

3. Rozen O.M., Zhuravlev D.Z., Lyapunov S.M. Geohimicheskie issledovaniya osadochnyh otlozhenii Timano-Pecherskoi provintsii [Geochemical Studies of Sedimentary Deposits in the Timan-Pechora Province]. *Razvedka i ohrana neдр* — [Prospect and protection of mineral resources], 1994, no. 1, pp. 18–21. (in Russian).
4. Soboleva A.A., Kuznetsov N.B., Miller E.L., Udoratina O.V., Gerels Dzh., Romanyuk T.V. Pervye rezul'taty U/PB-datirovaniya detritnyh tsirkonov iz bazal'nyh gorizontov uralid (Polyarnyi Ural) [First results of U/PB dating of detrital zircons from the Uralide basal horizons (Polar Urals)]. *Doklady Earth Sciences*, 2012, v. 445, no. 5, pp. 570–576. (in Russian).
5. Strahov N.M. *Problemy geohimii sovremennogo okeanskogo litogeneza — Problems of geochemistry of modern oceanic lithogenesis*, M., Nauka Publ., 1976, 300 p. (in Russian).
6. Yudovich Y.E., Ketris M.P. *Osnovy litohimii — [Basics lithochemistry]*. St. Petersburg, Science Publ., 2000, 479 p. (in Russian).
7. Bhatia M.R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones, *The Journal of Geology*, 1983, v. 91, no. 6, pp. 611–627.
8. Bostrom K. The origin and fate of ferromanganoan active ridge sediments, *Stockholm Contrib. Geol.* 1973, v. 27, no. 2, pp. 148–243.
9. Cox R., Lowe D.R. Controls of sediment composition on a regional scale: a conceptual review of sediment composition on a regional scale: a conceptual review, *Journal of Sedimentary Research*, 1995, v. 65, pp. 1–12.
10. Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering, *Sedimentary Geology*, 1988, v. 55, no 3/4, pp. 319–322.
11. Herron M.M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data, *Journal of Sedimentary Petrology*, 1988, v. 58, pp. 820–829.
12. Lee Y.I. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea, *Sedimentary Geology*, 2002, v. 149, pp. 219–235.
13. Maynard J.B., Valloni R., Yu H.-Sh. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins, *Geological Society of London, Special Publication*, 1982, v. 10, pp. 551–561.
14. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, *Nature*, 1982, v. 299, pp. 715–717.
15. Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio, *The Journal of Geology*, 1986, v. 94, no. 5, pp. 635–650.

УДК 551.25, 552.163, 552.51, 549.41

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ КВАРЦА В ЖИЛАХ СРЕДИ ПЕСЧАНИКОВ ЗОНЫ МЕТАГЕНЕЗА (КУЛАРСКИЙ РАЙОН, ЯКУТИЯ)

О.А. СУСТАВОВ

*Уральский государственный горный университет
30, Куйбышева ул., г. Екатеринбург 620144, Россия
e-mail: olsustavov@mail.ru*

Рассмотрена перекристаллизация выпячивания (ПВ) в деформированных кварцевых жилах, залегающих в нижнетриасовых песчаниках зоны метабазиса в северо-западной части Куларского района, Якутия. ПВ характеризуется протекающим при кристаллопластической деформации кварца образованием зубчатых границ индивидов, к которым приурочены зёрна перекристаллизации, размеры которых (0,01–0,02 мм) отвечают размерам зубцов на границах индивидов. Своим образованием столь мелкие зёрна перекристаллизации могут фиксировать пиковые напряжения, возникающие при деформации континентальной коры вблизи хрупкопластического перехода. Внутри индивидов ПВ сопровождается перекристаллизацией вдоль микросдвигов и полос деформации при ведущей роли прогрессивного вращения субзёрен. ПВ в жильном кварце происходит при формировании во вмещающих песчаниках кливажа растворения под давлением, в связи с чем сочетание кливажа растворения под давлением в песчаниках зоны метабазиса и ПВ в жильном кварце можно рассматривать в качестве структурного парагенеза.

К л ю ч е в ы е с л о в а: кварцевые жилы; жильный кварц; динамическая перекристаллизация; перекристаллизация выпячивания; песчаники; метабазис; растворение под давлением; Якутия.

DYNAMIC RECRYSTALLIZATION OF QUARTZ IN VEINS IN SANDSTONES OF METAGENESIS ZONE (KULAR DISTRICT, YAKUTIA)

O.A. SUSTAVOV

*Ural State Mining University
30, Kuibysheva street, Yekaterinburg 620144, Russia
e-mail: olsustavov@mail.ru*

Bulging recrystallization (BR) has been considered in the deformed quartz veins in the lower Triassic sandstones of the metagenesis zone in the North-Western part of the Kular district, Yakutia. BR is characterized by the formation of sutured boundaries of individuals during the crystalloplastic deformation of quartz. To these boundaries, the recrystallization grains are confined, the size of which (in this case, 0,01–0,02 mm) corresponds to the size of the teeth at the boundaries of individuals. Such fine recrystallization grains can fix with their formation the peak crustal stresses

arising up during deformation of the continental crust near the brittle-plastic transition. Inside the individuals, BR is accompanied by recrystallization along the microshears and deformation bands with the leading role of progressive rotation of subgrains. BR in vein quartz occurs during the formation of the pressure solution cleavage in the host sandstones, and therefore the combination of the pressure solution cleavage in the sandstones of the metagenesis zone and BR in vein quartz can be considered as structural paragenesis.

