

УДК 548.4, 552.164, 54.01

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЙ МОРФОЛОГИИ И СОСТАВА ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КВАРЦЕ НА ФОНЕ ПРОГРЕССИРУЮЩИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ЖИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЗАПАДНОГО ФЛАНГА КЕЛЯНО-ПРОКИНДИНСКОЙ ЗОНЫ СМЯТИЯ (*Западное Забайкалье*)

Э.Н. Кунгулова¹, П.А. Тишин¹, Д.В. Лычагин¹, А.А. Томиленко², Е.Н. Москвичев¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Томск, просп. Ленина, 36, Россия

²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

С целью изучения поведения флюида при пластических деформациях проанализированы морфология и распределение флюидных включений в кварце разных типов микроструктур из жилы, контролируемой надвиговыми и сдвиговыми деформациями в восточной части Саяно-Байкальской складчатой области. Микроструктурные и кристаллографические особенности кварца исследованы методом дифракции отраженных электронов. Состав флюидных включений изучен методами микротермометрии, рамановской спектроскопии. Выделено семь структурных видов флюидных включений, отличающихся морфологическими признаками и положением в деформационной структуре кварца. Предложена модель последовательных структурных превращений кварцевых агрегатов при дислокационном скольжении и последующей рекристаллизации в условиях ползучести. Описана взаимосвязь перераспределения жидкости в структуре кварца с процессами преобразований кварцевых агрегатов в результате пластических деформаций. Выявлено, что потеря воды из флюидных включений, сопровождаемая их качественными и количественными изменениями, происходит на всех этапах пластической деформации кварца. При средних температурах и средних скоростях деформации эффективен дислокационный массоперенос при дислокационном скольжении. При низких скоростях деформации и повышенных температурах постепенно увеличивается вклад диффузионной ползучести, что способствует взаимодействию включений с мигрирующими границами.

Жильный кварц, микроструктура, флюидные включения, EBSD, КР-спектроскопия

MORPHOLOGY AND COMPOSITION CHANGES IN FLUID INCLUSIONS FROM QUARTZ UNDER PROGRESSIVE DEFORMATION: CASE STUDY OF A VEIN SYSTEM IN THE WESTERN KELYAN-IROKINDA FOLD ZONE (*Western Transbaikalia*)

E.N. Kungulova, P.A. Tishin, D.V. Lychagin, A.A. Tomilenko, E.N. Moskvichev

The behavior of fluids during plastic deformation is studied from the morphology and distribution of fluid inclusions in quartz grains of different microstructure types from a vein system controlled by thrusting and strike-slip faulting in the eastern Sayan–Baikal fold area. The analytical work includes electron backscatter diffraction (EBSD) for quartz microstructure and crystallography, as well as Linkam heating-and-freezing analysis and Raman spectroscopy for the composition of fluid inclusions. The studied fluid inclusions are of seven types that differ in morphology and position in the deformed quartz structure. A model is suggested to describe successive structural changes of quartz aggregates during dislocation sliding and subsequent creep-related recrystallization associated with redistribution of fluid. Fluid inclusions undergo qualitative and quantitative changes due to water leakage at all stages of plastic deformation. The changes occur by two main mechanisms: (i) mass transfer during dislocation sliding at medium temperatures and strain rates and (ii) diffusion creep at low strain rates and high temperatures. The contribution of creep increases gradually with temperature, which maintains the interaction of inclusions with migrating grain boundaries.

Vein quartz, microstructure, fluid inclusions, EBSD, Raman spectroscopy

ВВЕДЕНИЕ

В условиях средней и нижней коры исследования включений флюидов в сочетании с микроструктурными и петрологическими данными содержат ключ к пониманию роли флюидов в деформационных процессах [van den Kerkhof et al., 2014; Siebenaller et al., 2016; Добрецов и др., 2017; Sosa et al., 2018]. Благодаря чему появляется большое количество данных о переносе вещества, связанного с деформацион-

© Кунгулова Э.Н., Тишин П.А., Лычагин Д.В., Томиленко А.А., Москвичев Е.Н., 2023

✉ e-mail: elvirakungulova@mail.ru

ными процессами и сопряженных с ними метаморфическими реакциями [Crawford, Hollister, 1986; Putnis, 2009; Mesquita et al., 2021], которые в этом случае могут быть неизохимическими [Putnis, John, 2010].

На основании многочисленных экспериментальных работ показано, что под действием напряжений происходит модификация форм флюидных включений, образование трещин в прилегающих областях и их дальнейшее залечивание с образованием новых вакуолей [Tarantola et al., 2010; Bakker, 2017]. В ходе чего во включениях отмечается потеря воды, которая сопровождается возрастанием солёности и доли газовой фазы [Bakker, Jansen, 1990, 1994; Hollister, 1990; Küster, Stöckhert, 1997; Johnson, Hollister, 2007] и способствует тому, что гомогенизация этих включений будет соответствовать аномально высоким температурам [Реддер, Хитаров, 1987]. При этом процесс изменения состава включений может быть описан классическими диффузионными моделями [Bakker, 2009], градиентом давления [Bakker, Jansen, 1990] или связан с переходом от α - к β -кварцу [Doppler, Bakker, 2014].

По мнению Р. Дж. Баккера [Bakker, 2009], наиболее эффективным процессом транспортировки компонентов является диффузия вдоль микротрещин и дислокаций. Взаимодействие флюидных включений с дислокациями [Bakker, Jansen, 1990, 1994] во время их скольжения приводит к рециркуляции воды между включениями и ядрами дислокаций [Stünitz et al., 2017]. Включения, в свою очередь, частично действуют как источники дислокаций. При этом связи кварца Si-O в ядрах дислокаций преобразуются в Si-OH и отвечают за перенос молекулярной H_2O в структурно связанные дефекты OH [Stünitz et al., 2017]. Дефекты OH изменяют некоторые макроскопические физико-химические свойства кварца, включая его реологию и пьезоэлектрические характеристики [Kronenberg и др., 1986]. Это приводит к облегчению пластической деформации кварца посредством гидролитического ослабления [Griggs, 1967; Heggie, Jones, 1986; Tarantola et al., 2010; Law, 2014; Palazzin et al., 2018; Singleton et al., 2020; Zhou et al., 2022].

Таким образом, флюидный режим при деформациях демонстрирует как возможность смены состава флюидных включений при установлении равновесия или рекристаллизации, так и роль флюидной фазы при рекристаллизации [Tullis, Yund, 1982; Olgaard, Evans, 1986; Schmatz, Urai, 2010; Dijkstra et al., 2011; Pongrac et al., 2022]. Многие исследователи фиксируют взаимодействие флюидной фазы с мигрирующими при рекристаллизации границами [Kerrick, 1976; Drury, Urai, 1990; Schmatz, Urai, 2011; Singleton et al., 2020; Song et al., 2020].

При возникновении структурной неоднородности в жильном кварце, связанной, например, с механическими дофинейскими двойниками, демонстрирующими поворот индивида на 60° относительно оси *C* [Tullis, 1970; Tullis, Tullis, 1972], процессы перекристаллизации подчиняются определенным кристаллографическим закономерностям [Menegon et al., 2011] и сопровождаются распределением флюидных включений в структуре кварца [Fall et al., 2016].

Из данных результатов следует важность совместного рассмотрения процессов, происходящих во флюидной системе и деформационных агрегатах матрицы. Основываясь на этом подходе была сформулирована цель настоящей работы: выявление особенностей структурного контроля распределения флюидных включений в деформированном кварце жильной системы руч. Отвесный.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования выбрана кварцевая жила, являющаяся магистральной в строении жильной системы руч. Отвесный, расположенной в пределах Байкало-Витимской складчатой системы в восточной части Саяно-Байкальской складчатой области [Зорин и др., 2009; Руженцев и др., 2012]. Формирование кварцевой жилы связано с развитием надвиговой системы северо-западного простирания и последующим наложением сдвигобросовой составляющей [Kungulova et al., 2019]. Взаимная ориентировка жил представлена на рис. 1.

Строение жильной системы. В строении системы выделяются несколько серий с характерной ориентировкой жил и прожилков. Каждая серия определяется развитием трех зон (см. рис. 1, *a—в*). Первая зона или зона лежачего блока характеризуется развитием умеренно и крутопадающих крупных магистральных жил северо-западного простирания мощностью от 0.5 до 2.0 м (на рисунке выделено красным). Осевая зона представлена сложной системой сближенных прожилков мощностью до 5 см (на рисунке показано серым цветом) меридиональной или север-северо-западной ориентировкой. Зона висячего блока характеризуется веерными телами с западным падением мощностью от первых сантиметров до 0.5—0.7 м (на рисунке выделено зеленым). Подчиненное значение имеют пологопадающие прожилки (голубой цвет на рисунке), которые опережают магистральные жилы.

Полюса рассеивания жильных образований (см. рис. 1, *з*) расположены на поясе дуги большого круга, которая совпадает с полюсами рассеивания структурных элементов надвиговой системы, что указывает на контроль кварцевых жил зоны руч. Отвесный нарушениями фланговой зоны надвиговой системы: взбросонадвигами северо-западного простирания ($60^\circ \angle 30^\circ$) и меридионально крутопадающими сбросами ($270^\circ \angle 85^\circ$). При этом жилы висячего крыла $250^\circ \angle 60^\circ$ выполняют трещины растяжения, образованные при развитии сбросовых деформаций (см. рис. 1, *з*, сектор растяжения II). Формирование

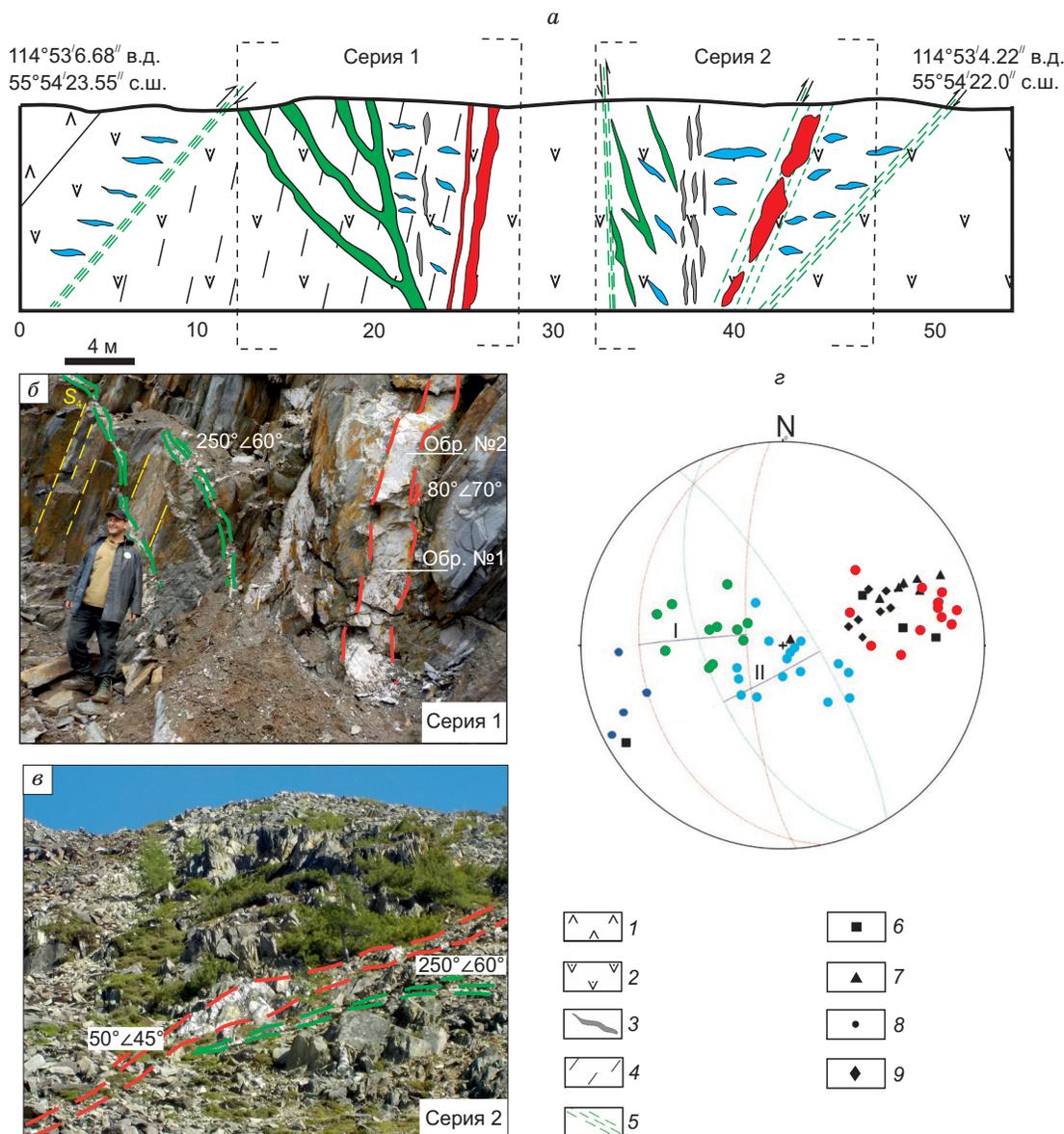


Рис. 1. Структура жильной системы:

a — разрез; *б* — кварцевые жилы серии 1; *в* — кварцевые жилы серии 2; *г* — стереографическая проекция распределения структурных элементов, жил и прожилков.

a: 1 — андезит, 2 — андезибазальт, 3 — жилы и прожилки, 4 — кливаж, 5 — разлом; *г*: 6 — разлом, 7 — кливаж, 8 — жилы, 9 — сланцеватость. *a–г* — цвет определяет соответствующий тип жил, см. текст; *б* — желтые штриховые линии (S_4) — кливаж.

