

УДК 553.43:549.3:546.22

DOI: 10.24930/1681-9004-2022-22-6-859-871

## Условия образования месторождений кварцевого сырья Южного Урала по результатам изучения флюидных включений и ИК-спектроскопии

Н. Н. Анкушева, М. В. Штенберг, М. А. Корекина

Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317, Россия, e-mail: [ankusheva@mail.ru](mailto:ankusheva@mail.ru)

Поступила в редакцию 30.05.2022 г., принята к печати 05.09.2022 г.

**Объект исследований.** В статье приведены результаты изучения кварцевых жил, южноуральских месторождений кварцевого сырья – Светлореченское, Караяновское, Гора Хрустальная и Толстиха. **Методы.** Петрографическое изучение кварца проведено на микроскопе Olympus BX51. Исследования флюидных включений в кварце выполнены в термокамере TMS-600 (Linkam) с программным обеспечением LinkSys V-2.39 с микроскопом для прохождения и отраженного света Olympus BX-51 (Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе). Солевой состав растворов во включениях оценен по температурам эвтектики раствора во включениях. Концентрации солей в растворах рассчитывались по температурам плавления последних кристаллов льда. Регистрация инфракрасных спектров выполнена на инфракрасном фурье-спектрометре Nicolet-6700 Thermo Scientific (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс). Обработка спектров осуществлялась в программном пакете OMNIC Thermo Nicolet и программе Peakfit. Коэффициенты экстинкции для расчета концентрации молекулярной воды и ОН-групп взяты из литературы. **Результаты.** Жилы сложены крупно- и гигантозернистым молочно-белым кварцем. По результатам термобарогеохимических исследований выявлено, что кварцевые жилы отлагались из близких по составу и параметрам NaCl–H<sub>2</sub>O флюидов с соленостью 3–9 мас. % NaCl-экв. и температурами от 100 до 280°C. Наиболее высокотемпературным является кварц месторождения Толстиха. По данным ИК-спектроскопии, для кварца изученных месторождений характерны высокое содержание молекулярной воды и средние значения концентрации группировок Al–ОН. По содержанию ОН-группировок кварц месторождения Толстиха (Южный Урал) близок к гранулированному кварцу, используемому промышленностью для получения кварцевых концентратов высокой степени чистоты. **Выводы.** Диапазон температур образования кварцевых жил на месторождениях составил от 100 до 280°C. Концентрация солей в растворах включений в кварце изученных месторождений изменяется в широких пределах – от 10.0 до 3.5 мас. % NaCl-экв. Минералообразующие растворы имели Na-хлоридный или Na–K-хлоридный состав, что указывает на кристаллизацию кварца из гидротермальных растворов при постдиagenетическом (метаморфическом) преобразовании пород. Кварц изученных месторождений имеет характерное соотношение воды и Al–ОН, что связано с условиями образования месторождений и незавершенностью процессов метаморфизма кварца на них.

**Ключевые слова:** термобарогеохимия, инфракрасные спектры, кварц

### Источник финансирования

Исследования выполнены по бюджетной теме ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН 075-00880-22ПР (2022–2024 гг.)

## Formation conditions of quartz deposits in the Southern Urals: Fluid inclusion data and IR spectroscopy

Natalia N. Ankusheva, Mikhail V. Shtenberg, Maria A. Korekina

Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS, Chelyabinsk region, Miass 456317, Russia, e-mail: [ankusheva@mail.ru](mailto:ankusheva@mail.ru)

Received 30.05.2022, accepted 05.09.2022

**Research subject.** Quartz veins of the Svetlorechenskoye, Karayan, Gora Khrustalnaya and Tolstikha quartz deposits in the Southern Urals. **Methods.** An optical study of quartz was performed using an Olympus BX51 optical microscope. A fluid inclusion study was performed using a thermostage TMS-600 (Linkam) equipped with the LinkSys V-2.39 software and an Olympus BX51 optical microscope (South Urals State University, Miass). The fluid composition in the inclusions was estimated from eutectic temperatures. Fluid salinity was calculated based on the melting temperatures of crystalline pha-

**Для цитирования:** Анкушева Н.Н., Штенберг М.В., Корекина М.А. (2022) Условия образования месторождений кварцевого сырья Южного Урала по результатам изучения флюидных включений и ИК-спектроскопии. *Литосфера*, 22(6), 859–871. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-859-871>

**For citation:** Ankusheva N.N., Shtenberg M.V., Korekina M.A. (2022) Formation conditions of quartz deposits of the Southern Urals: Fluid inclusion data and IR spectroscopy. *Lithosphere (Russia)*, 22(6), 859–871. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-859-871>

ses. Registration of infrared spectra was carried out using an infrared Fourier spectrometer Nicolet-6700 Thermo Scientific (SU FRC MG UB RAS, Miass). The spectra were processed using the OMNIC Thermo Nicolet software package and the Peakfit program. The extinction coefficients for calculating the concentration of molecular water and OH-groups were used from. *Results.* The veins are composed of coarse-grained milky-white quartz. The fluid inclusion data shows that the quartz veins were deposited from similar in composition NaCl-H<sub>2</sub>O fluids with salinities of 3–9 wt % NaCl eq. and at temperatures ranging from 100 to 280°C. Quartz in the Tolstikha deposit was deposited at the highest temperatures. According to IR spectroscopy data, quartz in the studied deposits is characterized by high contents of molecular water and average concentrations of Al-OH groups. According to the content of OH-groups, quartz in the Tolstikha deposit approaches industrial granulated quartz used in the production of high-purity quartz concentrates. *Conclusions.* Quartz veins in the studied deposits formed at temperatures ranging from 100 to 280°C. The salinity of inclusions in quartz ranged from 10 to 3.5 wt % NaCl eq. Mineral-forming fluids were of Na-chloride or Na-K-chloride composition, which indicates quartz crystallization during the post-diagenetic (metamorphic) transformation of rocks. Quartz in the studied deposits is characterized by a specific ratio of water and Al-OH, which is associated with the conditions of deposit formation and incompleteness of quartz metamorphism processes therein.

**Keywords:** Urals, quartz, infrared spectra, fluid inclusions, water

#### Funding information

The study was supported by the State Contract No. 075-00880-22ПП (2022–2024) of the SU FRC MG UB RAS

## ВВЕДЕНИЕ

Кварцу посвящено множество зарубежных работ: он изучен методом инфракрасной (ИК) спектроскопии (Kats, 1962; Kronenberg, 1994; Bachheimer, 2000; Koch-Muller et al., 2003; Koch-Muller, Rhede, 2010; и др.), ICP-MS (Zecchini et al., 1994; Miyoshi et al., 2005; Gotte et al., 2011), их согласованности с температурными данными по флюидным включениям (Sterner et al., 1995; Miallier et al., 2001; Mohan, Prasad, 2002; Анфилогов и др., 2012, 2017; Никандрова и др., 2014) и условиям образования кварца (Famin et al., 2004; Gleeson et al., 2008). Многочисленными исследователями показано, что кварц по химическому составу, форме кристаллов, парагенезисам с другими минералами содержит информацию об условиях своего формирования, возникновения кварцевых тел и связи золоторудной минерализации с жильным кварцем.

Актуальность данной работы заключается в исследовании месторождений Уральской кварцевоносной провинции, в которой сосредоточена весомая доля запасов кварцевого сырья в России. Целью исследования является оценка *P-T* параметров минералообразующих флюидов кварцевожильных тел месторождений кварцевого сырья Южного Урала. Несмотря на большой объем исследований, детальное изучение кварцевожильных объектов остается актуальным, поскольку расшифровка условий их образования на основе новых данных расширяет возможности прогнозирования месторождений и способствует решению вопроса комплексного использования жильного кварца рудных и нерудных кварцевых тел. Как показано в научных работах (Поленов, 2008; см. также ссылки в ней), гиганто- и крупнозернистый кварц

из-за наличия флюидных и минеральных включений уступает в качестве кварцевого сырья гранулированному кварцу. Однако в ряде случаев гигантозернистый молочно-белый кварц по качеству может быть сравним с гранулированным (Вертушков и др., 1970; Емлин и др., 1988; Мельников, 1988).

Объектами исследования выбраны месторождения Светлореченское, Караяновское, Гора Хрустальная и Толстикха, кварцевые жилы в которых сложены молочно-белым первично кристаллически-зернистым кварцем, относятся к жилам выполнения, образованным за счет привноса кремнезема гидротермальными растворами с последующим отложением его в полых трещинах (Поленов и др., 2014). Формация первично кристаллизованного кварца, к которой отнесены исследованные месторождения, была выделена задолго до этого по результатам изучения пространственного распределения кварцевых жил в пространстве вокруг гранитоидных массивов (кварцеметрическая съемка) (Вертушков, 1955).