К е у о р д с: quartz veins; vein quartz; dynamic recrystallization; bulging recrystallization; Yakutia; sandstones; metagenesis; pressure solution.

В континентальной земной коре ниже хрупко-пластического перехода преобладающим механизмом пластического течения является дислокационная ползучесть [20]. Происходящие в ходе этого процесса изменения размера, формы и ориентировки зёрен минералов, движимые энергией деформации в форме дислокаций, называются «динамической перекристаллизацией» [11, 14, 15, 18, 19, 23, 24]. Последней отчасти соответствует выделяемая Д.П. Григорьевым [2] «рекристаллизация» [4, 6], которую данный автор определяет как «процесс перекристаллизации, ... заключающийся в росте за счёт деформированных кристаллов новых стабильных кристаллов с недеформированной решеткой» [2, с. 190].

В настоящее время выделяется три механизма динамической перекристаллизации: «выпячивание» (bulging) в результате «медленной» [24] миграции границ зёрен, вращение субзёрен и «быстрая» [24] миграция границ зёрен [14, 16, 18–20, 23]. Перекристаллизация выпячивания характеризуется образованием мелкозубчатых («сутурных» [11]) границ исходных кристаллов и преобразованием отдельных зубцов («выпячиваний») в мелкие зёрна перекристаллизации (ЗП). При перекристаллизации вращением субзёрен исходный кварц подвергается полигонизации с возникновением субзёрен, которые при последующих поворотах преобразуются в ЗП. «Быстрая» миграция границ исходных зёрен приводит к образованию крупных ЗП, имеющих неправильную форму и сложную конфигурацию границ. Микроструктуры кварца, образованные тремя данными механизмами перекристаллизации, соответствуют трём режимам экспериментальной дислокационной ползучести кварца, последовательно сменяющихся при повышении температуры и снижении дифференциальных напряжений [14, 18, 19, 23].

В природном кварце динамическая перекристаллизация наиболее детально изучена в зонах милонитизации [6, 12, 17–19, 23]. В других геологических обстановках, в том числе в жилах, залегающих среди пород зоны метазенеза (анхиметаморфизма), подвергшихся слабым низкотемпературным преобразованиям, особенности протекания динамической перекристаллизации кварца охарактеризованы слабее [15, 22]. При этом мало внимания уделяется соотношениям между динамической перекристаллизацией кварца в жилах и характером деформации вмещающих пород. Рассмотрению этих вопросов и посвящена настоящая статья.

Район исследований

Материал для изучения отобран в северной части Верхояно-Колымской орогенной области (рис. 1), в северо-западном секторе Кулар-Нерского турбидитового террейна (сланцевого пояса), сложенном терригенно-осадочными породами верхнепермского и триасового возрастов. Данный сектор Кулар-Нерского террейна характеризуется северо-восточным простиранием складчатых структур, среди которых имеется несколько крупных кулисообразно расположенных опрокинутых антиклиналей и синклиналей, разделенных надвигами и взбросами северо-западной вергентности [5]. Ядра антиклиналей сложены верхнепермскими породами, а разделяющие их синклинали (синклинальные зоны напряженной линейной складчатости) — породами триаса. Формирование складчатых структур происходило в поздней юре—раннем мелу. Автором рассмотрены кварцевые жилы, залегающие в песчаниках нижнего триаса, образующих вместе с алевропелитовыми породами того же возраста сложнодислоцированную синклиналь, расположенную к западу от крупной лежащей Улахан-Сисской антиклинали, сопряженной с ограничивающим эту антиклиналь с северо-запада надвигом. Мелкие складчатые структуры в породах триаса представляют собой складки изгиба со скольжением и разбиты кливажем, ориентированным параллельно осевым плоскостям складок.

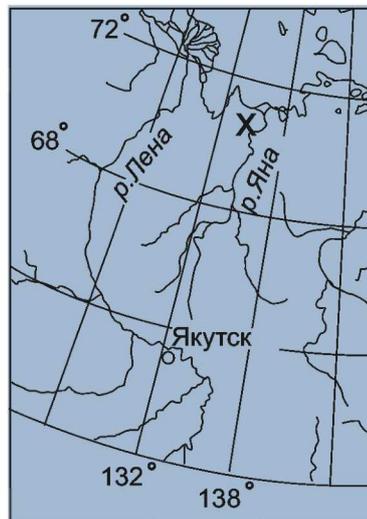


Рис. 1. Географическое положение района (x)

Мощность отложений, эродированных после мезозойской складчатости в зоне развития нижнетриасовых отложений, составляет 6–8 км [3].

Методы исследования

Пробы для исследования отобраны в районе ручьев Бургуат и Йэкийээс при минералогическом картировании кварцевых жил на западном фланге приуроченного к Улахан-Сисской антиклинали одноимённого золотрудного района [8]. Дальнейшее изучение микроструктур кварцевых жил и вмещающих их песчаников производилось преимущественно в перпендикулярных кливажу песчаников шлифах, ориентированных вдоль и поперёк линейности на поверхностях кливажа.

Результаты изучения

Песчаники нижнего триаса — это преимущественно мелкозернистые кварцевые граувакки (обломочные компоненты песчаной размерности представлены, в порядке возрастания содержаний плагиоклазом, кварцем и обломками пород; последние составляют 40–50% от общего количества обломков). Цемент песчаников серицит-хлоритовый, с резким преобладанием хлорита. Породы разбиты поверхностями кливажа, на которых нередко заметна слабо выраженная линейность.

