

УДК 553.065

## Условия образования и источники флюидов месторождений безрудного жильного кварца гидротермально-метаморфогенно-метасоматического и гидротермально-метаморфогенного генезиса (Средний и Южный Урал)\*

М. А. Корекина, А. Н. Савичев

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии  
Уральского отделения Российской академии наук,  
Российская Федерация, 456317, Миасс, тер. Ильменского заповедника

**Для цитирования:** Корекина, М. А., Савичев, А. Н. (2023). Условия образования и источники флюидов месторождений безрудного жильного кварца гидротермально-метаморфогенно-метасоматического и гидротермально-метаморфогенного генезиса (Средний и Южный Урал). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 68 (2), 200–217. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.201>

В работе рассмотрены условия образования кварца гидротермально-метаморфогенно-метасоматического и гидротермально-метаморфогенного генезиса месторождений и проявлений Среднего и Южного Урала на основе изучения флюидных включений методами термобарогеохимии, ионной и газовой хроматографии. Установлено, что изученные кварцевые объекты сформированы в широком интервале температур, на фоне незначительных различий значений давления. Показано, что температуры минералообразования на месторождениях гидротермально-метаморфогенно-метасоматического генезиса варьируют от 440 до 230 °С при давлении 1.2–1.4 кбар. Формирование данных жил происходило с участием K-Mg-Fe-хлоридного флюида с соленостью 1.2–8.7 мас. % NaCl-экв., обедненного Mg и Fe за счет отложения магнезиально-железистых карбонатов. Типоморфной особенностью гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца являются высокие значения бора, связанные с размещением кварцевых жил среди пегматоидов и наличием на кварцево-жильных объектах борсодержащих минеральных включений. Жилы гидротермально-мета-

\* Работа проводилась в рамках выполнения Госзадания 122062100023-5 ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2023

морфогенного генезиса образовались при заполнении системы трещин кварцем с участием существенно К-Na-хлоридного флюида (0.2–15.5 мас. % NaCl-экв.), при температурах гомогенизации 435–335 °С и давлении 1.3–2.3 кбар. В составе флюидных включений гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца сумма «вредных» компонентов (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Cl, B, Na, K, Mg и Li) меньше, чем в гидротермально-метаморфогенном кварце. Изученные кварцевые месторождения и жилы сформированы в интервале температур и давлений не выше стадии зеленых сланцев в течение нескольких последовательных этапов: образование кварцевых жил — в более высокотемпературную гидротермальную стадию, в то время как последующие изменения кварцевых жил происходили под влиянием процессов метаморфизма при понижении температуры. Последующие изменения связаны с появлением трещиноватости, катаклазом и перекристаллизацией кварцевых тел с уменьшением размера зерна.

*Ключевые слова:* кварц, гидротермальные жилы, термобарогеохимия, флюидные включения, метасоматоз, метаморфизм.

## 1. Введение

Уральская кварценосная провинция — одна из крупнейших в России, многочисленные объекты безрудного жильного кварца которой являются источником для получения высокочистого кварцевого сырья (Ryzhkov et al., 2020; Korekina, 2021). Кварцевые месторождения представлены жилами выполнения и замещения, залегающими в амфиболитах, диоритах, кристаллических сланцах, гранитах. Несмотря на многочисленные геологические (Емлин и др., 1988; Кухарь и Огородников, 1990; Белковский, 2013), петрографические (Вертушков и др., 1980; Поленов, 2008) и геохимические (Евстропов и др., 1995; Gotze et al., 2017) исследования, вопросы формирования кварцевых месторождений Урала до сих пор остаются дискуссионными.

Важность понимания P-T-условий образования месторождений кварца обусловлена взаимосвязью минералообразующих факторов с наличием в кварце структурных, минеральных и флюидных включений (ФВ), оказывающих непосредственное влияние на чистоту кварцевого сырья. В связи с этим вопросы изучения термодинамических условий, в частности температурного режима, газового и солевого состава флюидов, являются значимыми для определения промышленных и потенциально перспективных кварцево-жильных объектов Урала.

Традиционным методом определения температурного режима формирования кварца и солевого состава гидротермальных растворов является термометрия флюидных включений (Ермаков и Долгов, 1979; Юсупов и др., 1979; Реддер, 1987; Wilkinson, 2001). В дополнение к результатам термометрии в работе используются методы ионной и газовой хроматографии, позволяющие определять газовый и микроэлементный составы флюидных включений.

Основная цель авторов данного исследования заключается в определении особенностей формирования гидротермально-метаморфогенно-метасоматического и гидротермально-метаморфогенного кварца из кварцевых жил и месторождений Южного и Среднего Урала путем получения информации о температурах минералообразования, солевом, газовом и микроэлементном составах минералообразующих растворов.

## 2. Методы и объекты исследования

Для оценки температур образования кварца, концентраций и состава солей минералообразующих растворов были проанализированы флюидные включения в плоскополированных кварцевых пластинах толщиной 0.2–0.3 мм. Термобарометрические измерения выполнены в термокамере TMS-600 (Linkam) с программным обеспечением LinkSystem 32 DV-NC и оптическим микроскопом Olympus BX-51, оборудование позволяет производить измерения температур фазовых переходов в интервале от –196 до +600 °С (Геологический факультет Южно-Уральского государственного университета, г. Миасс, аналитик Н. К. Никандрова). Точность измерений составляет  $\pm 0.1$  °С в интервале температур от –20 до +80 °С и  $\pm 1$  °С за пределами этого интервала.

Солевой состав растворов во включениях оценивался по температурам эвтектик (Борисенко, 1977). Концентрации солей в растворах рассчитаны по температурам плавления льда (Bodnar and Vityk, 1994).

Изучение водно-углекислотных флюидных включений позволило определить давление и плотность флюидов (Thiery et al., 1994; Brown, 1989). Для включений данного типа замерялись температуры общей и частичной гомогенизации в жидкую фазу. Концентрации солей рассчитывались по температурам плавления газогидрата углекислоты (Darling, 1991).

Газовый и микроэлементный состав флюидов изучен методом ионной и газовой хроматографии на газовом хроматографе «ЦВЕТ-100» и жидкостном хроматографе «Цвет-3006» (ЦНИГРИ, г. Москва, аналитик С. Г. Кряжев) в пробах кварцевой крупки массой 1 г, предварительно очищенных от посторонних примесей по методике, предложенной в работе (Кряжев и др., 2003). Используются следующие сокращения:  $T_{\text{гом}}$  — температура гомогенизации в жидкую фазу;  $T_{\text{эвт}}$  — температура эвтектики;  $T_{\text{пл. льда}}$  — температура плавления льда.

В исследовании рассмотрены жильный кварц из месторождения гидротермально-метаморфогенно-метасоматического генезиса: Кыштымское (жилы № 175 и 179) и Уфимское (жила № 2136) месторождения (Уфалейский гнейсово-амфиболитовый комплекс); жильный кварц гидротермально-метаморфогенного генезиса: жила Толстиха (Больше-Таловский массив), месторождение Гора Хрустальная (Сысертско-Ильменогорский комплекс), а также проявление Песчаное (вблизи Джабык-Карагайского гранитного массива) (рис. 1, а).

В коллекцию для изучения вошли 25 штуфных образцов кварца с Кыштымского месторождения, 13 образцов с Уфимского месторождения, 32 образца с месторождения Гора Хрустальная, 12 образцов с жилы Толстиха и 6 штуфных образцов с кварцевого проявления Песчаное. Все образцы без видимых минералов-примесей, характеризующих типичные текстурно-структурные особенности кварцевых жил.