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В Уральской кварцевоносной провинции сосредоточено большое количество месторождений кварца; провинция подразделяется на Приполярно-Уральскую и Южно-Уральскую субпровинции. Приполярно-Уральская главным образом представлена месторождениями горного хрусталя и прозрачного жильного кварца. В Южно-Уральской субпровинции находятся месторождения горного хрусталя, гранулированного и молочно-белого кварца. Наиболее развиты месторождения гидротермально-метаморфогенного гранулированного кварца.

Наиболее крупными и значимыми объектами в Уральской кварцевоносной провинции являются месторождения Желанное, Гора Хрустальная, Кыштымское, Кузнечихинское. История изучения уральских месторождений кварца насчитывает более 70 лет и связана с фундаментальными работами В.В. Буканова, Г.Н. Вертушкова, Д.П. Григорьева, Э.Ф. Емлина, С.К. Кузнецова, Г.Г. Леммлейна, Е.П. Мельникова, Ю.А. Поленова, С.Н. Сигаева, Г.А. Синкевича, Г.И. Страшненко, А.А. Щеколдина, В.И. Якшина и др. (Штенберг, 2014; см. также ссылки в ней).

Схема размещения исследованных месторождений показана на рис. 1. Пространственно месторождения приурочены к Центрально-Уральскому и Восточно-Уральскому поднятиям, а также к Тагило-Магнитогорскому прогибу (Толстиха) (Анфилов и др., 2012; Штенберг, 2014).

Месторождения кварца и горного хрусталя Гора Хрустальная и Светлореченское расположены в юго-восточной части Верх-Исетского комплекса, в 17 и 19 км западнее г. Екатеринбурга. Современ-

ные знания о строении и составе комплекса базируются на исследованиях В.Н. Пучкова, И.Д. Соболева, И.Н. Бушлякова, Г.Б. Ферштатера и т. д. В строении комплекса принимают участие породы от диоритов до гранитов. Изученные месторождения в виде крупных кварцевых тел размером от 200 до 550 м относятся к одному генетическому типу и представлены минералогически идентичным кварцем. Объекты залегают среди среднезернистых амфиболитов, раннекаменноугольных мезократовых в различной степени разгнейсованных диоритов и позднекаменноугольных гранитов (Глаголев, 2006; Анфилов и др., 2017).

Караяновское месторождение входит в состав крупной Сакмарской кварценосной провинции и расположено в 30 км к северо-западу от с. Акъяр. Сакмарская провинция находится в пределах южной части Уралтауского антиклинория, представляющего собой зону между серпентинитовым меланжем Главного Уральского разлома на востоке и Зилаирским и Башкирским мегантиклинориями на западе (Пучков, 2010; Казанцев, Казанцева, 2016). Уралтауский антиклинорий сложен породами суванякского и нижележащего максютовского комплексов, относящихся к верхнему протерозою (Криницкий, Криницкая, 1963). Максютовский комплекс, в пределах которого расположено Караяновское месторождение, является сложной структурой, для которой характерны породы, испытавшие высокobarический метаморфизм. Вмещающими породами месторождения являются сланцы гранат-мусковит-кварцевого состава, чередующиеся с существенно хлорит-эпидотовыми разностями.

Месторождение Толстиха находится в 35 км севернее Миасса и является структурным элементом Наилинского месторождения золота. Жила протяженностью 1000 м и мощностью до 50 м залегает на контакте небольшого массива габбро с крупным массивом Больших Таловских гор, сложенным серпентинизированными дунитами, перидотитами и пироксенитами (Анфилов и др., 2012). Вмещающими породами являются габброиды и в разной степени измененные серпентиниты, образованные по дунитам, перидотитам и пироксенитам.

Существенное влияние на формирование вмещающих пород и кварцевых жил месторождений Гора Хрустальная и Светлореченское оказали процессы регионального метаморфизма, которому были подвергнуты как осадочно-вулканогенные образования, так и интрузивные (Анфилов и др., 2017). Биотитовые граниты и связанные с ними жильные образования видимых следов регионального метаморфизма не несут. Большая часть пород формировалась в условиях амфиболитовой фации. К породам, сформированным в данную фацию, относятся амфиболиты, амфибол-полевошпатовые сланцы, порфириды, а также породы габбровой формации. Парагенетическая ассоциация в диори-



**Рис. 1.** Схема расположения исследованных месторождений (Кузнецов, 1998; Кузнецов и др., 2011, с упрощениями).

1 – Центрально-Уральское поднятие, 2 – Тагило-Магнитогорский прогиб, 3 – Восточно-Уральское поднятие, 4 – месторождения молочно-белого кварца.

**Fig. 1.** The location scheme of deposits (Kuznetsov, 1998; Kuznetsov et al., 2011, simplified).

1 – Central-Uralian Uplift, 2 – Tagil-Magnitogorsk Trough, 3 – East-Uralian Uplift, 4 – milky-white quartz deposits.

тах: олигоклаз–биотит–роговая обманка также отвечает амфиболитовой фации.

Метаморфизм максютовского комплекса характеризуется широким развитием и разнообразием, что определяется его непосредственным контактом с зоной Главного Уральского разлома, т. е. нахождением в зоне максимальных стрессовых условий с развитием высокобарических ассоциаций. Метаморфические особенности данной области наиболее детально рассмотрел В.И. Ленных (1963) и выделил три главных его этапа: прогрессивный метаморфизм эклогитовой фации; “глубинный диафторез” фации глаукофановых сланцев; диафторез фации зеленых сланцев. Состав диафторитов фации зеленых сланцев – хлорит-кварцевый (по гранатам), хлорит-альбит-актинолитовый (по глаукофану), серицитовый (по мусковиту) и др. С диафторитами В.И. Ленных связывает образование кварцевых жил. В работе (Шмелев и др., 1995) установлено, что метаморфизм высоких ступеней оказал влияние практически на все породы максютовского комплекса от эклогитов, кристаллических сланцев до гипербазитов и мраморов. Однако авторы отмечают, что в геологическом строении комплекса присутствуют и слабометаморфизованные породы, уровень метаморфизма в которых не превышал зеленосланцевую фацию.

Вопросы метаморфизма рассмотрены в работах А.П. Сигова (1948), А.Н. Грицук (2003), Н.И. Бородаевского (1948) и т. д. Авторы приводят последовательность метаморфических преобразований пород от регрессивного этапа метаморфизма ультрабазитов до прогрессивного изменения гипербазитов и делают заключение, что породы Таловского массива претерпели значительные метаморфические преобразования в условиях эпидот-амфиболитовой фации регионального метаморфизма. Контактный метаморфизм в соседстве с габбро-диоритовыми телами проявился в серицитизации, сосюритизации, хлоритизации, карбонатизации, альбитизации зеленых сланцев и более ранних габбро-диоритов. Процесс оталькования, карбонатизации, хлоритизации и окремнения характерен для серпентинитов. На площади присутствует широко распространенное явление инъекционного метаморфизма сланцевых пород кровли.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы кварца отобраны из коренных выходов жил месторождений. Текстурно-структурные особенности кварца жил изучены под оптическим микроскопом Olympus BX-51, сопряженным с фотокамерой в проходящем свете.

Исследования двухфазных флюидных включений в кварце проведены в термокамере TMS-600 (Linkam) с программным обеспечением LinkSys V-2.39, позволяющей производить измерения тем-

