

Флюидные включения в жильном кварце как отражение деформационных этапов области сочленения Байкало-Муйской и Баргузино-Витимской структурно-формационных зон (Западное Забайкалье)

Э. Н. Кунгулова¹, А. А. Томиленко², П. А. Тишин¹, О. В. Савинова³, Д. В. Лычагин¹, О. В. Бухарова¹

¹Национальный исследовательский томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, e-mail: elvirakungulova@mail.ru

²Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3

³Национальный исследовательский томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 20.12.2021 г., принята к печати 22.04.2022 г.

Объект исследований. Проанализированы флюидные включения в кварце трех жильных систем, приуроченных к тектоническим трещинам, связанных с развитием надвиговых и сдвиговых деформаций Западного Забайкалья. Жильные системы локализованы в вулканических, терригенных и интрузивных породах. **Методы.** Состав флюидных включений изучен методами микротермометрии, рамановской спектроскопии и газовой хромато-масс-спектрометрии. **Результаты.** В формировании кварца трех систем участвовал высокоплотный среднетемпературный NaCl-KCl-водно-углекислотный флюид низкой и средней солености (2–15 мас. % NaCl экв.). Отличительной особенностью кварца разных жильных систем выступает состав газовой фазы включений. Минимальные температуры формирования жильного кварца фиксируются в диапазоне от 180 до 450°C в условиях минимальных значений флюидного давления 0.7–2.9 кбар. **Выводы.** Сложнопостроенные жильные системы зоны сочленения Байкало-Муйской и Баргузино-Витимской структурно-формационных зон, приуроченные к различным вмещающим породам и имеющие разное структурное положение, характеризуются близким составом флюида и единой термодинамической историей, отражающей смену деформационных агрегатов. Установлена метаморфогенно-гидротермальная природа флюида, принимавшего участие в формировании кварца жильных систем. Развитие гидротермальной системы сопровождается влиянием на вмещающие породы, что находит отражение в вариациях состава флюида. Эволюция единой гидротермальной системы сопряжена с тектоно-деформационными процессами и может быть описана тремя динамическими этапами, которым соответствуют три генерации кварца.

Ключевые слова: жильный кварц, флюидные включения, Западное Забайкалье, тектонические деформации

Источник финансирования

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

Fluid inclusions in vein quartz as a reflection of the deformation stages of the junction area of Baikal-Muisk and Barguzin-Vitim structural-formation zones (Western Transbaikalia)

Elvira N. Kungulova¹, Anatoly A. Tomilenko², Platon A. Tishin¹, Olesya V. Savinova³, Dmitry V. Lychagin¹, Oksana V. Bukharova¹

¹National Research Tomsk State University, 36 Lenin av., Tomsk 634050, Russia, e-mail: elvirakungulova@mail.ru

²V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Akad. Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia

³National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin av., Tomsk 634050, Russia

Received 20.12.2021, accepted 22.04.2022

Для цитирования: Кунгулова Э.Н., Томиленко А.А., Тишин П.А., Савинова О.В., Лычагин Д.В., Бухарова О.В. (2022) Флюидные включения в жильном кварце как отражение деформационных этапов области сочленения Байкало-Муйской и Баргузино-Витимской структурно-формационных зон (Западное Забайкалье). *Литосфера*, 22(3), 327–346. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-3-327-346>

For citation: Kungulova E.N., Tomilenko A.A., Tishin P.A., Savinova O.V., Lychagin D.V., Bukharova O.V. (2022) Fluid inclusions in vein quartz as manifestation of deformation stages of the junction area of Baikal-Muisk and Barguzin-Vitim structural-formation zones (Western Transbaikalia). *Lithosphere (Russia)*, 22(3), 327–346. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-3-327-346>

© Э.Н. Кунгулова, А.А. Томиленко, П.А. Тишин, О.В. Савинова, Д.В. Лычагин, О.В. Бухарова, 2022

Research subject. Fluid inclusions in quartz of three vein systems associated with tectonic cracks occurred during the development of thrust and shear deformations of the Western Transbaikalia. Vein systems localized in volcanic, terrigenous and granite rocks. **Methods.** The composition of fluid inclusions was studied by microthermometry, Raman spectroscopy and gas chromatography-mass spectrometry. **Results.** The quartz under study was formed by high-density medium-temperature NaCl-KCl and a low- and medium-salinity water-carbon dioxide fluid (2–5 wt % NaCl eq.). A distinctive feature of quartz of different vein systems was found to be the gas phase composition of inclusions associated with the composition of host rocks. The minimum temperatures of vein quartz formation were determined to range from 180 to 450°C under the minimum fluid pressure values of 0.7–2.9 kbar. **Conclusions.** Complex vein systems of the junction zone of the Baikal-Muiskaya and Barguzino-Vitimskay SFZ, confined to different host rocks and having different structural positions, are characterized by a similar fluid composition and a common thermodynamic history reflecting the change of deformation aggregates. The metamorphogenic-hydrothermal nature of the fluid involved in the formation of quartz vein systems was established. The development of the hydrothermal system was accompanied by its influence on the host rocks, which was manifested in the variations of fluid composition. The evolution of a single hydrothermal system is associated with tectonic deformation processes, which can be described by three dynamic stages corresponding to three quartz generations.

Keywords: vein quartz, fluid inclusions, Western Transbaikalia, tectonic deformations

Funding information

This research was supported by the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education (No. FSWM-2020-0041), as well as by the TPU development program and state assignment of IGM SB RAS

Acknowledgements

We express our gratitude to Sergey Z. Smirnov, Sergey G. Kryazhev, Ekaterina N. Sokolova and Elena O. Shaparenko for valuable discussions when interpreting the results. We are also grateful to the reviewers for their comments that contributed to improving the quality of the research.

ВВЕДЕНИЕ

Флюиды метеорного и ювенильного происхождения, выделяющиеся в результате уплотнения, реакций дегидратации, плавления и дегазации во время крупномасштабных тектонических событий перемещаются посредством тепловой конвекции, инфильтрации, поверхностной и внутрикристаллической диффузии (Carter et al., 1990). Эти жидкости транспортируют вещество на расстояние, начиная от масштаба зерна до сотен километров. При этом зоны разломов являются благоприятными каналами для потока (Сох, 2002). Если давление поровых флюидов в земной коре превышает горизонтальные напряжения, то проницаемость горной массы резко возрастает (Sibson, 2000, 2019). Повышение проницаемости играет ключевую роль в облегчении перераспределения флюида между резервуарами жидкости в земной коре и влияет на формирование гидротермальных систем (Сох, 2010; Bons et al., 2012; Micklethwaite et al., 2015).

В гидротермальных системах с интенсивной циркуляцией жидкости проницаемость, контролируемая трещинами, может быть относительно недолговечной, если только она не восстанавливается в результате продолжающейся деформации (Сох, 2010). Минеральные ассоциации жил, выполняющие образованные сети трещин, хранят информа-

цию о природе захваченной жидкости (Lyubetskaya, Ague, 2009). Анализ законсервированного флюида из минералов жил дает представление о составе и плотности присутствующих жидкостей, а также о температуре и давлении гидротермальной системы во время захвата (Реддер, Хитаров, 1987; Muchez et al., 1995; Soloviev et al., 2019). Эти данные в комплексе с микроструктурными особенностями минералов дают возможность установить *TPX* (температура – давление – состав) параметры геологических событий (Chi, Guha, 2011; Schmatz, Urai, 2011).

Мы исследовали флюидные включения из агрегатов кварца трех жильных систем различной деформационной истории, приуроченных к разным вмещающим породам с целью восстановить природу флюида, образующего кварцевые жилы в породах, обладающих разными реологическими свойствами, и оценить влияние деформационных процессов на миграцию жидкости.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

Складчатые сооружения Западного Забайкалья, объединяемые в Саяно-Байкальскую складчатую область, представляют собой структуру второго порядка в составе Центрально-Азиатского пояса

и приурочены к южному обрамлению Сибирской платформы (рис. 1а). В составе Саяно-Байкальской складчатой области выделяются структурно-формационные зоны (террейны) байкальского, каледонского и варисско-герцинского возраста (рис. 1б). Объекты исследования располагаются в зоне сочленения позднеерифейской островодужной Байкало-Муйской структурно-формационной зоны (СФЗ) и Баргузино-Витимской СФЗ окраинных бассейнов венд-раннепалеозойского возраста. Байкало-Муйская СФЗ представлена верхнетулуинским субвулканическим и гранитным комплексами, надвинутыми по Келяно-Ирокиндинской зоне смятия на терригенные комплексы Баргузино-Витимской СФЗ (Зорин и др., 2009; Руженцев и др., 2012). Общая структура усложняется левосторонними сдвиго-сбросами запад-северо-западного простирания и крутопадающими нарушениями северо-восточного простирания (рис. 1в).

Нами изучался кварц жильных систем, приуроченных к структурным парагенезисам основных дизъюнктивных нарушений. Подробное строение исследуемых жильных систем приведено в более ранней работе (Lychagin et al., 2020).

С надвигами связано развитие системы Отвесной. Жильная система Береговая контролируется сдвиго-сбросами и взбросо-сдвигами СВ простирания. Система Кривая приурочена к зоне пересечения структур надвига и сдвигов. Жильные системы характеризуются различным составом вмещающих пород и набором структурных признаков, определяющих тектоническую обстановку формирования разломов с образованием магистральных и оперяющих трещин.

Жильная система Отвесная локализована среди пород верхнетулуинского комплекса, представленного метаморфизованными субвулканическими породами кислого и среднего состава, с подчиненным количеством базитов раннерифейского возраста (Клейменов и др., 2003). Околожилные породы, как правило, подвержены серицитизации, пропилитизации, березитизации и карбонатизации. Контроль кварцевых жил участка Отвесный осуществляется сбросо-надвигами северо-западного простирания ($\approx 330 \angle 30$ СВ) и секущими их меридионально крутопадающими сбросами ($\approx 0 \angle 85$ З). Жильная система включает в себя крупные магистральные, часто будинированные жилы ($\approx 150 \angle 50$ СВ); умереннопадающие жилы ($\approx 340 \angle 60$ ЮЗ) и пологопадающие прожилки ($\approx 80 \angle 10$ ЮВ), выполняющие сингенетичные трещины отрыва двух генераций.

Жильные образования системы Береговая приурочены к терригенным отложениям аматканского комплекса (Vam), представленным песчаниками, гравелитами, конгломератами кварц-полевошпатового состава. Породы комплекса преобразованы в условиях позднего катагенеза и дис-

лоцированы в наклонные, лежащие, ныряющие, кондовые складки. Вблизи тектонических нарушений отложения более уплотнены, мелкозернисты и подвержены метасоматической проработке (серицитизации и ожелезнению). Магистральные жилы контролируются направлением сдвиго-сбросовых ($\approx 241 \angle 70$ СЗ) и взбросо-сдвиговых ($\approx 283 \angle 89$ ЮЗ) деформаций. Структурный рисунок оперяющих жил определяется развитием сдвигового парагенезиса сколов Риделя.

Кварцевые жилы системы Кривая локализируются среди двуполевошпатовых гранитоидов Бамбукойского комплекса позднеерифейского возраста. Граниты подвержены интенсивному расщелачиванию, трещиноватости и метасоматозу (альбитизации, серицитизации). Развитие кварцевых жил в этой системе контролируется тыловыми зонами надвиговых деформаций и усложняется левосдвиговыми деформациями широтного простирания ($\approx 240 \angle 80$ СЗ), а также деформациями северо-восточного простирания ($\approx 263 \angle 76$ ЮВ). Магистральные жилы юго-западного падения ($\approx 152 \angle 30$ ЮЗ) связаны с развитием сбросовых деформаций при формировании надвиговой системы. Оперяющие жилы представлены ограниченными по простиранию прожилками юго-западного падения ($\approx 220 \angle 68$ СЗ), крутопадающими жилами ($\approx 242 \angle 78$ СЗ) и ($\approx 260 \angle 70$ ЮВ) и связаны с процессом растяжения при развитии двух генераций трещин отрыва в ходе формирования фланговых взбросо-сдвигов.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нами исследовались мономинеральные агрегаты кварца магистральных и оперяющих кварцевых жил зоны сочленения Байкало-Муйской и Баргузино-Витимской структурно-формационных зон Западного Забайкалья. Образцы жильного кварца отобраны во время полевых работ в 2017–2018 гг. Из 15 образцов (6 – кварц из жил системы Отвесная, 5 – кварц из жил системы Береговая, 4 – кварц из жил системы Кривая) были изготовлены петрографические шлифы и полированные с двух сторон пластинки. Петрографические шлифы изучены под оптическим микроскопом (Leica DM750P) с установленной цифровой камерой (Leica MC170 HD) в отраженном и проходящем свете (оборудование 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)).