магистральных крупных жил лежащего крыла (падение $80^\circ/70^\circ$ и $60^\circ/50^\circ$) связывается с выполнением жильным материалом интенсивно дислоцированных узлов и трещин расщепления в условиях инверсии напряжений в результате периодической активизации перемещений взбросового и сбросового типов. Развитие пологопадающих прожилков $290^\circ/10^\circ$ определяется вектором растяжения при образовании взбросовых разломов (см. рис. 1, *г*, сектор растяжения I). Изученная нами кварцевая жила сохраняет свою геометрическую целостность и не сгибается. Единственными локальными изменениями являются начальные проявления будинажа.

Формирование кварца жильной системы связано с эволюцией метаморфогенно-гидротермального водно-углекислотного флюида хлоридного калий-натриевого состава низкой и средней солёности (2—15 мас. % NaCl-экв.). При развитии надвиговой системы была захвачена первая порция высокоплотного метаморфогенного диффузионно-мигрирующего флюида. При дальнейшей разгрузке метаморфогенно-гидротермальных флюидов, связанной с одновременным раскрытием сдвиговых и надвиговых деформаций, был образован кварц изученной нами жилы при температурах 370—180 °C и давлении 1.9—0.7 кбар [Кунгулова и др., 2022].

Методы исследования. В петрографических шлифах и полированных с двух сторон пластинках семи образцов жильного кварца изучен характер распределения флюидных включений в агрегатах с разной микроструктурой. Для двух образцов кварца из семи получены панорамные изображения в режиме дифракции отраженных (EBSD) электронов на растровом микроскопе.

Микроструктурные и кристаллографические особенности жильного кварца исследовали на оптическом микроскопе Leica DM750P в отраженном и проходящем свете и на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3 LMU (Tescan, Czech) на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета (грант Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №. 075-15-2021-693 (№ 13. ЦКП.21.0012)). Сканирующий электронный микроскоп оснащен устройством Nordlys F (Oxford Instruments, Великобритания) для метода EBSD. Поверхность кварца была подготовлена путем механической полировки и ионного травления на многофункциональном устройстве SEMPrep2 (Technoorg Linda Co. Ltd., Hungary). Напыление образцов углеродом проводили на установке EMITECH K450X. Слой напыления 5—15 нм. Съемку производили при ускоряющем напряжении 20 кВ, ток пучка ~0.8 нА, рабочее расстояние 15 мм, наклон образца 70°. EBSD съемку вели по прямоугольной сетке путем перемещения электронного пучка с регулярным шагом 2 или 4 мкм (не менее 10 пикселей на зерно). Область сканирования при этом составляла 1 мм². Обработку результатов проводили с использованием лицензионного программного обеспечения Oxford Instruments AZtec. Анализ полученных данных EBSD осуществляли с помощью программного обеспечения HKL Channel 5 (Oxford Instruments, GB) и HKL Crystals. При делении границ на мало- и большеугловые принимали величину угла разориентации 10°. Общая индексация для тригонального кварца составила от 80 до 90 %. Из кристаллографического анализа с использованием программ HKL Crystals и HKL Channel 5 можно извлечь три основных характеристики границ: кристаллографические ориентации смежных зерен, величину угла разориентации (θ), кристаллографическую ориентацию оси поворота $\langle uvw \rangle$.

С целью идентификации дофинеиных двойников при обработке данных EBSD был использован анализ трассировки границ. В настоящем исследовании мы определяли наличие дофинеиных двойников по следующей группе признаков: во-первых, наличие пика, приходящегося на угол разориентации около 60°, связанного с вращением вокруг оси L_3 ; во-вторых, аналогичные углы Эйлера ϕ_1 и Φ и разность углов Эйлера $\phi_2 = 60^\circ$ [Tullis, 1970; Tullis, Tullis, 1972; Pehl, Wenk, 2005]. Согласно данным работы [Menegon, 2011] принято, что новообразованные зерна рекристаллизации приурочены к положительному ромбоэдру $r \{101^- 1\}$, ориентированному почти параллельно направлению сжатия, и не связаны с отрицательным z ромбоэдром $\{011^- 1\}$, ориентация которого почти ортогональна направлению сжатия.

Процессы рекристаллизации в условиях ползучести описаны согласно режимам, представленным в работах [Hirth, Tullis, 1992; Stipp et al., 2002, 2010; Stipp, Kunze, 2008; Kidder et al., 2016]. На основе данных кварц претерпевает внутреннюю перестройку зерен, связанную с медленной миграцией границ (BLG рекристаллизация), вращением субблоков (SGR рекристаллизация) и появлением крупных недеформированных зерен с большеугловыми границами (GBM рекристаллизация).

В прозрачно-полированных пластинках были исследованы флюидные включения методами термометрии и рамановской спектроскопии в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и Томском политехническом университете (г. Томск). Для определения температур гомогенизации использовали микротермокамеру THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений температур от -196 до +600 °С. Плотность водно-солевых включений рассчитывали исходя из температуры общей гомогенизации и солёности по методике, изложенной в работе [Steele-MacInnis et al., 2012]. Состав флюидных включений в кварце был исследован методом КР-спектроскопии [Dubessy et al., 1989; Frezzotti et al., 2012] на спектрометре Horiba Lab Ram HR 800 в ИГМ СО РАН, Новосибирск. Возбуждение проводилось твердотельным Nd YAG лазером с длиной волны 532 нм и мощностью 75 мВт. Регистрация спектра производилась полупроводниковым детектором Endor, охлаждаемым по методу Пельтье. Для локализации точки в анализируемом образце использована конфокальная система спектрометра на базе микроскопа OLYMPUS BX-41 с объективом x100 с большой числовой апертурой. Анализ проводился в геометрии обратного рассеяния. Время накопления сигнала и размер конфокальной диафрагмы варьировали в зависимости от размеров анализируемой фазы. Минимальный размер конфокального отверстия 30 нм (для объектов размером 5—10 мкм), максимальный размер 300 нм (для объектов больше 100 мкм). Спектры получены в диапазоне 100–4200 см⁻¹. Погрешность ее определения находится в пределах 1 см⁻¹. Время накопления сигнала изменялось от 25 с/спектральное окно для крупных объектов до 400 с/спектральное окно для мелких объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разнообразие микроструктур и структурных элементов. Проведенный ранее структурно-кристаллографический анализ образцов кварца демонстрирует существенную деформационную неоднородность.

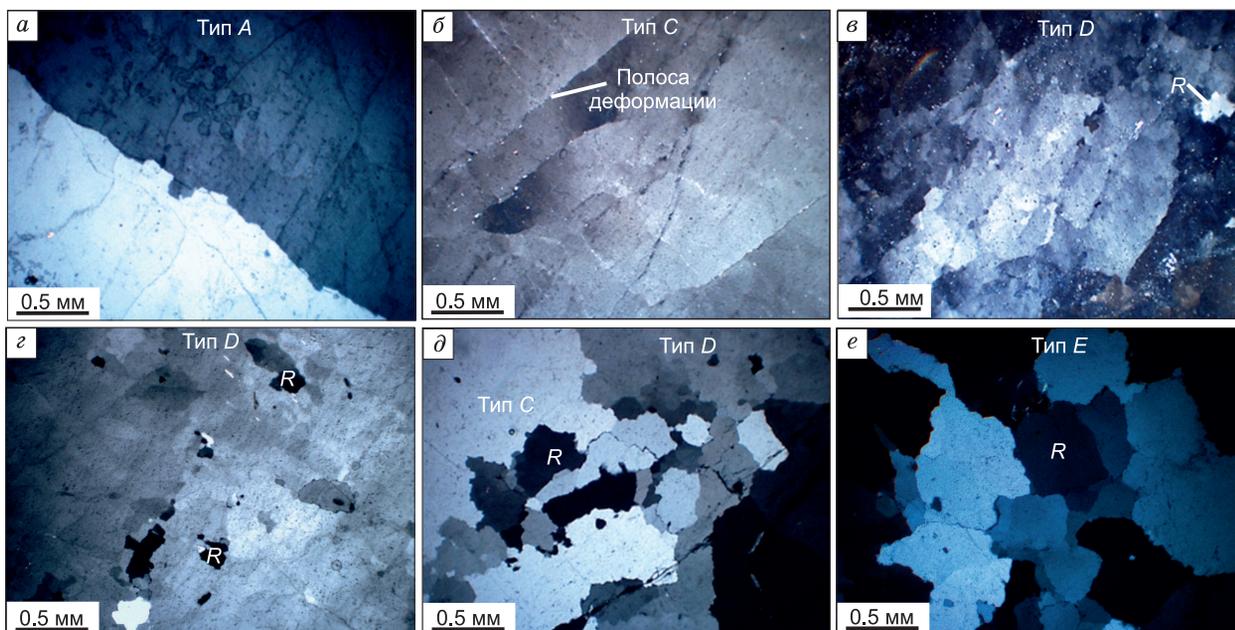


Рис. 2. Типы микроструктур жильного кварца:

a — протозернистая; *б* — фрагментарная; *в–д* — псевдопорфириобластовая; *е* — зерновая. *R* — зерно рекристаллизации.

родность, которая выражается в появлении различных типов микроструктур [Luchagin et al., 2020]: недеформированная протозернистая микроструктура типа *A*, слабдеформированная фрагментарная микроструктура типа *C*, деформированная псевдопорфириобластовая микроструктура типа *D*, зернистая микроструктура типа *E* (рис. 2). Названия микроструктур предложены на основе существующих представлений о классификации кварцевых агрегатов [Кабанова, 2016].

На основе анализа выделенных структурных типов жильного кварца с применением метода EBSD для каждого типа фиксируются определенные морфологические особенности структурных элементов, спектр разориентации зерен и внутризерновых блоков. Типичными элементами типов микроструктуры являются субзерна, полосы деформации, механические дофинейские двойники, зерна рекристаллизации. Базовым элементом структуры жильного кварца являются крупные зерна, ограниченные большеугловыми границами ($> 65^\circ$). Многие из которых внутри зерна содержат дофинейские двойники (протозернистая микроструктура, см. рис. 2, *a*).

