной пластической деформации и перекристаллизации. При пластической деформации в индивидах кварца возникают изгибы кристаллической решетки (волнистое угасание) на угол до 50-60°. Волна угасания преимущественно параллельна направлению с-оси в индивидах кварца и состоит из отдельных вытянутых вдоль с-оси слабо разориентированных между собой субзерен полигонизации (рис. 3, в, 1).

Перекристаллизация кварца происходит ориентированными главным образом поперек стенок жил (субпараллельно кливажу вмещающих пород) полосами толщиной от одного до десятков ЗП размерами 0,07–0,18 мм. Полосы ПК идут по границам индивидов исходного кварца (рис. 3, *в*) или пересекают индивиды. По мере увеличения количества полос ПК и их ширины на месте исходного крупнокристаллического кварца может образовываться почти сплошной ПК.

Находящиеся между полосами ПК целые индивиды исходного кварца или их части будем называть реликтами исходного кварца. Так как полосы ПК ориентированы главным образом поперек стенок жил, форма реликтов чаще всего полосовидная, вытянутая поперек стенок жил; *с*-оси кварца в этих реликтах ориентированы под разными углами к вытянутости реликтов (рис. 3, e). Среди полосовидных реликтов иногда имеются и отдельные реликты субизометричной формы. В них оси *с* обычно ориентированы вдоль стенок жил, поперек вытянутости окружающих полосовидных реликтов (рис. 3, *e*, 3).

Перекристаллизация по границам реликтов («межреликтовая» П) приводит к образованию так называемых [1, 8, 16] «структур ядра и мантии»: ядро – монокристальный реликт, мантия – кайма окружающих его ЗП (рис. 3, в). При этом в мантии наряду с ЗП могут находить-



Рисунок 2. Образование фестончато-лопастных складок при вертикальном продольном сжатии жесткого слоя (черное) в пластичной матрице при малом контрасте вязкости между слоем и матрицей (по [14], с. 392, с изменениями)

Figure 2. Formation of cuspate-lobed folds during vertical longitudinal compression of a rigid layer (black) in a plastic matrix with a small viscosity contrast between the layer and the matrix (according to [14], p. 392, with changes)



Рисунок 3. Кварцевые жилы с фестончато-лопастной конфигурацией стенок (ϕ – фестоны, π – лопасти) в углеродистых породах (кливаж S_1 ориентирован горизонтально): a – поперечное сечение жилы; b – поверхность стенки жилы; e – шлиф поперек жилы, николи скрещены, штрихи – ориентировка *c*-осей кварца; 1, 2, 3 – объяснения в тексте Figure 3. Quartz veins with a cuspate-lobed configuration of the walls (ϕ – cusps, π – lobes) in carbonaceous rocks (cleavage S_1 is oriented horizontally): a – cross sections of the vein; b – surface of the vein wall; c – thin section across the vein, nichols crossed, white strokes – orientation *c*-axes of quartz; 1, 2, 3 – explanations in the text

О. А. Суставов. Ранние поперечные к слоистости кварцевые жилы в северной части Куларского района, Якутия: продольное 77 укорочение жил и перекристаллизация кварца//Известия УГГУ. 2024. Вып. 1(73). С. 75–83. DOI 10.21440/2307-2091-2024-1-75-83



Рисунок 4. Межреликтовые зерна перекристаллизации, вытянутые под углом к удлинению реликта (стрелка внизу – направление границы реликта); николи скрещены

Figure 4. Interrelict grains of recrystallization, elongated at an angle to the elongation of the relict (arrow below – direction of the relict boundary); nichols are crossed

ся отдельные субзерна ядра, сходные по размерам и форме с ЗП и отличающиеся от последних главным образом лишь меньшими углами разориентировки *с*-осей относительно *с*-оси исходного реликта.

Межреликтовые ЗП имеют субизометричную (рис. 3, в), реже вытянутую форму. В последнем случае ЗП могут быть вытянуты параллельно удлинению полосовидных реликтов или же (в некоторых нацело перекристаллизованных участках кварца) под углом до 10–15° к удлинению реликтов (SC-текстура [4]) – рис. 4.