Изученные в работе кварцево-жильные объекты расположены на территории Челябинской и Свердловской областей и представлены двумя генетическими типами: перекристаллизованным гидротермально-метасоматическим и первичнозернистым гидротермально-метаморфогенным кварцем (Вертушков и др., 1970; Емлин и др., 1988; Козлов, 1988; Поленов, 2008; Огородников и др., 2007). К месторождениям гидротермально-метаморфогенно-метасоматического

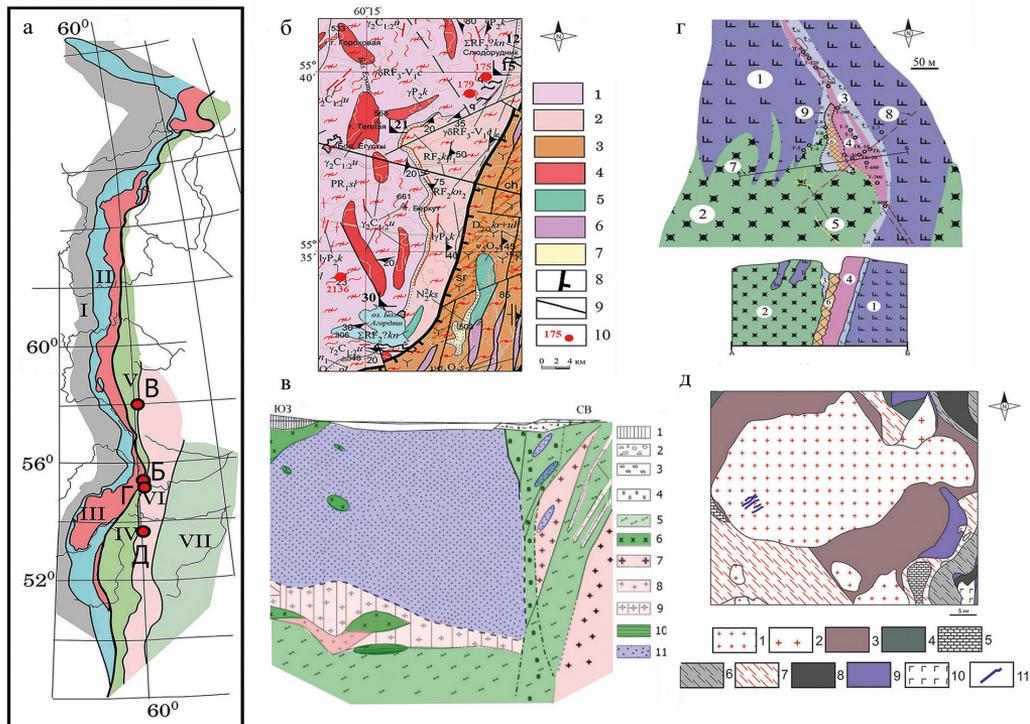


Рис. 1. Геологические схемы и карты объектов изучения. Составлено по: (Захаров и Пучков, 1994) с упрощениями авторов:

а — схема структурно-формационного районирования Урала: I — Предуральский прогиб; II–VII — мегазоны (II — Западно-Уральская, III — Центрально-Уральская, IV — Магнитогорская, V — Тагильская, VI — Восточно-Уральская, VII — Зауральская); проявления и месторождения молочно-белого кварца (б–д); б — месторождения Уфалейского гнейсово-амфиболитового комплекса (Кыштымское, жилы № 175 и 179; Уфимское, жила № 2136) (Кузнецов и др., 2008): 1 — амфиболиты, плагиогнейсы биотитовые и амфиболовые, прослои кварцитов и слюдяно-кварцевых сланцев, гранито-гнейсы, мигматиты; 2 — гранат-слюдяно-кварцевые сланцы, слюдяные кварциты, амфиболиты; 3 — базальты афировые, андезитобазальты и андезиты, дациты, углисто-кремнисто-глинистые сланцы; 4 — граниты биотитовые, дайки гранитов; 5 — граниты двуслюдяные и мусковитовые; 6 — габбро, клинопироксениты; 7 — гарцбургиты, дуниты, ортопироксениты, серпентиниты, тальково-карбонатные породы; 8 — зона Главного Уральского разлома; 9 — разрывные нарушения; 10 — номера кварцевых жил; в — месторождение Гора Хрустальная (Анфилогов и др., 2017): 1 — отвалы карьера; 2 — осыпи; 3 — площадная кора выветривания; 4 — линейная кора выветривания, связанная с тектонической зоной; 5 — амфиболиты; 6 — диориты; 7 — граниты биотитовые; 8 — граниты мусковитовые; 9 — пегматоидные породы; 10 — слюдиты мусковитовые; 11 — кварцевые тела; г — Наиллинское золоторудное месторождение (жила Толстиха) (Грознецкий, 1974; Анфилогов и др., 2012): 1 — ультрабазитовый комплекс: серпентиниты, пироксениты; 2 — габбро-плагиогранитный комплекс: диориты, габбро-диориты, габбро; метасоматические и гидротермальные образования; 3 — тальковые сланцы, тальк-хлоритовые, тальк-карбонатные породы; 4 — кварцевая жила; 5 — золотоносная жила; 6 — золото-сульфидная залежь; 7 — линия разреза; 8 — тектонические нарушения; д — проявление Песчаное (Махиня, 2003): 1 — граниты Джабык-Карагайского комплекса; 2 — плагиограниты; 3 — гранито-гнейсы; 4 — сланцы; 5 — мраморизованные известняки; 6 — черные углеродистые сланцы; 7 — кристаллические сланцы; 8 — слабо метаморфизованные породы; 9 — серпентиниты; 10 — габбро; 11 — изученные проявления молочно-белого кварца (52°59'3.80" с. ш.; 59°52'32.00" в. д.)

типа относятся объекты (Кыштымское — жилы № 179, 175 и Уфимское — жила № 2136), образованные в результате замещения кварцем при силификации карбонатитов, фенитизированных амфиболитов и амфиболовых гнейсов (Огородников и др., 2016). Жилы первичнозернистого гидротермально-метаморфогенного типа сформированы путем отложения кварца в открытых пустотах с наложением на жильную массу более поздних процессов метаморфизма. Примерами месторождений с таким типом кварца являются: месторождение Гора Хрустальная на Среднем Урале; жила Толстиха, залегающая в Больших Таловских горах, сложенных серпентинизированными дунитами, перидотитами и пироксенитами; проявление Песчаное, в котором кварцевые жилы залегают в экзоконтакте Джабык-Карагайского гранитного массива.

### 3. Краткая геологическая характеристика

Жилы *Кыштымского* (№ 175 и 179) и *Уфимского* (№ 2136) месторождений локализируются в юго-западной части Уфалейского метаморфического комплекса в породах уфалейской свиты, представленных плагиоклазовыми амфиболитами с подчиненным количеством слюдяных гнейсов, гранитогнейсов, слюдяно-кварцевых сланцев (рис. 1, б) (Савичев, 2005; Anfilogov et al., 2016).

Кварцевая жила № 175 расположена вблизи пос. Слюдорудник. В настоящее время она является единственным в России сырьевым источником для получения высокочистых кварцевых концентратов для нужд высокотехнологичных отраслей промышленности. Аналогичная по составу жила № 179, расположенная юго-западнее жилы № 175, в настоящее время практически полностью отработана. Кварц изученных жил — гранулированный, светло- и темно-серый, массивной текстуры, разномзернистый, мелко- и среднезернистый, гранулы прозрачные, цементация крепкая. Важно отметить, что по восточному борту карьера жилы № 175 присутствуют кальцитовые карбонатиты, оказывающие влияние на микроэлементный состав кварца. В статье (Кабанова и др., 2017) рассмотрены подробности формирования карбонатитов и их связь с кварцевым телом.