Зерна кварца, в которых фиксируются полосы деформации, характеризуются фрагментарной микроструктурой (рис. 2, *б*). Кварц псевдопорфириобластовой микроструктуры (см. рис. 2, *в, г, д*) демонстрирует присутствие участков развития групп рекристаллизованных зерен (*R*), повторяющих форму многочисленных субблоков (см. рис. 2, *в, г*). При повороте столика поляризационного микроскопа такие субблоки гаснут в произвольном порядке. Кварц зерновой микроструктуры типа *E* характеризуется средними (от 1 мм) изометричными слабдеформированными зернами с плавными, волнистыми границами (см. рис. 2, *д, е*). Такие зерна могут или формировать группы, окруженные кварцем псевдопорфириобластовой микроструктуры (см. рис. 2, *д*), или быть линейно приурочены к полосам деформации (см. рис. 2, *е*).

В пространственном распределении этих структур не установлено четких закономерностей относительно контактов жил и структурных элементов вмещающих пород (слоистость, кливаж, сланцеватость). Как правило, микроструктуры кварца сменяют друг друга в пространстве жил, поэтому мы можем предположить блочно-ячейчатое строение кварцевых жил, где изолированные участки слабдеформированных агрегатов отделены друг от друга зонами повышенных деформаций.

Особенности состава и пространственной позиции флюидных включений в кварцевых агрегатах. В кварцевых зернах наблюдаются многочисленные флюидные включения разнообразны по фазовому составу: I — двухфазные водно-солевые ($\text{ЖН}_2\text{О} + \text{ГН}_2\text{О}$), II — двухфазные водно-углекислотные ($\text{ЖН}_2\text{О} + \text{ЖСО}_2$), III — трехфазные водно-углекислотные ($\text{ЖН}_2\text{О} + \text{ЖСО}_2 + \text{ГСО}_2$), IV — однофазные включения жидкой углекислоты [Кунгулова и др., 2022]. Флюидные включения выделенных типов характеризуются различной пространственной позицией, на основании чего в агрегатах жильного кварца произведена типизация структурных видов флюидных включений (рис. 3, табл. 1, дополнительные материалы, https://sibran.ru/journals/Suppl_Kungulova.pdf).

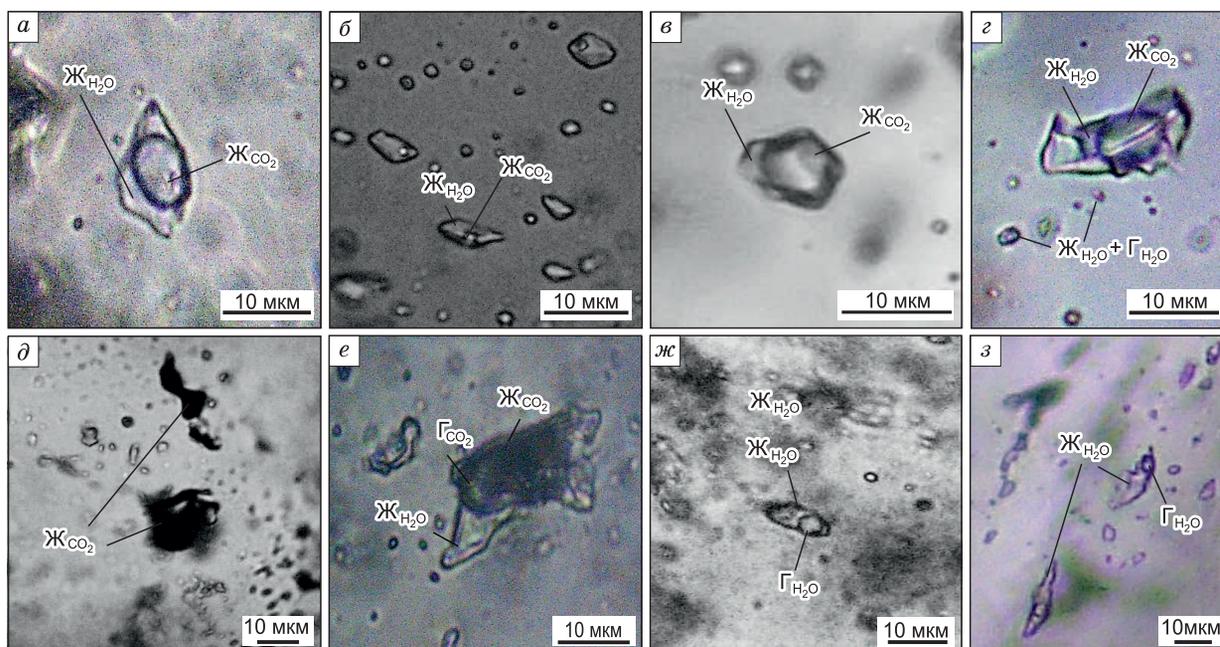


Рис. 3. Структурные виды флюидных включений в жильном кварце:

a — вид *a* в кварце протозернистой микроструктуры; *б* — вид *b* в кварце протозернистой микроструктуры; *в* — вид *c* в кварце фрагментарной микроструктуры; *г* — вид *d* в кварце фрагментарной микроструктуры; *д* — вид *e* в кварце псевдопорфиробластовой микроструктуры; *e* — вид *f* в кварце псевдопорфиробластовой микроструктуры; *ж* — вид *g* в зернах рекристаллизации; *з* — вид *g* в кварце зерновой микроструктуры.

Первый структурный вид *a* соответствует первичным включениям, представленным в агрегатах кварца протозернистой микроструктуры. Для них характерны изометричная форма и размер, достигающий 25 мкм (см. рис. 3, *a*). При комнатной температуре включения преимущественно двухфазные ($\text{ЖH}_2\text{O} + \text{ЖCO}_2$) с фазой жидкой углекислоты разного размера. Реже в качестве первичных выступают существенно углекислотные включения (IV тип). Наряду с углекислотой, по данным КР-спектроскопии, во включениях фиксируется до 4 мол. % азота.

Флюидные образования второго структурного вида *b* (см. рис. 3, *б*) фиксируются в виде линейно вытянутых изогнутых групп шириной ≈ 100 мкм (см. доп. материалы, рис. S1, *б*). В пределах групп на-

Таблица 1. Структурные виды флюидных включений в кварце

Вид ФВ	Характеристика структурного вида ФВ	Тип микроструктуры				Тип по фазовому составу, по [Кунгулова и др., 2022]
		<i>A</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	
<i>a</i>	Изометричные включения, неравномерно распределенные в зернах кварца	+				II ($\text{ЖH}_2\text{O} + \text{ЖCO}_2$), IV
<i>b</i>	Линейно вытянутые группы включений, не приуроченные к залеченным трещинам	+	+	+		IV, II ($\text{ЖH}_2\text{O} + \text{ЖCO}_2$)
<i>c</i>	Включения изогнутой формы, вытянутые вдоль деформационных элементов структуры Кластеры декрипитации		+			II ($\text{ЖH}_2\text{O} + \text{ЖCO}_2$), IV
<i>d</i>	<i>d</i> ₁ — центральные включения <i>d</i> ₂ — новообразованные включения ореола декрипитации		+			II ($\text{ЖH}_2\text{O} + \text{ЖCO}_2$) I ($\text{ЖH}_2\text{O} + \text{ГH}_2\text{O}$)
<i>e</i>	Включения, расположенные вблизи субблоковых и межзерновых границ или приуроченные к ним			+		IV, III ($\text{ЖH}_2\text{O} + \text{ЖCO}_2 + \text{ГCO}_2$)
<i>f</i>	Линейно вытянутые включения, равномерно распределенные в зернах кварца			+		III ($\text{ЖH}_2\text{O} + \text{ЖCO}_2 + \text{ГCO}_2$), IV
<i>g</i>	Включения в зернах рекристаллизации			+	+	I ($\text{ЖH}_2\text{O} + \text{ГH}_2\text{O}$)

Примечание. Здесь и далее: Ж — жидкость, Г — газ.

блюдаются включения извилистой, неправильной формы размером до 10 мкм. При комнатной температуре включения имеют разные соотношения газообразной фазы, воды и углекислоты. В большом количестве встречаются однофазные образования, реже двухфазные. Волнистый рисунок контура подобных групп включений сопоставим по форме и размеру с контурами дофинейских двойников, что дает возможность предположить, что включения концентрируются вдоль двойниковых границ (см. доп. материалы, рис. S1, в).

Включения третьего структурного вида *c* (см. рис. 3, в) характерны для агрегатов кварца фрагментарной микроstructures и представлены образованиями изогнутой формы, вытянутыми вдоль деформационных элементов структуры (см. доп. материалы, рис. S2, а—в). Фазовый состав таких включений аналогичен первичным включениям. Образования четвертого структурного вида *d* (см. рис. 3, з) также типичны для кварца фрагментарной микроstructures и представлены кластерами декрипитации, связывающими крупное центральное (20—40 мкм) включение (*d*₁ структурный вид) и многочисленные субмикроскопические включения (до 10 мкм) вокруг него (*d*₂ структурный вид). Центральное включение может не иметь материала внутри вакуоли или сохранять параметры первичного включения. Новообразованные включения имеют водно-солевой состав (ЖН₂О + ГН₂О).

Образования пятого структурного вида *e* (см. рис. 3, д) расположены вблизи или вдоль субблоковых (см. доп. материалы, рис. S3, з) границ и границ зерен рекристаллизации (рис. S4, а) псевдопорфириобластовой микроstructures. Представлены комплексами флюидных включений с тонкими каналами. Размер включений достигает 20—30 мкм. Включения преимущественно однофазные углекислотные, иногда фиксируются небольшое количество воды и газовый пузырек.

Ортогонально к границам субблоков псевдопорфириобластовой микроstructures ориентированы крупные (40—50 мкм) вытянутые, согласно единому тренду (см. доп. материалы, рис. S3, а, з), включения, представляющие собой шестой структурный вид *f* (см. рис. 3, е). При комнатной температуре такие включения содержат две жидкие и одну газовую углекислотную фазу (ЖН₂О + ЖСО₂ + ГСО₂). Соотношение фаз меняется в широких пределах от 40 : 40 : 20 до 70 : 20 : 10 соответственно.

Флюидные включения седьмого структурного вида *g* приурочены к зернам рекристаллизации псевдопорфириобластовой (см. рис. 3, ж) и зерновой (см. рис. 3, з) микроstructures. Для таких включений характерен водно-солевой состав (ЖН₂О + ГН₂О). В кварце псевдопорфириобластовой микроstructures форма и размер таких включений имеют идентичные параметры включениям материнского зерна. В кварце зерновой микроstructures фиксируются участки, свободные от флюидных включений (см. доп.

Таблица 2. Параметры флюидных включений разных структурных видов кварца

Структурный вид включения	Морфология	Размер, мкм	Элементы структурного контроля	Характер распределения	<i>T_r</i> , °С	Вид гомогенизации	<i>X</i> _{CO₂} , %
Обр. № 1							
<i>a</i>	Изометричная	≈30—40	Первичные зерна	Одиночно/ Группами	370—340	Ж	50
<i>b</i>	Извилистая	<10	Границы двойникового типа	Массивы включений	—	—	—
<i>c</i>	Неправильная	20—40	Полосы деформации	Вдоль линий скольжения	340—350	Ж/Г	40—70
<i>d</i> ₂	Округлая	10—20	Ореол вокруг включений	Россыпь	210—300	Ж	0—50
<i>e</i>	Комплекс с каналами	20—30	Субблоковые границы и границы зерен рекристаллизации	Скопления вдоль границ	540 3—4	Г Ж	70 100
<i>f</i>	Вытянутая	40—50	Субблоки	Ортогонально к границам субзерен	350—490	Ж/Г	65—82
<i>g</i>	Изометричная/ Вытянутая	20—30	Зерна рекристаллизации до 1 мм	Ортогонально к границам зерен	330—340	Ж	0
Обр. № 2							
<i>a</i>	Изометричная	20—30	Первичные зерна	Одиночно/Группами	370—340	Ж	50—60
<i>f</i>	Вытянутая	30—40	Субблоки	Ортогонально к границам субзерен	250—320	Ж/Г	30—40
<i>g</i>	Неправильная	10—20	Зерна рекристаллизации более 1 мм	Цепочки и скопления ортогонально к границам субзерен	250—350	Ж	0

Примечание. *X*_{CO₂} — объемный процент углекислоты в газовой фазе. Прочерк — не обнаружено.