По наблюдениям в шлифах кливажные поверхности (кливажные зоны [1]) в песчаниках имеют толщину в несколько тысячных долей миллиметра; вдоль них отмечены хлорит, серицит и углеродистое вещество. Кливажные поверхности разделяют полосы породы (микролитоны [1]), толщины которых преимущественно превышает размеры обломочных зёрен (рис. 2, *a, б*). Под микроскопом кливаж сходен с «межзерновым» [1] (continuous disjunctive [13]) кливажем, но характеризуется превышающими размер обломочных зёрен расстояниями между кливажными поверхностями и меньшей толщиной последних. В сечениях породы,

ориентированных вдоль линейности, кливажные поверхности более ровные (рис. 2, *б*), чем в сечениях, ориентированных поперёк линейности (рис. 2, *а*).

Как видно из рис. 2, *a, б*, кливажные поверхности срезают края обломочных зёрен песчаников. В шлифах, ориентированных параллельно или под небольшими углами к поверхностям кливажа, отмечается [8] «шиповидное» [10] (поперечное к границам обломочных зёрен) расположение чешуек хлорита и серицита. В шлифах, ориентированных поперёк поверхностей кливажа, параллельно линейности на поверхностях кливажа, между обломочными зёрнами иногда наблюдаются хлоритовые и серицит-хлоритовые «бороды» [1, 16] — агрегаты чешуек хлорита или хлорита и серицита, ориентированные вдоль направления кливажа (рис. 2, *в*).

Внутри микролитонов нередко отмечается зародышевая кристаллизационная сланцеватость [1] (slaty cleavage [13]) — новообразованные чешуйки серицита (до 0,005 мм в поперечнике), ориентированные вдоль направления кливажа; они могут быть приурочены к границам обломочных зёрен, к кливажным поверхностям, а также появляются внутри присутствующих в песчаниках обломков пород. В краевых частях некоторых обломков кварца наблюдаются отдельные зёрна перекристаллизации («рекристаллизационно-грануляционного бласте-за» [10]) размерами 0,010–0,015 мм.

В песчаниках залегают кварцевые жилы мощностью до нескольких десятков сантиметров, ориентированные под разными углами к кливажу. Кварц в жилах молочно-белый, параллельно-шестоватой, аллотриоморфной и гипидиоморфной структур, с размером индивидов до 2 см в поперечнике. Встречаются как недеформированные, так и в разной степени изогнутые, сплюснутые, расчленённые на отдельные надвинутые один на другой фрагменты и будинированные жилы (рис. 3, *а*). Предметом рассмотрения в настоящей статье являются деформированные жилы. Они могут частично пересекаться поверхностями кливажа и сме-

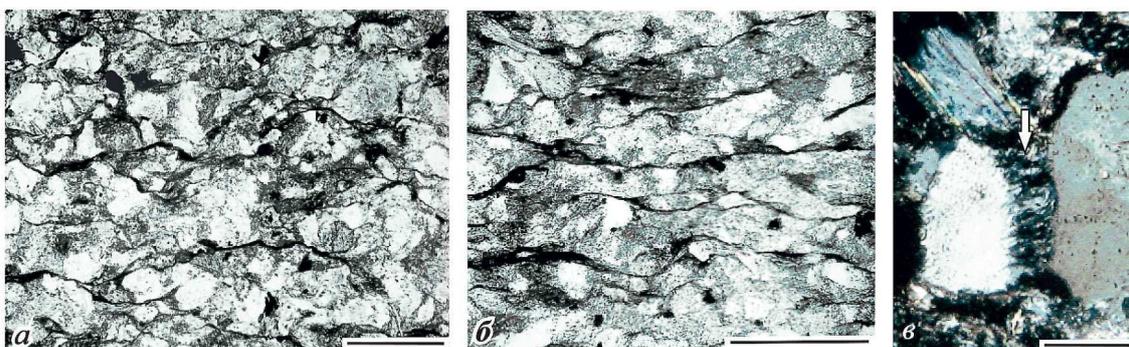


Рис. 2. Кливаж в песчаниках: *a, б* — общий вид, *в* — хлоритовая «борода» (стрелка) между раздвинутыми вдоль направления кливажа обломками кварца (*a, в* — сечения перпендикулярно кливажу и линейности, *б* — сечение перпендикулярно кливажу и параллельно линейности; *a, б* — без анализатора, *в* — с анализатором; масштабный отрезок: *a, б* — 0,4 мм, *в* — 0,1 мм)

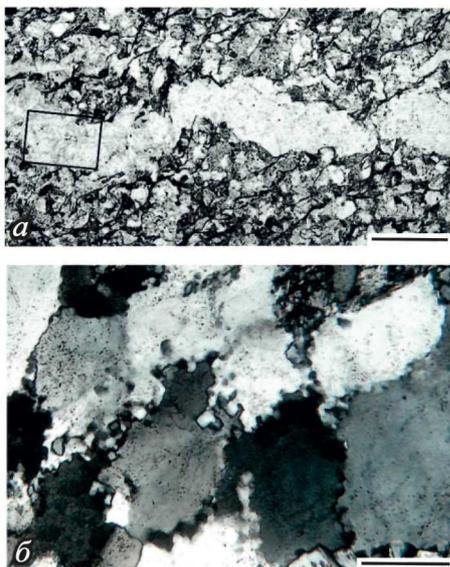


Рис. 3. Деформированная кварцевая жила в песчаниках (*а* – без анализатора; рамка – положение рисунка *б*) и перекристаллизация вдоль границ индивидов кварца в данной жиле (*б* – с анализатором); сечение перпендикулярно кливажу и линейности песчаников; масштабный отрезок: *а* – 0,5 мм, *б* – 0,1 мм

щаться вдоль этих поверхностей; встречаются жилы, смятые в неправильные складки, осевые поверхности которых совпадают с направлением кливажа.