Еще один сырьевой источник для плавки прозрачного кварцевого стекла (на консервации) — жильная зона № 2136. Она представлена серией кулисообразно расположенных кварцевых жил, залегающих в крупном пегматоидном теле линзовидной формы. Простираение зоны до 125 м при мощности до 40 м. На глубину она прослежена до 45 м. Кварц от светло- до темно-серого цвета, гранулированный, массивный, тонкозернистый, гранулы прозрачные, цементация крепкая.

*Месторождение Гора Хрустальная* расположено в юго-восточной части Верх-Исетского гранитного батолита среди изверженных пород различного состава и метаморфизованных вулканогенно-осадочных пород силура (рис. 1, в) (Бушляков и Соболев, 1976; Anfilogov и др., 2017; Nicandrova et al., 2014). Месторождение эксплуатируется. В настоящее время выпускаются обогащенные фракционированные кварцевые материалы, кварцевая мука и щебень. Кварцевое тело имеет каплевидную форму с направлением тупого конца на север. Простираение до 500 м при мощности до 210 м. Глубина залегания варьирует от 100 до 180 м. Кварц молочно-белый с участками светло-серого, серого и дымчато-серого цветов, текстура преимущественно шестоватая. Жильное тело участками интенсивно разлистованное.

Кварц месторождения отличается непостоянством состава и качественных характеристик, в связи с чем используется в металлургии, строительстве и других отраслях промышленности (Глаголев, 2006).

*Наилинское кварц-золоторудное месторождение*, в состав которого входит жила Толстиха, расположено в пределах Миасского золоторудного района. Рудные (Au) и безрудные кварцевые жилы залегают на контакте массива габбро с крупным массивом Больших Таловских гор, среди дунитов, перидотитов и пироксенитов (рис. 1, г) (Анфилогов и др., 2012). Вмещающие породы интенсивно окварцованы, хлоритизированы и серицитизированы. Простирающие жилы — до 1000 м при мощности до 50 м. На глубину она прослежена до 450 м. В средней части жилы залегает золото-сульфидная залежь размером 20×16 м, прослеженная до глубины 200–250 м и отработанная до глубины 50 м карьером и подземными горными выработками. Кварц молочно-белый, массивный, шестоватой текстуры трещиноватый с развитой по трещинам минерализацией гидроокислов железа.

*Проявление молочно-белого кварца Песчаное* расположено в экзоконтакте Джабык-Карагайского гранитного комплекса, в 5 км от пос. Песчаное. Проявление представлено пятью параллельно расположенными кварцевыми жилами, залегающими среди деформированных лейкоратовых гранитов (Кабанова и др., 2019) (рис. 1, д). Контакт кварцевых жил с гранитами резкий. Видимая мощность жил варьирует от 0.5 до 2.5 м при максимальной протяженности до 500 м. Кварц молочно-белый, массивный, текстура шестоватая с участками друзовой, трещиноватый. В приконтактовой части кварцевых жил наблюдаются интенсивное развитие гидроокислов железа.

#### 4. Результаты исследований

Анализ флюидных включений в кварце был проведен на основе критериев, рассмотренных в работе (Реддер, 1987). В изученных кварцевых образцах установлены четыре типа флюидных включений: 1) первичные двухфазовые (водно-солевые); 2) первичные трехфазовые (водно-углекислотные); 3) первично-вторичные двухфазовые (водно-солевые); 4) вторичные двухфазовые (водно-солевые) (рис. 2). Двухфазовые водно-солевые включения представлены фазами: жидкий раствор + газ. Трехфазовые (водно-углекислотные) — жидкий раствор + газ + жидкая углекислота.

Первичные включения единичные, отдельные и располагаются в зернах кварца бессистемно. Их образование связано с зонами микродефектов и происходит одновременно с формированием кварцевых тел. Первично-вторичные и вторичные включения образуют поля, линейные участки, плоскости. Первично-вторичные включения возникают, так же как и первичные, во время кристаллизации кварцевого тела в зонах микродефектов и за счет первичных включений при их перераспределении в данных зонах. Вторичные включения расположены в межзерновом пространстве, по трещинам и в отличие от первично-вторичных включений пересекают границы минеральных зерен.

В основу термометрической характеристики изучаемых объектов положены генетические условия их формирования.

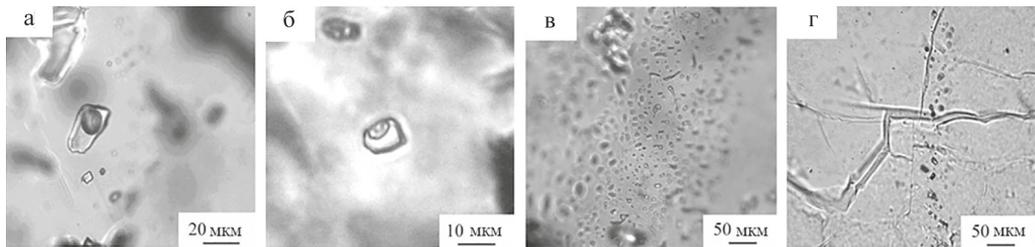


Рис. 2. Основные типы флюидных включений в кварце:

а — единичное первичное двухфазовое включение (жидкий раствор + газ) (жила Толстиха); б — первичное трехфазовое включение (жидкий раствор + газ + жидкая углекислота) (месторождение Гора Хрустальная); в — первично-вторичные включения, внутри одного зерна (жила № 179); г — вторичные включения, пересекающие границу зерен (жила № 175)

#### 4.1. Термометрическая характеристика гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца

Результаты термометрических исследований приведены в табл. 1.

**Кыштымское месторождение.** В кварце жилы № 179 установлены двухфазовые и трехфазовые первичные включения и двухфазовые вторичные включения. Единичные первичные включения (5–12 мкм) расположены хаотично в объеме образца. Форма первичных включений — круглая, овальная, в виде «отрицательного кристалла». Вторичные (2–5 мкм) — приурочены к межзерновому пространству и трещинам, образуют вытянутые цепочки и поля. Газовая фаза включений не превышает 15–20 % их объема. Температуры гомогенизации включений в жидкую фазу составляют: первичные двухфазовые включения — 296–274 °С; первичные трехфазовые включения — 279–228 °С (табл. 2); вторичные двухфазовые включения — 264–155 °С. Состав растворов в первичных и вторичных включениях близок и по температурам эвтектики соответствует NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O водно-солевой системе. Концентрации солей в двух- и трехфазных первичных включениях варьируют в пределах от 0.2 до 8.7 мас. % NaCl-экв.

**Жила № 175.** В кварце присутствуют первичные двухфазовые включения размером 5–15 мкм, имеющие форму «отрицательного кристалла» и вторичные двухфазовые округлые, овальные включения размером 2–5 мкм. Температуры гомогенизации (в жидкость) первичных включений — 349–278 °С, вторичных — 265–159 °С. Объем газового пузырька варьирует от 20 до 50–60 об. % включения. Температуры эвтектики растворов в первичных и вторичных включениях указывают на присутствии хлоридов К, Fe и Mg. Концентрации солей в первичных включениях — 0.2–8.7 мас. % NaCl-экв., в то время как во вторичных включениях концентрации солей равны 0.2–1.9 мас. % NaCl-экв.