материалы, рис. S5). В области перехода к таким участкам мы наблюдаем включения водно-солевого состава, отнесенные к седьмому структурному виду (см. доп. материалы, рис. S5, б).

Деформационная эволюция жильного кварца и перераспределение флюидных включений.

Два образца жильного кварца проанализированы методом EBSD. Это позволило оценить пространственное взаимоотношение микроструктур. Изучены особенности флюидных включений выделенных структурных видов (табл. 2).

На карте ориентаций образца кварца № 1 с псевдопорфирибластовой структурой (рис. 4, а) фиксируется наличие двух индивидов, отделенных друг от друга извилистой двойниковой границей с углом

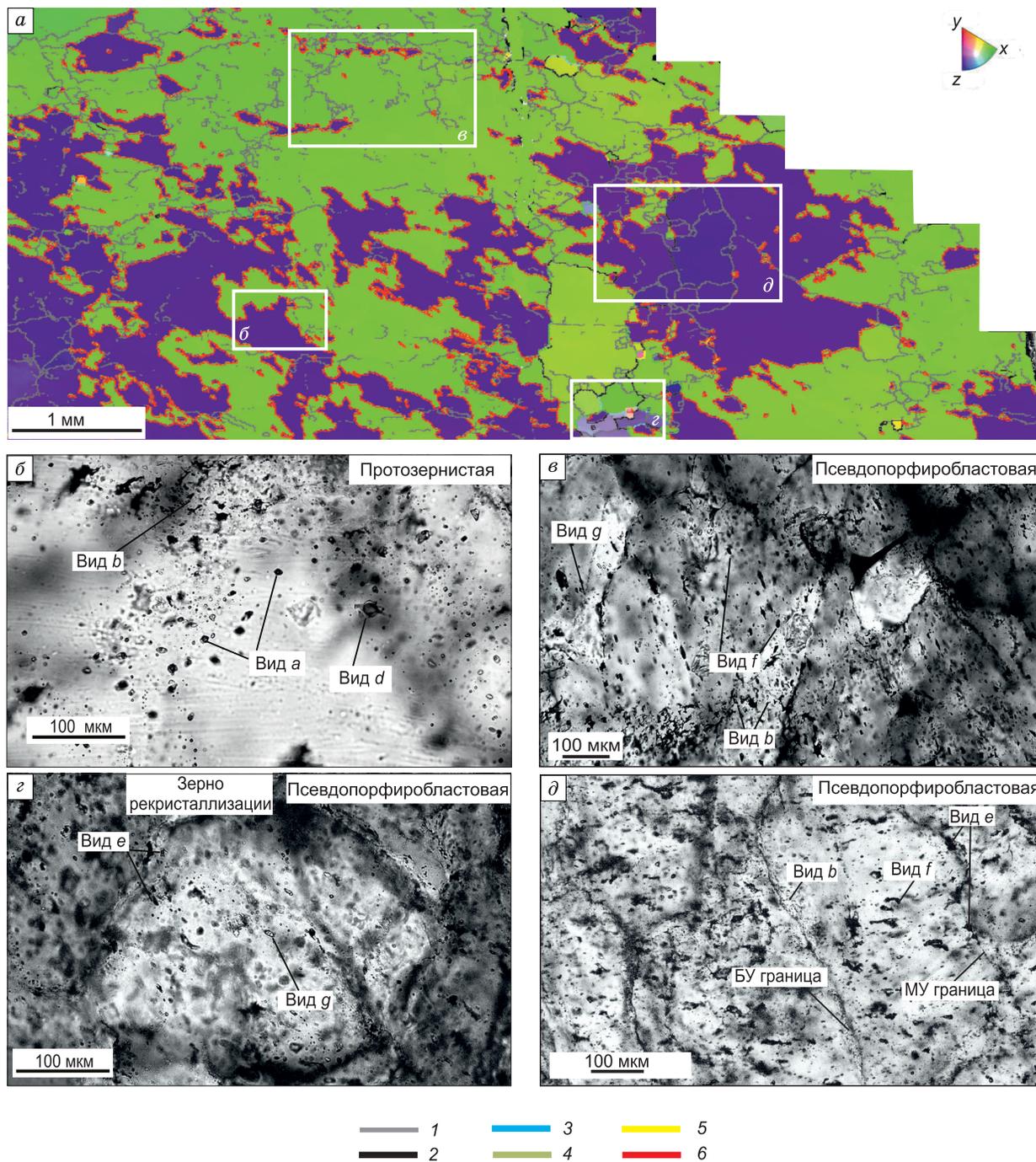


Рис. 4. Перестройка протозернистой микроструктуры кварца в псевдопорфирибластовую:

а — карта ориентации жильного кварца (здесь и далее цветное кодирование границ указывает на угол разориентации); б—д — флюидные включения в выделенных участках обр. № 1. Малоугловая граница (МУ): 1 — угол разориентации 2—10°; большеугловая граница (БУ): 2—5 — угол разориентации: 2—10—25°, 3—25—35°, 4—35—55°, 5 > 65°; граница дофенийских двойников: б — поворот 56—60° вокруг оси <с>.

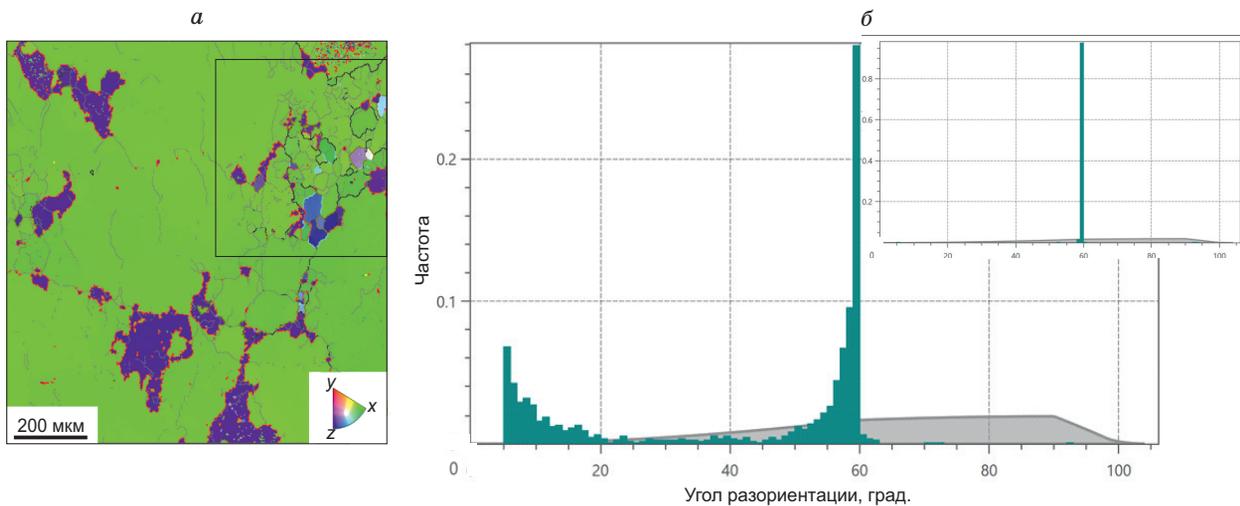


Рис. 5. Особенности псевдопорфиробластовой микроструктуры жильного кварца:

a — карта ориентации жильного кварца; *б* — гистограмма распределения угла разориентации (зеленая область) и теоретическая кривая (серая область).

разориентации 60° , обозначенной красным цветом. Кроме того, отмечается значительная доля малоугловых границ, формирующих субзерна, а также большеугловых границ, образующих зерна рекристаллизации. Зерна рекристаллизации демонстрируют повторяемость формы субзерен.

Участки с минимальным развитием малоугловых границ представляют собой реликты исходной микроструктуры и содержат изометричные водно-углекислотные включения I типа (см. рис. 4, *б*). С уменьшением доли двойниковых границ и увеличением доли малоугловых границ флюидные включения изменяют свою форму и приобретают ориентацию (вид *г*) (см. рис. 4, *в*). Такие включения характеризуются высокими температурами частичной гомогенизации ($30\text{--}31^\circ\text{C}$). При дальнейшей эволюции деформационной структуры фиксируется полная декрипитация включений (см. рис. 4, *д*). Новообразованные зерна рекристаллизации (см. рис. 4, *з*) содержат преимущественно водно-солевые флюидные включения (вид *г*). Наблюдавшиеся при этом вытянутые вакуоли могут иметь разную ориентацию в рассматриваемых структурных элементах (см. рис. 4, *в*). К границам этих зерен тяготеют углекислотные включения, для которых характерны высокие температуры общей гомогенизации до 540°C , происходящей в газовую фазу (см. табл. 2).

Более подробный анализ карты ориентаций кварца псевдопорфиробластовой микроструктуры (рис. 5, *a*) демонстрирует нарушение непрерывности двойниковых границ при развитии новых зерен.

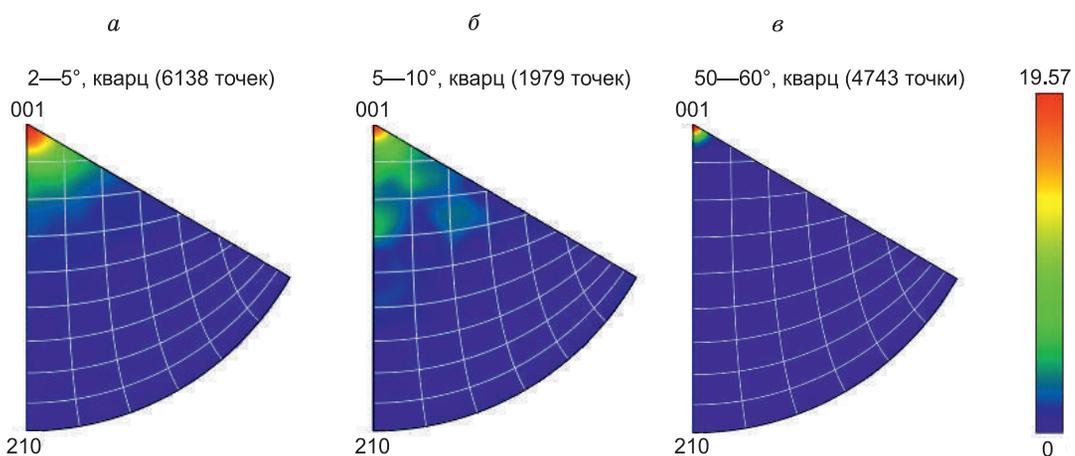


Рис. 6. Обратные полюсные фигуры осей разориентации малоугловых границ (*a*, *б*) и оси дофинейского двойника (*в*) в координатах кристалла.

Справа представлена цветовая шкала распределения осей, где красный цвет — максимальная концентрация замеров.