Наряду с приуроченными к полосам ПК межреликтовыми ЗП встречаются и внутриреликтовые ЗП. Последние преимущественно крупнее межреликтовых ЗП (см. положение линий равных размеров тех и других ЗП на рис. 5). Размеры межреликтовых ЗП (0,07–0,18 мм) соответствуют размерам мелких субизометричных субзерен полигонизации, развитых в краевых частях реликтов, а размеры внутриреликтовых ЗП (0,06–0,45 мм) обычно близки к поперечнику вытянутых по *с*-оси более крупных субзерен полигонизации центральных частей реликтов. Причем внутриреликтовые ЗП преимущественно тем крупнее, чем более крупнозернисты межреликтовые ЗП (см. линию экспоненциального тренда на рис. 5). Увеличение размеров тех и других ЗП нередко происходит параллельно с увеличением степени перекристаллизации кварца.

Внутриреликтовые ЗП (особенно относительно мелкие, приближающиеся по своим размерам к межреликтовым ЗП) нередко развиты цепочками, ориентированными параллельно или под небольшим углом к вытянутости реликтов (т. е. близко к направлению кливажа S₁ вмещающих пород). Иногда полосы данных ЗП приурочены к ориентированным вдоль вытянутости реликтов слабо выраженным микросдвигам в кварце (рис. 6, *a*).

Такие внутриреликтовые ЗП характеризуются близостью ориентировки *с*-осей кварца к направлению *с*-оси вмещающего реликта – угол между *с*-осями ЗП и вмещающего реликта часто не превышает 30° (рис. 6, *a*-*b*). При



Зерна перекристаллизации между реликтами

Рисунок 5. Размеры совместно присутствующих в одном и том же шлифе внутри- и межреликтовых зерен перекристаллизации (средние значения, сотые доли миллиметра); черный пунктир – линия равных размеров тех и других зерен, синий пунктир – линия экспоненциального тренда для всей совокупности замеров

Figure 5. Dimensions of intra- and inter-relict recrystallization grains present together in the same thin section (average values, hundredths of a millimeter); the black dotted line is a line of equal sizes of those and other grains, the blue dotted line is an exponential trend line for the entire set of measurements

этом *с*-оси ЗП ориентированы преимущественно под меньшими углами к вытянутости реликтов, чем *с*-оси реликтов (рис. 6) [17]. В связи с этим для данных ЗП обычно характерна четкая преимущественная ориентировка *с*-осей, особенно хорошо заметная при наблюдении кварца в скрещенных николях при введенном гипсовом компенсаторе. Близкую ориентировку *с*-осей к *с*-осям вмещающих реликтов нередко имеют также многие более крупные внутриреликтовые ЗП, вытянутые параллельно удлинению реликтов (рис. 6, *в*).

Иногда внутри реликтов встречаются также крупные ЗП, не обладающие отмеченной преимущественной ориентировкой *с*-осей. Они имеют неправильную форму, зубчатые границы и часто располагаются у краев реликтов. В отличие от внутриреликтовых ЗП, описанных ранее, данные ЗП крупнее, чем субзерна во вмещающих реликтах исходного кварца (рис. 7). Межреликтовый ПК, окружающий реликты, содержащие данные крупные внутриреликтовые ЗП, также относительно крупнозернист (размеры зерен 0,11–0,16 мм).

Обсуждение результатов

Рассматриваемые в данной статье кварцевые жилы, поперечно секущие слоистость, относятся к наиболее ранним кварцевым жилам данного района [7, 10]. Они образуются путем заполнения поперечно секущих трещин отрыва во вмещающих субгоризонтально залегающих терригенноосадочных породах. На это указывает как характер залегания этих жил, так и преимущественно грубошестоватая структура исходного крупнозернистого кварца, индивиды которого вытянуты поперек стенок жил.