**Уфимское месторождение.** В кварце жилы № 2136 проанализированы двухфазовые первичные ФВ размером 5–20 мкм (реже до 60 мкм) и двухфазовые вторичные ФВ размером 5–7 мкм. Первичные включения — удлиненные, в форме «отрицательного кристалла», вторичные включения — овальные, округлые. В кварце присутствуют двухфазовые вторичные расшнурованные включения. Размеры газовых пузырьков в первичных и вторичных включениях составляют от 20 до 50 об. %. Температуры гомогенизации первичных включений равны 365–270 °С,

Таблица 1. Результаты исследований флюидных включений в кварце

Месторождение	№ жилы	Генерация включения	<i>n</i>	$T_{\text{ГОМ}}$ , °С	$T_{\text{ЭВТ}}$ , °С	$T_{\text{пл. льда}}$ , °С	Соленость, мас. % NaCl-экв.
Гидротермально-метаморфогенно-метасоматический кварц							
Кыштымское	179	П	22	274–296	–23.4...–24.7	–0.7...–3.1	1.2–5.1
		В	31	155–264	–23.3...–24.1	–1.1...–2.9	1.9–4.8
	175	П	6	278–349	–29.6...–42.8	–0.1...–5.6	0.2–8.7
		В	6	159–265	–31.0...–33.0	–0.1...–1.1	0.2–1.9
Уфимское	2136	П	12	270–365	–27.8...–36.0	–0.3...–5.4	0.5–8.4
		В	172	159–262	–33.0...–40.8	–3.8...–4.5	6.2–7.2
Первичнозернистый гидротермально-метаморфогенный							
Гора Хрустальная		П	15	271–371	–22.9...–26.5	–0.9...–6	1.6–9.2
		ПВ	74	179–266	–22.8...–25.7	–0.5...–6.7	0.9–10.1
Толстиха		П	20	270–369	–21.3...–23.7	–0.7...–5.3	1.2–8.3
		ПВ	34	159–251	–22.3...–24.5	–2.0...–9.8	3.4–13.7
Песчаное		П	35	277–356	–23.7...–29.0	–0.1...–5.1	0.2–8.0
		ПВ	76	189–265	–23.4...–27.6	–0.1...–6	0.2–9.2

Примечание. Флюидные включения: П — первичные; ПВ — первично-вторичные; В — вторичные; *n* — количество замеров.

Таблица 2. Содержания элементов (г/т) по данным ионно-газовой хроматографии

Месторождение	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Cl	B	Na	K	Mg	Li	CO <sub>2</sub> / (CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O)	CO <sub>2</sub> / CH <sub>4</sub>
Гидротермально-метаморфогенно-метасоматический кварц											
Кыштымское, № 179	426	6.2	0.1	<0.5	400.2	0.34	0.17	0	5.4	0.014	62
Гидротермально-метаморфогенный											
Жила Толстиха	1415	20.6	0.3	<0.5	311.3	1.6	0.59	0.36	3.5	0.014	68.7
	2426	29.5	0.4	<0.5	631.2	0.76	0.19	0.27	5.7	0.012	73.8

вторичных — 262–159 °С. В первичных включениях  $T_{\text{ЭВТ}}$  варьируют от –27.8 до –36 °С при солености 0.5–8.4 мас. % NaCl-экв. ( $T_{\text{пл. льда}}$  — от –0.3 до –5.4 °С), во вторичных включениях  $T_{\text{ЭВТ}}$  — от –33 до –40.8 °С при более узком интервале солености — 6.2–7.2 мас. % NaCl-экв. ( $T_{\text{пл. льда}}$  — от –3.8 до –4.5 °С). По данным  $T_{\text{ЭВТ}}$  в составе первичных и вторичных включений определены хлориды К, Mg и Fe.

## **4.2. Термометрическая характеристика гидротермально-метаморфогенного кварца**

**Месторождение Гора Хрустальная.** В кварце фиксируются расположенные одиночно первичные двухфазовые и трехфазовые включения размером 7–10 мкм и двухфазовые первично-вторичные включения (5–10 мкм), образующие густонасыщенные ленточные скопления и узкие пересекающиеся цепочки. Температуры гомогенизации первичных двухфазовых включений составили 371–271 °С, первичных трехфазовых ФВ — 271–221 °С, первично-вторичных двухфазовых включений — 266–179 °С. Температуры эвтектики первичных двухфазовых ФВ варьируют от –22.9 до –26.5 °С, первичных трехфазовых — от –22.9 до –26.5 °С, в то время как в первично-вторичных включениях значения  $T_{эвт}$  варьируют в пределах от –22.8 до –25.7 °С. Температуры эвтектики первичных и первично-вторичных включений свидетельствуют о присутствии в растворах хлоридов К и Na и солености от 1.6 до 10.1 мас. % NaCl-экв.

**Жила Толстиха.** В кварце наблюдаются первичные двухфазовые ромбовидной (с элементами кристаллографических граней), трапециевидной, вытянутой формы, в виде «отрицательного кристалла» и первично-вторичные двухфазовые округлые, овальные, вытянутые ФВ. Размер первичных включений варьирует от 5 до 15 мкм, первично-вторичных — от 3 до 5 мкм. Доля газовой фазы в первичных и первично-вторичных включениях не превышает 40 об. %. Температуры гомогенизации первичных включений составляют 369–270 °С; первично-вторичных включений — 251–159 °С. По близким значениям температуры эвтектики в растворах первичных и первично-вторичных включений предполагается наличие NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O солевой системы с широким интервалом значений концентрации солей 1.2–13.7 мас. % NaCl-экв.

**Проявление Песчаное.** В кварце зафиксированы единичные обособленные (10–30 мкм) первичные двух- и трехфазовые и первично-вторичные двухфазовые включения (до 7 мкм). Газовая вакуоль во всех включениях занимает 30–60 об. %. Форма первичных включений близка «отрицательному кристаллу», треугольная, ромбовидная, удлинённая. Форма первично-вторичных ФВ, образующих ленточные скопления, округлая овальная. Температуры гомогенизации двухфазовых первичных включений составили 356–277 °С, трехфазовых первичных ФВ — 312–226 °С. Температуры гомогенизации первично-вторичных включений — 265–189 °С. Температуры эвтектики близки для первичных и первично-вторичных включений и составляют от –23.4 до –29 °С, что соответствует хлоридному флюиду, содержащему ионы К и Na.

## **4.3. Газовый и микроэлементный состав флюидных включений**

Количество и состав газов и элементов-примесей в газовой фазе включений в кварце разных типов по данным ионной и газовой хроматографии приведены в табл. 2. Основная роль среди растворенных в воде газов принадлежит углекислому газу, в меньшей степени — метану. При сопоставлении составов растворов ФВ по суммарному содержанию H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Cl, B, Na, K, Mg и Li видно, что в гидротермально-метаморфогенно-метасоматическом кварце данное значение (832 г/т) меньше по сравнению с гидротермально-метаморфогенным кварцем

(1747–3085 г/т), в то же время отношение  $H_2O/CO_2$  приблизительно одинаково — 68 и 68–82 соответственно. Последнее позволяет предположить близкий водно-углеродный газовый состав гидротермальных растворов. Отношение В к остальной газовой фазе ( $H_2O + CO_2 + CH_4 + Cl$ ) указывает на существенное участие бора в гидротермальных растворах при формировании гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца (0.92) по сравнению с гидротермально-метаморфогенным кварцем (0.21–0.25). Это связано с присутствием на кварцево-жильных объектах гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца борсодержащих минералов и, в частности, турмалина.

Среди микрокомпонентов преобладают Na (0.16–1.6 г/т) и Li (2.9–5.7 г/т), в подчиненном количестве установлены K (0.07–0.59) и Mg (0.11–0.25 г/т). Следует отметить, что Mg диагностируется только в кварце жилы Толстиха.