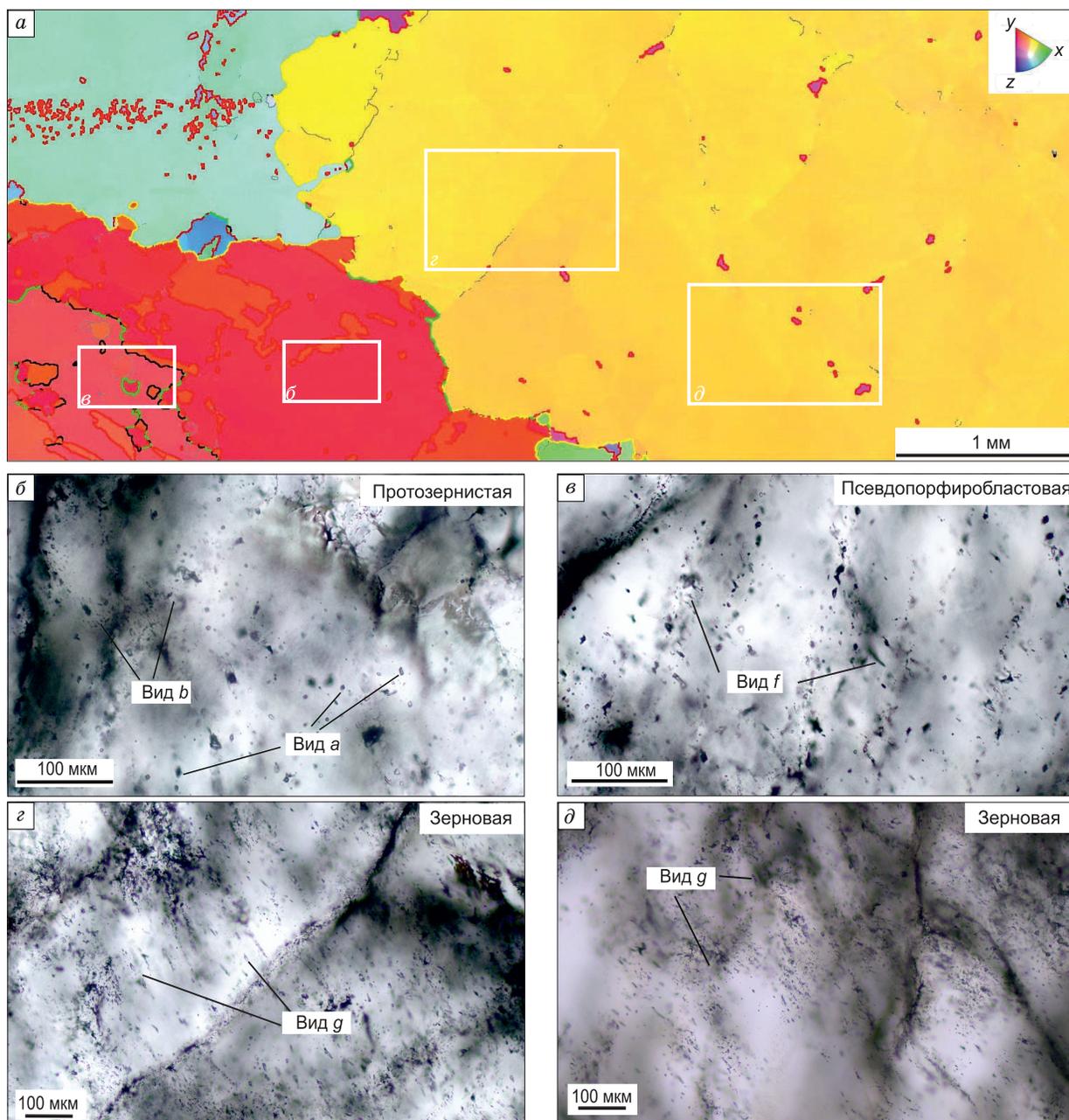


Рис. 7. Перестройка протозернистой микроструктуры кварца в псевдопорфиробластовую и зерновую:

a — карта ориентации жильного кварца; *б–д* — флюидные включения в выделенных участках обр. № 2. Цветовое кодирование границ указывает на угол разориентации (см. рис. 4).

Формирование агрегатов кварца псевдопорфиробластовой микроструктуры связано с процессами рекристаллизации, обусловленной миграцией границ и вращением субблоков. В результате рекристаллизации формируются мелкие зерна, ограниченные большеугловыми границами, которые образуют группы в отдельных частях кристалла. На рисунке 5, *a* выделена область, занятая зернами данного типа. Доказательством рекристаллизованной природы таких зерен служит отличие их морфологии и кристаллографической ориентации от текстуры основной массы жильного кварца. Это фиксируется по появлению дополнительных пиков на гистограмме углов разориентации (рис. 5, *б*, врезка на рисунке) от 10 до 55°.

На рисунке 6, *a, б* обратные полюсные фигуры демонстрируют предпочтительную ориентацию оси разориентации субзерен в направлении оси $\langle 001 \rangle$, что соответствует оси дофинейского двойника (см. рис. 6, *в*), и свидетельствует о наследовании малоугловыми границами признаков двойниковых границ. Так, на карте ориентации зерен на рис. 5, *a* фиксируется последовательный переход от ориента-

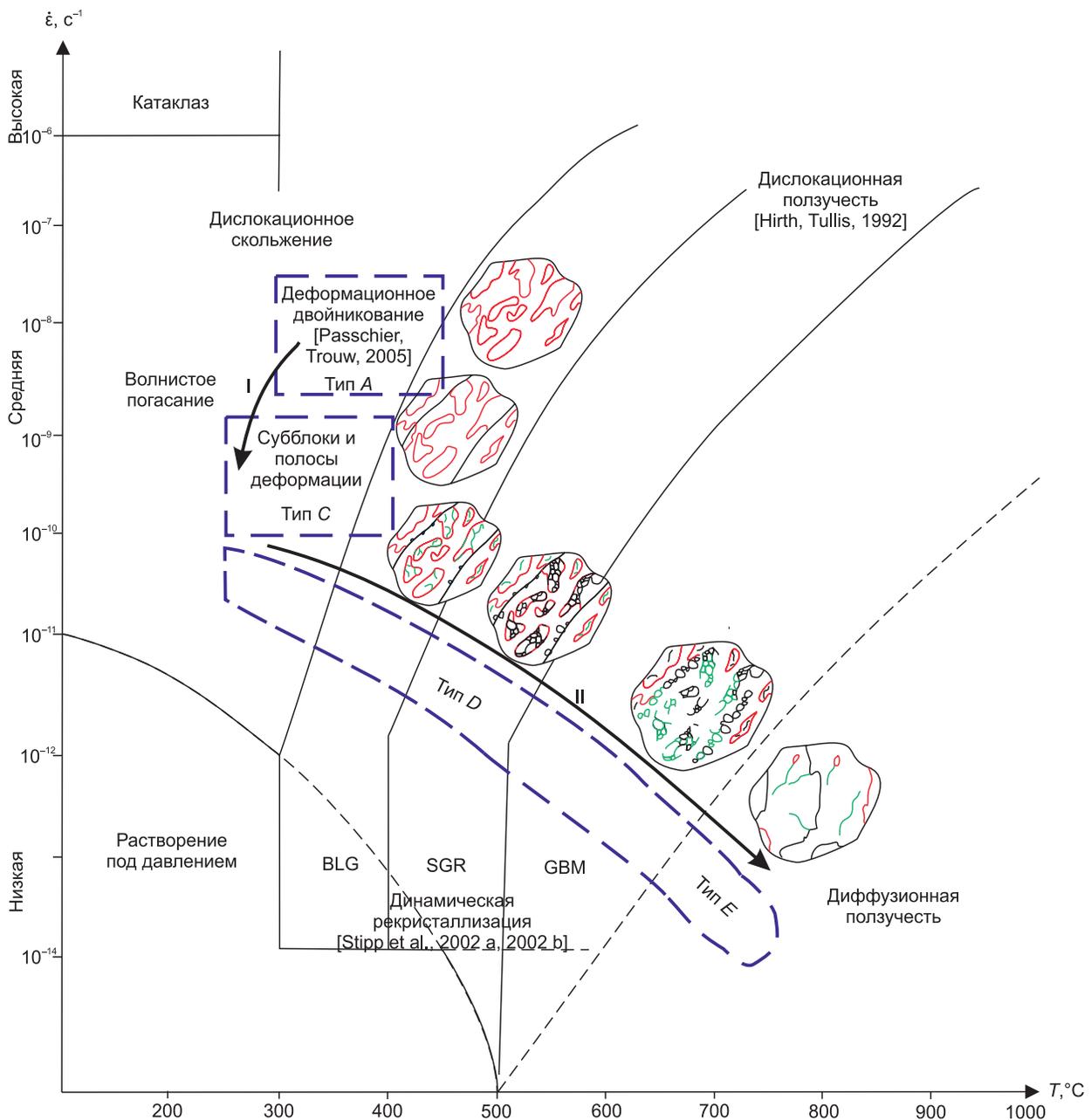


Рис. 8. Деформационная эволюция жильного кварца на модифицированной схеме деформационных механизмов кварца, по [Файф, 1981] с дополнениями.

На вертикальной оси отмечены значения скорости деформации. На рисунке схематично представлен процесс перестройки кварцевых агрегатов: черным цветом обозначены большеугловые границы, зеленым — малоугловые, красным — границы дофинейских двойников. Пояснения см. в тексте.

ции положительного ромбоэдра $r \{10\bar{1}1\}$ к отрицательному $z \{01\bar{1}1\}$, который соответствует 60° повороту дофинейского двойника вокруг оси c .

На карте ориентации кварца обр. № 2 (рис. 7, а) мы можем видеть сочленение трех зерен, в пределах которых наблюдаются участки развития протозернистой, псевдопорфиробластовой и зерновой микроструктур. Агрегаты протозернистой и псевдопорфиробластовой микроструктур приурочены к одному зерну. В свою очередь, кварц зерновой микроструктуры локализуется в соседнем зерне.

Участки кварца с протозернистой микроструктурой являются реликтами исходной микроструктуры и содержат изометричные водно-углекислотные включения I типа (см. рис. 7, б). Распространение малоугловых и большеугловых границ, типичных для псевдопорфиробластовой микроструктуры, сопровождается изменением морфологии и количества включений в единице объема кварца (см. рис. 7, в).

Кристаллографические характеристики зерновой микроструктуры указывают на ее формирование при перекристаллизации кварца в условиях низких скоростей деформации. В этом случае плотность дислокаций уменьшается в результате их аннигиляции и происходит перераспределение дислокаций с образованием малоугловых дислокационных субграниц [Niimi, 2002; Lychagin et al., 2020]. Включения структурного вида *g*, преобладающие в кварце с зерновой микроструктурой, характеризуются высокой плотностью флюида. В пузырьке таких включений не установлено значимых количеств труднорастворимых газов и, вероятно, они заполнены водяным паром низкой плотности.

Проведенный анализ структурной неоднородности агрегатов жильного кварца позволил выявить два последовательных тренда перестроек, отражающих деформационные этапы преобразований структуры (рис. 8). Преобразования, выделенные в первый этап, связаны с механизмом дислокационного скольжения. Они происходят в условиях средних скоростей деформации и средних температур. В этом случае происходит формирование деформационных дофинейских двойников и последующее образование полос деформаций.

Преобразования второго деформационного этапа происходят в условиях низких скоростей деформации при повышении температуры. Перестройка агрегатов в этом случае приводит к рекристаллизации, связанной с дислокационной и последующей диффузионной ползучестью. В результате чего ранее сформированные двойники разрушаются. На рисунке 8 схематично представлен процесс перестройки кварцевых агрегатов: черным цветом обозначены большеугловые границы, зеленым – малоугловые, красным – границы дофинейских двойников.

Распределение флюидных включений в деформационных агрегатах кварца подчиняется закономерностям структурных перестроек. Последовательность преобразований кварцевых агрегатов отражается в смене параметров температуры, состава и плотности флюидных включений.

ОБСУЖДЕНИЕ

Преобразования в деформационной структуре кварца влияют на перераспределение газовой-жидких и газовых включений, что, по-видимому, является способом релаксации напряжений. В связи с этим механизмы преобразований структуры необходимо рассматривать в комплексе с флюидным режимом гидротермальной системы. Эволюция параметров флюидных включений разных структурных видов в агрегатах кварца определяет флюидный режим при деформационных процессах. Модель процесса структурной перестройки с учетом превращений в системе флюидных включений представлена на рис. 9.