По [3], подобное поперечное к слоистости кварцевое жилообразование является самым ранним проявлением коллизионных процессов. Согласно [18], вертикальные трещины отрыва могут быть первыми трещинами, появляющимися при формировании складчато-надвиговых поясов в самом начале зарождающегося регионального сжатия. Образование таких жил растяжения происходит





Рисунок 7. Крупные внутриреликтовые зерна перекристаллизации, с-оси которых (черные штрихи) ориентированы под разными углами к с-осям вмещающих реликтов исходного кварца (белые штрихи); николи скрещены Figure 7. Large intra-relict grains of recrystallization, whose c-axes (black strokes) are oriented at different angles to the c-axes of the containing relics of the original quartz (white strokes); nichols are crossed

при возникновении в данных условиях высоких, до сверхлитостатических, давлений флюидов [3].

В ходе дальнейшего коллизионного сжатия рассматриваемые кварцевые жилы подвергаются продольному укорочению. На последнее указывает конфигурация стенок жил в виде ф.-л. складок, ориентированных поперек удлинения жил (рис. 3, *a*, *б*). Направление вершин фестонов в сторону кварцевой жилы, а широких лопастей – в сторону вмещающей породы соответствует характерной для ф.-л. складок [14] направленности вершин фестонов в сторону более вязкого, а лопастей – в сторону менее вязкого слоя.

Продольное укорочение кварцевых жил происходит при формировании в начале коллизии кливажа S_1 (в других районах близость во времени начала коллизии и образования кливажа отмечается в [5, 19], развитие кливажа совместно с подобной деформацией кварцевых жил – в [2]). При формировании кливажа S_1 происходит сплющивание пород поперек S_1 [12]. Так как кливаж S_1 субпараллелен слоистости пород, а жилы имеют поперечно-секущее S_1 залегание, то при образовании S_1 жилы подвергаются продольному укорочению. При этом стенки жил приобретают форму ф.-л. складок, простирание шарниров которых близко к направлению линий пересечения стенок жил кливажем S_1 .

При продольном укорочении жил слагающий их кварц подвергается кристаллопластической деформа-

ции, сопровождаемой динамическими возвратом и перекристаллизацией. В результате сжатия при продольном укорочении жил реликты исходного кварца подвергают уплощению. Ориентировка *с*-осей реликтов преимущественно под косыми углами к направлению сжатия (рис. 6) позволяет кварцу деформироваться с участием наиболее легко активируемого базисного и призматического внутрикристаллического скольжения [17]. Отдельные редкие изометричные реликты, *с*-оси которых направлены вдоль направления сжатия (субпараллельно стенкам жил), не подвергаются уплощению и сохраняют изометричную форму, так как имеют неблагоприятную для отмеченного ранее скольжения ориентировку [17].

Перекристаллизация кварца рассматриваемых жил соответствует главным образом обычной для зеленосланцевой фации метаморфизма [8] перекристаллизации вращением субзерен – исходный кварц подвергается полигонизации с возникновением слабо разориентированных субзерен, которые при последующих поворотах преобразуются в ЗП. При образовании межреликтовых ЗП к признакам П вращением субзерен относят [8, 16] развитие П каймами вокруг реликтов («структура ядра и мантии» – рис. 3, *в*; 6, *a*; 7) и присутствие по краям реликтов исходного кварца субзерен, близких по размерам к межреликтовым ЗП.

При П вращением субзерен могут образовываться как субизометричные, так и удлиненные межреликто-

вые ЗП. «Косая» по отношению к вытянутости реликтов и направлению кливажа S₁ ориентировка удлиненных ЗП (рис. 4) возникает при некоаксиальной деформации кварца [20, 21], причем направление удлинения ЗП указывает на знак сдвига при деформации [22] (например, на рис. 4 – правый сдвиг).