Кварц в жилах деформирован. Преобладающий механизм деформации — внутрикристаллическая пластичность (кристаллопластическая деформация) [11]. Её проявлениями являются волнистое угасание, деформационные ламели, полосы деформации, сплющивание индивидов (при сильной деформации), полигонизация (отмечается в единичных случаях) и динамическая перекристаллизация. Индивиды деформированного кварца часто имеют зубчатые («сутурные» [11]) границы, к которым приурочены зёрна перекристаллизации размерами 0,01—0,02 мм (рис. 3, *б*). Указанные размеры отвечают размерам зубцов на границах индивидов — зёрна перекристаллизации представля-

ют собой отдельные обособившиеся зубцы или их фрагменты (рис. 4). Такой перекристаллизованный кварц обычно составляет до 5% от общего объёма кварца в жиле.

Перекристаллизованный кварц иногда пересекается поверхностями кливажа, переходящими в жилы из вмещающих песчаников, а также мелкими чешуйками серицита, параллельными развитой в песчаниках зародышевой кристаллизационной сланцеватости. На некоторых границах индивидов жильного кварца зубцы (в том числе с приуроченными к ним зёрнами перекристаллизации) вытянуты параллельно кливажу вмещающих жилу песчаников (рис. 5, *б* — левая граница центрального индивида). Вытянутость зубцов параллельно кливажу подобна ориентировке чешуек хлорита и серицита в «бородах» между обломочными зёрнами в песчаниках (рис. 2, *в*). Как и «борода» в песчаниках, полосы вытянутых параллельно кливажу зубцов с отдельными зёрнами перекристаллизации могут быть приурочены не только к границам индивидов, но и к поперечным по отношению к кливажу трещинам в индивидах кварца [7].

Зёрна перекристаллизации наблюдаются не только по границам, но и внутри достаточно крупных индивидов жильного кварца. Так, они могут быть приурочены к иногда имеющимся в индивидах участкам развития мелких слабо разориентированных между собой субзёрен. При этом размеры образующихся внутри индивидов зёрен перекристаллизации (ЗП) и субзёрен сходны между собой и подобны размеру ЗП на границах индивидов (0,01—0,02 мм); по степени разориентировки относительно матрицы от субзёрен к ЗП, находящимся внутри индивидов, наблюдаются постепенные переходы.

Внутри индивидов перекристаллизация также отмечается вдоль микросдвигов (микротрещин скалывания) [6] и субромбоэдрических полос деформации [4] (shear bands [17, 18, 25]). Как и в предыдущем случае, размеры ЗП, приуроченных к микросдвигам и полосам деформации, подобны

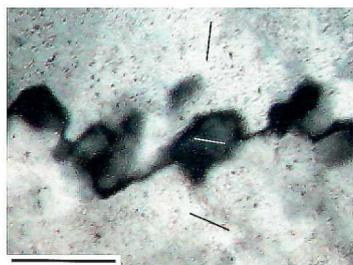


Рис. 4. Зёрна перекристаллизации (тёмное) вдоль зубчатой («сутурной») границы (чёрная) между индивидами кварца (штрихи — направления *c*-оси кварца); с анализатором; масштабный отрезок 0,05 мм

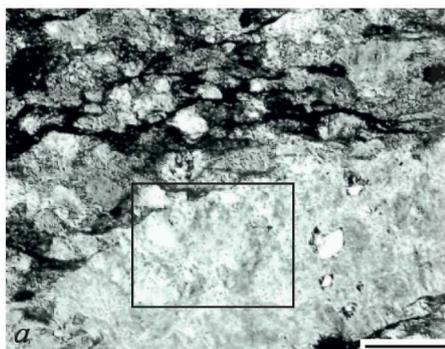


Рис. 5. Кварцевая жила в песчаниках (*а* – без анализатора; черное – кливажные поверхности; рамка – положение рисунка *б*) и перекристаллизация вдоль границ индивидов кварца в этой жиле (*б* – с анализатором); сечение перпендикулярно кливажу и параллельно линейности песчаников; масштабный отрезок: *а* – 0,4 мм, *б* – 0,2 мм

размерам ЗП, располагающимся вдоль границ индивидов. Вблизи микросдвигов, по которым происходит перекристаллизация, в матрице имеются субзёрна, близкие по величине и форме к ЗП; по степени разориентировки относительно матрицы наблюдаются постепенные переходы от этих субзёрен к ЗП (при этом разориентировка *c*-осей ЗП относительно *c*-оси матрицы несколько больше, чем у наиболее сильно переориентированных субзёрен).