Деформационная история первого этапа связана с процессами дислокационного скольжения, которое способствовало формированию дофинейских двойников и фрагментарных микроструктур в условиях средних скоростей деформации и температур 300–400 °С. Считается, что образование механических дофинейских двойников происходит после кристаллизации кварца и является результатом релаксации приложенных напряжений [Tullis, 1970; Tullis, 1972; Passchier, Trouw, 2005]. При изучении образцов жильного кварца мы предполагаем формирование дофинейских двойников синхронно с ростом зерен под воздействием упругих деформаций, возникающих при кристаллизации. Об условиях этого процесса можно судить по минимальной температуре образования кварца (340–370 °С), определенной по первичным включениям (структурный вид *a*). Подобные температуры сопоставимы с данными об образовании дофинейских двойников в результате наложенных деформаций [Passchier, Trouw, 2005]. Присутствие первичных включений изометричной формы существенно-углекислотного состава указывает на гетерогенизацию водно-углекислотного флюида при кристаллизации кварца. Отсутствие действия приложенных напряжений после кристаллизации кварца подтверждается незначительным количеством малоугловых границ в зернах с протозернистой микроструктурой (микроструктура типа *A*).

Последующие после кристаллизации кварца процессы скольжения дислокаций маркируются изменением формы первичных включений с сохранением исходных плотностей и состава (структурный вид *c*, см. табл. 2), а также выстраиванием флюидных включений в несколько линейных направлений. Подобные явления зафиксированы в ходе экспериментов по воздействию на кварц средних напряжений [Tarantola et al., 2010].

Локальные деформации в области вокруг флюидных включений сопровождаются движением точечных дефектов, скольжением дислокаций с образованием полос деформаций и последующим гидроразрывом на фоне продолжающегося сжимающего напряжения. Процесс гидроразрыва флюидных включений провоцируется внутренним избыточным давлением жидкости внутри вакуоли и способствует образованию хрупких микротрещин вокруг первичного включения, что приводит к формированию кластеров декрипитации (структурный вид *d*) с крупным реликтовым включением в центре и мелкими включениями вокруг него. Заживление образованных трещин способствует частичной потере воды. При этом в новообразованных включениях фиксируется увеличение плотности, что указывает на формирование равновесия давление — объем на фоне развития сжимающих напряжений при деформациях

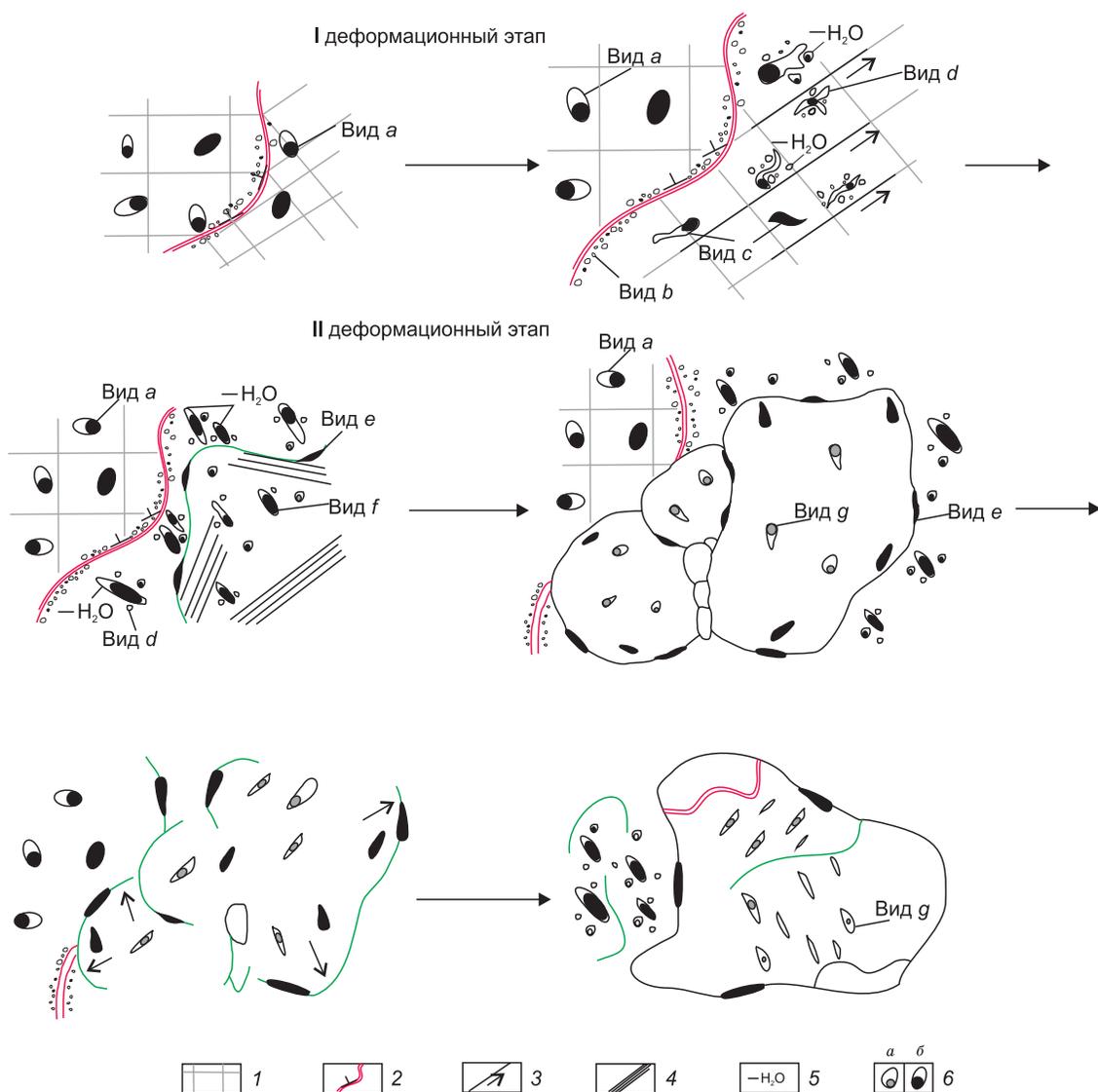


Рис. 9. Схематичное изображение характера распределения и морфологии флюидных включений в пределах деформационных этапов.

1 — символическое обозначение преимущественной ориентации решетки; 2 — двойниковые границы; 3 — следы сдвига; 4 — области преимущественной ориентации сдвига (деформационные домены); 5 — потеря воды из флюидных включений; 6 — газовая фаза включений: пар (а), углекислота (б).

сдвига. Аналогичные эффекты гидроразрыва и увеличения в новообразованных включениях содержания солей и газов зафиксированы экспериментами [Diamond et al., 2010; Bakker, Doppler, 2016].

Движение точечных дефектов и скольжение дислокаций в области вокруг включений способствуют транспортировке ионов вещества, высвободившихся при формировании кластеров дикрипитации и при полной декрипитации флюидных включений, посредством дислокационного скольжения и массопереноса [Раков и др., 2019]. В иерархии структурных дефектов, представленных вакансиями, дислокациями, микро- или нанопорами и трещинами, дефекты более крупного масштабного уровня являются стоками для дефектов меньшего масштаба. В результате фиксируются массовые скопления флюидных включений структурного вида *b* вдоль двойниковых границ [Fall et al., 2016], где в свободном объеме произошла сегрегация ионов с образованием молекул вещества флюида.

Реализация преобразований второго деформационного этапа происходит в условиях низких скоростей деформации и повышения температуры (см. рис. 8). Процессы медленной миграции границ способствуют интенсивному развитию малоугловых границ, появлению субзерен и зерен рекристаллизации в пределах одного из индивидов дофинейских двойников. Исследователи отмечают, что это про-

исходит в пределах индивида, ось которого ориентирована почти параллельно направлению сжатия (*r*-двойник) [Menegon et al., 2011]. При этом флюидные включения образованные ранее кластеров декрипитации представляют собой объемные дефекты и взаимодействуют с мигрирующей при рекристаллизации границей посредством изменения формы и положения включения в кристалле. На рисунке 6, *в* отмечается ориентировка включений структурного вида *f* перпендикулярно перестраивающейся двойниковой границе, что указывает на начало процесса перетаскивания флюидных включений мигрирующей границей и выражается в вытягивании вакуолей в направлении движения границы. В связи с этим минимальная температура гомогенизации таких вытянутых включений 250 °С фиксируется нами как температура, близкая к началу процесса рекристаллизации. При этом размеры вытянутых включений (см. табл. 2) указывают на то, что в первую очередь с мигрирующей границей взаимодействуют более крупные включения [Schmatz, Urai, 2011].

Кроме того, отмечается, что при взаимодействии мигрирующей границы с флюидным включением осуществляется удаление H₂O вследствие ее большой способности к смачиванию и инфильтрации по сравнению с CO₂ [Hollister, 1990]. При этом расширение вакуоли и потеря H₂O способствуют уменьшению плотности CO₂, увеличению количества соли и газа [Küster, Stöckhert, 1997; van den Kerckhof et al., 2014; Bakker, Doppler, 2016] и, как следствие, аномально высоким температурам гомогенизации [Реддер, Хитаров, 1987]. В результате таких процессов в крупных флюидных включениях, повернутых ортогонально мигрирующим границам, описанных нами в качестве структурного вида *f*, фиксируются высокие температуры гомогенизации, проходящей в жидкую и газовую фазу, и большое количество содержания углекислоты с малой плотностью (рис. 10).

Постепенное развитие описанных процессов приводит, вероятно, к разделению водной и углекислотной фаз в пространстве (см. рис. 10). Это подтверждается наличием скоплений существенно-углекислотных флюидных включений вдоль субзерновых границ и границ зерен рекристаллизации, описанных в качестве включений структурного вида *e*. Присутствие таких включений в кварце также отмечается другими исследователями [Green, Radcliffe, 1975; Wilkins, Barkas, 1978; Vityk et al., 2000]. Их положение в деформационной структуре кварца согласуется с закономерностями, установленными в работах [Chernak et al., 2009; Schmatz, Urai, 2011] и указывающими на то, что богатая углекислотой жидкость будет оставаться на границах зерен и субзерен, а вода перераспределяется латерально вследствие большой разницы в характеристиках смачивания CO₂ и рассолов.

Описанные процессы демонстрируют взаимовлияние деформационной структуры кварца с флюидной системой и определяют характер дальнейших структурных перестроек. Латеральное перераспре-

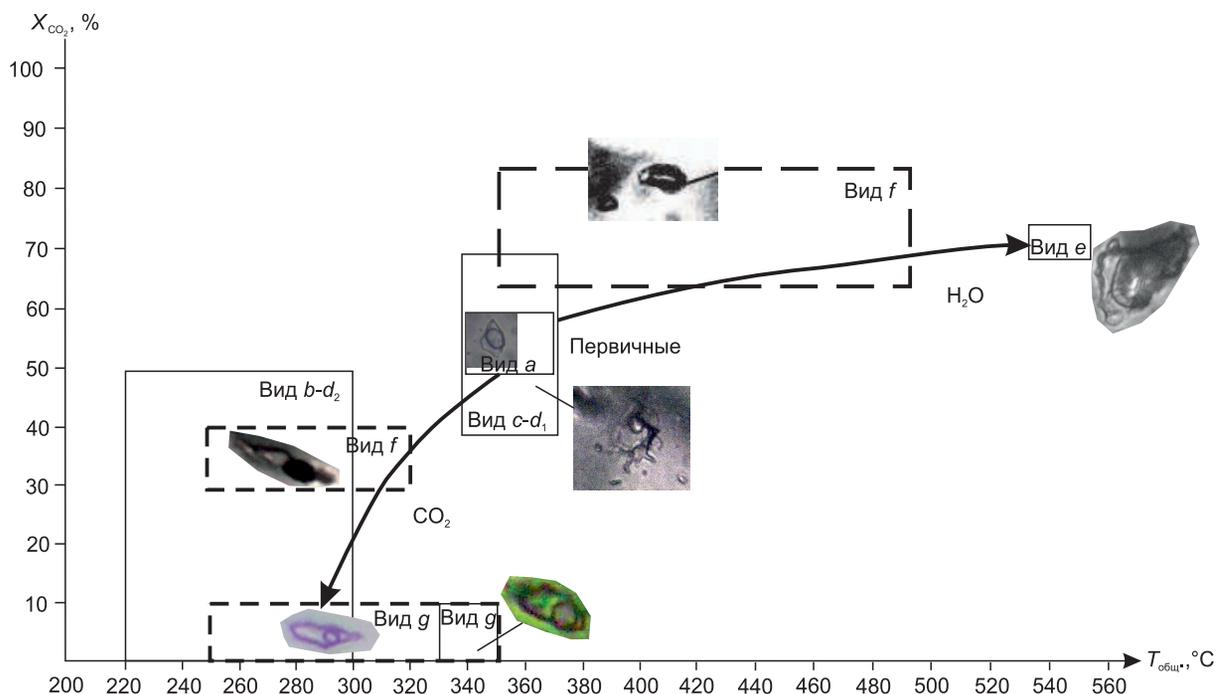


Рис. 10. Тренды эволюции для структурных типов флюидных включений.