В прозрачно-полированных пластинках локально исследовались флюидные включения методами криотермометрии и рамановской спектро-

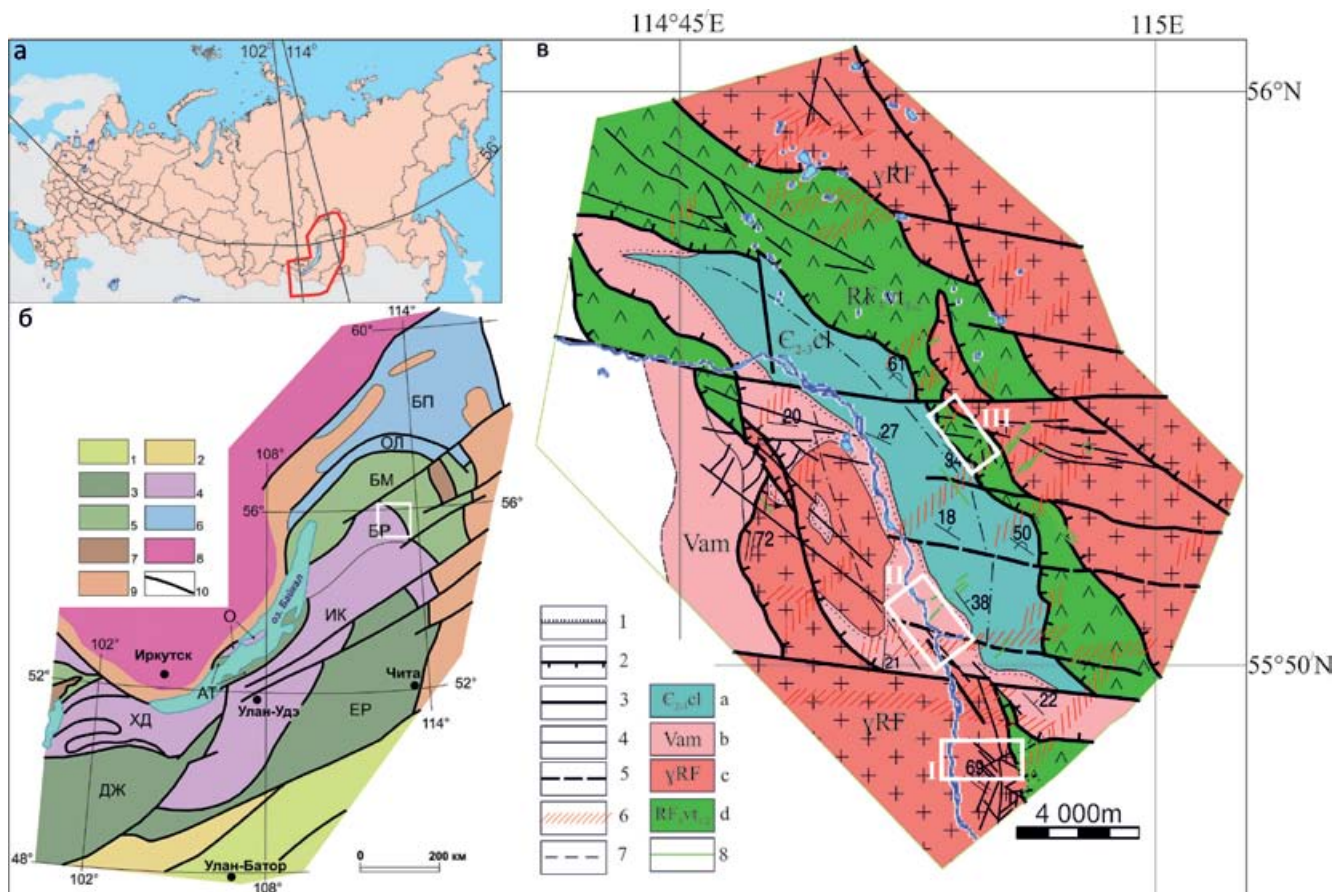


Рис. 1. Положение района исследований (а), геодинамическая карта Саяно-Байкальской складчатой области (б) (Зорин и др., 2009) и структурно-тектоническая схема района исследования (в).

б. 1 – зоны позднепалеозойского аккреционно-субдукционного клина; 2 – зоны венд-раннепалеозойского преддугового бассейна; 3 – зоны венд-раннепалеозойских островных дуг: ДЖ – Джидинская, ЕР – Еравнинская, АТ – Ангинско-Таланчанская; 4 – зоны венд-раннепалеозойских окраинных бассейнов: ХД – Хамардабанская, ИК – Икатская, БР – Баргузино-Витимская, О – Ольхонская; 5 – зоны позднерифейских окраинных дуг: БМ – Байкало-Муйская; 6 – зоны поздне-рифейского окраинного бассейна: БП – Байкало-Патомская с Олоkitской (ОЛ) подзоной; 7 – блоки раннедокембрийских пород в складчатых зонах вендраннего палеозоя и позднего рифея; 8 – позднерифейско-раннепалеозойский осадочный чехол Сибирской платформы; 9 – раннедокембрийский фундамент платформы; 10 – разломы. Белым прямоугольником выделен район работ.

в. а–д – структурно-вещественные комплексы: а – чулемгинский, б – аматканский, с – нерасчлененный гранитоидный, d – верхнетулуинский. 1–7: линейные структуры: 1 – граница несогласия; 2 – взбросы, взбросо-надвижки; 3 – левосторонние сдвиги-сбросы первого порядка; 4 – левосторонние сдвиги-сбросы второго порядка; 5 – левосторонние сдвиги-сбросы предполагаемые; 6 – зоны растяжения северо-восточного простирания; 7 – ось складки; 8 – дайки нерасчлененные. Белыми прямоугольниками выделены объекты исследований (I – жильная система Кривая, II – система Береговая, III – система Отвесная).

Fig. 1. The position of the research area (a), geodynamic map of the Sayano-Baikal folded region (б) (Zorin et al., 2009), structural and tectonic scheme of the district (в).

б. 1 – zones of the Late Paleozoic accretion-subduction wedge; 2 – zones of the Vend-Early Paleozoic pre-arc basin; 3 – zones of the Vend-Early Paleozoic island arcs: ДЖ – Djidinskaya, ЕР – Eravninskaya, АТ – Anginsko-Talanchanskaya; 4 – zones of the Vend-Early Paleozoic marginal basins: ХД – Khamardabanskaya, ИК – Ikatskaya, БР – Barguzin-Vitimskaya, О – Olkhonskaya; 5 – zones of the Late Riphean marginal arcs: БМ – Baikalo-Muiskaya; 6 – zones of the Late Riphean marginal basin: БП – Baikalo-Patomsky with the Olokite (ОЛ) subzone; 7 – blocks of Early Precambrian rocks in the folded zones of the Vendian-Early Paleozoic and Late Riphean; 8 – late Riphean-Early Paleozoic sedimentary cover of the Siberian platform; 9 – early Precambrian platform foundation; 10 – faults. The area of work is highlighted with a white rectangle.

в. а–d – Structural-material complexes: а – Chulegminsky, б – Amatkanskoy, с – undivided granitoid, d – Verkhnetuluinsky sub-volcanic. 1–7: linear structures: 1 – boundary of disconformity; 2 – upthrow fault, upthrow-thrust fault; 3 – left-handed strike slip fault of the first order; 4 – left-handed strike slip fault of the second order; 5 – left-handed strike slip fault supposed; 6 – stretching zones in the northeastern direction; 7 – fold axis; 8 – undivided dikes. White rectangles indicate sampling locations of vein systems: I – Krivaya, II – Beregovaya, III – Otvesnaya.

скопии в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и Томском политехническом университете. Для определения температур общей гомогенизации, эвтектики и плавления льда растворов использовалась микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений температур от -196 до $+600^{\circ}\text{C}$. Соленость минералообразующих растворов рассчитывалась по температуре плавления льда с применением двухкомпонентной водно-солевой системы $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ (Steele-MacInnis et al., 2012). Соленость растворов в системе $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ рассчитывалась с учетом температуры плавления газогидрата (Steele-MacInnis, 2018). Состав водной фазы включений определялся на основании температуры эвтектики, характеризующей водно-солевую систему (Борисенко, 1977). Плотность водно-солевых включений рассчитывалась исходя из температуры общей гомогенизации и солености (Steele-MacInnis et al., 2012). Плотность CO_2 определялась на линии равновесия жидкость–пар по температуре его гомогенизации. Плотность флюида, захваченного в момент кристаллизации минерала, рассчитывалась с учетом плотностей всех фаз (Наумов, 1982).

Оценка минимального давления минералообразования произведена с помощью программы FLUIDS (Bakker, 2001) по уравнению T.S. Bowers, H.C. Helgeson (1983) для системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$. При этом использованы результаты КР-анализа индивидуальных включений, температур частичной гомогенизации и количество содержания углекислоты (мол. %) в системе $\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{N}_2$ (Кряжев, 2010). При расчете давления за минимальную температуру консервации флюидных включений принималась температура их полной гомогенизации (без учета возможных поправок на давление).

Состав флюидных включений в кварце исследован методом КР-спектроскопии (Dubessy et al., 1989; Frezzotti et al., 2012) на спектрометре Horiba Lab Ram HR 800 в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Возбуждение проводилось твердотельным Nd YAG лазером с длиной волны 532 нм и мощностью 75 мВт. Регистрация спектра осуществлялась полупроводниковым детектором Endor, охлаждаемым по методу Пельтье. Для локализации точки в анализируемом образце использовалась конфокальная система спектрометра на базе микроскопа OLYMPUS BX-41 с объективом $100\times$ 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 $100-4200$ cm^{-1} . Время накопления сигнала изменялось от 25 с / спектральное ок-

но для крупных объектов до 400 с / спектральное окно для мелких объектов. Погрешность определения находится в пределах 1 cm^{-1} . При работе с КР-спектрами использовался программный пакет Origin 8.

Исследование состава летучих компонентов флюидных включений в кварце производилось с помощью метода газовой хромато-масс-спектрометрии на базе Аналитического центра ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на хромато-масс-спектрометре ThermoScientific (USA) DSQ II MS/Focus GC. Методика GC-MS анализа детально описана в работе (Бульбак и др., 2020). Свежесколотый образец объемом до 0.06 cm^3 помещали пинцетом в специальное устройство, включенное онлайн в газовую схему хроматографа перед аналитической колонкой, затем он прогревался при $T = 140-160^{\circ}\text{C}$ в течение 133 мин в токе газа-носителя – гелия (чистота 99.9999% , начальное давление 45 кПа). Разделение газовой смеси на компоненты осуществлялось на капиллярной аналитической колонке Restek Rt-Q-BOND. Газовую смесь вводили через термостатируемый (270°C) кран (Valco, USA) в аналитическую колонку, скорость постоянного потока не составляла 1.7 $\text{мл}\cdot\text{мин}^{-1}$, температура ГХ/МС соединительной линии – 300°C ; колонка выдерживалась 2 мин при $T = 70^{\circ}\text{C}$, затем нагревалась со скоростью $25^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ до температуры 150°C , а далее со скоростью $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ до 290°C и удерживалась при этой температуре 100 мин. Масс-спектры ионизации электронным ударом по полному ионному току получены на квадрупольном масс-селективном детекторе в режиме Full Scan. Масс-спектральные условия: энергия электронов 70 эВ, ток эмиссии 100 мкА, температура в источнике ионов 200°C , напряжение усилителя 1350 В, полярность регистрируемых ионов положительная, диапазон сканирования масс $5-500$ а. е. м., скорость сканирования один скан в секунду. Старт анализа синхронизировался с моментом разрушения образца. Все газовые тракты хроматографа, по которым перемещалась газовая смесь, в том числе инжектор, кран и капилляры, имели сульфидное покрытие. Ввод газовой смеси, извлеченной из образца при его одноактном ударном разрушении, осуществлялся в онлайн-режиме в токе гелия без концентрирования, включая криофокусировку.

Относительные концентрации летучих компонентов в разделяемой смеси устанавливались методом нормирования: сумма площадей всех хроматографических пиков анализируемой смеси приравнивалась 100% , а по величине площади отдельного компонента определялось его относительное процентное содержание в анализируемой смеси. Площади пиков определены по алгоритму ICIS в хроматограмме с использованием Qual Browser 1.4 SR1 из пакета программ Xcalibur.

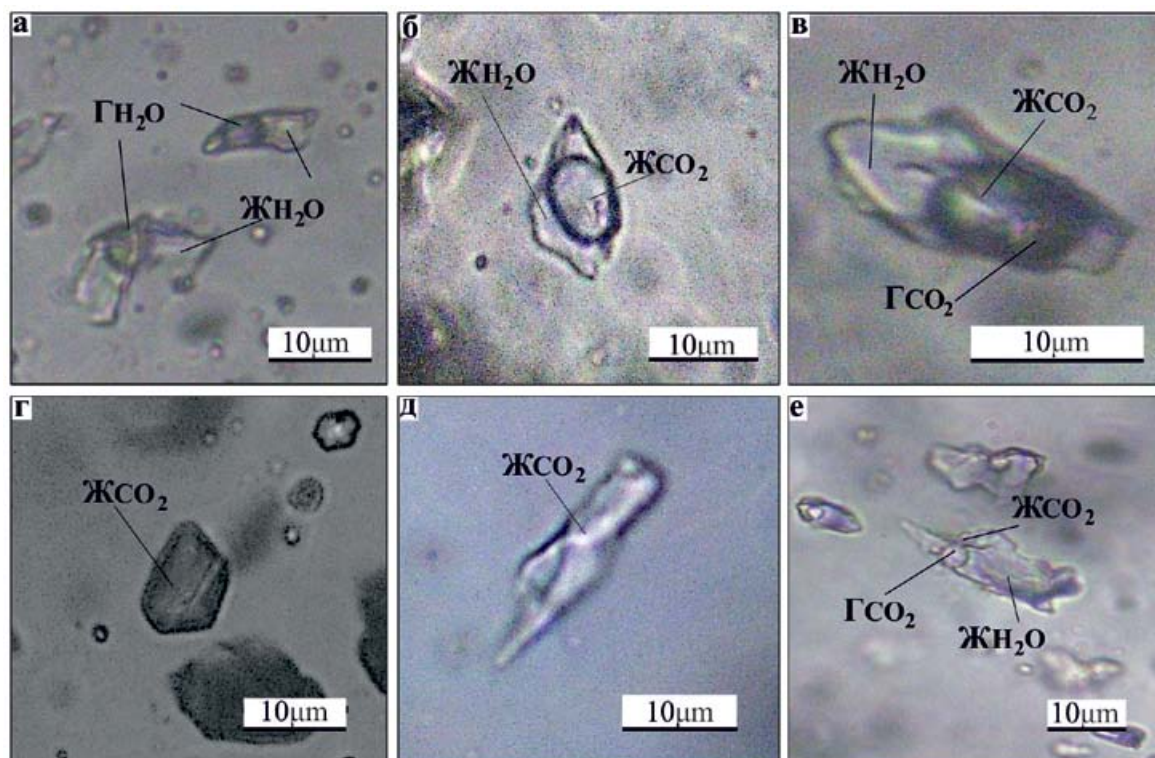


Рис. 2. Типы флюидных включений в кварце жильных систем.