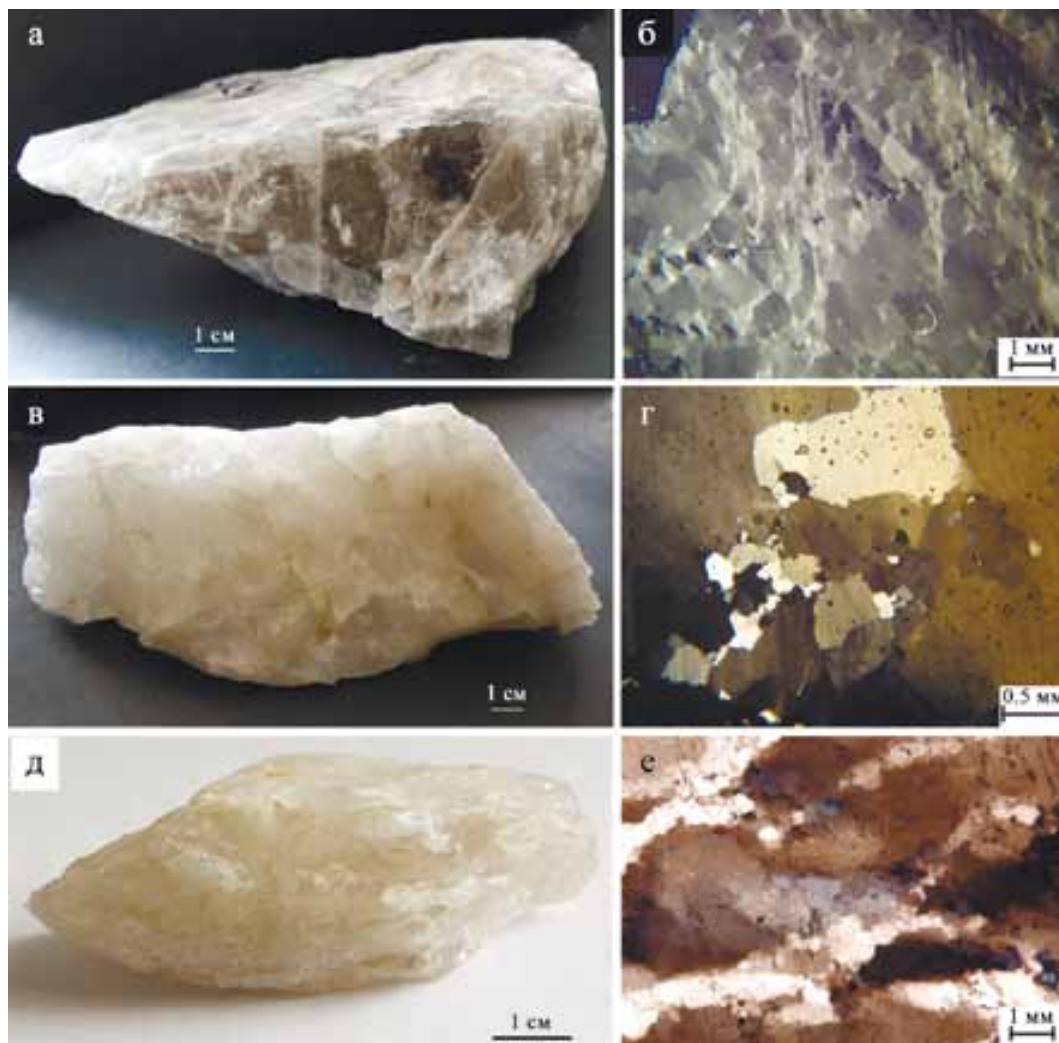
ператур фазовых переходов в интервале от  $-196$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ , с микроскопом для проходящего и отраженного света Olympus BX-51 (Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе). Точность измерений  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  в интервале температур  $-20 \dots +80^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  вне этого интервала. Солевой состав растворов во включениях оценен по температурам эвтектики раствора во включениях (Davis et al., 1990; Spenser et al., 1990). Температуры гомогенизации фиксировались в момент исчезновения газового пузырька при нагревании препарата в термокамере и приняты за минимальные температуры минералообразования (Реддер, 1987). Концентрации солей в растворах рассчитывались по температуре плавления последних кристаллов льда (Bodnar, Vityk, 1994). Обработка результатов измерений выполнена в программе Statistica 6.1.

Регистрация инфракрасных спектров выполнена на инфракрасном фурье-спектрометре Nicolet-6700 Thermo Scientific (ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс). Для зарегистрированных спектров выполнена процедура коррекции базовой линии, и полученные спектры пропускания пересчитаны в спектры поглощения (оптическую плотность) с нормированием по толщине образца. Обработка спектров проводилась в программном пакете OMNIC Thermo Nicolet и программе Peakfit. Методика обработки и коэффициенты пересчета взяты из работы (Штенберг, 2014), коэффициенты экстинкции для расчета концентрации молекулярной воды и ОН-групп – из работ (Kats, 1962; Kronenberg, 1994). Из-за отсутствия коэффициента экстинкции для  $\text{CO}_2$  в кварце использован соответствующий коэффициент для силикатных стекол  $1010 \pm 60 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  (Grzechnik et al., 1996; Moore et al., 2000). Относительная погрешность при определении концентрации воды, гидроксильных групп и углекислого газа составляет 20%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гигантозернистый массивный кварц был изучен для месторождений Гора Хрустальная, Светлореченское, Караяновское и Толстиха. В исследованных жилах месторождений преобладает молочно-белый (85–90%), реже серый полупрозрачный кварц. Жилы имеют мощность от 50 до 200 м при протяженности до 1 км, содержат зерна кварца размером 0.1–2.0 см, жилы извилистые, с большим количеством двухфазных флюидных включений размером 5–10 мкм.

Кварц месторождений Светлореченское, Караяновское и Гора Хрустальная имеет гигантозернистую структуру с зернами размером более 2 см, массивную текстуру (рис. 2а). Кварц жилы Толстиха молочно-белого цвета, массивный, гигантозернистый, равномерно замутненный. Иногда наблюдаются щелевидные пустоты с мелкими друза-



**Рис. 2.** Внешний вид и микрофотографии (с анализатором) кварца.

а, б – гора Хрустальная; в, г – Толстикха; д, е – Светлореченское.

**Fig. 2.** The samples and microphotographs (with analyzer) of quartz.

а, б – Gora Khrustalnaya; в, г – Tolstikha; д, е – Svetlorechenskoye.

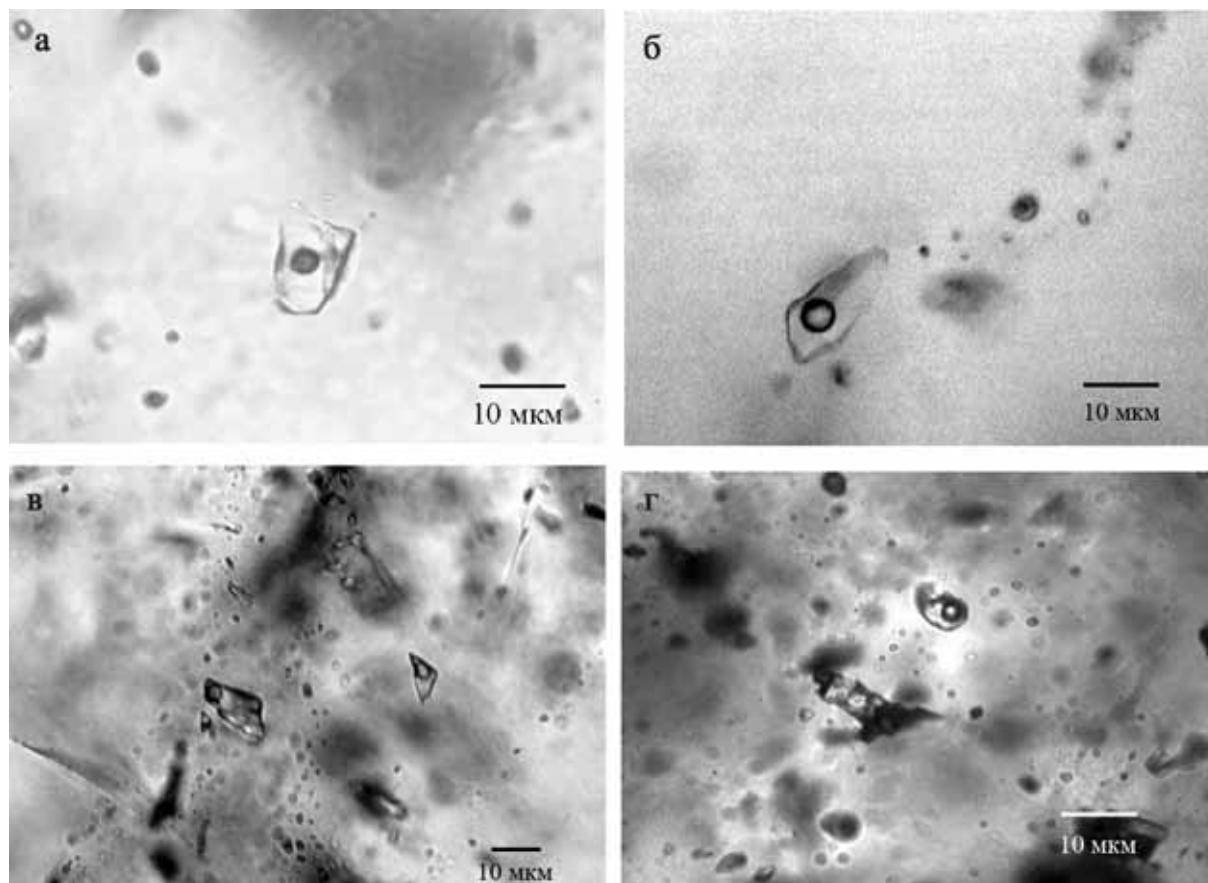
ми горного хрусталя. Размер зерен кварца достигает 3–4 см. Кварц характеризуется малой прозрачностью и большим количеством залеченных трещин, трассирующихся вторичными газовой-жидкими включениями (рис. 2б). Микроскопически исследуемый кварц имеет неровный матовый излом и обладает волнистым погасанием.