По результатам ионной и газовой хроматографии в гидротермально-метасоматическом кварце присутствуют Li и K. Наличие во флюиде Li и K обусловлено существенно щелочным характером гидротермальных растворов, индикаторами которых являются эти элементы (Исаев, 2006). Вариации значений в соотношении  $CO_2/CH_4$  в кварце разных формационных типов свидетельствуют об отличиях в окислительно-восстановительных характеристиках флюида (Klein et al., 2006; Пальмова и др., 1978).

## 5. Обсуждение результатов

Температуры минералообразования кварца двух генетических типов, рассчитанные с учетом поправки на давление, близки и варьируют в интервале от 440 до 208 °С. Гистограммы температур гомогенизации и солёности флюидных включений (рис. 3) также показывают широкий диапазон значений и многомодальный характер показателей термометрии для разных типов кварца.

В гистограмме температур гомогенизации газовой-жидких включений (рис. 3, а) в гидротермально-метаморфогенно-метасоматическом кварце смешаны как минимум три типа распределений, а гистограмма имеет мультимодальный вид. Однозначно выделяются следующие частные распределения:

— с максимумом в интервале  $T_{гом}$  от 300 до 320 °С и увязываются с интервалами температур высокотемпературных гидротерм (300–380 °С);

— с максимумом в интервале  $T_{гом}$  от 240 до 260 °С и плато в интервале  $T_{гом}$  от 140 до 280 °С и увязываются с интервалами температур среднетемпературных гидротерм (140–300 °С).

Этими типами распределений  $T_{гом}$  можно более широко трактовать значения зафиксированных нами показателей  $T_{гом}$  первичных и вторичных флюидных включений.

Для гидротермально-метаморфогенного кварца характерно положительное смешанное распределение, указывающее на преобладание в выборке значений  $T_{гом}$  с максимумом в интервале температур от 160 до 180 °С, от 200 до 220 °С и от 260 до 280 °С. Большая часть гистограммы этого типа кварца относится к интервалу характерному для среднетемпературных гидротерм (140–300 °С). Наличие температурных максимумов внутри интервала можно охарактеризовать как проявление нескольких этапов образования первичных, первично-вторичных и вторичных включений, связанных с несколькими этапами гидротермальной деятельности, но-

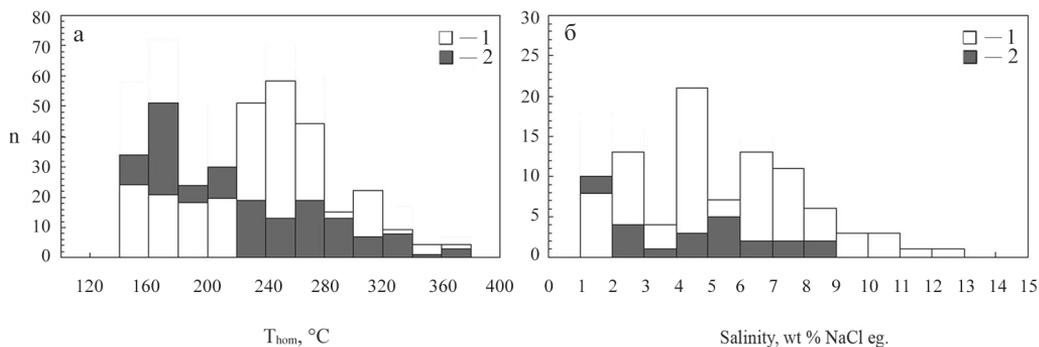


Рис. 3. Гистограмма температур гомогенизации (а) и солёности (б) флюидных включений:

1 — гидротермально-метасоматический перекристаллизованный кварц; 2 — гидротермально-метаморфогенный первичнозернистый кварц

ящей, скорее всего, ретроградный характер. Наличие разных типов ФВ указывает на то, что изменения кварцевых жил, происходившие в процессе метаморфизма, привели к деформации кварцевых тел и появлению системы разветвленных трещин.

На гистограмме, изображенной на рис. 3, б, максимальное значение солёности для гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца — в интервале от 4 до 5 мас. % NaCl-экв., для гидротермально-метаморфогенного кварца — от 1 до 2 мас. % NaCl-экв.

Кварц разных формационных типов различается по корреляционной зависимости между температурами гомогенизации и солёностью. Коэффициент корреляции для гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца составляет 0.21, для гидротермально-метаморфогенного — 0.95. Последнее значение говорит о сильной корреляционной связи между температурой гомогенизации и солёностью гидротермальных растворов — чем выше температура гомогенизации, тем более солёными были кварцеобразующие гидротермальные растворы, формирующие этот тип кварца.

Изучение водно-углекислотных флюидных включений позволило определить давление и плотность флюидов (Thiery et al., 1994; Brown, 1989). Их значения приведены в табл. 3.

Расчетное значение давления для всех типов кварца соответствует фации зеленых сланцев. Однако температуры гомогенизации, лежащие в основе расчета, позволяют сделать некоторые предварительные выводы:

— для гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца (жила № 179) определенный интервал давления в газовой-жидких включениях составил 1.2–1.4 кбар, для гидротермально-метаморфогенного кварца горы Хрустальной — 1.3–1.5 кбар. Эти значения давлений и в том, и в другом случае связаны со средне-температурным интервалом минералообразования. Образование вторичных ФВ включений связано с залечиванием трещин, сформированным во время метаморфизма кварцевых жил на уровне фации зеленых сланцев;

— гидротермально-метаморфогенный кварц проявления Песчаное характеризуется давлением 1.7–2.3 кбар. Флюидные включения сформированы на границе

Таблица 3. Значения давления и плотности, определенные по водно-углекислотным включениям

Месторождение	<i>n</i>	$T_{\text{гом}}$ , °С	$T_{\text{пл CO}_2}$ , °С	$T_{\text{част. гом}}$ , °С	Соленость, мас. % NaCl	Плотность	Давление, кбар
Кыштымское, жила № 179	4	228–279	56.8–56.9	29–31	2.63–5.76	0.88	1.2–1.4
Гора Хрустальная	20	221–271	56.7–56.9	24–31	3.02–15.50	0.88–0.93	1.3–1.5
Песчаное	4	226–312	56.8–56.9	25.5–31	3.77–5.76	0.88	1.7–2.3

*Примечание.* Количество замеров в таблице обозначено *n*.

средне-высокотемпературного интервала гидротермального минералообразования. Для этого типа кварца можно сделать вывод о его первичном формировании в гидротермальную стадию в интервале температур и давлений, соответствующих зеленосланцевой фации метаморфизма.

## 6. Заключение

1. Показано, что изученные кварцевые объекты отражают процессы кварцеобразования, которые охватывают широкий интервал значений температур минералообразования, на фоне незначительных различий значений давления: с учетом поправки на давление температуры кварцеобразования на месторождениях гидротермально-метаморфогенно-метасоматического генезиса варьируют от 230 до 440 °С, при давлении 1.2–1.4 кбар; для жил гидротермально-метаморфогенного генезиса характерные температуры гомогенизации — 435–335 °С и давление — 1.3–2.3 кбар.

2. Определенные с помощью флюидных включений параметры температур и давлений в разных типах кварца соответствуют уровню фации зеленых сланцев. Это находит отражение в изменении структурно-текстурных особенностей кварца, связанных прежде всего с давлением: широким развитием трещиноватости, катаклазом и перекристаллизацией (грануляцией) кварцево-жильной массы. Следует отметить разный состав растворов в первичных и вторичных включениях, что свидетельствует о формировании кварцевых тел из одного Na-K-Mg-Fe-хлоридного флюида, обедненного Mg и Fe за счет отложения их в виде магнезиально-железистых карбонатитов (Кабанова и др., 2017).