а – двухфазные водно-солевые включения ($\text{ЖН}_2\text{О} + \text{ГН}_2\text{О}$) (тип I); б – двухфазные водно-углекислотные ($\text{ЖН}_2\text{О} + \text{ЖСО}_2$) (тип II); в, е – трехфазные водно-углекислотные ($\text{ЖН}_2\text{О} + \text{ЖСО}_2 + \text{ГСО}_2$) (тип III); г, д – однофазные включения жидкой углекислоты (тип IV). Ж – жидкость, Г – газ.

Fig. 2. Types of fluid inclusions in quartz of vein systems.

а – two-phase water-salt inclusions ($\text{LH}_2\text{O} + \text{GH}_2\text{O}$) (I type); б – two-phase water-carbon dioxide ($\text{LH}_2\text{O} + \text{LCO}_2$) (II type); в, е – three-phase water-carbon dioxide ($\text{LH}_2\text{O} + \text{LCO}_2 + \text{GCO}_2$) (III type); г, д – carbon-dioxide (IV type). Ж – liquid, Г – gas.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характеристика флюидных включений в жильном кварце

В кварце исследуемых жил обнаружены первичные и вторичные флюидные включения, среди которых по фазовому составу при комнатной температуре выделяются следующие типы (рис. 2).

Тип I – двухфазные водно-солевые включения $\text{ЖН}_2\text{О} + \text{ГН}_2\text{О}$ (см. рис. 2а). Соотношение жидкой и газовой водных фаз меняется от 90/10 до 30/70 соответственно.

Тип II – двухфазные водно-углекислотные $\text{ЖН}_2\text{О} + \text{ЖСО}_2$ (см. рис. 2б). Включения с двумя жидкими фазами – водной и углекислотной, соотношение которых меняется в пределах от 40/60 до 60/30 соответственно. В некоторых включениях при охлаждении кристаллизовался газогидрат CO_2 ($\text{CO}_2/3/4\text{H}_2\text{O}$), который плавился при температуре 2.0–9.3°C.

Тип III – трехфазные водно-углекислотные $\text{ЖН}_2\text{О} + \text{ЖСО}_2 + \text{ГСО}_2$ (см. рис. 2в, е), с сосуществующими жидкой и газовой фазами углекислоты. При этом их соотношение меняется в широких пределах – от 40/40/20 до 70/20/10 соответственно.

Тип IV – однофазные включения жидкой углекислоты. Форма включений соответствует как изометричной конфигурации (см. рис. 2г), так и сложной (см. рис. 2д). При просмотре под микроскопом включения с преобладанием CO_2 в жидком состоянии выглядят более темными однофазными, но при уменьшении температуры ниже 0°C в них иногда появляются тончайшая кайма водного раствора у стенок вакуоли и пузырек газа CO_2 .

Особенности распределения флюидных включений в агрегатах жильного кварца

Проведенный ранее (Lychagin et al., 2020) структурно-кристаллографический анализ образцов позволил выделить пять типов микроструктур жиль-

ного кварца, отражающих развитие деформационных процессов: А) кварц с непрерывными двойниками Дофине; В) кварц субблоковой микроструктуры; С) кварц с полосами деформации; D) кварц порфирокастовой структуры; Е) кварц зерновой микроструктуры. Выделенные типы выстраиваются в деформационный ряд В–С–А–D–Е, который отражает временную последовательность формирования кварцевых агрегатов. Ниже приведены особенности ассоциации флюидных включений для характерных микроструктур кварца трех участков.

1. Кварцевым зернам агрегатов микроструктуры типа А (рис. 3а) свойственны присутствие двойниковых границ дофинеяского типа (двойникование путем вращения относительно оси L_3) и консервация первичных включений, в качестве которых выступают двухфазные включения II типа с жидкой фазой CO_2 разного размера и существенно углекислотные включения IV типа. Первичные включения имеют средний размер (15–25 мкм). Более крупные флюидные включения наблюдаются преимущественно в кварце магистральных жил, более мелкие – в кварце опеляющих жил. В качестве вторичных выступают включения II и III типов.

2. Кварц микроструктуры типа В характеризуется субблоковым строением. Таким агрегатам (рис. 3б) свойственны редкие первичные включения III типа. Кроме того, наблюдаются включения II и III типов, имеющие маленькие размеры (10 мкм) и предполагающие вторичную природу вследствие линейной ориентировки.

3. Ассоциация флюидных включений микроструктуры типа С (рис. 3в) представлена первичными углекислотными двухфазными включениями (II тип) среднего размера (10–20 мкм). В качестве вторичных отмечаются сингенетичные трехфазные углекислотные включения III типа и однофазные включения IV типа. Отличительной особенностью включений этой ассоциации является ярко выраженная приуроченность к деформационным элементам в структуре кварца.

4. Микроструктура кварца типа D отличается развитием зерен рекристаллизации размером до 0.3 мм. Характерной особенностью ассоциации флюидных включений данной микроструктуры является их измененная морфология, что дает основание рассматривать их как вторичные. В кварце магистральных жил (рис. 3г) наблюдаются включения II–IV типов вытянутой формы, ориентированных в одном направлении ортогонально к расположению деформационных элементов в кварце. Большая часть таких включений расшнурована. В агрегатах микроструктуры типа D опеляющих жил (рис. 3д) также фиксируются вторичные включения неправильной вытянутой формы размером до 25 мкм I типа, реже II типа, а также плоские включения неправильной конфигурации жидкой углекислоты IV типа (см. рис. 2д).

5. В агрегатах кварца микроструктуры типа Е находятся первичные и вторичные флюидные включения всех четырех типов и области, полностью от них освобожденные. Максимальная концентрация флюидных включений наблюдается вблизи субблоковых и межзерновых границ (рис. 3е).

Микротермометрические исследования водной фазы флюидных включений

В кварцевых агрегатах описаны флюидные включения: первичные, захваченные в процессе роста минерала, и вторичные, расположенные в залеченных трещинах, секущих границы кварцевых зерен. Первичные включения либо равномерно рассеяны по всей площади зерна кварца, либо образуют облачные скопления (группы). Ко вторичным были отнесены рои включений, обладающие одинаковой ориентировкой.

Результаты микротермометрических исследований 360 флюидных включений жильного кварца (15 образцов) приведены в табл. 1. Гомогенизация флюидных включений происходила при температуре от 100 до 430°C преимущественно в жидкую фазу. Жильный кварц трех исследуемых участков характеризуется близким составом водного раствора флюидных включений. Начальное плавление льда ($=T_{\text{эвт}}$) во включениях происходит в интервале от –30 до –25°C, что говорит о вероятном присутствии в растворе хлоридов Na и K (Борисенко, 1977). С учетом конечной температуры плавления льда или газогидрата CO_2 соленость флюида составляет 2–15 мас. % в NaCl-эквиваленте.

Первичные включения системы Отвесная гомогенизируются в жидкую фазу при температурах 430–340, 320 и 300–230°C. Вторичные включения характеризуются температурами гомогенизации 420–210°C в жидкую и газовую фазы.

Гомогенизация первичных включений в кварце жильной системы Береговая в основном происходит в интервале температур 300–230°C, за редким исключением – при 350–340°C. Также здесь наблюдаются первичные включения, гомогенизация которых происходит как в жидкую фазу, так и в газовую и попадает в интервал 200–185°C. В кварце жил этой системы вторичные включения гомогенизируются при температуре 410–365, 300–240, 150–140°C в жидкую фазу.

В кварце жил системы Кривая обнаружены первичные флюидные включения, температура гомогенизации которых фиксируется в интервале 450–430 и 300–230°C и происходит в жидкую фазу. В кварце магистральной жилы при микротермометрических исследованиях трехфазные включения часто декрепитировали. Вторичные включения демонстрируют различные температуры гомогенизации – 320, 300–240, 200, 160–140°C – с переходом в жидкую фазу.

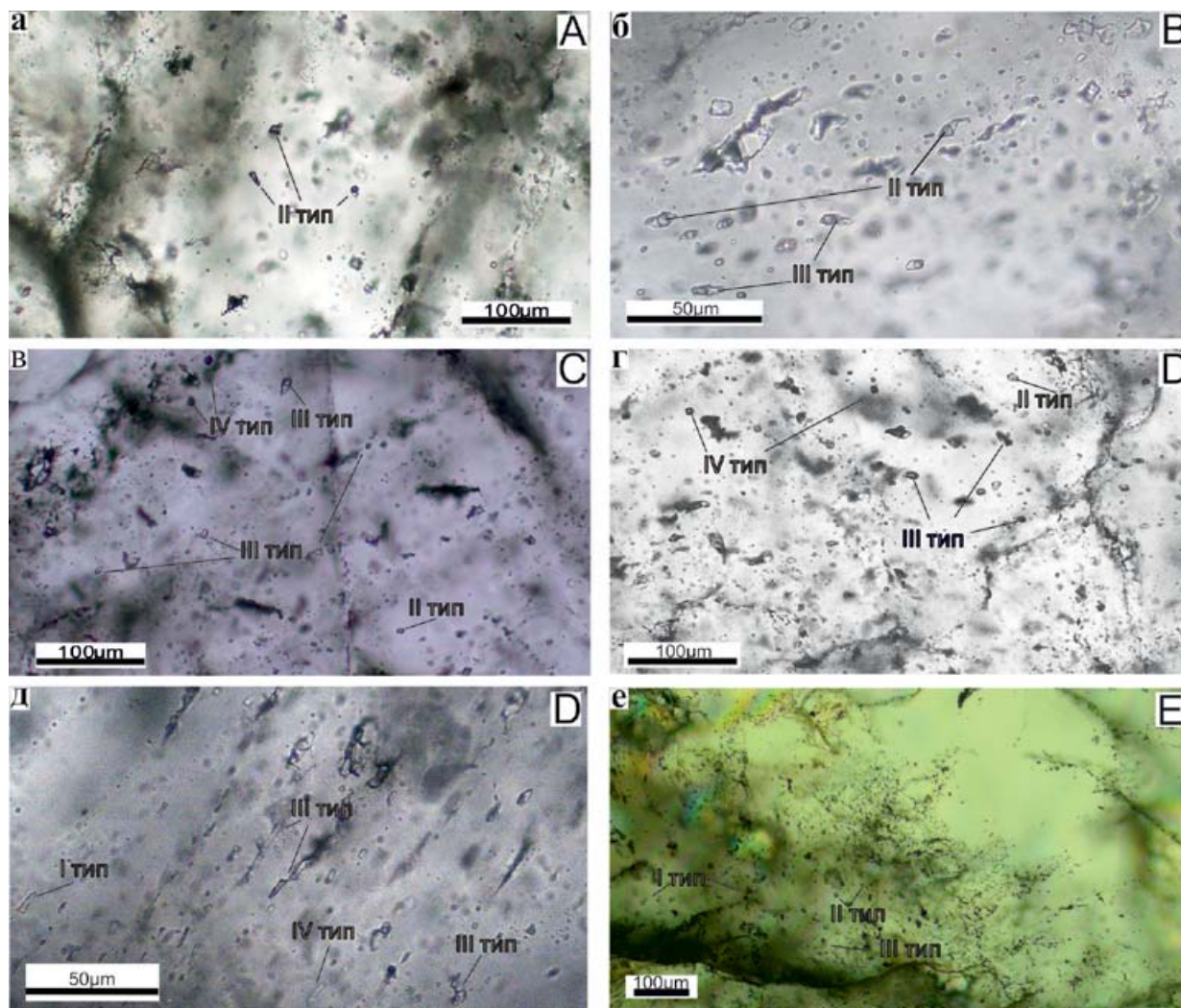


Рис. 3. Положение флюидных включений в кварцевых агрегатах с различной микроструктурной характеристикой.

а – первичные флюидные включения II типа в кварце микроструктуры типа А; б – вторичные флюидные включения II и III типов в кварце микроструктуры типа В; в – вторичные флюидные сингенетические включения III и IV типов в кварце микроструктуры типа С; г – вторичные флюидные включения III типа в кварце магистральной жилы микроструктуры типа D; д – вторичные флюидные включения всех типов в кварце оперяющей жилы микроструктуры типа D; е – очищение от флюидных включений структуры кварца в магистральной жиле микроструктуры типа E.

Fig. 3. The position of fluid inclusions within quartz aggregates.

а – primary fluid inclusions of type II in quartz of type A microstructure; б – secondary fluid inclusions of type II and III in quartz of type B microstructure; в – secondary fluid syngenetic inclusions of type III and IV in quartz of type C microstructure; г – secondary fluid inclusions of type III in quartz of the main vein of type D microstructure; д – secondary fluid inclusions of all types in quartz of the feathering vein of type D microstructure; е – purification from fluid inclusions quartz structure in the main vein of type E microstructure.