Посредством П вращения субзерен возникали и многие внутриреликтовые ЗП, близкие по размерам к поперечнику субзерен полигонизации в реликтах и обладающие преимущественной ориентировкой *с*-осей под углами в первые десятки градусов по отношению к *с*-осям реликтов (рис. 6). Эта зависимость размеров и ориентировки ЗП от размеров и ориентировки субзерен является одним из главных признаков внутриреликтовой П вращением субзерен [6, 9, 17, 18, 23]. Формирование таких внутриреликтовых ЗП в виде цепочек, ориентированных параллельно или под небольшим углом к направлению кливажа S_1 вмещающих пород и местами приуроченных к микросдвигам [6] в реликтах, происходит при некоаксиальной деформации кварца [24].

Возникновение относительно редких внутриреликтовых ЗП неправильной формы с зубчатыми границами, значительно более крупных, чем субзерна матрицы (рис. 7), может быть связано с так называемой миграционной П [8, 22, 23, 25, 26]; сходные с наблюдаемыми нами зерна миграционной П показаны в [17] -(fig. 4, a). Согласно отмеченным авторам, миграционная П по сравнению с П вращением субзерен происходит при более высоких температурах и более низких дифференциальных напряжениях. По [5], температура перехода от П вращением субзерен к П миграции границ около 400 °С. Появление крупных зерен миграционной П внутри, а не между реликтами исходного кварца, соответствует данным об образовании крупных ЗП при меньших напряжениях, чем более мелких ЗП [27], а также об относительно низких напряжениях при П внутри реликтов по сравнению с П между реликтами [28].

В заключение следует отметить, что разновидности ПК, присутствующие в рассматриваемых жилах, являются более крупнозернистыми, чем ПК в многочисленных более поздних кварцевых жилах изученного района [7] (подобное отмечается в работе [29]). Это можно связывать с более высокими температурами П кварца рассматриваемых в данной статье ранних жил [7]. Последнее подтверждается иногда отмечаемым, в отличие от более поздних жил, присутствием в ПК данных ранних жил ильменита, а также биотита [10] – минерала, фиксирующего максимальный уровень метаморфизма в изучаемом районе. Приуроченность наиболее крупнозернистого перекристаллизованного кварца и биотита к данным ранним кварцевым жилам указывает на повышенные температуры метаморфизма в начале коллизии, что отмечается и в других регионах [5, 29].

Выводы

1. Образование ранних поперечно секущих слоистость кварцевых жил происходило в самом начале зарождающегося коллизионного сжатия. По мере дальнейшего коллизионного сжатия происходило продольное укорочение жил с приобретением их стенками конфигурации фестончато-лопастных складок. При этом исходный кварц данных жил подвергался кристаллопластической деформации, сопровождаемой динамическими возвратом и перекристаллизацией.

2. Перекристаллизованный кварц (сложенный изометричными и удлиненными ЗП размерами 0,06–0,45 мм в поперечнике) образуется между и внутри реликтов исходного кварца. Перекристаллизация кварца происходит главным образом вращением субзерен, признаками чего являются развитие перекристаллизованного кварца каймами вокруг реликтов («структура ядра и мантии») и присутствие в реликтах исходного кварца субзерен, близких по размерам к ЗП.

3. Формирование межреликтовых ЗП, вытянутых под углом к направлению кливажа, а также внутриреликтовая перекристаллизация с образованием ЗП, которым свойственна близость размеров к поперечнику субзерен полигонизации в реликтах, а также ориентировка *с*-осей кварца под небольшими углами к *с*-осям вмещающих реликтов связаны с протеканием перекристаллизации при некоаксиальной деформации кварца.

4. Относительно редкие ЗП неправильной формы с зубчатыми границами, значительно более крупные, чем субзерна матрицы, и которым не свойственна близкая ориентировка *с*-осей кварца к *с*-осям вмещающих реликтов, возникают при внутриреликтовой миграционной перекристаллизации.

5. Разновидности перекристаллизованного кварца, присутствующие в рассматриваемых жилах, являются более крупнозернистыми, чем перекристаллизованный кварц в более поздних кварцевых жилах изученного района, что можно связывать с повышенными температурами метаморфизма в начале коллизии.