Для определения условий образования жил и параметров флюидов исследованы двухфазные флюидные включения в прозрачно-полированных пластинках жильного кварца. Основываясь на оптических наблюдениях и критериях Э. Реддера (1987), мы выделили первичные флюидные включения, встречающиеся в виде обособленных включений и малочисленных групп в центральных частях зерен, и вторичные включения, которые маркируют про-

ходящие через несколько зерен кварца трещины или наблюдаются в зонах перекристаллизации. По фазовому составу при комнатной температуре исследованные включения относятся к двухфазным газовой-жидким (рис. 3). Кроме того, в кварце присутствуют однофазные (в том числе вторичные) существенно газовые и жидкие включения.

Результаты термометрических исследований представлены в табл. 1 и на рис. 4.

В кварце Светлореченского месторождения двухфазные флюидные включения исследованы в крупных светлых прозрачных или полупрозрачных зернах. Флюидные включения имеют четкие темные границы, размеры до 20 мкм. Форма включений разнообразная: округлые, изометричные, удлиненные или угловатые. Они располагаются обособ-



**Рис. 3.** Флюидные включения в кварце жил месторождений кварцевого сырья.

а – Светлореченское, б – Караяновское, в – Гора Хрустальная, г – Толстиха.

**Fig. 3.** Fluid inclusions in quartz.

а – Svetlorechenskoye, б – Karayan; в – Gora Khrustalnaya, г – Tolstikha.

ленно или небольшими группами по 2–3 включения. Границы вакуолей обладают элементами кристаллографических граней и близки форме отрицательных кристаллов. Газовые пузыри четко очерчены, занимают до 15–20% объема включения. В солевом составе жидкой фазы флюидных включений в кварце определен NaCl. Температуры эвтектики образуют интервал  $-21...-22^{\circ}\text{C}$  ( $n = 30$ ). Гомогенизация включений в жидкую фазу происходила при  $100-155^{\circ}\text{C}$  ( $n = 52$ ; мода  $110-135^{\circ}\text{C}$ ). Концентрация солей варьирует от 3.3 до 9.4 мас. % NaCl-экв. ( $n = 52$ , мода 4–5 мас. %).

На Караяновском месторождении кварц мелкозернистый, массивный, большей частью непрозрачный, темный. В прозрачных или полупрозрачных зернах кварца были зафиксированы двухфазные флюидные включения размером 5–7 мкм. Они имеют округлую, изометричную форму, расположены обособленно, часто приурочены к краевым частям зерен кварца. Температуры эвтектики варьируют от  $-21$  до  $22^{\circ}\text{C}$  ( $n = 4$ ) и характеризуют соле-

вую систему NaCl–H<sub>2</sub>O. Температуры гомогенизации образуют интервал  $156-180^{\circ}\text{C}$  ( $n = 17$ ). Соленость флюида во включениях составила 5–8 мас. % NaCl-экв. ( $n = 17$ , мода 6–7 мас. %).

Двухфазные флюидные включения в кварце месторождения Гора Хрустальная имеют температуры эвтектики растворов от  $-21$  до  $-22^{\circ}\text{C}$ , характеризуют водно-солевую систему NaCl–H<sub>2</sub>O ( $n = 14$ ). Гомогенизация включений в жидкую фазу происходила в интервале от  $127$  до  $170^{\circ}\text{C}$  ( $n = 30$ ). Значения солёности растворов включений варьируют от 4.1 до 7.5 мас. % ( $n = 30$ ).

В молочно-белом кварце месторождения Толстиха выделены три ассоциации двухфазных флюидных включений. Эвтектика включений этих ассоциаций происходила в диапазоне  $-21...-23^{\circ}\text{C}$ , что свидетельствует о содержании хлоридов Na и K во флюиде.

Флюидные включения первой ассоциации крупные, объемные, размером около 30 мкм, часто темные, с кристаллографическими очертаниями.

**Таблица 1.** Результаты термобарогеохимических исследований кварца

**Table 1.** Results of fluid inclusion study

№ обр.	Генерация ФВ	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл.льда}}, ^\circ\text{C}$	C, мас. % NaCl-экв.
Светлореченское					
СЗ, 560-3	П, ПВ	100–155	–20...–21	–2.0...–6.2	3.3–9.1
Караяновское					
К1	П, ПВ	157–180	–21...–22	–3.3...–5.1	5.4–8.0
Гора Хрустальная					
Г1	П, ПВ	128–170	–21	–2.5...–4.7	4.1–7.4
Толстиха					
Т12-1	I (П)	240–281	–21...–23	–3.9...–6	6.3–9.2
	II (ПВ)	250–277		–3.7...–6.3	6–9.6
	III (ПВ)	200–250		–2...–4.1	3.3–6.5

Примечание. Включения: П – первичные, ПВ – псевдотеричные, ФВ – двухфазные газово-жидкие,  $T_{\text{гом}}$  – температура гомогенизации,  $T_{\text{эвт}}$  – температура эвтектики,  $T_{\text{пл.льда}}$  – температура плавления последнего кристалла льда; C – соленость.

Note. Inclusions: П – primary, ПВ – pseudo-secondary, ФВ – two-phase gas-liquid,  $T_{\text{гом}}$  – homogenization temperature,  $T_{\text{эвт}}$  – eutectic temperature,  $T_{\text{пл.льда}}$  – melting temperature of the last ice crystal; C – salinity.

Газовая вакуоль крупная, достигает 30–40% объема включения. Включения расположены обособленно, приурочены к центральным частям зерен кварца. Характеризуются температурами плавления последних кристаллических фаз от –3.9 до –6.0°C и соленостью захваченного флюида 6.3–9.0 мас. % NaCl-экв. Включения гомогенизировались в газовую фазу в диапазоне температур от 248 до 271°C.

Включения второй ассоциации светлые, плоские, размером до 15–20 мкм, вытянутой формы, реже изометричные, иногда со сложными границами. Газовые вакуоли в них не крупные, занимают 15–20% объема включения. Включения расположены в центральных частях зерен кварца. Обладают температурами плавления льда от –4.0 до –6.3°C, и, соответственно, соленость флюида в них составила 6.4–9.6 мас. % NaCl-экв. Включения гомогенизировались в жидкую фазу при температурах от 250 до 280°C.

Включения третьей ассоциации (вторичные) размером около 10 мкм имеют четкие темные границы преимущественно округлых форм. Они приурочены к границам зерен кварца, иногда ассоциируют с цепочками вторичных однофазных включений. Концентрация солей растворов включений варьирует от 3.3 до 6.5 мас. % NaCl-экв. (температуры плавления льда –2...–4°C). Включения гомогенизировались в жидкую фазу при 200–230°C.