Анализ флюидных включений в агрегатах жильного кварца различных микроструктур (табл. 2) показал, что в кварце с непрерывными двойниками Дофине (микроструктура А) законсервированы первичные включения, гомогенизация которых происходит в жидкую фазу в интервалах температур 370–340, 300–230 и 200–185°C. Первично дефор-

мированные агрегаты (микроструктуры В) содержат первичные включения, гомогенизирующиеся при 320°C, и вторичные включения с температурами гомогенизации 380–310 и 420–413°C в жидкую фазу. Первичные включения в кварце микроструктуры типа С гомогенизируются в жидкую фазу при 300–230°C. Вторичные включения имеют

Таблица 1. Результаты исследований индивидуальных флюидных включений в жильном кварце

Table 1. Results of studies of individual fluid inclusions in vein quartz

| Тип микро- струк- тур | Тип включе- ния | N | V, % | Температура фазовых переходов, °C | | | | | | | Содержание, мол. % | | | Расчетные параметры | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|----|---------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------------|---|----------------|----------|--------------------|----------------|-----------------|-----------------------------------|---|-------------------------|---------------------------|------------|--|
| | | | | T _{эвт} | T _{пл} льда | T _{пл} ГГ | T _{пл} CO ₂ | T _Г CO ₂ (Фаза) | T _Г | Вид Г | CO ₂ | N ₂ | CH ₄ | Соленость, мас. % NaCl-экв. | ρCO ₂ , г/см ³ | ρ, г/см ³ | CO ₂ мол. % | P, Кбар | |
| Жильная система Отвесная | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Магистральные жилы | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Образец О45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D | III, В | 4 | 40 | −23 | − | 5.2 | −56.6 | 7.0 | 320 | ж | 100 | 0 | 0 | 8.7 | 0.88 | 0.99 | 21 | 2.9 | |
| | III, В | 5 | 35 | − | − | − | −56.6 | 7.0 | 190–215 | ж | 100 | 0 | 0 | − | 0.88 | − | 16 | − | |
| | III, В | 3 | 60 | −25 | − | 6.4 | −60.0 | −10.0 | 180 | ж | 100 | 5 | 0 | 8.6 | − | 1.02 | 36 | 1 | |
| | I, В | 4 | 30 | − | − | − | − | − | 130–180 | ж | − | − | − | − | − | − | − | − | |
| Образец О32.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D | II, П | 4 | 40 | −30 | −1.7 | − | −60.0 | − | 430 | ж | 95.0 | 5 | 0 | 2.9 | − | 0.43 | − | − | |
| | II, П | 5 | 32 | | −1.7 | − | − | − | 220–240 | ж | − | − | − | 2.9 | − | 0.85 | − | − | |
| | III, В | 5 | 85 | −30 | −6.0 | − | −56.6 | 30.0 | 400–420 | г | 100 | 0 | 0 | 9.2 | 0.60 | 0.60 | 58 | 1.3 | |
| | III, В | 3 | 65 | −30 | −5.8 | − | −56.6 | 30.0 | 360–390 | ж | 100 | 0 | 0 | 8.9 | 0.60 | 0.63 | 28.5 | 1.2 | |
| | III, В | 3 | 75 | −29 | −6.5 | − | −56.6 | 30.0 | 330 | г | 100 | 0 | 0 | 9.8 | 0.60 | 0.64 | 42 | 1.0 | |
| | III, В | 4 | 81 | −31 | −5.9 | − | −56.6 | 30.0 | 310 | г | 100 | 0 | 0 | 9.0 | 0.60 | 0.63 | 51 | 0.9 | |
| | III, В | 2 | 75 | −30 | −6.2 | − | −56.6 | 30.0 | 306 | г | 100 | 0 | 0 | 9.4 | 0.60 | 0.65 | 42 | 0.8 | |
| Образец О33.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E | III, В | 3 | 60 | −22 | −10.0 | 5.2 | −56.6 | 30.0 | 390 | ж | 100 | 0 | 0 | 8.7 | 0.60 | 0.78 | 29 | 1.6 | |
| | III, В | 3 | 80 | −24 | −10.0 | 5.2 | −56.6 | 31.0 | 380–390 | г | 100 | 0 | 0 | 8.7 | 0.56 | 0.69 | 51 | 1.3 | |
| | III, В | 9 | 65 | −23 | −8.0 | 5.2 | −56.6 | 31.0 | 350–360 | ж | 100 | 0 | 0 | 8.7 | 0.56 | 0.76 | 33 | 1.2 | |
| | II, П | 2 | 50 | −24 | −8.0 | − | − | − | 280 | ж | 100 | 0 | 0 | 11.7 | − | 0.86 | − | − | |
| | II, П | 3 | 40 | −23 | −9.0 | − | − | − | 245 | ж | 100 | 0 | 0 | 12.8 | − | 0.91 | − | − | |
| | II, П | 7 | 34 | −25 | −10.0 | − | − | − | 230 | ж | − | − | − | 13.9 | − | 0.90 | − | − | |
| Оперяющие жилы | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Образец О32.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | II, П | 6 | 60 | −23 | −1.0 | − | −56.6 | − | 340–370 | ж | 100 | 0 | 0 | 1.7 | − | 0.60 | − | − | |
| | I, П | 6 | 32 | −23 | −1.0 | − | − | − | 300 | ж | 0 | 0 | 0 | 1.7 | − | 0.70 | − | − | |
| | II, П | 3 | 60 | −24 | −10.0 | − | −56.6 | − | 270–280 | ж | 100 | 0 | 0 | 13.9 | − | 0.89 | − | − | |
| D | II, В | 6 | 35 | −22 | −8.0 | − | −58.0 | − | 355–360 | ж | 98.0 | 2 | 0 | 11.7 | − | 0.75 | − | − | |
| | I, В | 3 | 40 | −23 | −10.0 | − | − | − | 352 | ж | 0 | 0 | 0 | 13.9 | − | 0.79 | − | − | |
| | II, В | 5 | | −25 | −9.0 | − | −56.6 | − | 350 | г | 100 | 0 | 0 | 12.8 | − | 0.78 | − | − | |
| | II, В | 4 | | −23 | −9.0 | − | −56.6 | − | 344 | г | 100 | 0 | 0 | 12.8 | − | 0.78 | − | − | |
| | II, В | 3 | | −22 | −6.0 | 4.9 | −56.6 | − | 340 | ж | 100 | 0 | 0 | 6.5 | − | 0.78 | − | − | |
| Образец О33.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | II, В | 4 | 32 | −25 | −11.0 | − | −60.0 | − | 413–420 | ж | 95.0 | 5 | 0 | 14.9 | − | 0.70 | − | − | |
| | III, В | 5 | 37 | −26 | −10.0 | − | −56.6 | 30.0 | 310–380 | ж | 100 | 0 | 0 | 13.9 | 0.60 | 0.71 | 12 | − | |
| | I, В | 5 | 25 | −23 | −9.0 | − | − | − | 140–245 | ж | 0 | 0 | 0 | 12.8 | − | 0.95 | − | − | |
| Образец О34.7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | III, П | 4 | 40 | −25 | −10.0 | 5.2 | −58.0 | 7.0 | 320 | ж | 97.0 | 3 | 0 | 8.7 | − | 0.99 | 21 | 2.9 | |
| | III, П | 3 | 60 | −25 | −10.0 | 5.2 | −56.6 | 2.5 | 318 | ж | 100 | 0 | 0 | 9.0 | 0.92 | 0.98 | 38 | 2.7 | |
| C | II, П | 7 | 52 | −24 | −10.0 | − | −56.6 | − | 275 | ж | 100 | 0 | 0 | 13.9 | − | 0.93 | − | − | |
| | I, П | 12 | 18 | −23 | −8.0 | − | − | − | 228–240 | ж | 0 | 0 | 0 | 11.7 | − | 0.95 | − | − | |
| | III, В | 8 | 82 | −25 | −9.0 | 5.2 | −56.6 | 30.0 | 380 | г | 100 | 0 | 0 | 8.7 | 0.60 | 0.68 | 53 | 1.2 | |
| | II, В | 3 | 30 | −25 | −10.0 | − | −56.6 | − | 210 | ж | 100 | 0 | 0 | 13.9 | − | 0.96 | − | − | |

Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

| Тип микро-структур | Тип включения | N | V, % | Температура фазовых переходов, °C | | | | | | | Содержание, мол. % | | | Расчетные параметры | | | | |
|---------------------------|---------------|----|------|-----------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------|-------|--------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------|---------|
| | | | | T _{эвт} | T _{пл льда} | T _{пл ГГ} | T _{пл CO₂} | T _{Г CO₂ (Фаза)} | T _Г | Вид Г | CO ₂ | N ₂ | CH ₄ | Соленость, мас. % NaCl-экв. | ρCO ₂ , г/см ³ | ρ, г/см ³ | CO ₂ мол. % | P, Кбар |
| Жильная система Береговая | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Магистральная жила | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Образец Б23.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | II, П | 7 | 44 | -23 | -1.5 | — | -57.0 | — | 340–350 | ж | 98.0 | 0 | 2.0 | 2.6 | — | 0.60 | — | — |
| | III, П | 6 | 38 | -21 | -10.8 | — | -57.1 | 21.0 | 270–310 | ж | 97.7 | 0 | 2.3 | 14.8 | 0.70 | 0.98 | 15 | 1.8 |
| | III, П | 4 | 37 | -22 | -1.2-1.5 | — | -57.0 | 20.0 | 310 | ж | 98.0 | 0 | 2.0 | 2.0 | 0.70 | 0.94 | 14 | 1.9 |
| | III, П | 3 | 43 | -23 | -5.0 | — | -56.6 | 21.0 | 267 | ж | 100 | 0 | 0 | 7.9 | 0.70 | 0.93 | 18 | 1.1 |
| | III, П | 3 | 35 | -22 | -9.0 | — | -56.8 | 20.0 | 250–254 | ж | 99.7 | 0 | 0.3 | 12.8 | 0.70 | 0.99 | 13 | 1.1 |
| | III, П | 5 | 52 | -20 | -1.2-1.5 | — | -56.8 | 20.0 | 243–245 | ж | 99.8 | 0 | 0.2 | 2.0 | 0.70 | 0.90 | 24 | 0.8 |
| | III, П | 7 | 50 | -22 | -2.0 | — | -56.6 | 20.0 | 240 | ж | 100 | 0 | 0 | 2.6 | 0.70 | 0.90 | 22 | 0.7 |
| | III, П | 5 | — | -25 | -7.0 | — | — | — | 148–200 | ж | — | — | — | 10.5 | — | 0.96 | — | — |
| | III, П | 3 | 70 | -30 | -1.0 | — | -58.0 | -10.0 | 185 | г | 97.0 | 0 | 3.0 | 1.7 | 0.98 | 0.99 | 44 | 1.3 |
| | II, В | 5 | 22 | -21 | -7.0 | — | -57.0 | — | 187 | ж | 98.7 | 0 | 1.3 | 10.5 | — | 0.90 | — | 1.3 |
| | III, В | 6 | 60 | -22 | -4.0 | 6.8 | -58.0 | — | 350 | ж | 97.0 | 0 | 3.0 | 3.7 | — | — | — | — |
| II, В | 5 | 15 | -30 | -1.2 | — | — | -56.6 | — | 140–150 | ж | 100 | 0 | 0 | 2.0 | — | 0.90 | — | — |
| Образец Б25.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E | III, В | 2 | 65 | -22 | -6.0 | — | -56.6 | 30.0 | 410 | ж | 100 | 0 | 0 | 9.2 | 0.60 | 0.76 | 31 | 1.7 |
| | III, В | 10 | 65 | -22 | -8.0 | — | -56.6 | 30.0 | 365 | ж | 100 | 0 | 0 | 11.7 | 0.60 | 0.77 | 31 | 1.3 |
| | II, В | 6 | 20 | -22 | -1.5 | — | — | — | 140–187 | ж | — | — | — | 2.8 | — | 0.92 | — | — |
| | IV, В | 4 | — | — | — | — | — | -4 | — | — | 100 | 0 | 0 | — | — | 0.95 | — | 1.6 |
| Оперяющие жилы | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Образец Б72.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D | III, В | 6 | 32 | -25 | -6.0 | 6.2 | -56.6 | 30.0 | 270–280 | ж | 100 | 0 | 0 | 6.1 | 0.60 | 0.91 | 12 | 0.9 |
| | I, В | 8 | 25 | -22 | -1.5 | — | — | — | 240–270 | ж | 0 | 0 | 0 | 2.8 | — | 0.81 | — | — |
| Образец Б72.1.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D | III, В | 3 | 40 | -25 | -8.0 | — | -57.4 | 15.0 | 300 | ж | 99.0 | 0 | 1.0 | 11.7 | 0.80 | 0.82 | 18 | 1.4 |
| | I, В | 6 | 20 | -25 | -9.0 | — | — | — | 145–210 | ж | — | — | — | 12.8 | — | 0.96 | — | — |
| | IV, В | 13 | — | — | — | — | -56.6 | -1.4-4.5 | — | ж | 100 | 0 | 0 | — | — | 0.87 | — | 1.5 |
| Жильная система Кривая | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Магистральная жила | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Образец K4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | III, П | 7 | 38 | -22 | -5.0 | 6.1 | -56.6 | 27.0 | 300 | ж | 100 | 0 | 0 | 7.3 | 0.67 | 0.91 | 16.5 | 1.4 |
| | III, П | 3 | 70 | -23 | -7.0 | 6.2 | -56.6 | 17.0 | 275 | г | 100 | 0 | 0 | 7.1 | 0.80 | 0.98 | 45 | 1.4 |
| | II, П | 5 | 45 | -22 | -1.8 | 3.6 | -57.0 | — | 260 | ж | 99.8 | 0 | 0.1 | 0.9 | — | 0.70 | — | — |
| Образец K 103 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C | III, В | 6 | 50 | -23 | -6.6 | 6.2 | -56.6 | — | 200 | ж | 100 | 0 | 0 | 7.1 | — | 0.94 | — | — |
| | III, В | 7 | 22 | -28 | -8.0 | 5.4 | -56.6 | 20.0 | 140–145 | ж | 100 | 0 | 0 | 8.4 | 0.70 | 1.00 | 10 | — |
| Образец K 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E | II, П | 9 | 45 | -23 | -9.0 | 4.5 | -56.6 | — | 230–280 | ж | 100 | 0 | 0 | 9.5 | — | 0.80 | — | — |
| | III, В | 5 | 25 | -23 | -9.0 | 4.6 | -56.6 | 17.0 | 130–160 | ж | 100 | 0 | 0 | 9.6 | 0.80 | 1.01 | 12 | — |
| | III, П | 8 | 65 | -22 | -9.0 | — | -56.6 | 30.0 | 430–450 | ж | 100 | 0 | 0 | 12.8 | 0.60 | 0.77 | 31 | 1.8 |
| Оперяющие жилы | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Образец K 103.21.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | I, В | 5 | 20 | -25 | -6.0 | — | — | — | 320 | ж | 0 | 0 | 0 | 9.2 | — | 0.80 | — | — |
| Образец K 103.21.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D | III, В | 6 | 30 | -25 | -7.0 | 6.2 | -56.6 | 17.0 | 300 | ж | 100 | 0 | 0 | 7.1 | 0.80 | 0.98 | 14 | 2.5 |
| | I, В | 3 | 15 | -23 | -8.0 | — | — | — | 250 | ж | 0 | 0 | 0 | 11.7 | — | 0.90 | — | 1.2 |

Примечание. Генерация флюидных включений: П – первичные, В – вторичные; фазовый состав включений: I – водно-солевой (ЖН₂O + ГН₂O), II – двухфазный водно-углекислотный (ЖН₂O + ЖСО₂), III – трехфазный водно-углекислотный (ЖН₂O + ЖСО₂ + Г), IV – однофазный углекислотный (ЖСО₂); N – количество определений; V, % – объемная доля газовой фазы; вид Г – вид гомогенизации: ж – жидкость, г – газ. Прочерк – не обнаружено.