3. Образование жил гидротермально-метаморфогенно-метасоматического генезиса происходило с участием K-Na-хлоридного флюида с соленостью 1.2–8.7 мас. % NaCl-экв. Жилы гидротермально-метаморфогенного генезиса образовались с участием существенно K-Na-Mg-хлоридного флюида с соленостью 0.2–15.5 мас. % NaCl-экв. Различия в ионном составе флюидов связаны с влиянием на их состав материнских источников гидротермальных растворов: в первом случае — это интрузивные породы кислого и щелочного составов; во втором — это интрузивные породы среднего, основного и ультраосновного составов.

4. Бор является одним из ведущих газовых компонентов гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца и наличие его в составе флюидных

включений можно считать типоморфной особенностью данного генетического типа кварца. Высокие значения бора связаны с локализацией кварцевых жил среди тел пегматоидов и наличием на кварцево-жильных объектах борсодержащих минеральных ассоциаций и, в частности, турмалина.

5. Следовые примеси в обогащенных концентратах могут быть связаны с большим количеством ФВ и их неполным удалением из кварцевой крупки. В составе раствора ФВ гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца сумма «вредных» компонентов, таких как  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ , Cl, B, Na, K, Mg и Li, меньше по сравнению с гидротермально-метаморфогенным кварцем. Это определяет большую перспективность первого для получения глубокообогащенной кварцевой крупки. Перспективность его также обусловлена меньшим количеством флюидных включений и их локализацией по трещинам и в межзерновом пространстве, что значительно упрощает процесс обогащения и удаления ФВ. При прочих равных условиях этот фактор является основным с точки зрения промышленных перспектив кварца в качестве сырья для плавки прозрачного кварцевого стекла — чем меньше количество флюидных включений в кварце, тем выше вероятность его использования в качестве сырья для плавки.

## Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность Н. К. Никандровой и С. Г. Кряжеву за выполнение аналитических исследований, а также рецензентам за ценные замечания, позволившие улучшить качество предоставленных материалов.

## Литература

- Анфилов, В. Н., Кабанова, Л. Я., Игуменцева, М. А., Насыров, Р. Ш., Штенберг, М. В., Лебедев, А. С., Рыжков, В. М., Ардышев, П. А. (2012). Геологическое строение, петрография и технологические характеристики кварца кварцевого месторождения «жила Толстиха». *Разведка и охрана недр*, 12, 12–16.
- Анфилов, В. Н., Кабанова, Л. Я., Игуменцева, М. А., Никандрова, Н. К. (2017). Геологическое строение, петрография и генезис кварцевого месторождения Гора Хрустальная. *Отечественная геология*, 1, 68–74.
- Белковский, А. И. (2013). Минерагения месторождений особо чистого кварца «уфалейского» типа (Центрально-Уральское поднятие, Уфалейский метаморфический блок, Средний Урал). *Литосфера*, 6, 73–87.
- Борисенко, А. С. (1977). Изучение солевого состава растворов флюидных включений в минералах методом криометрии. *Геология и геофизика*, 8, 16–28.
- Бушляков, И. Н. и Соболев, И. Д. (1976). *Петрология, минералогия и геохимия гранитоидов Верхнетского массива*. М.: Наука.
- Вертушков, Г. Н., Борисков, Ф. Ф., Емлин, Э. Ф., Синкевич, Г. А., Соколов, Ю. А., Сустанов, О. А., Якшин, В. И. (1970). Жильный кварц восточного склона Урала. *Труды СГИ*, 2 (66), 82–99.
- Вертушков, Г. Н., Дроздов, В. П., Саковцев, Г. П., Мельникова, Н. Н., Якшин, В. И. (1980). Геология метаморфогенных месторождений гранулированного кварца. В: *Геология метаморфических комплексов: межвузовский научный тематический сборник*. Свердловск: СГИ, 8, 3–23.
- Глаголев, Е. В. (2006). Месторождение кварца Гора Хрустальная. *Минеральное сырье Урала*, 2, 5–40.
- Грознецкий, Д. П. (1974). *Отчет о поисково-разведочных работах на Наилинском и Тыелгинском золоторудных месторождениях, проведенных Миасским прииском*. Миасс.
- Евстропов, А. А., Бурьян, Ю. И., Кухарь, Н. С., Серых, Н. М., Цюцкий, С. С. (1995). *Жильный кварц Урала в науке и технике. Геология основных месторождений кварцевого сырья*. М.: Недра.

- Емлин, Э.Ф. Синкевич, Г.А., Якшин, В.И. (1988). *Жильный кварц Урала в науке и технике*. Свердловск: Средне-Уральское кн. изд-во.
- Ермаков, Н.П. и Долгов, Ю.А. (1979). *Термобарогеохимия*. М.: Недра.
- Захаров, О.А. и Пучков, В.Н. (1994). *О тектонической природе максютовского комплекса Уралтау: доклад Президиуму Уфимского научного центра Российской академии наук*. Уфа: УФИЦ РАН.
- Исаев, В.А. (2006). Структурные примеси в кварце. Ч. I. Обзор и анализ традиционных способов очистки кварца от структурных примесей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 9, 11–23.
- Кабанова, Л.Я., Анфилогов, В.Н., Игуменцева, М.А., Никандрова, Н.К. (2017). Проявления карбонатитов на кварцевом месторождении «жила № 175» (Уфалейский блок, Южный Урал). *Литосфера*, 17 (4), 110–119. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-4-110-119>
- Кабанова, Л.Я., Игуменцева, М.А., Никандрова, Н.К., Анфилогов, В.Н., Рыжков, В.М. (2019). Геологическое строение и петрография месторождения жильного кварца Песчаное (Южный Урал). *Разведка и охрана недр*, 5, 18–24.
- Козлов, А.В. (1988). *Хрусталеобразующие гидротермальные системы*. Дис. ... д-ра геол.-минерал. наук.
- Кряжев, С.Г., Васюта, Ю.В., Харрасов, М.К. (2003). Методика валового анализа включений в кварце. *Матер. XI международной конференции по термобарогеохимии*. Александров: ВНИИСИМС, 6–10.
- Кузнецов, Н.С., Пужаков, Б.А., Шох, В.Д., Савельев, В.П., Петров, В.И., Шулькина, Н.Е., Шулькин, Е.П., Долгова, О.Я. (2008). Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Сер. Южно-Уральская, лист N-41-I (Кыштым). Челябинск.
- Кухарь, Н.С. и Огородников, В.Н. (1990). Кварцево-жильная минерализация метаморфических комплексов Южного Урала. В: *Геология метаморфических комплексов*. Свердловск: СГИ, 105–113.
- Махиня, В.Б. (2003). *Поисковые и оценочные работы на особо чистый жильный кварц на Знаменской площади: геологический отчет о результатах работ за 2000–2003 гг.* п. Южный.
- Огородников, В.Н., Поленов, Ю.А., Недосекова, И.Л., Савичев, А.Н. (2016). *Гранитные пегматиты, карбонатиты и гидротермалиты Уфалейского метаморфического комплекса*. Екатеринбург: ИГГ РАН; УГГУ.
- Огородников, В.Н., Сазонов, В.Н., Поленов, Ю.А. (2007). *Минерагения шовных зон Урала*. Екатеринбург: УрО РАН.
- Пальмова, Д.Г., Копнева, Л.А., Иванов, П.А., Прусаков, А.М. (1978). Физико-химическая характеристика золотоносных растворов. В: *Теория и практика термобарогеохимии*. М.: Наука, 101–106.
- Поленов, Ю.А. (2008). *Эндеогенные кварцево-жильные образования Урала*. Екатеринбург: Изд-во УГГУ.
- Реддер, Э. (1987). *Флюидные включения в минералах*. М.: Мир.
- Савичев, А.Н. (2005). *Уфалейский кварцево-жильный район (закономерности размещения кварца различных генетических типов, минералого-технологическое картирование и прогноз*. Дис. ... канд. геол.-минерал. наук.
- Юсупов, С.Ш., Мельников, Е.П., Фатахутдинов, С.Г. (1979). *РТ-условия грануляции жильного кварца Урала: доклад Президиума Башкирского филиала АН СССР*. Уфа: УФИЦ РАН.
- Anfilogov, V.N., Kabanova, L. Ya., Igumenlseva, M. A., Nilcandrova, N. K. (2016). Geological Structure and Genesis of Quartz Veins in the Ufalei Complex Exemplified by the Vein 2136. *Doklady Earth Sciences*, 466 (2), 109–112. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1602001X>
- Bodnar, R.J. and Vityk, M.O. (1994). Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions. In: B. De Vivo, M. L. Frezzotti, Pontignano, eds, *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Siena, 117–130.
- Brown, P.E. (1989). FLINCOR: a new microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *American Mineralogist*, 74, 1390–1393.
- Darling, R.S. (1991). An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluid inclusions: implications for PT-isochors location. *Geochimica et Cosmochimica*, 55, 3869–3871.
- Gotze, J., Yuanming, P., Mueller, A., Kotova, E.L., Cerin, D. (2017). Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the Southern Ural Region, Russia. *Minerals*, 7 (10), 189. <https://doi.org/10.3390/min7100189>