X_{CO_2} — доля углекислоты, $T_{общ.}$ °C — температура общей гомогенизации. Стрелками обозначено разделение водной и углекислотных фаз.

деление водной фазы способствует локальному гидролитическому ослаблению и повышению градиента диффузии [Palazzin et al., 2018; Zhou et al., 2022; Pongrac et al., 2022]. Это оказывает положительное влияние на продолжающуюся миграцию деформационных двойниковых границ. В то же время затрудненная диффузия вокруг углекислоты [Chernak et al., 2009] способствует закреплению границ зерен и процессу переноса фаз вдоль подвижных дислокаций или границ субзерен посредством механизма ползучести, что определяет дальнейшее развитие динамической рекристаллизации в режиме вращения субзерен (см. рис. 8, этот этап рекристаллизации обозначен аббревиатурой SGR, по [Stipp et al., 2002a]). Помимо флюидных включений вблизи границ субзерен наблюдаются пустые полости, что также было отмечено [Kerrich, 1976; Precigout et al., 2022]. Их присутствие указывает на продолжающиеся процессы взаимодействия мигрирующих границ с объемными дефектами при рекристаллизации.

В работе [Schmatz, Urai, 2011] выдвигается предположение о многоэтапном взаимодействии флюидных включений с мигрирующей границей. В свете чего флюидные включения, описанные в образцованных при перестройке структуры кварца зернах рекристаллизации (структурный вид *g*), вероятно, являются остаточными. Их существенно-водный состав и температуры гомогенизации, близкие к первичным включениям (см. табл. 2), могут быть доказательством того, что мигрирующая граница зерен по-разному взаимодействует с различными фазами и способствует их разделению в пространстве. Таким образом, взаимодействие мигрирующей границы с флюидными включениями во многом определяется их размером и фазовым составом.

Разделение водной и углекислотных фаз определяет последовательную смену значений температуры гомогенизации (см. рис. 10). На основании чего можно сделать вывод, что термометрические параметры флюидных включений структурных видов *e*, *f*, *g* не отражают условия минералообразования, но указывают на характер структурных преобразований.

Дальнейшее постепенное установление равновесия структуры кварца приводит к развороту зерна до ориентировки, соответствующей состоянию кристалла до двойникового с образованием малоугловых границ, наследующих признаки двойниковых (см. рис. 8). Механика данного процесса совпадает с процессами рекристаллизации в режиме быстрой миграции границ зерен (на рис. 8 этот этап рекристаллизации обозначен аббревиатурой GBM, по [Stipp et al., 2002a]). По экспериментальным данным [Xu, Heaney, 1997], заметное изменение морфологии двойниковых границ, фиксируемое нами на данной стадии, происходит при приближении температуры к 573 °С, что соответствует фазовому переходу в кварце. На этой стадии продолжается процесс удаления флюидных включений.

Повышенные температуры и рекристаллизация способствуют выравниванию и уменьшению напряжений в деформированном кварце в результате отжига в условиях диффузионной ползучести [Niimi, 2002]. Сохранившиеся положительные ромбоэдры двойников тяготеют к границе основного зерна [Paschier, Trouw, 2005] (см. рис. 7, *a*; 9). Наблюдаемые здесь водно-солевые флюидные включения (структурный вид *g*) имеют малый размер, вытянутую форму, ортогональную немногочисленным субзерновым границам (см. табл. 2, рис. 7). Эти признаки указывают на процессы заключительной миграции флюидных включений к границам зерен и их уничтожение [Singleton et al., 2020]. Миграция флюидных включений сопровождается перестройкой структуры, исчезновением дислокаций при их взаимодействии, а также образованием новых зерен с рассеянной текстурой и их укрупнением (более 1 мм) (см. рис. 7, 9). Редкие водно-углекислотные включения присутствуют в таких зернах в качестве реликтовых образований структурного вида *f*. В результате активных диффузионных процессов границы зерен обогащаются минеральными фазами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разнообразные флюидные включения в изученном жильном кварце сформировались из первичных водно-углекислотных включений. Их перераспределение маркирует последовательность структурных преобразований кварца. Общий характер структурной перестройки фиксирует два последовательных деформационных этапа, связанных с региональными деформациями. Петрографический анализ флюидных включений позволил охарактеризовать флюидный режим при одновременном протекании выделенных деформационных процессов.

Преобразования первого этапа происходят в условиях дислокационного скольжения при средних скоростях деформации и фиксируются появлением дофинейских двойников. При этом первичные флюидные включения претерпевают изменение формы без изменения объема. Продолжающиеся деформации способствуют образованию полос деформации, резкой смене локальных давлений и последующему гидроразрыву с формированием кластеров декрипитации на месте первичных включений.

Преобразования второго этапа сопровождаются процессами рекристаллизации в условиях дислокационной и диффузионной ползучести. В это время происходит перестройка деформационных границ с появлением зерен рекристаллизации и релаксация напряжений с последующим уравниванием структуры. Взаимодействие мигрирующих границ с флюидными включениями выражается в переори-

ентировке включений, их гетерогенизацией и миграцией. Развитие процесса рекристаллизации сопровождается потерей воды с формированием существенно-газовых включений, а также расшнурованием флюидных включений с образованием существенно-водных включений внутри новообразованных зерен и существенно-газовых включений вдоль их границ. При завершении процесса рекристаллизации в условиях ползучести при повышенных температурах деформации заметно сокращается количество и объем флюидных включений.

По результатам проведенного исследования можно отметить, что многочисленные флюидные включения, разнообразные по фазовому составу и микротермометрическим параметрам, не всегда отражают последовательность кристаллизации минерала-хозяина. Полная интерпретация процессов во флюидной системе требует детального рассмотрения структуры кварцевых агрегатов, включающих результат ростовых, деформационных и рекристаллизационных процессов. С целью выявления этапов минералообразования и выделения генераций необходимо использование неизменных включений, расположенных в пределах агрегатов кварца с волнистым погасанием, субблоковой или фрагментарной микроструктурой. В свою очередь, флюидные включения в кварце, претерпевшем процессы рекристаллизации, маркируют перераспределение флюида в дефектной структуре кварца и свидетельствуют о смене напряжений в процессе эволюции гидротермальной системы.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № SWM-2020-0041), а также госзадания ИГМ СО РАН.

За ценные советы в интерпретации данных и обсуждении результатов исследований авторы выражают благодарность д.г.-м.н. С.З. Смирнову, к.г.-м.н. О.В. Бухаровой, к.г.-м.н. Е.Н. Соколовой и А.А. Бибко. За качественные замечания, направленные на улучшение статьи авторы благодарны рецензентам.

Дополнительные материалы см. https://sibran.ru/journals/Suppl_Kungulova.pdf

ЛИТЕРАТУРА

Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Кулаков И.Ю., Котляров А.В. Проблемы фильтрации флюидов и расплавов в зонах субдукции и общие вопросы теплофизического моделирования в геологии // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (5), с. 701—722, doi: 10.15372/GiG20170503.

Зорин Ю.А., Скляр Е.В., Беличенко В.Г., Мазукабзов А.М. Механизм развития системы островная дуга—задуговой бассейн и геодинамика Саяно-Байкальской складчатой области в позднем рифее—раннем палеозое // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (3), с. 209—226.

Кабанова Л.Я. Изучение кварцевых агрегатов. Практикум. Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2016, 28 с.

Кунгулова Э.Н., Томиленко А.А., Тишин П.А., Савинова О.В., Лычагин Д.В., Бухарова О.В. Флюидные включения в жильном кварце как отражение деформационных этапов области сочленения Байкало-Муйской и Баргузино-Витимской структурно-формационных зон (Западное Забайкалье) // Литосфера, 2022, т. 22, № 3, с. 327—346, doi: 10.24930/1681-9004-2022-22-3-327-346.

Раков Л.Т., Прокофьев В.Ю., Зорина Л.Д. Ионы-компенсаторы H^+ и Li^+ в структурных каналах кварца месторождений золота Дарасунского рудного поля (Восточное Забайкалье, Россия): данные электронного парамагнитного резонанса // Геология рудных месторождений, 2019, том 61, № 1, с. 75—96, doi: 10.31857/S0016-777061175-96.

Реддер Э., Хитаров Д.Н. Флюидные включения в минералах, т. 1, 1987, М., Мир, 360 с.

Руженцев С.В., Минина О.Р., Некрасов Г.Е., Аристов В.А., Голионко Б.Г., Доронина Н.А., Лыхин Д.А. Байкало-Витимская складчатая система: строение и геодинамическая эволюция // Геотектоника, 2012, т. 2, с. 3—28.

Файф У., Прайс Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М., Мир, 1981, 436 с.

Bakker R.J. Re-equilibration of fluid inclusions: Bulk-diffusion // Lithos, 2009, v. 112 (3—4), p. 277—288, doi: 10.1016/j.lithos.2009.03.006.

Bakker R.J. Re-equilibration processes in fluid inclusion assemblages // Minerals, 2017, v. 7 (7), p. 117, doi: 10.3390/min7070117.

Bakker R.J., Doppler G. Salinity and density modifications of synthetic H_2O and $H_2O-NaCl$ fluid inclusions in re-equilibration experiments at constant temperature and confining pressure // Chem. Geol., 2016, v. 424, p. 43—85.

Bakker R.J., Jansen J.B.H. Preferential water leakage from fluid inclusions by means of mobile dislocations // Nature, 1990, v. 345 (6270), p. 58—60, doi: 10.1038/345058a0.

Bakker R.J., Jansen J.B.H. A mechanism for preferential H_2O leakage from fluid inclusions in quartz, based on TEM observations // Contrib. Mineral. Petrol., 1994, v. 116 (1—2), p. 7—20, doi: 10.1007/BF00310686.