Note. Generation of fluid inclusions: П – primary, В – secondary; phase composition of inclusions: I – water-salt (LH₂O + GH₂O), II – two-phase water-carbon dioxide (LH₂O + LCO₂), III – three-phase water-carbon dioxide (LH₂O + LCO₂ + G), IV – single-phase carbon dioxide (LCO₂); N – the number of definitions; V, % – the volume percentage of the gas phase; type Г – type of Homogenization: ж – liquid, г – gas. Dash – not detected.

Таблица 2. Температуры гомогенизации включений в агрегатах кварца различных микроструктур

Table 2. Homogenization temperatures of inclusions in quartz aggregates of various microstructures

| Жильная система | A | B | C | D | E |
|-----------------|---|---|---|---|---|
| Отвесная | 370–340 ж (П) 300–270 ж (П) | 420–413 ж (В) 380–310 ж (В) 320 ж (П) | 380 г (В) 300–230 ж (П) 210 ж (В) | 430 ж (П) 360–340 ж (В) 420–306 ж/г (В) | 390–350 ж/г (В) 280–230 ж (П) |
| Береговая | 350–340 ж (П) 300–240 ж (П) 200–185 ж/г (П) | – | 150–140 ж (В) | 300–240 ж (В) | 410–365 ж (В) 187 ж (В) 140 ж (В) |
| Кривая | 280–230 ж (П) 300–260 ж (П) | 320 ж (В) | 200 ж (В) 145–140 ж (В) | 300–240 ж (В) | 450–430 ж/г (П) 280–230 ж (П) 160–130 ж (В) |

Примечание. Условные обозначения – см. табл. 1.

Note. Symbols – see Table 1.

температуры гомогенизации 210–200 и 150–140°C в жидкую фазу.

Агрегаты кварца, сформированные в условиях динамической рекристаллизации (микроструктура типа D), содержат единичные первичные включения, гомогенизирующиеся при 430 °C в жидкую фазу, а также несколько видов вторичных включений. В качестве первого вида выделяются вторичные включения, температуры гомогенизации которых совпадают с таковыми первичных включений, обнаруженных в агрегатах микроструктуры типа А (360–340, 300–240°C в жидкую фазу). Второй вид вторичных включений демонстрирует гомогенизацию в жидкую и газовую фазы в широком интервале температур 420–306°C.

Первичные флюидные включения, обнаруженные в кварце микроструктуры типа Е, гомогенизируются в жидкую фазу при 450–430, 280–230°C. В качестве вторичных включений фиксируются высокотемпературные, гомогенизирующие в жидкую и газовую фазы (в микротермометрических исследованиях такие включения часто декриптезировали), а также низкотемпературные включения, гомогенизирующиеся в жидкую фазу.

Состав газовой фазы флюидных включений в кварце жил

Состав газовой фазы флюидных включений жильного кварца демонстрирует незначительную изменчивость (см. табл. 1). По данным рамановской спектроскопии, преобладающими компонентами флюидных включений являются вода и углекислота. В значимых концентрациях отмечаются азот и метан. Характерные КР-спектры соединений представлены на рис. 4. В пределах спектра фиксируются смещения эталонных пиков в низкочастотную область, что свидетельствует о высокой плотности флюидов (Frezzotti et al., 2012). Наблюдаемая КР-линия 2750–3900 см⁻¹ подтверждает наличие во включениях воды (см. рис. 4в). Кроме того, по данным КР-спектроскопии фиксируется присутствие углекислоты в воде с частотой 1381 см⁻¹ (см. рис. 4г) (Frezzotti et al., 2012).

Включения II и III типов из кварца системы Береговая содержат в составе от 0.2 до 3.0 мол. % метана, в то время как для таких включений из кварца жил системы Отвесная характерно до 5 мол. % азота. В водно-углекислотных включениях из кварца системы Кривая, по данным КР-спектроскопии, присутствие метана и азота не обнаружено. Однофазные вторичные включения IV типа всех систем содержат только углекислоту.

Измеренная в ходе микротермометрических исследований температура плавления CO₂ –56.6°C соответствует таковой чистой углекислоты (Редер, Хитаров, 1987). Более низкие температуры плавления (до –60°C) связаны с присутствием во включениях, наряду с углекислотой, метана и азота. Температура частичной гомогенизации (Th, т. е. фазовый переход жидкость + пар → жидкость) колеблется в интервале от –10.0 до 31.0°C, гомогенизация на этом отрезке происходит в жидкую фазу. Самые низкие температуры частичной гомогенизации –10°C, по-видимому, связаны с присутствием во включении значительного количества метана и азота, помимо углекислоты (Кряжев, 2010).

Остальные температуры частичной гомогенизации соответствуют кривой двухфазового равновесия для системы чистой CO₂ и группируются в трех диапазонах: самый малочисленный диапазон – от 2.5 до 7.0°C (плотность 0.88–0.92 г/см³), второй по величине – между +15.0 и +21.0°C (плотность 0.7–0.8 г/см³) и 30.0–31.0°C (плотность 0.6 г/см³). Для крупных углекислотных включений всех жильных систем, имеющих высокие температуры гомогенизации, температура частичной гомогенизации составляет 30.0–31.0°C. В первичных включениях участков Береговая и Кривая частичная гомогенизация зафиксирована в районе 20°C. Включения с низкими температурами частичной гомогенизации характерны для жил систем Отвесная и Кривая.

Хромато-масс-спектрометрическим методом определен состав газовой фазы флюидных включений в кварце (табл. 3). В газовой фазе кварца установлены H₂O, CO₂, серосодержащие соединения (H₂S, CS₂, O₂S, COS, C₂H₆S₂, CH₄S и др.), азот и

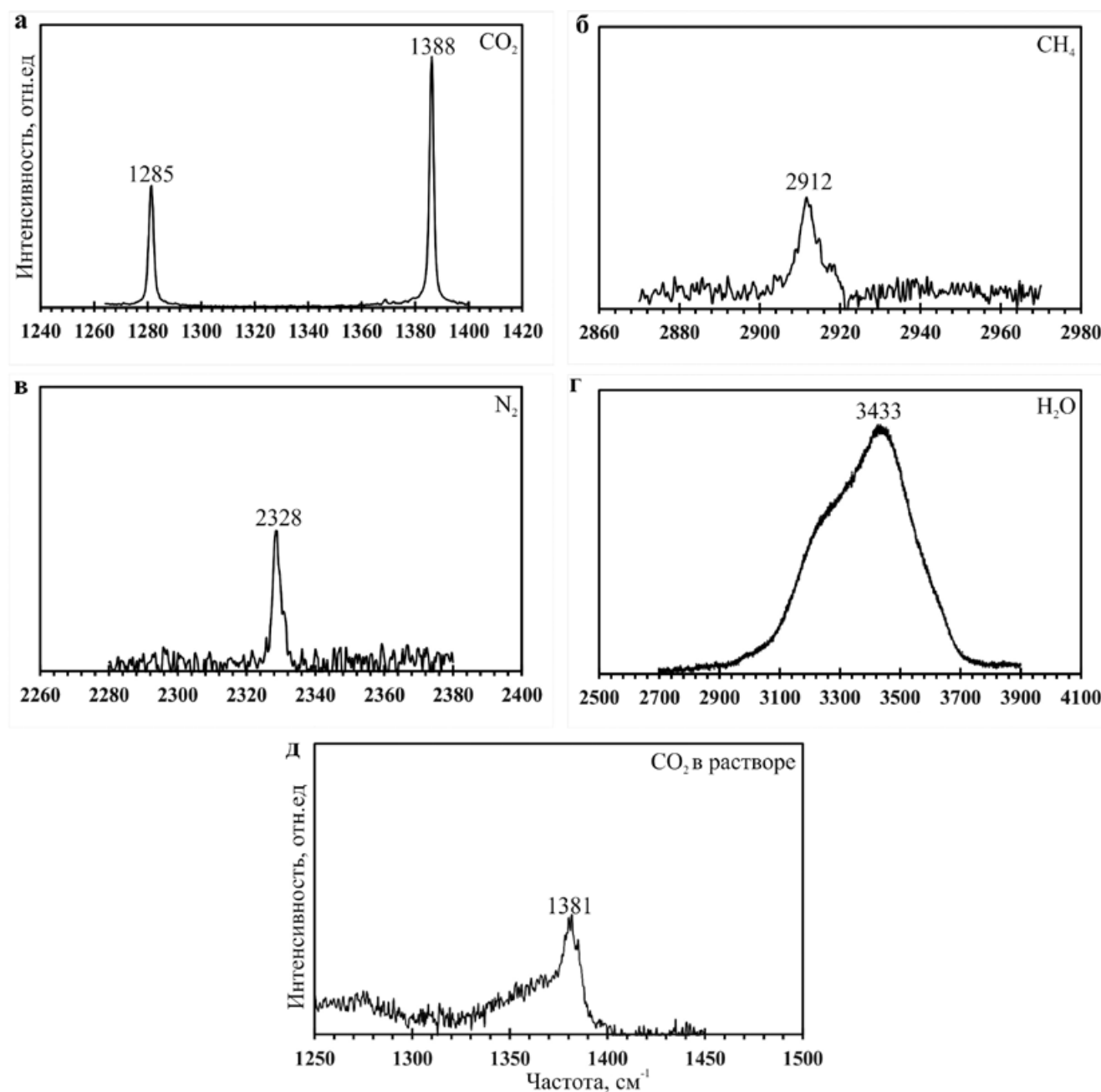


Рис. 4. КР-спектры характерных соединений, входящих в состав флюидных включений жильного кварца исследуемых участков.

а – КР-линии 1285 и 1388 см^{-1} соответствуют углекислоте, б – КР-линия 2912 см^{-1} – метану, в – КР-линия 2328 см^{-1} – азоту, г – КР-линия 3433 см^{-1} – воде, д – КР-линия 1381 см^{-1} – углекислоте в растворе.

Fig. 4. Raman spectra of characteristic compounds included in the fluid inclusions of vein quartz of the studied sites.

а – KR-lines 1285 and 1388 cm^{-1} correspond to carbon dioxide, б – KR-line 2912 cm^{-1} – methane, в – KR-line 2328 cm^{-1} – nitrogen, г – KR-line 3433 cm^{-1} – water, д – KR-line 1381 cm^{-1} – carbon dioxide in solution.

азотсодержащие соединения (H_3N , $\text{C}_2\text{H}_3\text{N}$, $\text{C}_3\text{H}_5\text{N}$, $\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}$, $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}$ и др.), благородный газ Ar, соединение H_3P и обширная группа углеводородов. Последние представлены парафинами, олефинами, аренами, спиртами, эфирами, альдегида-

ми, кетонами, карбоновыми кислотами и фуранами. В общем списке обнаруженных соединений присутствуют от 150 до 200 наименований.

Несмотря на большое разнообразие летучих компонентов, основными в составе флюидных

Таблица 3. Состав выделившихся при механическом вскрытии флюидных включений из жильного кварца (по данным газового хромато-масс-спектрометрического анализа), отн. %

Table 3. Composition fluid inclusions from vein quartz released during mechanical opening (according to gas chromatography-mass spectrometric analysis), rel. %

| Жильная система | Кривая | | | | Отвесная | | | Береговая | | |
|--|--------|-------|------------|------------|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| Тип жилы | I | II | III | IV | I | II | III | I | II | III |
| № образца | K4 | K15 | K 103.21.1 | K 103.21.2 | O33.1 | O32.1 | O34.6 | B72.1.2 | B72.2 | B72.3 |
| <i>Алифатические углеводороды</i> | | | | | | | | | | |
| Парафины | 0.15 | 0.18 | 0.07 | 0.52 | 0.20 | 0.17 | 1.05 | 0.14 | 0.26 | 0.16 |
| Из них метан | 0.00 | — | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.22 | 0.10 |
| Олефины | 0.04 | 0.08 | 0.05 | 0.54 | 0.11 | 0.05 | 0.43 | 0.09 | 0.04 | 0.06 |
| <i>Циклические углеводороды</i> | | | | | | | | | | |
| Арены | 0.01 | 0.26 | 0.03 | 0.33 | 0.19 | 0.02 | 1.11 | 0.02 | 0.06 | 0.06 |
| <i>Кислородосодержащие углеводороды</i> | | | | | | | | | | |
| Спирты | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.99 | 0.24 | 0.06 | 0.21 | 0.38 | 0.04 | 0.14 |
| Эфиры и сложные эфиры | 0.08 | 0.22 | 0.04 | 1.33 | 0.34 | 0.69 | 1.29 | 0.19 | 0.06 | 0.12 |
| Альдегиды | 0.13 | 0.42 | 0.11 | 1.06 | 0.54 | 0.14 | 4.24 | 0.19 | 0.06 | 0.29 |
| Кетоны | 0.09 | 0.20 | 0.07 | 0.67 | 0.35 | 0.10 | 0.99 | 0.12 | 0.06 | 0.09 |
| Карбоновые кислоты | 0.24 | 1.04 | 0.34 | 16.99 | 2.78 | 0.43 | 3.88 | 0.55 | 0.07 | 0.44 |
| <i>Гетероциклические соединения</i> | | | | | | | | | | |
| Фураны | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.07 | 0.01 | 0.01 | 0.09 | 0.03 | 0.00 | 0.00 |
| <i>Азотсодержащие соединения</i> | | | | | | | | | | |
| Сумма | 0.11 | 0.52 | 0.10 | 0.40 | 0.66 | 0.14 | 0.84 | 0.15 | 0.14 | 0.69 |
| Из них азот | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 0.10 | 0.39 | 0.03 | 0.35 | 0.06 | 0.09 | 0.21 |
| <i>Серосодержащие соединения</i> | | | | | | | | | | |
| Сумма | 0.01 | 0.23 | 0.01 | 0.09 | 0.40 | 0.03 | 0.37 | 0.01 | 0.01 | 0.12 |
| <i>Оксиды</i> | | | | | | | | | | |
| CO ₂ | 49.75 | 81.52 | 10.34 | 16.03 | 68.10 | 13.66 | 37.82 | 33.64 | 31.52 | 37.82 |
| H ₂ O | 49.27 | 15.22 | 88.76 | 60.96 | 26.05 | 84.46 | 47.65 | 64.48 | 67.67 | 59.99 |
| CO ₂ (CO ₂ + H ₂ O) | 0.50 | 0.84 | 0.10 | 0.20 | 0.72 | 0.14 | 0.44 | 0.34 | 0.32 | 0.38 |
| <i>Благородные газы</i> | | | | | | | | | | |
| Ar | — | 0.002 | 0.001 | 0.003 | 0.011 | — | 0.009 | 0.001 | 0.001 | 0.003 |
| H ₃ P | — | — | — | — | — | — | — | 0.001 | 0.001 | 0.001 |