- Klein, E. L., Harris, C., Renac, C., Giret, A., Moura, C. A. V., Fuzikawa, K. (2006). Fluid inclusion and stable isotope (O, H, C, and S) constraints on the genesis of the Serrinha gold deposit, Gurupi Belt, northern Brazil. *Mineral Deposit*, 41, 160–178. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0050-1>
- Korekina, M. A. (2021). Assessment of possibility of using milky-white quartz of Novotroitsk., deposit for obtaining high-purity quartz. South Urals. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university-geo assets engineering*, 332 (8), 99–108.
- Nikandrova, N. K., Anfilogov, V. N., Igumenseva, M. A., Kabanova, L. Ya. (2014). Homogenization temperatures and the composition of gas-liquid inclusions from the Gora Khrustal'naya deposit (Middle Urals). *Doklady Earth Sciences*, 456 (1), 554–557. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14050183>
- Ryzhkov, V. M., Igumentseva, M. A., Shtenberg, M. V. (2020). Technology for Quality Assessment of Quartz Raw Materials. In: S. Votyakov, D. Kiseleva, V. Grokhovsky, Y. Shchapova, eds, *Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Cham: Springer, 195–199. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00925-0\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00925-0_29)
- Thiery, R., Vidal, J., Dubessy, J. (1994). Phase equilibria modeling applied to fluid inclusions: liquid vapor equilibria and calculations of the molar volume in the CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 1073–1082.
- Wilkinson, J. J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55, 229–272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2021 г.  
Статья рекомендована к печати 20 марта 2023 г.

#### Контактная информация:

Корекина Мария Александровна — [maria@mineralogy.ru](mailto:maria@mineralogy.ru)  
Савичев Александр Николаевич — [ansavichev@mail.ru](mailto:ansavichev@mail.ru)

## Conditions of formation and sources of fluids of the birthplace of barren residential quartz of hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic and hydrothermal-metamorphogenic genesis (Middle and South Urals)\*

M. A. Korekina, A. N. Savichev

South Ural Federal Scientific Center for Mineralogy and Geoecology  
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
terr. Il'menskogo zapovednika, Miass, 456317, Russian Federation

**For citation:** Korekina, M. A., Savichev, A. N. (2023). Conditions of formation and sources of fluids of the birthplace of barren residential quartz of hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic and hydrothermal-metamorphogenic genesis (Middle and South Urals). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 68 (2), 200–217. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.201> (In Russian)

The paper considers the conditions of quartz formation of hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic and hydrothermal-metamorphogenic genesis of deposits and manifestations of the Middle and Southern Urals based on the study of fluid inclusions by methods of thermobarogeochemistry, ion and gas chromatography. It is established that the studied quartz objects are formed in a wide temperature range, against the background of insignificant differences in pressure values. It is shown that the temperatures of mineral formation in deposits of hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic genesis vary from 440–230 °C at a pressure of 1.2–1.4 kbar. The formation of these veins occurred with the participation of K-Mg-Fe-chloride fluid with a

\* The work was carried out within the framework of state order 122062100023-5, South Ural Federal Scientific Center for Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

salinity of 1.2–8.7 wt. % NaCl-eq., depleted Mg and Fe due to the deposition of magnesia-ferrous carbonates. A typomorphic feature of hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic quartz is the high values of boron associated with the placement of quartz veins among pegmatoids and the presence of boron-containing mineral inclusions on quartz-vein objects. Veins of hydrothermal-metamorphogenic genesis were formed when the crack system was filled with quartz with the participation of a substantially K-Na chloride fluid (0.2–15.5 wt. % NaCl-eq.), at homogenization temperatures of 435–335 °C and a pressure of 1.3–2.3 kbar. In the composition of fluid inclusions of hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic quartz, the sum of “harmful” components (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Cl, B, Na, K, Mg and Li) is less than in hydrothermal-metamorphogenic quartz. The studied quartz deposits and veins were formed in the range of temperatures and pressures not higher than the green shale stage during several successive stages: the formation of quartz veins — in a more high-temperature hydrothermal stage, while subsequent changes in quartz veins occurred under the influence of metamorphism processes, with a decrease in temperature. Subsequent changes are associated with the appearance of fracturing, cataclysm and recrystallization of quartz bodies with a decrease in grain size.

*Keywords:* quartz, thermobarogeochemistry, fluid inclusions, metasomatism, metamorphism.

## References

- Anfilogov, V.N., Kabanova, L. Ya., Igumeniseva, M. A., Nicandrova, N. K. (2016). Geological Structure and Genesis of Quartz Veins in the Ufalei Complex Exemplified by the Vein 2136. *Doklady Earth Sciences*, 466 (2), 109–112. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1602001X>
- Anfilogov, V.N., Kabanova, L. Ya., Igumentseva, M. A., Nasyrov, R. Sh., Shtenberg, M. V., Lebedev, A. S., Ryzhkov, V. M., Ardyshv, P. A. (2012). Geological structure, petrography and technological characteristics of quartz of the quartz deposit “Tolstikha vein”. *Prospect and protection of mineral resources*, 12, 12–16. (In Russian)
- Anfilogov, V.N., Kabanova, L. Ya., Igumentseva, M. A., Nikandrova, N. K. (2017). Geological structure, petrography and genesis of the Gora Khrustalnaya quartz deposit. *Domestic geology*, 1, 68–74. (In Russian)
- Belkovsky, A. I. (2013). Minerageny of highly pure quartz deposits of the “Ufalei” type (Central Ural uplift, Ufaleisk metamorphic block, Middle Urals). *Lithosphere*, 6, 73–87. (In Russian)
- Bodnar, R. J. and Vityk, M. O. (1994). Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions. In: B. De Vivo, M. L. Frezzotti, Pontignano, eds, *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Siena, 117–130.
- Borisenko, A. S. (1977). Study of the salt composition of solutions of fluid inclusions in minerals by cryometry. *Geology and Geophysics*, 8, 16–28. (In Russian)
- Brown, P. E. (1989). FLINCOR: a new microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *American Mineralogist*, 74, 1390–1393.
- Bushlyakov, I. N. and Sobolev, I. D. (1976). *Petrology, mineralogy and geochemistry of granitoids of the Verkhisetsky massif*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Darling, R. S. (1991). An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluid inclusions: implications for PT-isochors location. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 3869–3871.
- Emlin, E. F. Sinkevich, G. A., Yakshin, V. I. (1988). *Vein quartz of the Urals in science and technology*. Sverdlovsk: Sredne-Ural'skoe kn. izd-vo Publ. (In Russian)
- Ermakov, N. P. and Dolgov, Yu. A. (1979). *Thermobarogeochemistry*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Evstropov, A. A., Buryan, Yu. I., Kukhar, N. S., Serykh, N. M., Tsutsky, S. S. (1995). *Vein quartz of the Urals in science and technology. Geology of the main deposits of quartz raw materials*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Glagolev, E. V. (2006). Quartz deposit Gora Khrustalnaya. *Mineral raw materials of the Urals*, 2, 5–40. (In Russian)
- Gotze, J., Pan, Y., Mtiller, A., Kotova, E. L., Cerin, D. (2017). Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the Southern Ural Region, Russia. *Minerals*, 7 (10), 189. <https://doi.org/10.3390/min7100189>