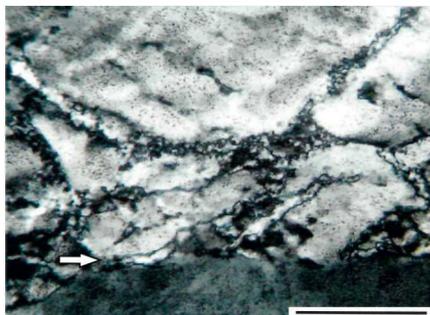


Рис. 6. Контакт (стрелка) между двумя сплюснутыми индивидами кварца; в верхнем индивиде — перекристаллизация вдоль полос деформации; с анализатором; масштабный отрезок 0,2 мм

При сильной кристаллопластической деформации (с образованием значительного волнистого угасания) индивиды жильного кварца часто подвергаются сплющиванию и имеют в шлифах полосовидную форму сечений. Вдоль границ таких индивидов перекристаллизация обычно проявлена относительно слабо — продольные границы таких индивидов преимущественно ровные, лишь с единичными зубчатыми и подвергшимися перекристаллизации участками. Более интенсивно перекристаллизация развита внутри таких индивидов вдоль микросдвигов и полос деформации (рис. 6). При толщине полос деформации до 0,05 мм зёрна перекристаллизации размерами 0,01—0,02 мм образуют полосы шириной в 1—2 зерна в наиболее переориентированных осевых частях полос деформации; ориентировка *c*-осей кварца в зёрнах перекристаллизации повторяет ориентировку *c*-оси осевых частей полос деформации [4, 25].

Обсуждение результатов

Как следует из микроструктур нижнетриасовых песчаников, ведущим механизмом деформации песчаников и образования в них кливажа является растворение под давлением [1, 13]. Оно особенно интенсивно на границах между обломочными зёрнами и кливажными поверхностями, где проявляется в виде срезания кливажными поверхностями боковых частей обломочных зёрен (рис. 2). В результате растворения под давлением происходит сплющивание породы перпендикулярно направ-

лению кливажа, а также сокращение её объёма в связи с выносом растворённых компонентов [13].

При сплющивании имеет место некоторое растяжение породы параллельно плоскости кливажа [13]. Об этом, в частности, свидетельствует присутствие между отдельными обломочными зёрнами хлоритовых и серицит-хлоритовых «бород» (рис. 2, *г*), возникающих при раздвигании обломочных зёрен вдоль направления кливажа [1, 7]. Наиболее интенсивное развитие «бород» в сечениях, ориентированных вдоль линейности, указывает на более сильное растяжение породы в этом направлении.

Степень постдиагенетических изменений рассматриваемых песчаников отвечает стадии метанеза [8], что подтверждается [10] наличием в песчаниках «шиповидных» структур и «рекристаллизационно-грануляционного бластеза» обломочно-го кварца. Согласно [10], метанез (анхиметаморфизм) происходит в тектонически дислоцированных терригенно-осадочных породах при температурах 200—350°C. В песчаниках на стадии метанеза происходит разрушение терригенного биотита, окварцевание или альбитизация полевых шпатов, зарождение кливажа и сланцеватости; глинистые породы при этом превращаются в филлитовидные сланцы с достаточно высокой степенью кристалличности слюдистых минералов [10].

В деформированных кварцевых жилах, залегающих среди рассматриваемых песчаников, вдоль границ индивидов кварца наблюдается перекристаллизация выпячивания. Этому соответствует [14, 18, 19, 23] наличие зубчатых («сутурных» [11]) границ индивидов, к которым приурочены зёрна перекристаллизации, размеры которых (0,01—0,02 мм) отвечают размерам зубцов на границах (рис. 3, *б*; 4; 5, *б*). Согласно отмеченным выше авторам, перекристаллизация выпячивания происходит путём «медленной» [24] локализованной миграции границ зёрен с образованием отдельных зубцов («выпячиваний») в тех местах границ между зёрнами, где плотность дислокаций по разные стороны от границы неодинакова (принадлежащий одному индивиду участок кварца с низкой плотностью дислокаций локально разрастается за счёт участка с высокой плотностью дислокаций в смежном индивиде). Эти зубцы затем преобразуются в зёрна перекристаллизации, представляющие собой отдельные обособившиеся зубцы или фрагменты этих зубцов [14, 18, 19, 23].

Перекристаллизация выпячивания — это динамическая (синхронная с деформацией, синтетектоническая [1]) перекристаллизация, свойственная наиболее низкотемпературному режиму дислокационной ползучести кварца [14, 18, 23]. Согласно [15, 18, 23], размеры зёрен перекристаллизации, подобные наблюдающимся в данном случае (0,01—0,02 мм), свойственны кварцу, деформированному в условиях низов зеленосланцевой фации

метаморфизма при температурах 280–400°C (часть этого интервала температур соответствует отмеченным выше температурам метагенеза [10] песчаников).

Перекристаллизация выпячивания происходит при кристаллопластической деформации, протекающей в условиях высоких дифференциальных напряжений [14, 18, 23]. По данным [16, 22], столь мелкие зёрна перекристаллизации (0,01–0,02 мм) фиксируют своим образованием пиковые коровые напряжения, достигающие нескольких сотен мегапаскалей, которые возникают в континентальной коре вблизи хрупкопластического перехода.

Дислокационная ползучесть (и связанная с ней динамическая перекристаллизация, отмечаемая в рассматриваемых кварцевых жилах) происходит при более высоких дифференциальных напряжениях, чем растворение под давлением (являющееся главным механизмом деформации вмещающих песчаников) [21]. Таким образом, в данном случае в деформируемых кварцевых жилах эти напряжения были более высокими, чем во вмещающих песчаниках. Концентрация напряжений в кварцевых жилах обусловлена тем, что последние обладают в подобных условиях большей вязкостью (компетентностью), чем кливажируемые песчаники [22].