Примечание. Типизация кварцевых жил – жильная система Кривая: I – магистральная жила, II – магистральная жила, III – пологая оперяющая жила, IV – крутопадающая оперяющая жила; жильная система Отвесная: I – магистральная жила, II – оперяющая жила, III – оперяющая жила; жильная система Береговая: I – оперяющая жила, II – оперяющая жила, III – магистральная жила. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Typification of quartz veins – vein system Krivaya: I – main vein, II – main vein, III – flat feathering vein, IV – steeply falling feathering vein; Otvesnaya vein system: I – main vein, II – feathering vein, III – feathering vein; Beregovaya vein system: I – feathering vein, II – the feathering vein, III – the main vein. Dash – below the detection limit.

включений являются углекислота и вода, что соответствует данным микротермометрии и КР-спектроскопии (рис. 5г).

Для кварца магистральных жил всех систем характерно от 33 до 50 отн. % углекислоты. В отдельных образцах кварца магистральных жил си-

стем Отвесная и Кривая фиксируется присутствие 70–80 отн. % углекислоты. Особенностью включений кварца оперяющих жил является преобладание водной составляющей (до 80 отн. %).

Во флюидных включениях кварца жил системы Отвесная, наблюдаемой среди субвулканических

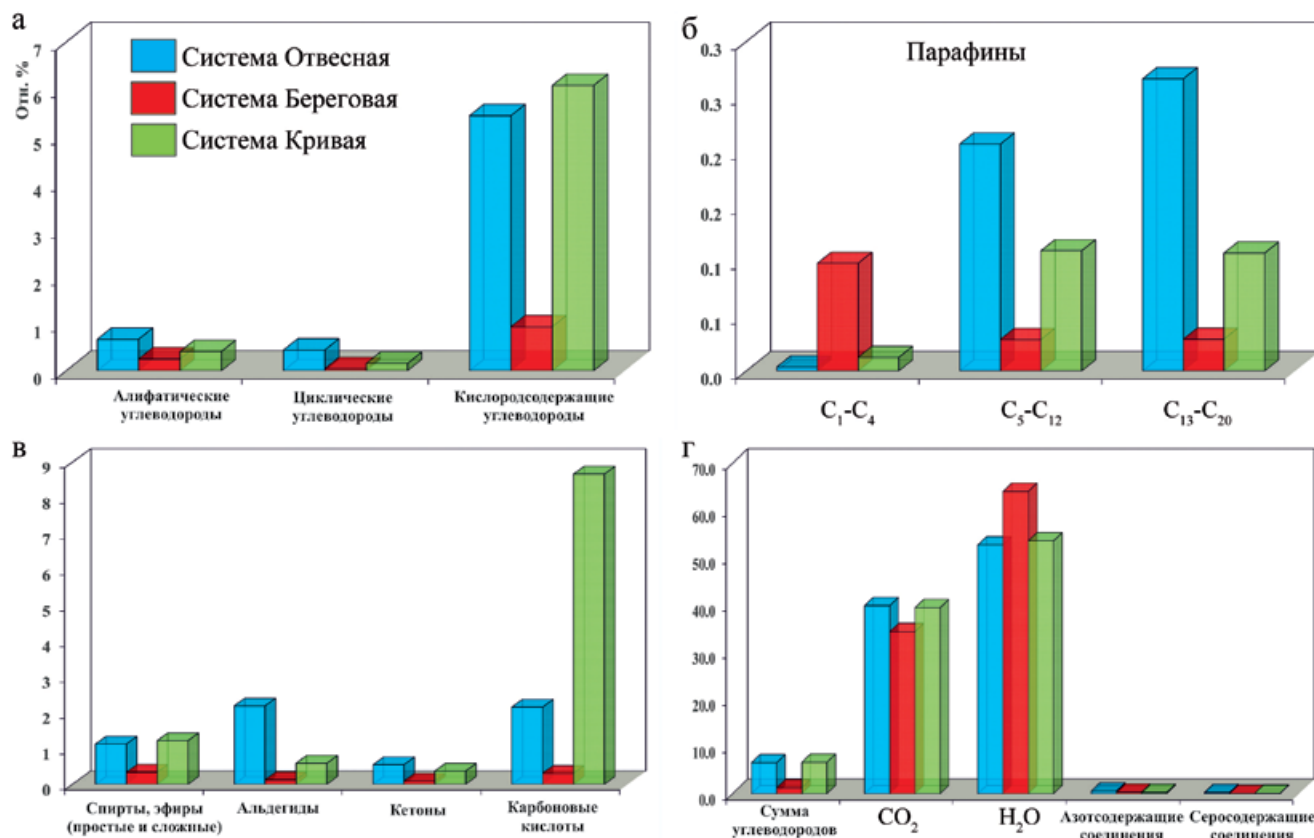


Рис. 5. Относительное содержание летучих из флюидных включений в жильном кварце систем Отвесная (синий цвет), Береговая (красный) и Кривая (зеленый).

а – алифатические, циклические и кислородсодержащие углеводороды; б – “легкие” (C₁–C₄), “средние” (C₅–C₁₂) и “тяжелые” (C₁₃–C₂₀) предельные углеводороды (парафины); в – кислородсодержащие углеводороды (спирты и простые и сложные эфиры, альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты); г – сумма углеводородов, углекислота, вода, азот- и серосодержащие соединения.

Fig. 5. The relative content of volatile fluid inclusions in vein quartz of the Otvesnaya (blue color), Beregovaya (red) and Krivaya (green) systems.

а – aliphatic, cyclic and oxygen-containing hydrocarbons; б – “light” (C₁–C₄), “medium” (C₅–C₁₂) and “heavy” (C₁₃–C₂₀) marginal hydrocarbons (paraffins); в – oxygen-containing hydrocarbons (alcohols and esters, aldehydes, ketones, carboxylic acids); г – the sum of hydrocarbons, carbon dioxide, water, nitrogen- and sulfur-containing compounds.

пород верхнетулуинского комплекса, фиксируются повышенные значения азотсодержащих соединений относительно кварца других систем. При исследовании индивидуальных включений методом КР-спектроскопии были обнаружены включения, содержащие азот. Кроме того, отмечаются значительные концентрации кислородсодержащих углеводородов (см. рис. 5а, в).

Для кварца жил системы Береговая, где боковыми породами являются терригенные отложения аматканской свиты, характерны повышенные, относительно таковых остальных жил, содержания метана (CH₄), что определяет преобладание “легких” парафинов (CH₄–C₄H₁₀) над “средними” и “тяжелыми” (C₅H₁₂–C₁₇H₃₆) (см. рис. 5б). Кроме того, в составе включений из кварца жил системы Берего-

вая обнаружены незначительные количества фосфата водорода (H₃P).

Для жил из системы Кривая, секущих граниты, характерны незначительные количества углеводородов и азотсодержащих соединений. Для оперяющих жил фиксируются повышенные содержания карбоновых кислот, как и для жил системы Отвесная (см. рис. 5в).

Давление во флюидной системе

В кварце исследуемых жильных систем захвачен флюид, минимальные оценки давления которого варьируют от 2.9 до 0.7 кбар. На основе показателей температуры гомогенизации углекислоты среди изученных включений III типа определя-

ются три интервала плотности: 0.88–0.92, 0.7–0.8, 0.3–0.6 г/см³, что свидетельствует о смене давления во флюидной системе (см. табл. 1).

Включения с высокой плотностью, фиксируемые в жилах систем Кривая и Отвесная, характеризуются давлением от 2.9 до 2.5 кбар, соответствующим пиковым значениями метаморфизма в области зеленосланцевой фации (Турченко, 2019). Флюидное давление включений, плотность которых определяется в интервале 0.7–0.8 г/см³, составило 1.9–0.7 кбар. Включения с низкой плотностью 0.3–0.6 г/см³ углекислоты демонстрируют расчетное давление 1.6–0.8 кбар.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ флюидных включений в кварце трех жильных систем зоны сочленения Байкало-Муйской и Баргузино-Витимской структурно-формационных зон показал, что в гидротермальной системе присутствовали водно-углекислотные флюиды хлоридного калий-натриевого состава низкой и средней солености (2–15 мас. % NaCl экв.). Отношение CO₂/(CO₂ + H₂O) во включениях варьирует от 0.10 до 0.84.

Отличительной особенностью жил систем Отвесная и Береговая является содержание летучих газов N₂ и CH₄ (до 5 и до 3 мол. % соответственно), что может указывать на различные источники флюида, задействованного при образовании кварца этих двух систем. Однако существуют представления, что азот и метан могут появляться в гидротермальной системе при разрушении вмещающих пород (Наумов и др., 2012). Присутствие азота во включениях в кварце жил, локализованных в вулканических породах участка Отвесный, можно связать с разрушением аммонийсодержащих силикатов, где азот в форме [NH₄]⁺ изоморфно замещает калий (Bottrell, Miller, 1990). Примесь метана, зафиксированная исключительно во включениях кварца жил системы Береговая, локализованных среди метаосадочных пород, может свидетельствовать в пользу органического происхождения метана, который обогащает флюид при метаморфизме (Наумов и др., 2012). Учитывая островодужную обстановку формирования СФК БМСЗ, можно предполагать обогащение флюидов сингенетических гидротермальных систем метаном и азотом за счет термокаталитического синтеза органического вещества субдуцированных морских осадков (Welhan, 1988; Giggenbach, 1997).

По данным Г.Б. Наумова с соавторами (2012), образование высокоплотного водно-углекислотного флюида связано с процессами дегидратации и декарбонатизации при внедрении горячего магматического тела и последующем метаморфизме в ходе тектономагматической активизации. Анализ температур гомогенизации и солености (темпера-

тур плавления льда) первичных включений на трех изученных участках свидетельствует о выдержанном по составу среднетемпературном флюиде, что может указывать на его метаморфогенно-гидротермальный генезис.

В кварце магистральных жил присутствуют более крупные флюидные включения с высоким содержанием углекислоты относительно включений кварца опережающих жил. Считается, что магистральные трещины имеют большую проницаемость для тепло- и массопереноса в отличие от трещин, сформированных между поверхностями сдвига (Сох, 2002; Sibson, 2019), что и обуславливает особенности состава и морфологии флюидных включений в жильной системе.

P-T параметры флюидных включений в агрегатах жильного кварца разного типа демонстрируют смену флюидной активности в пределах деформационного ряда от субблоковых микроструктур (тип В) к более поздним структурам перекристаллизации (тип Е) (рис. 6). Кварц субблоковой микроструктуры обнаружен в жилах систем Отвесная и Кривая, где, по данным термобарометрии, его минимальная температура образования составляет 320°C при минимальном значении флюидного давления 2.5–2.9 кбар. Кварц с полосами деформации и непрерывными дофинейскими двойниками (типы С и А) имеет близкие параметры включений. Его образование проходило в интервалах температур 370–340, 300–230 и 200–180°C в условиях флюидного давления от 1.9 до 0.7 кбар.

Вторичные включения, захваченные в зернах кварца с зародышами рекристаллизации (тип D), высокотемпературные, при этом расчетные параметры давления флюида показывают, что оно может составлять 0.7–1.5 кбар. Такая смена давления в минералообразующей системе на фоне повышения температуры может реализоваться в условиях динамической рекристаллизации.

Крупные зерна, формирующие кварц микроструктуры типа Е, содержат вторичные углекислотные и водные включения высокой плотности. Судя по сохранившимся первичным включениям, образование таких зерен происходило при минимальных температурах 430–450°C при давлении флюида 1.9–1.5 кбар.

Таким образом, анализ параметров захваченных включений в комплексе с динамическими преобразованиями минерала-хозяина свидетельствует в пользу эволюции единой флюидной системы в пределах изученных жильных систем. Исследуемые кварцевые жилы формировались на разных этапах и сложены агрегатами трех генераций (табл. 4).