- Groznetsky, D.P. (1974). *Report on prospecting and exploration work at the Nailinsky and Tyelginsky gold deposits, carried out by the Miass mine*. Miass. (In Russian)
- Isaev, V.A. (2006). Structural impurities in quartz. Part I. Review and analysis of traditional methods for purifying quartz from structural impurities. *Mining information and analytical bulletin*, 9, 11–23. (In Russian)
- Kabanova, L. Ya., Anfilogov, V.N., Igumentseva, M. A., Nikandrova, N.K. (2017). Manifestations of carbonatites at the vein № 175 quartz deposit (Ufalei block, South Urals). *Lithosphere*, 17 (4), 110–119. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-4-110-119> (In Russian)
- Kabanova, L. Ya., Igumentseva, M. A., Nikandrova, N. K., Anfilogov, V. N., Ryzhkov, V.M. (2019). Geological structure and petrography of the Peschanoe vein quartz deposit (South Urals). *Prospect and protection of mineral resources*, 5, 18–24. (In Russian)
- Klein, E.L., Harris, C., Renac, C., Giret, A., Moura, C. A. V., Fuzikawa, K. (2006). Fluid inclusion and stable isotope (O, H, C, and S) constraints on the genesis of the Serrinha gold deposit, Gurupi Belt, northern Brazil. *Mineral Deposit*, 41, 160–178. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0050-1>
- Korekina, M. A. (2021). Assessment of possibility of using milky-white quartz of Novotroitsk., deposit for obtaining high-purity quartz. South Urals. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university-geo assets engineering*, 332 (8), 99–108. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/8/3308>
- Kozlov, A. V. (1988). *Crystal-forming hydrothermal systems*. Dr. Sci. thesis. St. Petersburg. (In Russian)
- Kryazhev, S. G., Vasyuta, Yu. V., Kharrasov, M. K. (2003). Bulk analysis technique for inclusions in quartz. Mater. In: *XI International Conference on Thermobarogeochemistry*. Aleksandrov: VNIISIMS Publ., 6–10. (In Russian)
- Kukhar, N. S. and Ogorodnikov, V.N. (1990). Quartz-vein mineralization of metamorphic complexes of the Southern Urals. In: *Geology of metamorphic complexes*. Sverdlovsk: SGI Publ., 105–113. (In Russian)
- Kuznetsov, N. S., Puzhakov, B. A., Shokh, V.D., Savelyev, V.P., Petrov, V.I., Shchulkina, N. E., Shchulkina, E. P., Dolgova, O. Ya. (2008). *Gosudarstvennaia geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200000. Ser. Yuzhno-Uralskaya. list N-41-I (Kyshtym)* [State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000. Ser. South Ural, sheet N-41-I (Kyshtym)]. Chelyabinsk. (In Russian)
- Makhinya, V.B. (2003). *Search and evaluation work on especially pure vein quartz on Znamenskaya Square: Geological report on the results of work for 2000–2003*. Yuzhny. (In Russian)
- Nikandrova, N. K., Anfilogov, V.N., Igumentseva, M. A., Kabanova, L. Ya. (2014). Homogenization temperatures and the composition of gas-liquid inclusions from the Gora Khrustal'naya deposit (Middle Urals). *Doklady Earth Sciences*, 456 (1), 554–557. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14050183>
- Ogorodnikov, V.N., Polenov, Yu. A., Nedosekova, I.L., Savichev, A.N. (2016). *Granite pegmatites, carbonatites and hydrothermalites of the Ufaley metamorphic complex*. Yekaterinburg: IPGG RAS Press; USMU Press. (In Russian)
- Ogorodnikov, V.N., Sazonov, V.N., Polenov, Yu. A. (2007). *Minerageny of the suture zones of the Urals*. Yekaterinburg: Ural Branch of the RAS Press. (In Russian)
- Palmova, D.G., Kopneva, L. A., Ivanov, P.A., Prusakov, A.M. (1978). Physicochemical characteristics of gold-bearing solutions. *Theory and practice of thermobarogeochemistry*. Moscow: Nauka Publ., 101–106. (In Russian)
- Polenov, Yu. A. (2008). *Endogenous quartz-vein formations of the Urals*. Yekaterinburg: USMU Press. (In Russian)
- Redder, E. (1987). *Fluid inclusions in minerals*. Moscow: Mir Publ. (In Russian)
- Ryzhkov, V.M., Igumentseva, M. A., Shtenberg, M. V. (2020). Technology for Quality Assessment of Quartz Raw Materials. In: S. Votyakov, D. Kiseleva, V. Grokhovsky, Y. Shchapova, eds, *Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Cham: Springer, 195–199. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00925-0\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00925-0_29)
- Savichev, A.N. (2005). *Ufaleyskiy quartz-vein area (Patterns of placement of quartz of various genetic types, mineralogical and technological maps)*. PhD thesis. Yekaterinburg. (In Russian)
- Thiery, R., Vidal, J., Dubessy, J. (1994). Phase equilibria modeling applied to fluid inclusions: liquid vapor equilibria and calculations of the molar volume in the CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 1073–1082.
- Vertushkov, G. N., Boriskov, F.F., Emlin, E. F., Sinkevich, G. A., Sokolov, Yu. A., Sustavov, O. A., Yakshin, V.I. (1970). Vein quartz on the eastern slope of the Urals. *Proceedings of SGI*, 2 (66), 82–99. (In Russian)

- Vertushkov, G. N., Drozdov, V. P., Sakovtsev, G. P., Melnikova, N. N., Yakshin, V. I. (1980). Geology of metamorphogenic granular quartz deposits. In: *Geology of metamorphic complexes: interuniversity scientific topics sat.* Sverdlovsk: SGI Publ., 8, 3–25. (In Russian)
- Wilkinson, J. J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55, 229–272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
- Yusupov, S. Sh., Melnikov, E. P., Fatakhutdinov, S. G. (1979). RT-conditions for granulation of vein quartz in the Urals. In: *Report of the Presidium of the Bashkir Branch of the USSR Academy of Sciences.* Ufa: UFRS RAS Press. (In Russian)
- Zakharov, O. A. and Puchkov, V. N. (1994). *On the tectonic nature of the Maksyutovsky complex of Uraltau: Reports to the Presidium of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* Ufa: UFRS RAS Press. (In Russian)

Received: December 10, 2021

Accepted: March 20, 2023

Authors' information:

*Maria A. Korekina* — [maria@mineralogy.ru](mailto:maria@mineralogy.ru)

*Alexander N. Savichev* — [ansavichev@mineralogy.ru](mailto:ansavichev@mineralogy.ru)