Охарактеризованная выше перекристаллизация внутри индивидов кварца (в участках развития субзёрен, вдоль микросдвигов и субромбоэдрических полос деформации), происходящая одновременно с перекристаллизацией выпячивания по границам индивидов, в литературе отмечается достаточно часто [17, 18, 23]. При этом указывается, что зёрна перекристаллизации (ЗП), образующиеся внутри индивидов, обычно имеют, как и в нашем случае, такие же размеры, как ЗП, возникающие по границам тех же индивидов. Согласно [18, 23], образование ЗП внутри индивидов также обусловлено перекристаллизацией выпячивания. Но в рассматриваемом нами кварце главное значение при перекристаллизации, происходящей внутри индивидов жильного кварца, имеет, по-видимому, вращение субзёрен.

При образовании ЗП в участках развития субзёрен внутри индивидов на это указывает [18] сходство размеров ЗП с размерами субзёрен и постепенные переходы от субзёрен к ЗП по степени разориентировки относительно матрицы. При перекристаллизации вдоль микросдвигов в исходном кварце также образуются субзёрна, близкие по величине и форме к ЗП, и наблюдаются постепенные переходы от субзёрен к ЗП по степени разориентировки относительно матрицы (подобная перекристаллизация вдоль микросдвигов, связанная с вращением субзёрен, описана в [6]). Контроль кристаллографической ориентировки ЗП в полосах деформации вмещающим индивидом также связывают с вращением субзёрен при перекристаллизации вдоль полос деформации [17].

Таким образом, в данном случае в жильном кварце вдоль границ индивидов происходит перекристаллизация выпячивания, обусловленная локальной миграцией границ, а внутри индивидов главную роль при образовании зерен перекристаллизации играет вращение субзёрен. Этот вывод отвечает данным [18, 19] о возможности вращения субзёрен в условиях перекристаллизации выпячивания.

Рассматриваемые кварцевые жилы подвергались деформации при формировании кливажа во вмещающих песчаниках. На это указывают пересечения жил кливажными поверхностями, смещения жил вдоль этих поверхностей, случаи смятия жил в складки, осевые поверхности которых совпадают с направлением кливажа. В процессе формирования кливажа в песчаниках происходила и перекристаллизация жильного кварца. Это подтверждается наличием пересечений перекристаллизованного кварца отдельными кливажными поверхностями, а также чешуйками серицита, аналогичными таковым, образующим кристаллизационную сланцеватость, зарождающуюся в песчаниках при образовании кливажа.

Параллельная кливажу песчаников вытянутость зубцов (с отдельными зёрнами перекристаллизации) на некоторых границах индивидов жильного кварца (рис. 5, б) является, по-видимому, результатом того, что в данном случае образование зубцов и зёрен перекристаллизации сочеталось с процессами растворения—переотложения кварца при раздвигании смежных индивидов кварца (подобном раздвиганию обломочных зёрен в песчаниках при образовании «бород», рис. 2, в). Сочетание перекристаллизации выпячивания с микроструктурами растворения под давлением («с частичным растворением кварцевых зёрен и с кварц-слюдистыми волокнами в тенях давления») отмечено также в [12]. Приведённые данные подтверждают связь перекристаллизации выпячивания в жильном кварце с образованием кливажа в песчаниках и позволяют заключить, что наблюдаемое сочетание кливажа растворения под давлением в песчаниках зоны метагенеза и перекристаллизации выпячивания в жильном кварце можно рассматривать в качестве структурного парагенеза [1].

Выводы

1. В рассматриваемой зоне метагенеза ведущим механизмом деформации песчаников и образования в них кливажа является растворение под давлением, приводящее к сплющиванию породы перпендикулярно направлению кливажа и сопровождаемое ориентированным преимущественно вдоль линейности некоторым растяжением породы параллельно плоскости кливажа.

2. В деформированных кварцевых жилах, залегающих среди подвергшихся метазенезу песчаников, происходит связанная с локальной миграцией границ индивидов кварца перекристаллизация выпячивания, приводящая к образованию зубчатых границ индивидов и располагающихся вдоль них зёрен перекристаллизации размерами 0,01—0,02 мм.

3. Перекристаллизация внутри индивидов кварца (в участках развития субзёрен, вдоль микросдвигов и субромбоэдрических полос деформации), сопровождающая ПВ, приуроченную к границам индивидов, происходит при участии прогрессивного вращения субзёрен.

4. При раздвигании смежных индивидов кварца вдоль направления кливажа ПВ в деформируемых жилах сочетается с процессами растворения—перераспределения кварца.

5. Столь мелкие зёрна ПВ своим образованием могут фиксировать пиковые коровые напряжения, возникающие при деформации континентальной коры вблизи хрупкопластического перехода.

6. Поскольку ПВ в жильном кварце происходит при формировании во вмещающих песчаниках кливажа растворения под давлением, сочетание данного кливажа в песчаниках зоны метазенеза и ПВ в жильном кварце можно рассматривать в качестве структурного парагенеза.