ЛИТЕРАТУРА

4. Кирмасов А. Б. Основы структурного анализа. М.: Научный мир, 2011. 368 с.

7. Суставов О. А. Деформации жильного кварца при формировании золотого оруденения в черносланцевых толщах (Куларский район, Восточная Якутия) // Геология и геофизика. 1995. № 4. С. 81–87.

^{1.} Passchier C. W., Trouw R. A. J. Microtectonics. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer, 2005. 366 p.

^{2.} Trepmann C. A., Stöckhert B. Microfabric of folded quartz veins in metagreywackes: dislocation creep and subgrain rotation at high stress // Journal of metamorphic Geology. 2009. Vol. 27. Issue 8. P. 555–570. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00842.x

^{3.} 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

^{5.} 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

^{6.} Суставов О. А. Рекристаллизация жильного кварца в зоне Мурзинского сдвига (Средний Урал) // Известия АН СССР. Сер. геол. 1987. № 2. С. 91–99.

8. Stipp M., Stünitz H., Heilbronner R., Schmid S. M. The eastern Tonale fault zone: a "natural laboratory" for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 °C // Journal of Structural Geology. 2002. Vol. 24. Issue 12. P. 1861–1884. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00035-4

9. Vernon R. H. Apractical guide to rock microstructure. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. 431 p. https://doi.org/10.1017/9781108654609 10. Суставов О. А. Рекристаллизация жильного кварца при формировании кливажа в метапсаммитах Куларского района (Якутия) // Известия вузов. Геология и разведка. 1988. № 10. С. 33–39.

11. Парфенов Л. М., Оксман В. С., Прокопьев А. В., Тимофеев В. Ф., Третьяков Ф. Ф., Трунилина В. А., Дейкуненко А. В. Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / под ред. Л. М. Парфенова и М. И. Кузьмина. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 199–254.

12. 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

13. Суставов О. А. Кливаж и перекристаллизация кварца в терригенных породах верхоянского комплекса (Яно-Индигирская зона) // Известия УГГГА. Сер. Геология и геофизика. 1998. Вып. 8. С. 49–55.

14. Ramsay J. G., Huber M. I. The Techniques of Modern Structural Geology. Vol. 2. Folds and Fractures. London: Academic press, 1987. 700 p. 15. Urai J. L., Spaeth G., van der Zee W., Hilgers C. Evolution of Mullion (formerly boudin) structures in the Variscan of the Ardennes and Eifel // Journal of the Virtual Explorer. 2001. Vol. 3. P. 1–16. https://doi.org/10.3809/JVIRTEX.2001.00027

16. Hirth G., Tullis J. Dislocation creep regimes in quartz aggregates // Journal of Structural Geology. 1992. Vol. 14. Issue 2. P. 145–159. https:// doi.org/10.1016/0191-8141(92)90053-Y

17. Law R. D. Relationship between strain and quartz crystallographic fabrics in the Roche Maurice quartzites of Plougastel, western Brittany // Journal of Structural Geology. 1986. Vol. 8. Issue 5. P. 493–515. https://doi.org/10.1016/0191-8141(86)90001-5

18. 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. Article number 104362. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104362

19. Chen C.-T., Chan Yu.-C., Lo C.-H., Malavieille J., Lu C.-Yu., Tang J.-T., Lee Yu.-H. Basal accretion, a major mechanism for mountain building in Taiwan revealed in rock thermal history // Journal of Asian Earth Sciences. 2018. Vol. 152. P. 80–90. https:// doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.11.030 20. Law R. D., Casey M., Knipe R. J. Kinematic and tectonic significance of microstructures and crystallographic fabrics within quartz mylonites from the Assynt and Eriboll regions of the Moine thrust zone, NW Scotland // Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth sciences. 1986. Vol. 77. Issue 2. P. 99–125. https://doi.org/10.1017/S0263593300010774