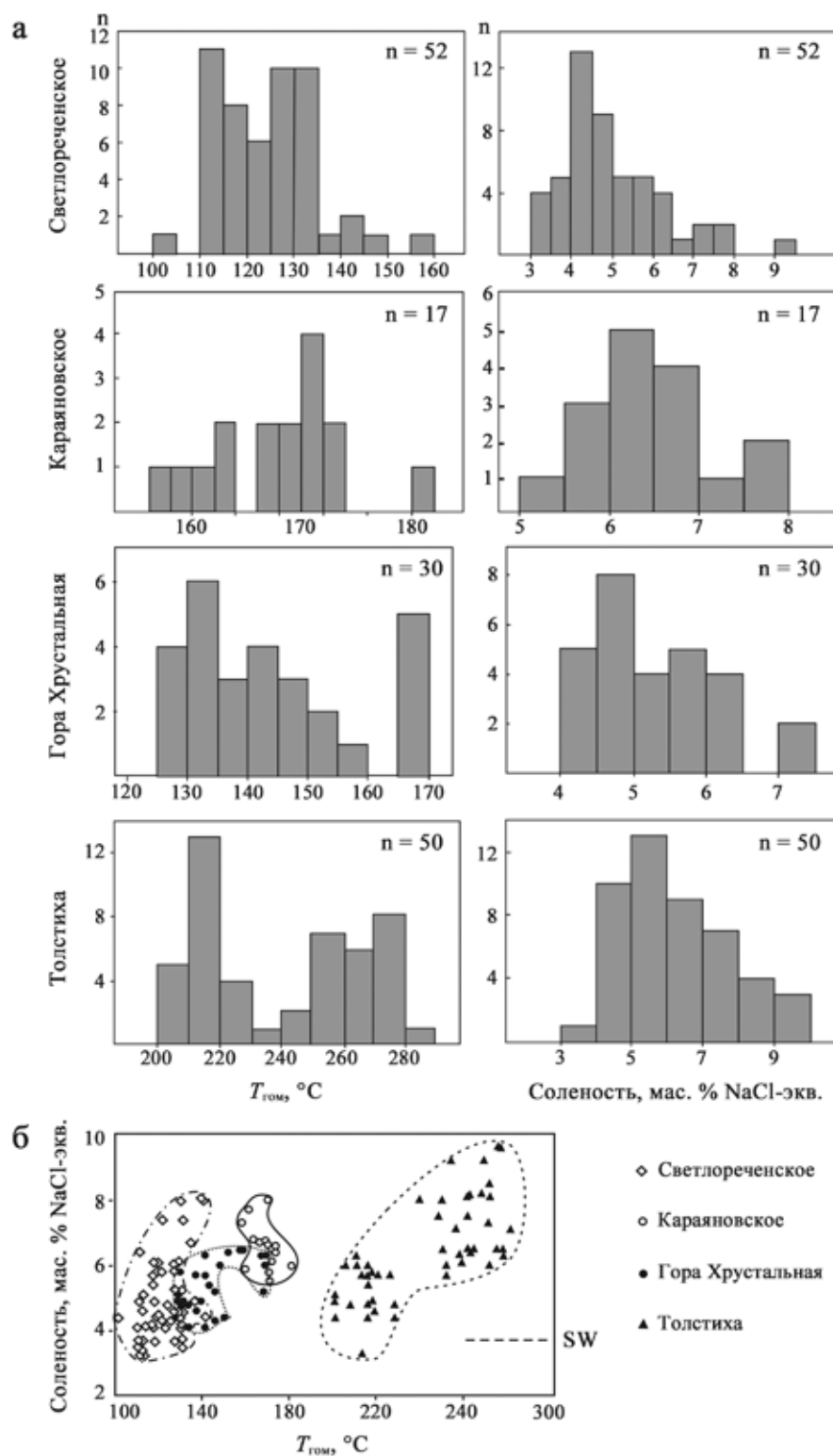
На диаграмме (см. рис. 4) фигуративные точки образуют два поля для двух генераций флюидных включений, различающихся по температурам гомогенизации и концентрации, которые могли быть захвачены в разное время.

**ИК-спектроскопические характеристики кварца.** Методом ИК-спектроскопии была исследована 81 плоскополированная пластина кварца. На рис. 5 представлены характерные инфракрасные спектры поглощения кварца в “водной” области (3000–3800 см<sup>–1</sup>).

Типичный спектр гигантозернистого молочно-белого кварца Толстихи имеет широкую интенсивную полосу с максимумом 3400 см<sup>–1</sup>, связанную с валентными колебаниями связи О–Н в молекулах воды. Линии обертонов колебаний решетки кварца и колебаний ОН-групп, связанных со структурным алюминием, слабо различимы. Спектр прозрачного кварца Светлореченского месторождения имеет гораздо меньшую по интенсивности полосу, связанную с молекулярной водой. На этом фоне отчетливо проявляются линии обертонов колебаний решетки Si–O в области 3200 и 3300 см<sup>–1</sup>. Кроме того, явно выделяется полоса с максимумом 3378 см<sup>–1</sup>, относимая к колебаниям группировки Al–OH (Kats, 1962; Kronenberg, 1994). Спектры кварца Горы Хрустальной и Караяновского месторождения по виду подобны таковым Светлореченского месторождения. Было выполнено разложение спектров на составляющие линии гауссовской формы. Произведен расчет концентрации молекулярной воды, гидроксильных групп, связанных с алюминием и углекислым газом. На рис. 6 и в табл. 2 приведены результаты расчета.

В кварце жилы Толстиха наблюдается большое количество молекулярной воды, ≈900 г/т. При этом также отмечается повышенное содержание углекислого газа. В кварце Караяновского месторождения концентрация H<sub>2</sub>O достигает 290, CO<sub>2</sub> –





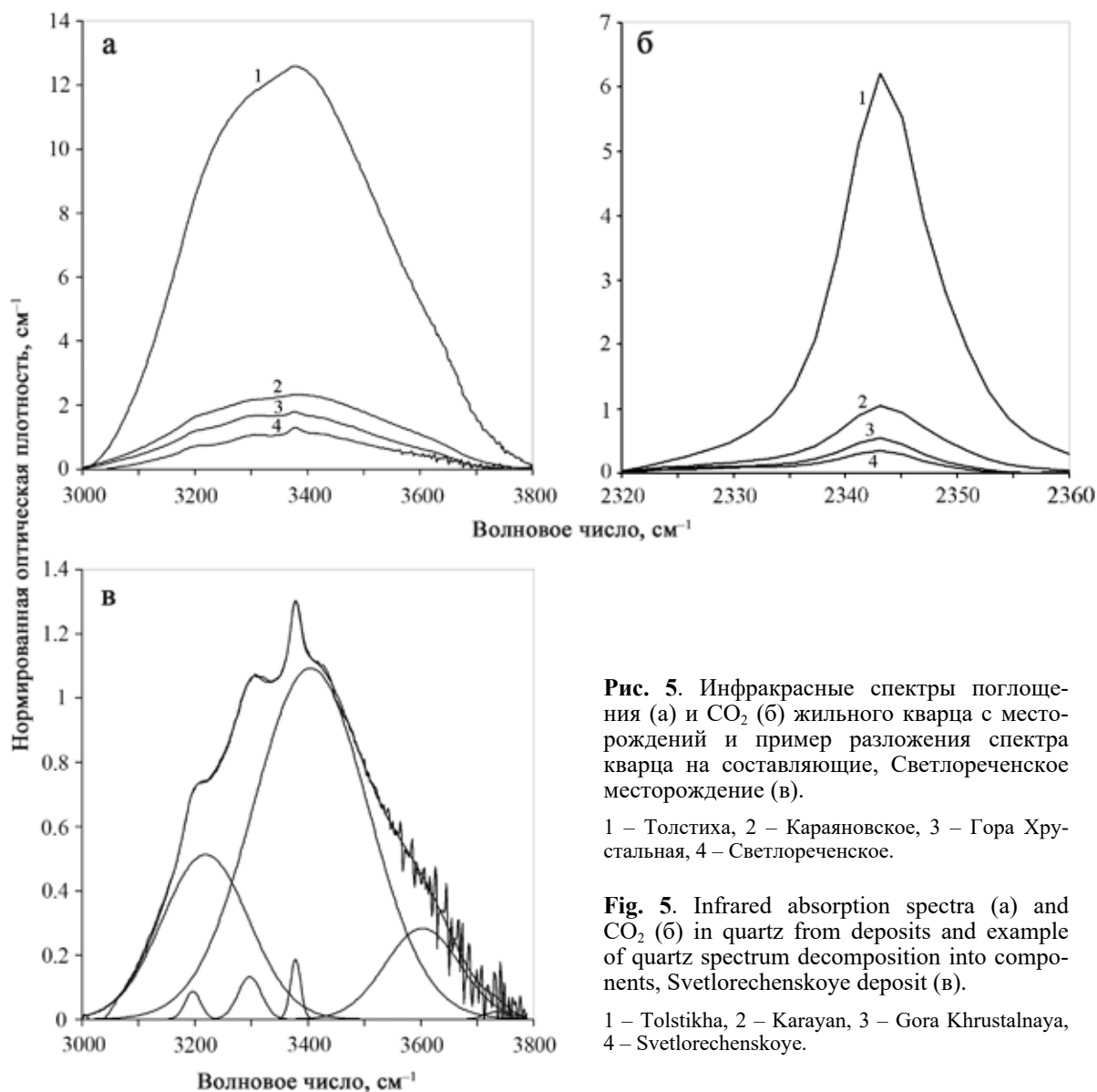
**Рис. 4.** Результаты исследования флюидных включений в кварце.

а – распределение значений концентраций солей и температур гомогенизации, б – диаграмма солености и температур гомогенизации включений; n – количество замеров; SW – соленость морской воды при 25°C.

**Fig. 4.** Results of fluid inclusions study in quartz.

а – distribution of salinities and homogenization temperatures, б – salinity vs homogenization temperatures plot; n – number of measurements; SW – seawater salinity at 25°C.





**Рис. 5.** Инфракрасные спектры поглощения (а) и  $\text{CO}_2$  (б) жильного кварца с месторождений и пример разложения спектра кварца на составляющие, Светлореченское месторождение (в).