- Chernak L.J., Hirth G., Selverstone J., Tullis J.** Effect of aqueous and carbonic fluids on the dislocation creep strength of quartz // *J. Geophys. Res.*, 2009, v. 114, B04201, doi: 10.1029/2008JB005884.
- Crawford M.L., Hollister L.S.** Metamorphic fluids: the evidence from fluid inclusions // *Fluid–Rock Interactions during Metamorphism*. New York, Springer, 1986, p. 1–35.
- Diamond L.W., Tarantola A., Stünitz H.** Modification of fluid inclusions in quartz by deviatoric stress. II: experimentally induced changes in inclusion volume and composition // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2010, v. 160 (6), p. 845–864, doi: 10.1007/s00410-010-0510-6.
- Dijkstra I., Schmatz J., Post A., Urai J.L.** The role of fluid-inclusion composition on dynamic recrystallization in experimentally deformed quartz single crystals // *The Science of Microstructure - Part II. J. Virtual Explorer*, 2011, doi: 10.3809/jvirtex.vol.2011.038.
- Doppler G., Bakker R.J.** The influence of the α – β phase transition of quartz on fluid inclusions during re-equilibration experiments // *Lithos*, 2014, v. 198–199, p. 14–23, doi: 10.1016/j.lithos.2014.03.018.
- Drury M.R., Urai J.L.** Deformation-related recrystallization processes // *Tectonophysics*, 1990, v. 172 (3–4), p. 235–253, doi: 10.1016/0040-1951(90)90033-5.
- Dubessy J., Poty B., Ramboz C.** Advances in C-O-H-N-S fluid geochemistry based on micro-Raman spectrometric analysis of fluid inclusions // *Eur. J. Mineral.*, 1989, v. 1 (4), p. 517–534, doi: 10.1127/ejm/1/4/0517.
- Fall A., Ukar E., Laubach S.E.** Origin and timing of Dauphiné twins in quartz cement in fractured sandstones from diagenetic environments: Insight from fluid inclusions // *Tectonophysics*, 2016, v. 687, p. 195–209, doi: 10.1016/j.tecto.2016.08.014.
- Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A.** Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis // *J. Geochem. Explor.*, 2012, v. 112, p. 1–20, doi: 10.1016/j.gexplo.2011.09.009.
- Green H.W., Radcliffe S.V.** Fracture at interfaces // Ed. R.C. Gifkins. *Interfaces Conference* (Butterworths, 1969). Australian Institute of Metals, Melbourne, 1975, p. 223–236.
- Griggs D.** Hydrolytic weakening of quartz and other silicates // *Geophys. J. Int.*, 1967, v. 14 (1–4), p. 19–31, doi:10.1111/j.1365-246X.1967.tb06218.x.
- Heggie M., Jones R.** Models of hydrolytic weakening in quartz // *Philos. Mag.*, 1986, v. 53 (5), p. 65–70, doi: 10.1080/01418618608242857.
- Hirth G., Tullis J.** Dislocation creep regimes in quartz aggregates // *J. Struct. Geol.*, 1992, v. 14, p. 145–159, doi: 10.1016/0191-8141(92)90053-Y.
- Hollister L.S.** Enrichment of CO₂ in fluid inclusions in quartz by removal of H₂O during crystal-plastic deformation // *J. Struct. Geol.*, 1990, v. 12 (7), p. 895–901, doi: 10.1016/0191-8141(90)90062-4.
- Johnson E.L., Hollister L.** Syndeformational fluid trapping in quartz: determining the pressure-temperature conditions of deformation from fluid inclusions and the formation of pure CO₂ fluid inclusions during grain-boundary migration // *J. Metamorph. Geol.*, 2007, v. 13 (2), p. 239–249, doi: 10.1111/j.1525-1314.1995.tb00216.x.
- Kerrick R.** Some effects of tectonic recrystallisation on fluid inclusions in vein quartz // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1976, v. 59 (2), p. 195–202, doi: 10.1007/BF00371308.
- Kidder S., Hirth G., Avouac J.-P., Behr W.** The influence of stress history on the grain size and microstructure of experimentally deformed quartzite // *J. Struct. Geol.*, 2016, v. 83, p. 194–206, doi: 10.1016/j.jsg.2015.12.004.
- Kronenberg A.K., Kirby S.H., Aines R.D., Rossman G.R.** Solubility and diffusional uptake of hydrogen in quartz at high water pressures: Implications for hydrolytic weakening // *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, 1986, v. 91, p. 12723–12741, doi: 10.1029/JB091iB12p12723.
- Kungulova E.N., Kremer I.O., Tishin P.A.** Structure of quartz-vein zones in South Muya block of the Western Transbaikalia // Paper Presented at the International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2019, No. 19 (1.1), p. 545–552, doi: 10.5593/sgem2019/1.1/S01.067.
- Küster M., Stöckhert B.** Density changes of fluid inclusions in high-pressure low-temperature metamorphic rocks from Crete: A thermobarometric approach based on the creep strength of the host minerals // *Lithos*, 1997, v. 41 (1–3), p. 151–167, doi: 10.1016/S0024-4937(97)82010-5.
- Law R.D.** Deformation thermometry based on quartz *c*-axis fabrics and recrystallization microstructures: A review // *J. Struct. Geol.*, 2014, v. 66, p. 129–161, doi: 10.1016/j.jsg.2014.05.023.
- Lychagin D.V., Kungulova E.N., Moskvichev E.N., Tomilenko A.A., Tishin P.A.** Microstructure of vein quartz aggregates as an indicator of their deformation history: An example of vein systems from Western Transbaikalia (Russia) // *Minerals*, 2020, v. 10 (10), p. 865, doi: 10.3390/min10100865.
- Menegon L., Piazzolo S., Pennacchioni G.** The effect of Dauphiné twinning on plastic strain in quartz // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2011, v. 161, p. 635–652, doi: 10.1007/s00410-010-0554-7.

Mesquita M.J., Samson I., Hartmann L.A., Picanço J.L., Gomes M.E. Shearing and fluid evolution of the Porto Nacional orogenic gold district, western Brazil: microstructural, fluid inclusion, and C-O isotopic evidence // *Ore Geol. Rev.*, 2021, v. 136, 104242, doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.104242.

Niimi N. Static recrystallization of the deformed quartz in the granite from Mt. Takamiyama // *J. Geosci.-Osaka City Univ.*, 2002, v. 45, p. 89—100.

Olgaard D.L., Evans B. Effect of second-phase particles on grain growth in calcite // *J. Am. Ceram. Soc.*, 1986, v. 69 (11), p. 272.

Palazzin G., Raimbourg H., Stünitz H., Heilbronner R., Neufeld K., Précigout J. Evolution in H₂O contents during deformation of polycrystalline quartz: An experimental study // *J. Struct. Geol.*, 2018, v. 114, p. 95—110, doi: 10.1016/j.jsg.2018.05.021.

Passchier C.W., Trouw A.J.R. *Microtectonics*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2005, 366 p.

Pehl J., Wenk H.-R. Evidence for regional Dauphiné twinning in quartz from the Santa Rosa mylonite zone in Southern California. A neutron diffraction study // *J. Struct. Geol.*, 2005, v. 27 (10), p. 1741—1749, doi: 10.1016/j.jsg.2005.06.008.

Pongrac P., Jeřábek P., Stünitz H., Raimbourg H., Heilbronner R., Racek M., Nègre L. Mechanical properties and recrystallization of quartz in presence of H₂O: Combination of cracking, subgrain rotation and dissolution-precipitation processes // *J. Struct. Geol.*, 2022, v. 160, 104630, doi: 10.1016/j.jsg.2022.104630.

Précigout J., Ledoux E., Arbaret L., Spriet C. Porosity induced by dislocation dynamics in quartz-rich shear bands of granitic rocks // *Sci. Rep.*, 2022, v. 12, 6141, doi: 10.1038/s41598-022-10053-x.

Putnis A. Mineral replacement reactions // *Rev. Mineral. Geochem.*, 2009, v. 70, p. 87—124, doi: 10.2138/rmg.2009.70.3.

Putnis A., John T. Replacement processes in the Earth's crust // *Elements*, 2010, v. 6, p. 159—164, doi: 10.2113/gselements.6.3.159.

Schmatz J., Urai J.L. The interaction of fluid inclusions and migrating grain boundaries in a rock analogue: deformation and annealing of polycrystalline camphor-ethanol mixtures // *J. Metamorph. Geol.*, 2010, v. 28 (1), p. 1—18, doi: 10.1111/j.1525-1314.2009.00849.x.

Schmatz J., Urai J.L. The interaction of migrating grain boundaries and fluid inclusions in naturally deformed quartz: A case study of a folded and partly recrystallized quartz vein from the Hunsrück Slate, Germany // *J. Struct. Geol.*, 2011, v. 33 (4), p. 468—480, doi: 10.1016/j.jsg.2010.12.010.

Siebenaller L., Vanderhaeghe O., Jessell M., Boiron M., Hibsich C. Syntectonic fluids redistribution and circulation coupled to quartz recrystallization in the ductile crust (Naxos Island, Cyclades, Greece) // *J. Geodyn.*, 2016, v. 101, p. 129—141, doi: 10.1016/j.jog.2016.07.001.

Singleton J.S., Rahl J.M., Befus K.S. Rheology of a coaxial shear zone in the Virginia Blue Ridge: Wet quartzite dislocation creep at ~250–280° C // *J. Struct. Geol.*, 2020, v. 140, p. 104109, doi: 10.1016/j.jsg.2020.104109.

Song W.J., Johnson S.E., Gerbi C.C. Quartz fluid inclusion abundance and off-fault damage in a deeply exhumed, strike-slip, seismogenic fault // *J. Struct. Geol.*, 2020, v. 139, p. 104118, doi: 10.1016/j.jsg.2020.104118.

Sosa G.M., Oriolo S., van den Kerkhof A. Development of sigmoidal en-échelon microfractures in beryl and the role of strain localization evidenced by fluid inclusions // *J. Struct. Geol.*, 2018, v. 115, p. 297—303, doi: 10.1016/j.jsg.2018.04.005.

Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J. Short note: HokieFlincs_H₂O-NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O-NaCl // *Comput. Geosci.*, 2012, v. 49, p. 334—337, doi: 10.1016/j.cageo.2012.01.022.

Stipp M., Kunze K. Dynamic recrystallization near the brittle-plastic transition in naturally and experimentally deformed quartz aggregates // *Tectonophysics*, 2008, v. 448, p. 77—97, doi: 10.1016/j.tecto.2007.11.041.

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 // *J. Struct. Geol.*, 2002a, v. 24, p. 1861—1884, doi: 10.1016/S0191-8141(02)00035-4.

Stipp M., Stünitz H., Heilbronner R., Schmid S.M. Dynamic recrystallisation of quartz: correlation between natural and experimental conditions // *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, 2002b, v. 200, p. 171—190, doi: 10.1144/GSL.SP.2001.200.01.11.

Stipp M., Tullis J., Scherwath M., Behrmann J.H. A new perspective on paleopiezometry: Dynamically recrystallized grain size distributions indicate mechanism changes // *Geology*, 2010, v. 38, p. 759—762, doi: 10.1130/G31162.1.

Stünitz H., Thust A., Heilbronner R., Behrens H., Kilian R., Tarantola A., Fitz Gerald J.D. Water redistribution in experimentally deformed natural milky quartz single crystals—Implications for H₂O-weakening processes // *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, 2017, v. 122 (2), p. 866—894.

- Tarantola A., Diamond L.W., Stünitz H.** Modification of fluid inclusions in quartz by deviatoric stress I: experimentally induced changes in inclusion shapes and microstructures // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2010, v. 160 (6), p. 825—843, doi: 10.1007/s00410-010-0509-z.
- Tullis J.** Quartz: Preferred orientation in rocks produced by Dauphiné twinning // *Science*, 1970, v. 168, p. 1342—1344, doi: 10.1126/science.168.3937.1342.
- Tullis J., Tullis T.E.** Preferred orientation produced by mechanical Dauphiné twinning: Thermodynamics and axial experiments // *AGU Geophys. Monogr.*, 1972, v. 16, p. 67—82, doi: 10.1029/GM016p0067.
- Tullis J., Yund R.A.** Grain growth kinetics of quartz and calcite aggregates // *J. Geol.*, 1982, v. 90 (3), p. 301—318, doi: 10.1086/628681.
- van der Kerkhof A., Kronz A., Simon K.** Deciphering fluid inclusions in high-grade rocks // *Geosci. Front.*, 2014, v. 5, p. 683—695, doi: 10.1016/j.gsf.2014.03.005.
- Vityk M.O., Bodnar R.J., Doukhan J.-C.** Synthetic fluid inclusions. XV. TEM investigation of plastic flow associated with reequilibration of fluid inclusions in natural quartz // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2000, v. 139, p. 285—297, <http://repository.geologyscience.ru/handle/123456789/23744>.
- Wilkins R.W.T., Barkas J.P.** Fluid inclusions, deformation and recrystallization in granite tectonites // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1978, v. 65, p. 293—299, doi: 10.1007/BF00375515.
- Xu H., Heaney P.J.** Memory effects of domain structures during displacive phase transitions: A high-temperature TEM study of quartz and anorthite // *Am. Mineral.*, 1997, v. 82, p. 99—108, doi: 10.2138/am-1997-1-212.
- Zhou B., Liu J., Chen X., Hou C.** Fluid-enhanced grain-size reduction of K-feldspar from a natural middle crustal shear zone in northern Beijing, China // *Tectonophysics*, 2022, v. 838, p. 229478, doi: 10.1016/j.tecto.2022.229478.