21. Lister G. S. S-C Mylonites // Journal of Structural Geology. 1984. Vol. 6. Issue 6. P. 617–638. https://doi.org/10.1016/0191-8141(84)90001-4 22. Behr W. M., Platt J. P. A naturally constrained stress profile through the middle crust in an extensional terrane // Earth and Planetary Science Letters. 2011. Vol. 303. Issue 3–4. P. 181–192. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.044

23. Lloyd G. E., Freeman B. Dynamic recrystallization of quartz under greenschist conditions // Journal of Structural Geology. 1994. Vol. 16. Issue 6. P. 867–881. https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)90151-1

24. Bestmann M., Pennacchioni G., Nielsen S., Göken M., de Wall H. Deformation and ultrafine dynamic recrystallization of quartz in pseudotachylyte-bearing brittle faults: A matter of a few seconds // Journal of Structural Geology. 2012. Vol. 38. P. 21–38. http://dx.doi.org/10.1016/j. jsg.2011.10.001

25. Stipp M., Tullis J., Scherwath M., Behrmann J. H. A new perspective on paleopiezometry: Dynamically recrystallized grain size distributions indicate mechanism changes // Geology. 2010. Vol. 38. No. 8. P. 759–762. https://doi.org/10.1130/G31162.1

26. Mancktelow N. S., Pennacchioni G. The influence of grain boundary fluids on the microstructure of quartz-feldspar mylonites // Journal of Structural Geology. 2004. Vol. 26. Issue 1. P. 47–69. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00081-6

27. Heilbronner R., Kilian R. The grain size(s) of Black Hills Quartzite deformed in the dislocation creep regime_// Solid Earth. 2017. Vol. 8. Issue 5. P. 1071–1093. http://dx.doi.org/10.5194/se-8-1071-2017

28. Tullis J. Deformation of Granitic Rocks: Experimental Studies and Natural Examples // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. Vol. 51. No. 1. P. 51–95. https://doi.org/10.2138/GSRMG.51.1.51

29. 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. 2007. Vol. 97. Issue 6. P. 1331–1352. https://doi.org/10.1007/s00531-007-0221-z

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2023 года

Early quartz veins transverse to bedding in the northern part of the Kular region, Yakutia: longitudinal shortening of the veins and recrystallization of quartz

Oleg Anatol'evich SUSTAVOV*

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. When reconstructing certain features of tectonic processes, quartz veins are often used. They serve as markers and kinematic indicators that carry information about tectonic movements and their sequence. Significant information can be obtained by studying the deformation structures and textures of vein quartz in thin sections caused by tectonic processes under a microscope. To use such information, knowledge of the processes of formation of deformation structures and textures of quartz in veins formed under different conditions and at different stages of tectonic processes is required. This article provides new data on the formation and deformation of quartz veins occurring at the beginning of the collision process in weakly metamorphosed terrigenous-sedimentary rocks.

The purpose of the research is to study the geological position of the quartz veins under consideration and their macro- and micro-deformations during the formation of cleavage, and to study the mechanisms of recrystallization of vein quartz.

Research methods. Sampling from quartz veins during mineralogical mapping of the northern part of the Kular gold-bearing region, followed by microscopic examination of thin sections of vein quartz.