1 – Толстикха, 2 – Караяновское, 3 – Гора Хрустальная, 4 – Светлореченское.

**Fig. 5.** Infrared absorption spectra (a) and  $\text{CO}_2$  (б) in quartz from deposits and example of quartz spectrum decomposition into components, Svetlorechenskoye deposit (в).

1 – Tolstikha, 2 – Karayan, 3 – Gora Khrustalnaya, 4 – Svetlorechenskoye.

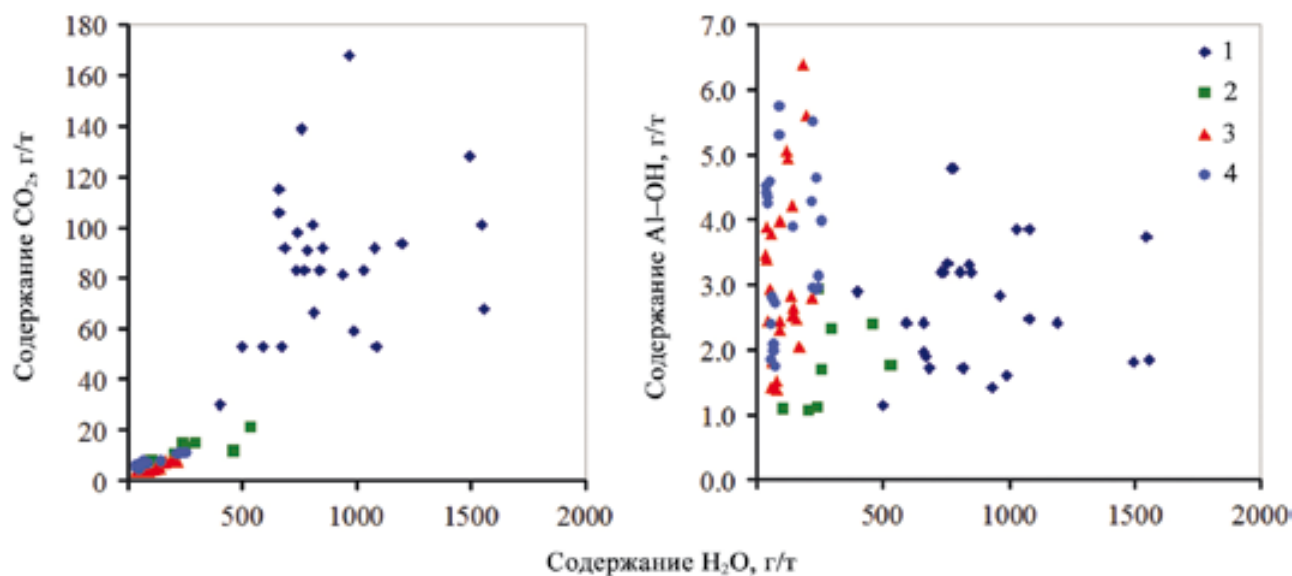
13 г/т. Среди всех изученных месторождений при наименьших концентрациях  $\text{H}_2\text{O}$  (<130 г/т) и  $\text{CO}_2$  (<8 г/т) в кварце Светлореченского месторождения и Горы Хрустальной отмечается максимальное содержание Al–ОН-группировок (3.6 г/т). В кварце Караяновского месторождения доля Al–ОН минимальная (1.8 г/т), в кварце жилы Толстикха Al–ОН достигает 2.7 г/т.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Общий диапазон температур минералообразования (гомогенизации включений) достаточно широк – от 100 до 280°C. Концентрация солей в растворах включений в кварце изученных месторождений изменяется в широких пределах – от 10.0 до 3.5 мас. % NaCl-экв. Повышение солёности может

быть следствием реакций дегидратации при диагенетических (метаморфических) преобразованиях или смешения растворов (Wilkinson, 2001) либо являться результатом кипения флюида с увеличением температуры (Pichavant et al., 1982; Wilkinson, 2001; и др.). Минералообразующие растворы имели простой Na-хлоридный или Na-K-хлоридный состав. Это можно объяснить кристаллизацией кварца из гидротермальных растворов в условиях постдиагенетического (метаморфического) преобразования пород.

В целом, диаграмма температур гомогенизации включений и концентраций солей в них показывает прямую зависимость между значениями температур гомогенизации и солёности, что также является маркером смешения гидротермального флюида с холодными низкосолёными водами экзоген-



**Рис. 6.** Соотношение концентраций группировок Al–ОН и CO<sub>2</sub> и молекулярной воды в кварце исследуемых месторождений кварцевого сырья.

1 – Толстиха, 2 – Караяновское, 3 – Гора Хрустальная, 4 – Светлореченское.

**Fig. 6.** The ratio of concentrations of Al–ОН and CO<sub>2</sub> groups and water in quartz of the studied quartz deposits.

1 – Tolstikha, 2 – Karayan, 3 – Gora Khrustalnaya, 4 – Svetlorechenskoye.

**Таблица 2.** Содержание воды, Al–ОН и углекислого газа в кварце

**Table 2.** Water, Al–ОН and carbon dioxide contents in quartz

Месторождение	Кол-во образцов	Содержание, г/г		
		H <sub>2</sub> O	Al–ОН	CO <sub>2</sub>
Толстиха	26	890 ± 300	2.7 ± 1.0	87 ± 30
Караяновское	8	290 ± 140	1.8 ± 0.7	13 ± 4
Светлореченское	23	130 ± 80	3.6 ± 1.2	8 ± 2
Гора Хрустальная	24	105 ± 50	3.2 ± 1.3	5 ± 1

ного происхождения. Сходный генезис исследованных месторождений отражен в пересечении полей значений параметров флюидных включений в кварце.

Полученные термобарогеохимические данные укладываются в интервал температур и солености (200–400°C и 0.5–6.0 мас. %) образования месторождения Гора Хрустальная, полученный ранее Н.К. Никандровой с соавторами (2014) для серого полупрозрачного и молочно-белого кварца. В этой работе были проанализированы первичные и вторичные трубчатые флюидные включения и сделан вывод, что объект является одностадийным гидротермальным месторождением.

По содержанию молекулярной воды и углекислого газа в кварце месторождения условно делятся на три группы: максимальные концентрации (Толстиха), средние (Караяновское) и небольшие (Гора Хрустальная и Светлореченское). Также наблюда-

ется неоднородность по содержанию H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> в пределах каждого месторождения. В кварце Горы Хрустальной и Светлореченского месторождения при относительно небольших концентрациях молекулярной воды и углекислого газа отмечаются наибольшие концентрации Al–ОН-групп. Как показано ранее, в молочно-белом кварце жилы Толстиха имеется множество крупных и мелких флюидных включений, именно в них находится основная доля воды и CO<sub>2</sub>.

Ранее авторами был исследован крупно- и гигантозернистый гидротермальный кварц Аркаимской золотоносной площади методами ИК-спектроскопии, газовой хроматографии и термобарогеохимии (Штенберг, Анкушева, 2015). На Аркаимской площади сверху вниз выделены три зоны окварцевания, кварц которых также неодинаков по концентрациям молекулярной воды и Al–ОН. В гематит-кварцевых постройках по направлению

от жил подошвы к кровле увеличивается концентрация воды. Концентрация углекислого газа, как и молекулярной воды, возрастает от нижних зон к верхним. Данные ИК-спектроскопии позволили подтвердить существенно водный состав включений, а также наличие углекислого газа во включениях.

Кроме того, кварц различных месторождений имеет характерное соотношение воды и Al–ОН, что связано с условиями образования месторождений и степенью развития на них процессов метаморфизма.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена количественная характеристика содержания молекулярной воды, ОН-групп и углекислого газа в жильном кварце основных месторождений Уральской кварцевоносной провинции методом инфракрасной фурье-спектроскопии. Для гигантозернистого молочно-белого кварца характерны высокие содержания молекулярной воды и углекислого газа наряду со средними значениями концентрации группировок Al–ОН. По содержанию Al–ОН-группировок гигантозернистый молочно-белый кварц жилы Толстиха (Южный Урал) и мелкозернистый кварц Караяновского месторождения близки к гранулированному кварцу (Штенберг, 2014), используемому в промышленности для получения кварцевых концентратов высокой степени чистоты.

Данные исследований флюидных включений указывают на проявление стадийности минералообразования при формировании кварцевых жил. Об этом свидетельствует бимодальный характер распределения значений температур гомогенизации и солености растворов флюидных включений.