ЛИТЕРАТУРА

- Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику. М.: КДУ, 2005. 496 с.
- Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. Львов: Изд.-во Львов. ун-та, 1961. 284 с.
- Гусев Г.С. Складчатые структуры и разломы Верхояно-Колымской системы мезозойд. М.: Наука, 1979. 218 с.
- Емлин Э.Ф., Синкевич Г.А., Якшин В.И. Жильный кварц Урала в науке и технике. Свердловск: Средне-Уральское книжн. изд-во, 1988. 272 с.
- Парфенов Л.М., Оксман В.С., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Третьяков Ф.Ф., Трунилина В.А., Деякуненко 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.
- Суставов О.А. Рекристаллизация жильного кварца в зоне Мурзинского сдвига (Средний Урал) // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1987. № 2. С. 91—99.
- Суставов О.А. Перекристаллизация породообразующего и жильного кварца при формировании кливажа в березитизированных песчаниках золото-сурьмяного месторождения Сарылах (Якутия) // Изв. вузов. Геология и разведка. 1997. № 5. С. 51—57.
- Трунилина В.А., Коробицын А.В., Сергеев А.И. Распределение золота в изверженных и осадочных породах хр. Кулар // Золоторудные формации и геохимия золота Верхояно-Чукотской складчатой области. М.: Наука, 1975. С. 236—259.
- Фридовский В.Ю. Куларская металлогеническая зона: метаморфогенные Au кварцевые месторождения // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под ред. Л.М. Парфенова и М.И. Кузьмина. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 350—353.
- Япаскерт О.В. Аспекты теории постседиментационного литогенеза // Литосфера. 2005. № 3. С. 3—30.
- Venkensop T. Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks. Kluwer Academic Publishers, 2002. 150 p.
- Dunlap W. J., Hirth G., Teissier C. Thermomechanical evolution of a ductile duplex // Tectonics. 1997. Vol. 16. N 6. P. 983—1000.
- Fossen H. Structural Geology. Cambridge: University Press, 2010. 463 p.
- Hirth G., Tullis J. Dislocation creep regimes in quartz aggregates // Jour. Struct. Geol. 1992. Vol. 14. N 2. P. 145—159.
- Kidder S., Avouac J.-P., Chan Y.-C. Application of titanium-in-quartz thermobarometry to greenschist facies veins and recrystallized quartzites in the Hsuehshan range, Taiwan // Solid Earth. 2013. N 4. P. 1—21. DOI:10.5194/se-4-1-2013.
- Kidder S., Hirth G., Avouac J.-P., Behr W. The influence of stress history on the grain size and microstructure of experimentally deformed quartzite // Jour. Struct. Geol. 2016. Vol. 83. P. 194—206.
- Menegon L., Pennacchioni G., Heilbronner R., Pittarel L. Evolution of quartz microstructure and c-axis crystallographic preferred orientation within ductile deformed granitoids (Arolla unit, Western Alps) // Jour. Struct. Geol. 2008. Vol. 30. P. 1332—1347. DOI:10.1016/j.jsg.2008.07.007.
- Stipp M., Stunitz H., Heilbronner R., Schmid S.M. The eastern Tonalite fault zone: a «natural laboratory» for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C // Jour. Struct. Geol. 2002. Vol. 24. P. 1861—1884.
- Stipp M., Kunze K. Dynamic recrystallization near the brittle-plastic transition in naturally and experimentally deformed quartz aggregates // Tectonophysics. 2008. Vol. 448. P. 77—97. DOI:10.1016/j.tecto.2007.11.041.
- 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. P. 759—762. DOI: 10.1130/G31162.1.
- Takehita T., Hara I. c-Axis fabrics and microstructures in a recrystallized quartz vein deformed under fluid-rich greenschist conditions // Jour. Struct. Geol. 1998. Vol. 20. N 4. P. 417—431.
- Trepmann C. A., Stockert B. Microfabric of folded quartz veins in metagreywackes: dislocation creep and subgrain rotation at high stress // Jour. metamorp. Geol. 2009. Vol. 27. P. 555—570. DOI:10.1111/j.1525-1314.2009.00842.x.
- Tullis J. Deformation of Granitic Rocks: Experimental Studies and Natural Examples // Reviews Mineral. Geochem. 2002. Vol. 51. C. 51—95.
- Urai J.L., Means W.D., Lister G.S. Dynamic recrystallization of minerals // Geophys. Monograph. Amer. Geophys. Union. 1986. Vol. 36. P. 161—199.
- Van Daalen M., Heilbronner R., Kunze K. Orientation analysis of localized shear deformation in quartz fibres at the brittle—ductile transition // Tectonophysics. 1999. P. 303. P. 83—107.

REFERENCES

- Goncharov M.A., Talickij V.G., Frolova N.S. *Vvedenie v tektonofiziku* — [Introduction to Tectonophysics]. M., KDU Publ., 2005, 496 p. (In Russian).
- Grigor'ev D.P. *Ontogeniya mineralov* — [Ontogeny of minerals]. L'vov: Publ. L'vov. un-ta, 1961, 284 p. (In Russian).
- Gusev G.S. *Skladchatye struktury i razlomy Verkhoyano-Kolymskoi sistemy mezozoid* — [Folded structures and faults of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoid system]. M., Nauka Publ., 1979, 218 p. (In Russian).
- Emlin Je.F., Sinkevich G.A., Jakshin V.I. *Zhil'nyi kvarts Urala v nauke i tekhnike* — [The vein quartz of the Urals in science and technology]. Sverdlovsk, Middle-Ural, book Publ., 1988, 272 p. (In Russian).
- Parfenov L.M., Oxman V.S., Prokop'ev A.V., Timofeev V.F., Tret'yakov F.F., Trunilina V.A., Deikunenko A.V. Kollash terreyinov Verkhoyano-Kolymskoi orogennoi oblasti [Collage of terrains of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic area], *Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii respubliki Sakha (Yakutiya)* — [Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Republic of