Results and conclusions. We consider quartz veins that cross-cut the bedding and were formed in weakly metamorphosed terrigenous sedimentary rocks at the beginning of the collision. During collisional compression and the formation of cleavage in rocks, longitudinal shortening of these veins occurs with their walls acquiring the configuration of scalloped-lobate folds. In this case, the original coarse-crystalline quartz that formed the veins is subjected to crystallo-plastic deformation, accompanied by dynamic recovery and recrystallization (R). Recrystallized quartz (RQ) with grain sizes of 0.06–0.45 mm is formed between and inside relics of the original quartz. Mechanism R is mainly the rotation of subgrains. This is indicated by the development of quartz rims around the relics ("structure of the core and mantle") and the presence in the relics of the original quartz of subgrains close in size to recrystallization grains (RGs). The formation of interrelict RGs, elongated at an angle to the direction of cleavage, as well as intrarelict R with the formation of RGs, which are characterized by similar sizes to the diameter of the polygonization subgrains in the relics, as well as the orientation of the c-axes of quartz at small angles to the c-axes of the host relics, occurred during non-coaxial deformation of quartz. Relatively rare irregularly shaped RGs with jagged boundaries, much larger than matrix subgrains, and which are not characterized by close orientation of the c-axes of quartz to the c-axes of the host relics, arise during intra-relict migration R. The varieties of RQ present in the veins under consideration are more coarse-grained than RQ in later quartz veins of the studied area, which can be associated with high temperatures of metamorphism at the beginning of the collision.

Keywords: quartz veins, longitudinal shortening of veins, scalloped-lobate folds, microstructures of vein quartz, recrystallization by rotation of subgrains, migration recrystallization of quartz.

REFERENCES

1. Passchier C. W., Trouw R. A. J. 2005, Microtectonics. Berlin; Heidelberg; N. Y., 366 p.

2. Trepmann C. A., Stöckhert B. 2009, Microfabric of folded quartz veins in metagreywackes: dislocation creep and subgrain rotation at high stress. *Journal of metamorphic Geology*, vol. 27, issue 8, pp. 555–570. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00842.x

3. 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

4. Kirmasov A. B. 2011, Fundamentals of structural analysis. Moscow, 368 p. (In Russ.)

5. 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

6. Sustavov O. A. 1987, Recrystallization of vein quartz in the Murzin shear zone (Middle Urals). *Izvestiya Akademii Nauk SSSR* [News of the USSR Academy of Sciences], no. 2, pp. 91–99. (*In Russ.*)

7. Sustavov O. A. 1995, Deformations of vein quartz during the formation of gold mineralization in black shale strata (Kularsky district, Eastern Yakutia). *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], no. 4, pp. 81–87. (*In Russ.*)

⊠fgg.mpg@m.ursmu.ru

82 О. А. Суставов. Ранние поперечные к слоистости кварцевые жилы в северной части Куларского района, Якутия: продольное укорочение жил и перекристаллизация кварца//Известия УГГУ. 2024. Вып. 1(73). С. 75–83. DOI 10.21440/2307-2091-2024-1-75-83 8. Stipp M., Stünitz H., Heilbronner R., Schmid S. M. 2002, The eastern Tonale fault zone: a "natural laboratory" for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 °C. *Journal of Structural Geology*, vol. 24, issue 12, pp. 1861–1884. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00035-4

9. Vernon R. H. 2018, Apractical guide to rock microstructure. Cambridge: Cambridge University Press, 431 p. https://doi.org/10.1017/9781108654609 10. Sustavov O. A. 1988, Recrystallization of vein quartz during the formation of cleavage in metapsammites of the Kular region (Yakutia). *Izves-tiya vuzov. Geologiya i razvedka* [News of Universities. Geology and Exploration], no. 10, pp. 33–39. (*In Russ.*)

11. Parfenov L. M., Oksman V. S., Prokopyev A. V., Timofeev V. F., Tretyakov F. F., Trunilina V. A., Deykunenko A. V. 2001, Collage of terranes of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region. Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Moscow, pp. 199–254. (*In Russ.*)

12. Sustavov O. A. 2021, Cleavage microstructures and extension indicators in black shale rocks of the northern part of the Ulakhan-Sis antiform (Kularsky region, Yakutia). *Prirodnyye 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

13. Sustavov O. A. 1998, Cleavage and recrystallization of quartz in terrigenous rocks of the Verkhoyansk complex (Yano-Indigirka zone). *Izvestiya Ural'skoy gosudarstvennoy gorno geologicheskoy akademii* [News of the Ural State Mining and Geological Academy], issue 8, pp. 49–55. (*In Russ.*)

14. Ramsay J. G., Huber M. I. 1987, The Techniques of Modern Structural Geology. Vol. 2. Folds and Fractures. London, 700 p.