Образование кварцевых жил месторождений жильного кварца Южного Урала происходило из сходных по составу и термобарогеохимическим параметрам водно-хлоридных флюидов. Во флюидных включениях захвачены гомогенные NaCl–H<sub>2</sub>O, низко-среднесоленые (3–9 мас. % NaCl-экв.) флюиды с температурами от 100 до 280°C. Кварц месторождения Толстиха формировался при более высоких температурах – 200–300°C.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анфилов В.Н., Кабанова Л.Я., Игуменцева М.А., Никандрова Н.К. (2017) Геологическое строение, петрография и генезис кварцевого месторождения Гора Хрустальная (Средний Урал). *Отеч. геол.*, (1), 68–74.
- 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 месторождения Жила Толстиха. *Разведка и охрана недр*, (12), 12–17.
- Бородаевский Н.И. (1948) Типы золоторудных месторождений, подчиненных ультраосновным породам в Миасском и Учалинском районах Южного Урала. *200 лет золотой промышленности Урала*. (Ред. А.А. Иванова, И.С. Рожкова). Свердловск: УФАН СССР, 316–330.
- Вертушков Г.Н. (1955) Метаморфизм жильного кварца. *Тр. СГИ. Материалы по геологии Урала*, 22, 193–201.
- Вертушков Г.Н., Борисков Ф.Ф., Емлин Э.Ф. (1970) Жильный кварц восточного склона Урала. Свердловск: СГИ, 103 с.
- Глаголев Е.В. (2006) Месторождение кварца Гора Хрустальная. *Минеральное сырье Урала*, 2(5), 40 с.
- Грицук А.Н. (2003) Петрохимические особенности и рудоносность Таловского габбро-гипербазитового массива. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 148 с.
- Емлин Э.Ф., Синкевич Г.А., Якшин В.И. (1988) Жильный кварц Урала в науке и технике. Свердловск: Средне-Урал. кн. изд-во, 272 с.
- Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т. (2016) Фундаментальные проблемы геологии Южного Урала. Уфа: Гилем, 312 с.
- Криницкий Д.Д., Криницкая В.М. Геологическое строение района среднего течения р. Сакмары. (1963) Отчет Михайловской ГСП о геологической съемке м-ба 1 : 50 000 за 1961–1962 гг. Уфа: Башкиргеология.
- Кузнецов С.К. (1998) Жильный кварц Приполярного Урала. СПб.: Наука, 203 с.
- Кузнецов С.К., Лютоев В.П., Шанина С.Н., Светова Е.Н., Сокерина Н.В. (2011) Особенности качества жильного кварца уральских месторождений. *Изв. Коми НЦ УрО РАН*, 4(8), 65–72.
- Ленных В.И. (1963) Петрография, особенности метаморфизма и абсолютный возраст пород максютовского комплекса. *Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала. Тр. I Урал. петрограф. сов.*, вып. 3. Свердловск: УФАН СССР, 245–255.
- Мельников Е.П. (1988) Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца. М.: Недра, 216 с.
- Никандрова Н.К., Анфилов В.Н., Игуменцева М.А., Кабанова Л.Я. (2014) Температуры гомогенизации и состав газовой-жидких включений в кварце месторождения Гора Хрустальная (Средний Урал). *Докл. АН*, 456(1), 91.
- Поленов Ю.А. (2008) Эндогенные кварцево-жильные образования Урала. Екатеринбург: УГГА, 271 с.
- Поленов Ю.А., Огородников В.Н., Савичев А.Н. (2014) Кварц жил выполнения Урала. *Изв. УГТУ*, 3(35), 5–11.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Реддер Э. (1987) Флюидные включения в минералах. Т. 1. М.: Мир, 560 с.
- Сигов А.П. (1948) Золоторудные месторождения Северо-Миасской группы. *200 лет золотой промышленности Урала*. (Ред. А.А. Иванова, И.С. Рожкова). Свердловск: УФАН СССР, 296–304.
- Шмелев В.Р., Иванов К.С., Карстен Л.А. (1995) О метаморфизме гипербазитов максютовского комплекса. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 142, 106–108.
- Штенберг М.В. (2014) Вода и водородсодержащие груп-

- пировки в жильном кварце уральских месторождений кварцевого сырья. *Литосфера*, (3), 102-111.
- Штенберг М.В., Анкушева Н.Н. (2015) Кварц гидротермальных жил Аркаимской площади (Южный Урал) по данным колебательной спектроскопии, газовой хроматографии и термобарогеохимии. *Минералогия*, (4), 112-122.
- Bachheimer J.P. (2000) Comparative NIR and IR examination of natural, synthetic, and irradiated synthetic quartz. *Europ. J. Mineral.*, **12**(5), 975-986.
- Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O–NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. (Eds B. de Vivo, M.L. Frezzotti). Blacksburg: Virginia Tech, 117-130.
- Davis D.W., Lowenstein T.K., Spenser R.J. (1990) Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl–H<sub>2</sub>O, NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O, NaCl–MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O and CaCl<sub>2</sub>–NaCl–H<sub>2</sub>O. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**(3), 591-601.
- Famin V., Nakashima S., Jolivet L., Philippot P. (2004) Mobility of metamorphic fluids inferred from infrared microspectroscopy on natural fluid inclusions: the example of Tinos Island, Greece. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **146**(4), 736-749.
- Gleeson S.A., Roberts S., Fallick A.E., Boyce A.J. (2008) Micro-Fourier Transform Infrared (FT-IR) and  $\delta D$  value investigation of hydrothermal vein quartz: Interpretation of fluid inclusion  $\delta D$  values in hydrothermal systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**, 4595-4606.
- Gotte T., Pettke T., Ramseyer K., Koch-Muller M., Mullis J. (2011) Cathodoluminescence properties and trace element signature of hydrothermal quartz: A fingerprint of growth dynamics. *Amer. Miner.*, **96**, 802-813.
- Grzechnik A., Zimmermann H.D., Hervig R.L., King P.L., McMillan P.F. (1996) FTIR micro-reflectance measurements of the CO<sub>3</sub><sup>2+</sup> ion content in basanite and leucite glasses. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **125**, 311-318.
- Kats A. (1962) Hydrogen in Alpha-quartz. *Philips Res. Rep.*, **17**, 201-279.
- Koch-Muller M., Dera P., Fei Y., Reno B., Sobolev N., Hauri E., Wysoczanski R. (2003) OH<sup>-</sup> in synthetic and natural coesite. *Amer. Miner.*, **88**, 1436-1445.
- Koch-Muller M., Rhede D. (2010) IR absorption coefficients for water in nominally anhydrous high-pressure minerals. *Amer. Miner.*, **95**, 770-775.
- Kronenberg A.K. (1994) Hydrogen speciation and chemical weakening of quartz. *Rev. Mineral.*, **29**, 123-176.
- Miallier D., Gibert F., Fain J., Pilleyre T., Sanzelle S. (2001) Fluid inclusions in quartz: interference with thermoluminescence and its application to dating. *Quater. Sci. Rev.*, **20**, 901-905. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(00\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00030-5)
- Miyoshi N., Yamaguchi Y., Makino K. (2005) Successive zoning of Al and H in hydrothermal vein quartz. *Amer. Miner.*, **90**(2-3), 310-315.
- Mohan M.R., Prasad P.S.R. (2002) FTIR investigation on the fluid inclusions in quartz veins of the Penakacherla Schist Belt. *Curr. Sci.*, **83**(6), 755-760.
- Moore G., Chizmeshya A., McMillan P.F. (2000) Calibration of a reflectance FTIR method for determination of dissolved CO<sub>2</sub> concentration in rhyolitic glasses. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**(20), 3571-3579.
- Pichavant M., Ramboz C., Weisbrod A. (1982) Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data. I. Phase equilibria analysis – a theoretical and geometrical approach. *Chem. Geol.*, **37**, 1-27.
- Spenser R.J., Moller N., Weare J.N. (1990) The prediction of mineral solubilities in mineral waters: a chemical equilibrium model for the Na–K–Ca–Mg–Cl–SO<sub>4</sub> system at temperatures below 25°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**(3), 575-590.
- Sterner S.M., Hall D.L., Keppler H. (1995) Compositional re-equilibration of fluid inclusions in quartz. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **119**, 1-15.
- Wilkinson J.J. (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, **55**, 229-272.
- Zecchini P., Yamni K., Viard B., Dothee D. (1994) A new method for the determination of concentrations of impurities in quartz crystals. *IEEE Int. frequency control symp.*, 91-98.