Первый этап связан с началом становления надвиговой системы в результате субширотного сжатия на фоне тектономагматической активизации при развитии Палеоазиатского океана в раннем палеозое (Гордиенко и др., 2019). В это время в усло-

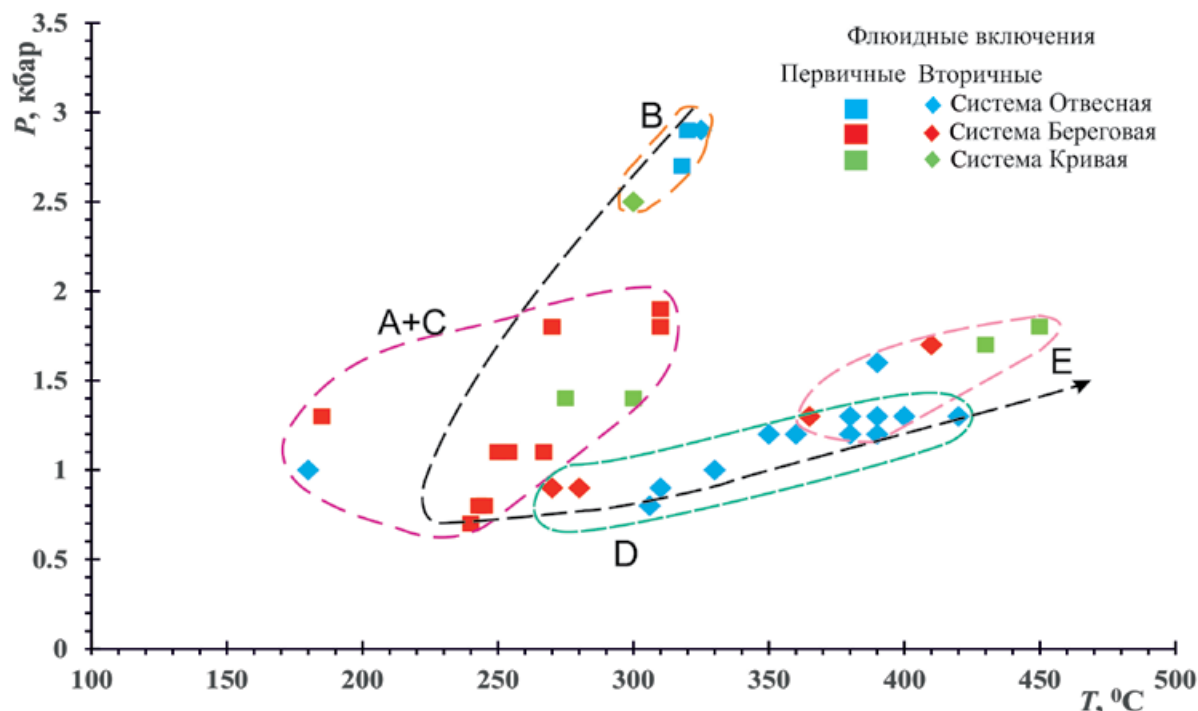


Рис. 6. Эволюция единой флюидной системы.

Буквами обозначены типы микроструктуры (Lychagin et al., 2020), стрелкой показана смена параметров флюида, захваченного в агрегатах кварца.

Fig. 6. Evolution of a single fluid system.

The letters indicate the types of microstructure of the software (Lychagin et al., 2020). The arrow indicates a change in the parameters of the fluid captured in quartz aggregates.

виях повышенного давления ($P > 2.5$ кбар) из высокоплотного диффузионно-мигрирующего флюида, отделившегося при дегидратации и декарбонатизации в ходе метаморфического процесса, кристаллизовался кварц I генерации. Для него характерны повышенные содержания парафинов, олефинов и кислородсодержащих углеводородов. Включения, содержащие флюид, свойственный для данного этапа, главным образом обнаружены в образцах кварца систем Отвесная и Кривая.

Второй этап формирования жильных систем фиксируется кристаллизацией кварца II генерации при температурах $370\text{--}180^\circ\text{C}$ и давлении $1.9\text{--}0.7$ кбар. Такие включения присутствуют в жилах всех трех систем, что указывает на их одновременное проявление и соотносится с представлениями А.Б. Кирмасова (1997) о синхронном становлении жильных образований региона в результате преломления поля напряжений и раскрытия ранних трещинных систем в условиях СВ-ЮЗ сжатия и сдвига (транспрессии) в среднем палеозое, что привело к разгрузке метаморфогенно-гидротермальных флюидов.

Флюидная активность перехода от II к III этапу устанавливается по сингенетичным крупным трех-

фазовым включениям с жидкими углекислотными и двухфазными водно-углекислотными включениями (до водно-солевых) с высокими минимальными оценками температур захвата и низкой плотностью углекислоты. Для таких включений фиксируются критические для CO_2 температуры частичной гомогенизации ($30\text{--}31^\circ\text{C}$) и существенный разброс температур общей гомогенизации от 300 до 450°C , которая происходит в жидкую и газовую фазы. Возможно, такие включения – результат захвата нового флюида, связанного со становлением Ангара-Витимского батолита в позднепалеозойское время (Гордиенко и др., 2019). Однако есть основания предполагать, что они могли образоваться в результате частичной декрепитации ранних водно-углекислотных флюидных включений, о чем свидетельствуют характер расположенных микротрещин разрыва и наличие упругодеформированной области вокруг последних. Залеченные микротрещины часто хорошо видны благодаря скоплениям субмикроскопических дочерних включений вокруг взорванного. Полагают, что такая упругодеформированная область вокруг взорванных включений возникает вследствие механического искажения кристаллической решетки кварца (Bakker, 2017).

Таблица 4. Параметры гидротермальной системы на различных этапах развития территории

Table 4. Parameters of the hydrothermal system at various stages of development of the territory

| Этап | Первый | Второй | Третий |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------|
| Генерация кварца | I | II | III |
| Тип микроструктуры | B | A, C | D, E |
| Жильная система | Отвесная | ☆ | ☆ |
| | Береговая | — | ☆ |
| | Кривая | ☆ | ☆ |
| Мин. температура захвата, °C | 320 | 370–340 300–230 200–180 | 450–300 |
| Мин. давление флюида, кбар | 2.9–2.5 | 1.9–0.7 | 1.8–0.8 |
| Состав флюида | Водно-углекислотный | Азот-метан-водно-углекислотный | Водно-углекислотный |
| Соленость, мас. % NaCl-экв | 9 | 2–15 | 9–13 |
| Плотность флюида, г/см ³ | 0.90–0.98 | 0.90–1.00 | 0.43–0.80 0.90–1.01 |
| Плотность CO ₂ | 0.92–0.88 | 0.80–0.70 | 0.60 |

В этом случае именно гранитоидный магматизм Ангаро-Витимского батолита мог спровоцировать флюидную разгрузку на фоне декомпрессии, связанной с априфтом глубинных блоков земной коры и перераспределением в них напряжений. Согласно модели А. Баккера с соавторами (Hollister, 1990; Bakker, Jansen, 1994; Bakker 2009, 2017), при подъеме блока литосферы ближе к поверхности происходит резкая смена напряжения и, как следствие, внутреннее избыточное давление жидкости провоцирует гидроразрыв. В результате появившаяся в структуре кварца вода облегчает кристалло-пластическую деформацию агрегатов посредством гидролитического ослабления (Tarantola et al., 2010). Во время подъема блоков деформация кварца сменяется с пластической на хрупкую (Passchier, Trouw, 2005), что провоцирует развитие микротрещин, вдоль которых при восстановлении равновесия системы осуществляется повторный захват гетерогенного флюида в виде углекислотных флюидных включений низкой плотности и углекислотно-водных или водных включений высокой плотности (Alfonsvan den Kerkhof et al., 2014).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зоне сочленения Байкало-Муйской и Баргузино-Витимской СФЗ гидротермальная активность сопряжена с деформационными процессами преобразований структурно-вещественных комплексов и может быть описана тремя динамическими этапами, что зафиксировано в изменчивости параметров флюида.

Этапы метаморфогенно-гидротермальной флюидной активности в термобарометрических пара-

метрах несут информацию о взаимном влиянии тектонических процессов и миграции жидкости. Первая порция высокоплотного метаморфогенного диффузионно-мигрирующего флюида была захвачена в ходе формирования надвиговой системы. Дальнейшая его разгрузка связана с одновременным раскрытием сдвиговых и надвиговых деформаций. Последующий прогрев ранее образованных жильных систем приводит к нарушению стабильного состояния флюидных включений, что провоцирует гидроразрыв, миграцию жидкости из включений в кристаллическую структуру кварца и повторный захват флюидных образований. В связи с этим можно говорить о наличии трех генераций кварца, соответствующих этапам развития территории, что согласуется с предыдущими исследованиями (Lychagin et al., 2020).

На основании исследований выявлено, что сложнопостроенные жильные системы зоны сочленения Байкало-Муйской и Баргузино-Витимской СФЗ, приуроченные к различным вмещающим породам и имеющие разную структурную ориентировку, характеризуются близким составом флюида и единой термодинамической историей.

Благодарности

За ценные советы при интерпретации данных и обсуждении результатов исследований авторы выражают благодарность д-ру геол.-мин. наук Сергею Захаровичу Смирнову, д-ру геол.-мин. наук Сергею Гавриловичу Кряжеву, канд. геол.-мин. наук Екатерине Николаевне Соколовой и младшему научному сотруднику Елене Олеговне Шапаренко. За качественные замечания, направленные на улучшение статьи, авторы благодарны рецензентам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенко А.С. (1977) Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии. *Геология и геофизика*, (8), 16-27.
- Бульбак Т.А., Томиленко А.А., Гибшер Н.А., Сазонов А.М., Шапаренко Е.О., Рябуха М.А., Хоменко М.О., Сильянов С.А., Некрасова Н.А. (2020) Углеродороды во флюидных включениях из самородного золота, пирита и кварца месторождения Советское (Енисейский край, Россия) по данным беспирилизной газовой хромато-масс-спектрометрии. *Геология и геофизика*, **61**(11), 1535-1560. DOI: 10.15372/GiG2020145
- Гордиенко И.В., Бадмацрыенова Р.А., Ланцева В.С., Елбаев А.Л. (2019) Селенгинский рудный район Западного Забайкалья: структурно-минерогенетическое районирование, генетические типы месторождений и геодинамические условия их образования. *Геология рудн. месторождений*, **61**(5), 3-36. DOI: 10.31857/S0016-77706153-36
- Зорин Ю.А., Скляров Е.В., Беличенко В.Г., Мазукабов А.М. (2009) Механизм развития системы островная дуга-задуговой бассейн и геодинамика Саяно-Байкальской складчатой области в позднем рифее-раннем палеозое. *Геология и геофизика*, **50**(3), 209-226.
- Кирмасов А.Б. (1997) Надвиги и компенсационные структурные парагенезы в пределах Келяно-Иркиндинской зоны (восточная часть Байкало-Муйского пояса). *Современные проблемы шарьяжно-надвиговой тектоники* (Отв. ред. Ю.В. Казанцев). Уфа: ИГ УФНЦ РАН, 56-58.
- Клейменов Ю.А., Ивлев А.С., Козлов Ю.П. (2003) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Сер. Муйская. Л. N-50-I. Объяснительная записка. М. (СПб.): ВСЕГЕИ, 143 с.
- Кряжев С.Г. (2010) Современные проблемы теории и практики термобарогеохимии. *Руды и металлы*, (2), 38-45.
- Наумов В.Б. (1982) Возможности определения давления и плотности минералообразующих сред по включениям в минералах. *Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений* (Ред. Н.П. Лаверов). М.: Недра, 85-94.
- Наумов Г.Б., Беркелиев Т.К., Миронова О.Ф. (2012) Метасоматическая природа гидротермальных рудообразующих растворов. *Мінералогічний журнал*, **34**(2), 100-111.
- Рёддер Э., Хитаров Д.Н. (1987) Флюидные включения в минералах. М.: Мир. Т. 1, 360 с.
- Руженцев С.В., Минина О.Р., Некрасов Г.Е., Аристов В.А., Голионко Б.Г., Доронина Н.А., Лыхин Д.А. (2012) Байкало-Витимская складчатая система: строение и геодинамическая эволюция. *Геотектоника*, (2), 3-28.
- Турченко С.И. (2019) Высвобождение серы при метаморфизме пород в земной коре: применение к генезису золоторудных месторождений. *Регион. геология и металлогения*, **77**, 60-66.
- Alfonsvan den Kerkhof A., Kronz A., Simon K. (2014) Deciphering fluid inclusions in high-grade rocks. *Geosc. Front.*, **5**(5), 683-695. DOI: 10.1016/j.gsf.2014.03.005
- Bakker R.J. (2001) Fluids: new software package to handle microthermometric data and to calculate isochores. *Memoria, Faculdade de Ciencias de Porto*, 23-25.
- Bakker R.J. (2009) Re-equilibration of fluid inclusions: Bulk-diffusion. *Lithos*, **112**(3-4), 277-288. DOI: 10.1016/j.lithos.2009.03.006
- Bakker R.J. (2017) Re-equilibration processes in fluid inclusion assemblages. *Minerals*, **7**(7), 117. DOI: 10.3390/min7070117
- Bakker R.J., Jansen J.B.H. (1994) A mechanism for preferential H₂O leakage from fluid inclusions in quartz, based on TEM observations. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **116**(1), 7-20. DOI: 10.1007/BF00310686
- Bons P.D., Elburg M.A., Gomez-Rivas E. (2012) A review of the formation of tectonic veins and their microstructures. *J. Struct. Geol.*, **43**, 33-62. DOI: 10.1016/j.jsg.2012.07.005
- Bottrell S.H., Miller M.F. (1990) The geochemical behaviour of nitrogen compounds during the formation of black shale hosted quartz-vein gold deposits, north Wales. *Appl. Geochem.*, **5**(3), 289-296. DOI: 10.1016/0883-2927(90)90004-O
- Bowers T.S., Helgeson H.C. (1983) Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H₂O-CO₂-NaCl on phase relation in geological systems: Equation of state for H₂O-CO₂-NaCl fluids at high pressure and temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 1247-1275.
- Carter N.L., Kronenberg A.K., Ross J.V., Wilischko D.V. (1990) Control of fluids on deformation of rocks. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **54**(1), 1-13. DOI: 10.1144/GSL.SP.1990.054.01.01
- Chi G., Guha J. (2011) Microstructural analysis of a sub-horizontal gold-quartz vein deposit at Donald, Abitibi greenstone belt, Canada: Implications for hydrodynamic regime and fluid-structural relationship. *Geosc. Front.*, **2**(4), 529-538. DOI: 10.1016/j.gsf.2011.07.004
- Cox S.F. (2002) Fluid flow in mid- to deep crustal shear systems: Experimental constraints, observations on exhumed high fluid flux shear systems, and implications for seismogenic processes. *Earth, Planets and Space*, **54**(11), 1121-1125. DOI: 10.1186/BF03353312
- Cox S.F. (2010) The application of failure mode diagrams for exploring the roles of fluid pressure and stress states in controlling styles of fracture-controlled permeability enhancement in faults and shear zones. *Geofluids*, **10**(1-2), 217-233. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2010.00281.x
- Dubessy J., Poty B., Ramboz C. (1989) Advances in C-O-H-N-S fluid geochemistry based on micro-Raman spectrometric analysis of fluid inclusions. *Europ. J. Mineral.*, **1**(4), 517-534. DOI: 10.1127/ejm/1/4/0517
- Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. (2012) Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *J. Geochem. Explor.*, **112**, 1-20. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.09.009
- Giggenbach W.F. (1997) The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. (Ed. H.L. Barnes). N. Y.: John Wiley and Sons, 737-796.
- Hollister L.S. (1990) Enrichment of CO₂ in fluid inclusions in quartz by removal of H₂O during crystal-plastic deformation. *J. Struct. Geol.*, **12**(7), 895-901. DOI: 10.1016/0191-8141(90)90062-4
- Lychagin D.V., Kungulova E.N., Moskvichev E.N., Tomilenko A.A., Tishin P.A. (2020) Microstructure of vein quartz aggregates as an indicator of their deformation history: An example of vein systems from western trans-