15. Urai J. L., Spaeth G., van der Zee W., Hilgers C. 2001, Evolution of Mullion (formerly boudin) structures in the Variscan of the Ardennes and Eifel. *Journal of the Virtual Explorer*, vol. 3, pp. 1–16. https://doi.org/10.3809/JVIRTEX.2001.00027

16. Hirth G., Tullis J. 1992, Dislocation creep regimes in quartz aggregates. *Journal of Structural Geology*, vol. 14, issue 2, pp. 145–159. https://doi.org/10.1016/0191-8141(92)90053-Y

17. Law R. D. 1986, Relationship between strain and quartz crystallographic fabrics in the Roche Maurice quartzites of Plougastel, western Brittany. *Journal of Structural Geology*, vol. 8, issue 5, pp. 493–515. https://doi.org/10.1016/0191-8141(86)90001-5

18. 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, article number 104362. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104362

19. Chen C.-T., Chan Yu. C., Lo C. H., Malavieille J., Lu C. Yu., Tang J. T., Lee Yu. H. 2018, Basal accretion, a major mechanism for mountain building in Taiwan revealed in rock thermal history. *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 152, pp. 80–90. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.11.030 20. Law R. D., Casey M., Knipe R. J. 1986, Kinematic and tectonic significance of microstructures and crystallographic fabrics within quartz mylonites from the Assynt and Eriboll regions of the Moine thrust zone, NW Scotland. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth sciences*, vol. 77, issue 2, pp. 99–125. https://doi.org/10.1017/S0263593300010774

21. Lister G. S. 1984, Mylonites. Journal of Structural Geology, vol. 6, issue 6, pp. 617-638. https://doi.org/10.1016/0191-8141(84)90001-4

22. Behr W. M., Platt J. P. 2011, A naturally constrained stress profile through the middle crust in an extensional terrane. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 303, issue 3–4, pp. 181–192. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.044

23. Lloyd G. E., Freeman B. 1994, Dynamic recrystallization of quartz under greenschist conditions. *Journal of Structural Geology*, vol. 16, issue 6, pp. 867–881. https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)90151-1

24. Bestmann M., Pennacchioni G., Nielsen S., Göken M., de Wall H. 2012, Deformation and ultrafine dynamic recrystallization of quartz in pseudotachylyte-bearing brittle faults: A matter of a few seconds. *Journal of Structural Geology*, vol. 38, pp. 21–38. http://dx.doi.org/10.1016/j. jsg.2011.10.001

25. Stipp M., Tullis J., Scherwath M., Behrmann J. H. 2010, A new perspective on paleopiezometry: Dynamically recrystallized grain size distributions indicate mechanism changes. *Geology*, vol. 38, no. 8, pp. 759–762. https://doi.org/10.1130/G31162.1

26. Mancktelow N. S., Pennacchioni G. 2004, The influence of grain boundary fluids on the microstructure of quartz-feldspar mylonites. *Journal of Structural Geology*, vol. 26, issue 1, pp. 47–69. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00081-6

27. Heilbronner R., Kilian R. 2017, The grain size(s) of Black Hills Quartzite deformed in the dislocation creep regime. *Solid Earth*, vol. 8, issue 5, pp. 1071–1093. http://dx.doi.org/10.5194/se-8-1071-2017

28. Tullis J. 2002, Deformation of Granitic Rocks: Experimental Studies and Natural Examples. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 51, no. 1, pp. 51–95. https://doi.org/10.2138/GSRMG.51.1.51

29. Krenn K., Fritz H., Mogessie A., Schaflechner J. 2007, Late Cretaceous exhumation history of an extensional extruding wedge (Graz Paleozoic Nappe Complex, Austria). International Journal of Earth Sciences, vol. 97, issue 6, pp. 1331–1352. https://doi.org/10.1007/s00531-007-0221-z

The article was received on November 26, 2023