## REFERENCES

- Anfilogov V.N., Kabanova L.Ya., Igumentseva M.A., Nasyrov R.Sh., Shtenberg M.V., Lebedev A.S., Ryzhkov V.M., Ardyshev P.A. (2012) Geological structure, petrography and technological characteristics of quartz from the Zhila Tolstikha deposit. *Razvedka i Okhrana Nedr.*, (12), 12-17. (In Russ.)
- Anfilogov V.N., Kabanova L.Ya., Igumentseva M.A., Nikandrova N.K. (2017) Geological structure, petrography and genesis of the quartz deposit Gora Khrustalnaya (Middle Urals). *Otech. Geol.*, (1), 68-74. (In Russ.)
- Bachheimer J.P. (2000) Comparative NIR and IR examination of natural, synthetic, and irradiated synthetic quartz. *Europ. J. Mineral.*, **12**(5), 975-986.
- Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O–NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. (Eds B. de Vivo, M.L. Frezzotti). Blacksburg, Virginia Tech, 117-130.
- Borodaevskii N.I. (1948) Types of gold deposits subordinated to ultramafic rocks in the Miass and Uchalinsky regions of the Southern Urals. *200 years of gold industry in the Urals*. (Eds A.A. Ivanov, I.S. Rozhkov). Sverdlovsk, Ufan SSSR, 316-330. (In Russ.)
- Davis D.W., Lowenstein T.K., Spenser R.J. (1990) Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl–H<sub>2</sub>O, NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O, NaCl–MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O and CaCl<sub>2</sub>–NaCl–H<sub>2</sub>O. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**(3), 591-601.
- Emlin E.F., Sinkevich G.A., Yakshin V.I. (1988) Vein quartz of Urals in science and technology. Sverdlovsk, Sredne-Ural. kn. izd-vo, 272 p. (In Russ.)
- Famin V., Nakashima S., Jolivet L., Philippot P. (2004) Mobility of metamorphic fluids inferred from infrared microspectroscopy on natural fluid inclusions: the example of Tinos Island, Greece. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **146**(4), 736-749.
- Glagolev E.V. (2006) Quartz deposit Gora Khrustalnaya. *Mineral'noe syr'e Urala*, **2**(5), 40 p. (In Russ.)
- Gleeson S.A., Roberts S., Fallick A.E., Boyce A.J. (2008) Micro-Fourier Transform Infrared (FT-IR) and  $\delta D$  value investigation of hydrothermal vein quartz: Interpretation of fluid inclusion  $\delta D$  values in hydrothermal systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**, 4595-4606.

- Gotte T., Pettke T., Ramseyer K., Koch-Muller M., Mullis J. (2011) Cathodoluminescence properties and trace element signature of hydrothermal quartz: A fingerprint of growth dynamics. *Amer. Miner.*, **96**, 802-813.
- Gritsuk A.N. (2003) Petrogeochemical features and ore content of the Talovsky gabbro-hyperbasite massif. Cand. geol. and min. Sci. diss. Moscow, Moscow State Univ., 148 p. (In Russ.)
- Grzechnik A., Zimmermann H.D., Hervig R.L., King P.L., McMillan P.F. (1996) FTIR micro-reflectance measurements of the CO<sub>3</sub><sup>2±</sup> ion content in basanite and leucite glasses. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **125**, 311-318.
- Kats A. (1962) Hydrogen in Alpha-quartz. *Philips Res. Rep.*, **17**, 201-279.
- Kazantsev Yu.V., Kazantseva T.T. (2016) Fundamental problems of Southern Urals geology. Ufa, Gilem Publ., 312 p. (In Russ.)
- Koch-Muller M., Dera P., Fei Y., Reno B., Sobolev N., Hauri E., Wysoczanski R. (2003) OH<sup>-</sup> in synthetic and natural coesite. *Amer. Miner.*, **88**, 1436-1445.
- Koch-Muller M., Rhede D. (2010) IR absorption coefficients for water in nominally anhydrous high-pressure minerals. *Amer. Miner.*, **95**, 770-775.
- Krinitskii D.D., Krinitskaya V.M. (1963) Geological structure of middle current of Sakmara River. Report of Mikhailovskaya Partie on geological survey 1 : 50 000 scale, 1961–1962. Ufa, Bashkirgeologiya. (In Russ., unpublished)
- Kronenberg A.K. (1994) Hydrogen speciation and chemical weakening of quartz. *Rev. Mineral.*, **29**, 123-176.
- Kuznetsov S.K. (1998) Vein quartz in the Subpolar Urals. St.Petersburg, Nauka Publ., 203 p. (In Russ.)
- Kuznetsov S.K., Lyutov V.P., Shanina S.N., Svetova E.N., Sokerina N.V. (2011) Features of the quality of vein quartz from the Ural deposits. *Izv. Komi NTs UrO RAN*, **4**(8), 65-72. (In Russ.)
- Lennykh V.I. (1963) Petrography, features of metamorphism and absolute age of rocks of the Maksyutov Complex. *Magmatizm, metamorfizm, metallogeniya Urala: Proceedings of the I Ural petrographic meeting*, Iss. 3. Sverdlovsk, UFAN SSSR, 245-255. (In Russ.)
- Melnikov E.P. (1988) Geology, genesis and industrial types of quartz deposits. Moscow, Nedra Publ., 216 p. (In Russ.)
- Miallier D., Gibert F., Fain J., Pilleyre T., Sanzelle S. (2001) Fluid inclusions in quartz: interference with thermoluminescence and its application to dating. *Quater. Sci. Rev.*, **20**, 901-905. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(00\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00030-5)
- Miyoshi N., Yamaguchi Y., Makino K. (2005) Successive zoning of Al and H in hydrothermal vein quartz. *Amer. Miner.*, **90**(2-3), 310-315.
- Mohan M.R., Prasad P.S.R. (2002) FTIR investigation on the fluid inclusions in quartz veins of the Penakacherla Schist Belt. *Curr. Sci.*, **83**(6), 755-760.
- Moore G., Chizmeshya A., McMillan P.F. (2000) Calibration of a reflectance FTIR method for determination of dissolved CO<sub>2</sub> concentration in rhyolitic glasses. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**(20), 3571-3579.
- 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 Khrustalnaya deposit (Middle Urals). *Dokl. Akad. Nauk*, **456**(1), 554-557. (In Russ.)
- Pichavant M., Ramboz C., Weisbrod A. (1982) Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data. I. Phase equilibria analysis – a theoretical and geometrical approach. *Chem. Geol.*, **37**, 1-27.
- Polenov Yu.A. (2008) Endogenous quartz-vein formations of the Urals. Ekaterinburg, UGGGA, 271 p. (In Russ.)
- Polenov Yu.A., Ogorodnikov V.N., Savichev A.N. (2014) Quartz from fulfillment veins of the Urals. *Izv. UGGU*, **3**(35), 5-11. (In Russ.)
- Puchkov V.N. (2010) Geology of the Urals and Cis-Urals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa, DizajnPoligrafServis Publ., 280 p. (In Russ.)
- Roedder E. (1987) Fluid inclusions in minerals. V. 1. Moscow, Mir Publ., 560 p. (In Russ.)
- Shmelev V.R., Ivanov K.S., Karsten L.A. (1995) On the metamorphism of ultramafic rocks of the Maksyutov Complex. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 142, 106-108. (In Russ.)
- Shtenberg M.V. (2014) Water and hydrogen-containing groups in vein quartz from Ural quartz deposits. *Lithosphere (Russia)*, (3), 102-111. (In Russ.)
- Shtenberg M.V., Ankusheva N.N. (2015) Quartz from hydrothermal veins of the Arkaim Area, South Urals: data on vibrational spectroscopy, gas chromatography, and fluid inclusions. *Mineralogiya*, (4), 112-122. (In Russ.)
- Sigov A.P. (1948) Gold-ores deposits of North-Miass. Sverdlovsk, UFAN SSSR, 296-304. (In Russ.)
- Spenser R.J., Moller N., Weare J.N. (1990) The prediction of mineral solubilities in mineral waters: a chemical equilibrium model for the Na–K–Ca–Mg–Cl–SO<sub>4</sub> system at temperatures below 25°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**(3), 575-590.
- Sterner S.M., Hall D.L., Keppler H. (1995) Compositional re-equilibration of fluid inclusions in quartz. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **119**, 1-15.
- Vertushkov G.N. (1955) Metamorphism of vein quartz. *Tr. SGI. Materialy po Geologii Urala*, **22**, 193-201. (In Russ.)
- Vertushkov G.N., Boriskov F.F., Emlin E.F. (1970) Vein quartz from the eastern slope of the Urals. Sverdlovsk, SGI, 103 p. (In Russ.)
- Wilkinson J.J. (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, **55**, 229-272.
- Zecchini P., Yamni K., Viard B., Dothee D. (1994) A new method for the determination of concentrations of impurities in quartz crystals. *IEEE Int. frequency control symp.*, 91-98.