- Sakha (Yakutia)]. M., MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001, pp. 199–254. (In Russian).
6. Sustavov O.A. Rekrystallizatsiya zhil'nogo kvartsa v zone Murzinskogo sdviga (Srednii Ural) [Recrystallization of vein quartz in the Murzin shear zone (Middle Urals)], *Izv. AN SSSR. Ser. geol.* — [Proc. AS SSSR. Ser. geol.], 1987, no. 2, pp. 91–99. (In Russian).
 7. Sustavov O.A. Perekrystallizatsiya porodooobrazuyushchego i zhil'nogo kvartsa pri formirovanii klivazha v berezitizedirovannykh peschanikakh zoloto-sur'myanogo mestorozhdeniya Sarylakh (Yakutiya) [Recrystallization of rock-forming and vein quartz during cleavage formation in berezitized sandstones of the Sarylakh gold-antimony deposit (Yakutia)], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 1997, no. 5, pp. 51–57. (In Russian).
 8. Trunilina V.A., Korobicyan A.V., Sergeenko A.I. Raspreделение zolota v izverzhennykh i osadochnykh porodakh khr. Kular — [Distribution of gold in igneous and sedimentary rocks, Kular], *Zolotorudnye formatsii i geokhimiya zolota Verkhoyano-Chukotskoi skladchatoi oblasti* — [Gold Ore Formations and Geochemistry of Gold in the Verkhoyansk-Chukotsky Folded Region]. M., Nauka Publ., 1975, pp. 236–259. (In Russian).
 9. Fridovsky V.Yu. Kularskaya metallogenicheskaya zona: metamorfogennyye Au kvartsevye mestorozhdeniya [Kular metallogenic zone: metamorphogenic Au quartz deposits], *Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii respubliki Sakha (Yakutiya)* — [Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Republic of Sakha (Yakutia)]. M., MAIK «Nauka/Interperiodika» Publ., 2001, pp. 350–353. (In Russian).
 10. Japaskurt O.V. Aspekty teorii postsedimentatsionnogo litogeneza [Aspects of the theory of post-sedimentary lithogenesis], *Litosfera* [Lithosphere], 2005, no. 3, pp. 3–30. (In Russian).
 11. Blenkinsop T. *Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks*. Kluwer Academic Publishers, 2002, 150 p.
 12. Dunlap W. J., Hirth G., Teissier C. Thermomechanical evolution of a ductile duplex, *Tectonics*, 1997, vol. 16, no. 6, pp. 983–1000.
 13. Fossen H. *Structural Geology*. Cambridge University Press, 2010, 463 p.
 14. Hirth G., Tullis J. Dislocation creep regimes in quartz aggregates, *Jour. Struct. Geol.*, 1992, vol. 14, no. 2, pp. 145–159.
 15. Kidder S., Avouac J.-P., Chan Y.-C. Application of titanium-in-quartz thermobarometry to greenschist facies veins and recrystallized quartzites in the Hsuehshan range, Taiwan, *Solid Earth*, 2013, no. 4, pp. 1–21. DOI:10.5194/se-4-1-2013.
 16. Kidder S., Hirth G., Avouac J.-P., Behr W. The influence of stress history on the grain size and microstructure of experimentally deformed quartzite, *Jour. Struct. Geol.*, 2016, vol. 83, pp. 194–206.
 17. Menegon L., Pennacchioni G., Heilbronner R., Pittarel L. Evolution of quartz microstructure and c-axis crystallographic preferred orientation within ductile deformed granitoids (Arolla unit, Western Alps), *Jour. Struct. Geol.*, 2008, vol. 30, pp. 1332–1347. DOI:10.1016/j.jsg.2008.07.007.
 18. Stipp M., Stuniz 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, *Jour. Struct. Geol.*, 2002, vol. 24, pp. 1861–1884.
 19. Stipp M., Kunze K. Dynamic recrystallization near the brittle-plastic transition in naturally and experimentally deformed quartz aggregates, *Tectonophys.*, 2008, vol. 448, pp. 77–97. DOI:10.1016/j.tecto.2007.11.041.
 20. 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, pp. 759–762. DOI: 10.1130/G31162.1.
 21. Takeshita T., Hara I. c-Axis fabrics and microstructures in a recrystallized quartz vein deformed under fluid-rich greenschist conditions, *Jour. Struct. Geol.*, 1998, vol. 20, no. 4, pp. 417–431.
 22. Trepmann C. A., Stockhert B. Microfabric of folded quartz veins in metagreywackes: dislocation creep and subgrain rotation at high stress, *Jour. metamorp. Geol.*, 2009, vol. 27, pp. 555–570. DOI:10.1111/j.1525-1314.2009.00842.x.
 23. Tullis J. Deformation of Granitic Rocks: Experimental Studies and Natural Examples, *Reviews Mineral. Geochem.*, 2002, vol. 51, pp. 51–95.
 24. Urai J.L., Means W.D., Lister G.S. Dynamic recrystallization of minerals, *Geophys. Monograph. Amer. Geophys. Union*. 1986, vol. 36, pp. 161–199.
 25. Van Daalen M., Heilbronner R., Kunz K. Orientation analysis of localized shear deformation in quartz fibres at the brittle–ductile transition, *Tectonophys.*, 1999, vol. 303, pp. 83–107.