- baikalia (Russia). *Minerals*, **10**(10), 865. DOI: 10.3390/min10100865
- Lyubetskaya T., Ague J.J. (2009) Modeling the magnitudes and directions of regional metamorphic fluid flow in collisional orogens. *J. Petrol.*, **50**(8), 1505-1531. DOI: 10.1093/petrology/egp039
- Micklethwaite S., Ford A., Witt W., Sheldon H.A. (2015) The where and how of faults, fluids and permeability—insights from fault stepovers, scaling properties and gold mineralisation. *Geofluids*, **15**(1-2), 240-251. DOI: 10.1111/gfl.12102
- Muchez P., Slobodnik M., Viaene W.A., Keppens E. (1995) Geochemical constraints on the origin and migration of palaeofluids at the northern margin of the Variscan foreland, southern Belgium. *Sed. Geol.*, **96**(3-4), 191-200. DOI: 10.1016/0037-0738(94)00118-E
- Passchier C.W., Trouw A.J. (2005) Microtectonics. 2nd ed. Berlin: Springer. 366 p.
- Schmatz J., Urai J.L. (2011) 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.*, **33**(4), 468-480. DOI: 10.1016/j.jsg.2010.12.010
- Sibson R.H. (2000) A brittle failure mode plot defining conditions for high-flux flow. *Econ. Geol.*, **95**(1), 41-48. DOI: 10.2113/gsecongeo.95.1.41
- Sibson R.H. (2019) Arterial faults and their role in mineralizing systems. *Geosci. Front.*, **10**(6), 2093-2100. DOI: 10.1016/j.gsf.2019.01.007
- Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S. (2019). Genesis of the Maikhura tungsten-tin skarn deposit, Tajik Tien Shan: Insights from petrology, mineralogy, and fluid inclusion study. *Ore Geol. Rev.*, **104**, 561-588. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.11.024
- Steele-MacInnis M. (2018) Fluid inclusions in the system H₂O–NaCl–CO₂: An algorithm to determine composition, density and isochore. *Chem. Geol.*, **498**, 31-44. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2018.08.022
- Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J. (2012) Short note: HokieFlincs_H₂O–NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O–NaCl. *Comp. Geosci.*, **49**, 334-337. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.01.022
- Tarantola A., Diamond L.W., Stünitz H. (2010) Modification of fluid inclusions in quartz by deviatoric stress I: experimentally induced changes in inclusion shapes and microstructures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **160**(6), 825-843. DOI: 10.1007/s00410-010-0509-z
- Welhan J.A. (1988) Origins of methane in hydrothermal systems. *Chem. Geol.*, **71**(1-3), 183-198. DOI: 10.1016/0009-2541(88)90114-3
- lithos.2009.03.006
- Bakker R.J. (2017) Re-equilibration processes in fluid inclusion assemblages. *Minerals*, **7**(7), 117. DOI: 10.3390/min7070117
- Bakker R.J., Jansen J.B.H. (1994) A mechanism for preferential H₂O leakage from fluid inclusions in quartz, based on TEM observations. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **116**(1), 7-20. DOI: 10.1007/BF00310686
- Bons P.D., Elburg M.A., Gomez-Rivas E. (2012) A review of the formation of tectonic veins and their microstructures. *J. Struct. Geol.*, **43**, 33-62. DOI: 10.1016/j.jsg.2012.07.005
- Borisenko A.C. (1977) Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by cryometry. *Geol. Geofiz.*, **8**, 16-27. (In Russ.)
- Bottrell S.H., Miller M.F. (1990) The geochemical behaviour of nitrogen compounds during the formation of black shale hosted quartz-vein gold deposits, north Wales. *Appl. Geochem.*, **5**(3), 289-296. DOI: 10.1016/0883-2927(90)90004-O
- Bowers T.S., Helgeson H.C. (1983) Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H₂O–CO₂–NaCl on phase relation in geological systems: Equation of state for H₂O–CO₂–NaCl fluids at high pressure and temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 1247-1275.
- Bul'bak T.A., Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Sazonov A.M., Shaparenko E.O., Ryabukha M.A., Khomenko M.O., Sil'yanov S.A., Nekrasova N.A. (2020) Hydrocarbons in fluid inclusions from native gold, pyrite and quartz of the Sovetskoye deposit (Yenisei Ridge, Russia) according to pyrolysis-free gas chromatography-mass spectrometry. *Geol. Geofiz.*, **61**(11), 1535-1560. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG2020145
- Carter N.L., Kronenberg A.K., Ross J.V., Wiltschko D.V. (1990) Control of fluids on deformation of rocks. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **54**(1), 1-13. DOI: 10.1144/GSL.SP.1990.054.01.01
- Chi G., Guha J. (2011) Microstructural analysis of a sub-horizontal gold-quartz vein deposit at Donald, Abitibi greenstone belt, Canada: Implications for hydrodynamic regime and fluid-structural relationship. *Geosci. Front.*, **2**(4), 529-538. DOI: 10.1016/j.gsf.2011.07.004
- Cox S.F. (2002) Fluid flow in mid- to deep crustal shear systems: Experimental constraints, observations on exhumed high fluid flux shear systems, and implications for seismogenic processes. *Earth, Planets and Space*, **54**(11), 1121-1125. DOI: 10.1186/BF03353312
- Cox S.F. (2010) The application of failure mode diagrams for exploring the roles of fluid pressure and stress states in controlling styles of fracture-controlled permeability enhancement in faults and shear zones. *Geofluids*, **10**(1-2), 217-233. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2010.00281.x
- Dubessy J., Poty B., Ramboz C. (1989) Advances in C-O-H-N-S fluid geochemistry based on micro-Raman spectrometric analysis of fluid inclusions. *Europ. J. Mineral.*, **1**(4), 517-534. DOI: 10.1127/ejm/1/4/0517
- Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. (2012) Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *J. Geochem. Explor.*, **112**, 1-20. DOI: 10.1016/j.jgexplo.2011.09.009
- Giggenbach W.F. (1997) The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. (Ed. H.L. Barnes). N. Y., John Wiley and Sons, 737-796.
- Alfonsvan den Kerkhof A., Kronz A., Simon K. (2014) Deciphering fluid inclusions in high-grade rocks. *Geosci. Front.*, **5**(5), 683-695. DOI: 10.1016/j.gsf.2014.03.005
- Bakker R.J. (2001) Fluids: new software package to handle microthermometric data and to calculate isochores. *Memoria, Faculdade de Ciencias de Porto*, 23-25.
- Bakker R.J. (2009) Re-equilibration of fluid inclusions: Bulk-diffusion. *Lithos*, **112**(3-4), 277-288. DOI: 10.1016/j.

REFERENCES

- Gordienko I.V., Badmatsyrenova R.A., Lantseva V.S., Elbaev A.L. (2019) Selenga ore district in Western Transbaikalia: Structural and mineragenetic zoning, genetic types of deposits and geodynamic settings of ore localization. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **61**(5), 3-36. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016-77706153-36
- Hollister L.S. (1990) Enrichment of CO₂ in fluid inclusions in quartz by removal of H₂O during crystal-plastic deformation. *J. Struct. Geol.*, **12**(7), 895-901. DOI: 10.1016/0191-8141(90)90062-4
- Kirmasov A.B. (1997) Thrusts and compensatory structural parageneses within the Kelyan-Irakindinsky zone (eastern part of the Baikal-Mui belt). *Modern problems of sharrige-thrust tectonics*. (Ed. Yu.V. Kazantsev). Ufa, IG UFTs RAN, 56-58. (In Russ.)
- Kleimenov Yu.A., Ivlev A.S., Kozlov Yu.P. (2003) State Geological Map of the Russian Federation scale 1 : 200 000. Muiskaya series. Sheet N-50-I. Explanatory note. Moscow (St.Petersburg), VSEGEI Publ. (In Russ.) 143 p.
- Kryazhev, S.G. (2010) Modern problems of theory and practice of thermobarogeochemistry. *Rudy i Metally*, **2**, 38-45. (In Russ.)
- Lychagin D.V., Kungulova E.N., Moskvichev E.N., Tomilenko A.A., Tishin P.A. (2020) Microstructure of vein quartz aggregates as an indicator of their deformation history: An example of vein systems from western transbaikalia (Russia). *Minerals*, **10**(10), 865. DOI: 10.3390/min10100865
- Lyubetskaya T., Ague J.J. (2009) Modeling the magnitudes and directions of regional metamorphic fluid flow in collisional orogens. *J. Petrol.*, **50**(8), 1505-1531. DOI: 10.1093/petrology/egp039
- Micklethwaite S., Ford A., Witt W., Sheldon H.A. (2015) The where and how of faults, fluids and permeability—insights from fault stepovers, scaling properties and gold mineralisation. *Geofluids*, **15**(1-2), 240-251. DOI: 10.1111/gfl.12102
- Muchez P., Slobodnik M., Viaene W.A., Keppens E. (1995) Geochemical constraints on the origin and migration of palaeofluids at the northern margin of the Variscan foreland, southern Belgium. *Sed. Geol.*, **96**(3-4), 191-200. DOI: 10.1016/0037-0738(94)00118-E
- Naumov G.B., Berkeliev T.K., Mironova O.F. (2012) Metasomatic nature of hydrothermal ore-forming solutions. *Mineralogichnii zhurnal*, **34**(2), 100-111. (In Russ.)
- Naumov V.B. Possibilities of determining the pressure and density of mineral-forming media from inclusions in minerals. The use of thermobarogeochemistry methods in the search and study of ore deposits (Ed. N.P. Laverov). Moscow, Nedra Publ., 85-94. (In Russ.)
- Passchier C.W., Trouw A.J. (2005) Microtectonics. 2nd ed. Berlin: Springer 366 p.
- Roedder E., Khitarov D.N. (1984) Fluid inclusions in minerals. V. 1. Moscow, Mir Publ., 360 p. (In Russ.)
- Ruzhencev S.V., Minina O.R., Nekrasov G.E., Aristov V.A., Golionko B.G., Doronina N.A., Lykhin D.A. (2012) Baikal-Vitim folded system: structure and geodynamic evolution. *Geotektonika*, (2), 3-28. (In Russ.)
- Schmatz J., Urai J.L. (2011) 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.*, **33**(4), 468-480. DOI: 10.1016/j.jsg.2010.12.010
- Sibson R.H. (2000) A brittle failure mode plot defining conditions for high-flux flow. *Econ. Geol.*, **95**(1), 41-48. DOI: 10.2113/gsecongeo.95.1.41
- Sibson R.H. (2019) Arterial faults and their role in mineralizing systems. *Geosci. Front.*, **10**(6), 2093-2100. DOI: 10.1016/j.gsf.2019.01.007
- Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S. (2019). Genesis of the Maikhura tungsten-tin skarn deposit, Tajik Tien Shan: Insights from petrology, mineralogy, and fluid inclusion study. *Ore Geol. Rev.*, **104**, 561-588. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.11.024
- Steele-MacInnis M. (2018) Fluid inclusions in the system H₂O–NaCl–CO₂: An algorithm to determine composition, density and isochore. *Chem. Geol.*, **498**, 31-44. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2018.08.022
- Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J. (2012) Short note: HokieFlincs_H₂O–NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O–NaCl. *Comp. Geosci.*, **49**, 334-337. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.01.022
- Tarantola A., Diamond L.W., Stünitz H. (2010) Modification of fluid inclusions in quartz by deviatoric stress I: experimentally induced changes in inclusion shapes and microstructures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **160**(6), 825-843. DOI: 10.1007/s00410-010-0509-z
- Turchenko S.I. (2019) Sulfur release during rock metamorphism in the Earth's crust: application to the genesis of gold deposits. *Regional'naya Geologiya i Metallogeniya*, **77**, 60-66. (In Russ.)
- Welhan J.A. (1988) Origins of methane in hydrothermal systems. *Chem. Geol.*, **71**(1-3), 183-198. DOI: 10.1016/0009-2541(88)90114-3
- Zorin Yu.A., Sklyarov E.V., Belichenko V.G., Mazukabzov A.M. (2009) The mechanism of development of the island arc–back arc basin system and geodynamics of the Sayano-Baikal folded region in the Late Riphean–Early Paleozoic. *Geol. Geofiz.*, **50**(3), 209-226. (In Russ.)