

УДК 549.514.51: 553.08

**КВАРЦ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ЖИЛ АРКАИМСКОЙ ПЛОЩАДИ
(ЮЖНЫЙ УРАЛ) ПО ДАННЫМ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ,
ГАЗОВОЙ ХРОМАТОГРАФИИ И ТЕРМОБАРОГЕОХИМИИ**

М.В. Штенберг¹, Н.Н. Анкушева^{1,2}

¹*Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, shtenberg@mineralogy.ru*

²*Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе*

**QUARTZ FROM HYDROTHERMAL VEINS
OF THE ARKAIM AREA, SOUTH URALS: DATA ON VIBRATIONAL
SPECTROSCOPY, GAS CHROMATOGRAPHY, AND FLUID INCLUSIONS**

M.V. Shtenberg¹, N.N. Ankusheva^{1,2}

¹*Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, shtenberg@mineralogy.ru*

²*South Urals State University, Miass Branch*

Исследован кварц Аркаимской площади на Южном Урале, принадлежащий двум разновозрастным вулканогенно-гидротермальным системам: среднему девону (золото-сульфидно-кварцевые зоны и гематит-кварцевая постройка) и нижнему карбону (сульфидно-кварцевые жилы в трахибазальтах, трахириолитах и дайках микрограносиенитов). Летучие компоненты в кварце представлены H₂O, CO₂, CH₄ и N₂. Концентрации воды и углекислого газа во флюидных включениях и кварце увеличиваются от нижних уровней систем к верхним: от Восточной к Западной золотоносным зонам и от подошвы к кровле гематит-кварцевой постройки. В раннекаменноугольном комплексе максимальные значения воды и углекислоты присущи кварцу из жилы в дайке микрограносиенитов. При этом наблюдается уменьшение концентраций углеводородов (CH₄) в кварце из жил вверх по разрезу вулканических комплексов. Минералообразующие растворы имели преимущественно водный NaCl и NaCl-KCl состав. Солёность растворов также вдвое увеличивается снизу-вверх в сульфидно-кварцевых зонах, гематит-кварцевой постройке и жилах в трахибазальтах и трахириолитах.

Илл. 5. Табл. 3. Библ. 22.

Ключевые слова: Аркаимская площадь, кварц, летучие компоненты, инфракрасная спектроскопия, Рамановская спектроскопия, газовая хроматография, термобарогеохимия.

Quartz veins from the Arkaim area, South Urals, belong to two volcanogenic-hydrothermal systems: Middle Devonian (gold-sulfide-quartz zones and hematite-quartz edifice) and Early Carboniferous (sulfide-quartz veins in trachybasalts, trachyrhyolites, and microgranosyenite dykes). Volatiles in quartz include H₂O, CO₂, CH₄, and N₂. The H₂O and CO₂ contents in the fluid inclusions increase from the lower to upper levels of the systems: from the Eastern to Western gold-sulfide-quartz zones and from the bottom to top of the hematite-quartz edifice. In the Early Carboniferous system, the maximum H₂O and CO₂ contents are typical of quartz vein from the microgranosyenite dyke. In addition, the CH₄ contents in the fluid inclusions decrease upward the section of the volcanic complexes. Hydrotherms were NaCl- and NaCl-KCl-dominant aqueous fluids. Their salinity increases twice upward the section in gold-sulfide-quartz zones, hematite-quartz edifice, and veins in trachybasalts and trachyrhyolites.

Figures 5. Tables 3. References 22.

Key words: Arkaim area, quartz, volatiles, IR spectroscopy, Raman spectroscopy, gas chromatography, fluid inclusion study.

Введение

Жильный кварц является одним из наиболее распространённых минералов в земной коре. В то же время, благодаря своим физико-химическим особенностям и свойствам, в его составе и структуре чётко прослеживаются этапы развития геологической среды. В связи с этим кварц всё чаще вовлекается в сферу практического использования не только как минеральное сырьё, но и как источник геологической информации, позволяющей восстанавливать последовательность и содержание геологических процессов. Особое внимание ряд исследователей уделил взаимосвязи содержания углекислого газа и молекулярной воды в кварце с присутствием золота (Бархударян, Гребенчиков, 1974; Сокерина и др., 2012). Они отмечают, что большие концентрации CO_2 и H_2O являются характерными особенностями золоторудного кварца. Таким образом, исследование кварца имеет не только практическое значение, но оказывает существенное влияние на развитие геологической науки в целом.

Целью настоящего исследования стало определение содержания и структурного положения воды и других летучих компонентов (углекислого газа, азота, углеводородов) в первично-кристаллизованном кварце из жил Аркаимской площади (12 образцов) и сопоставление с физико-химическими условиями формирования кварца по данным термобарогеохимии.

Методика исследований

Регистрация инфракрасных спектров производилась с плоскополированных пластинок кварца толщиной 0.3-0.9 мм на Фурье-спектрометре Nicolet-6700 Thermo Scientific, оснащённом микроскопом Continuum для выполнения локальных (до 20 мкм) измерений. Для зарегистрированных спектров выполнялась процедура коррекции базовой линии, и полученные спектры пропускания пересчитывались в спектры поглощения (оптическую плотность) с нормировкой на толщину образца. Обработка спектров производилась с помощью программного пакета OMNIC Thermo Nicolet и программы Peakfit. Методика обработки и используемые коэффициенты пересчета детально описаны в работе (Штенберг, 2014). Дополнительно с целью установления особенностей удаления воды и углекислого газа был проведен пошаговый высокотемпературный отжиг пластинок кварца в муфель-

ной печи ПКЛ-1.2 до температуры 1200 °С с шагом 100 °С, время выдержки составляло 2 часа.

Спектры комбинационного рассеяния флюидных включений (80 спектров) в кварце были зарегистрированы на спектрометре Horiba Lab Ram HR 800 с полупроводниковым детектором, возбуждение производилось твердотельным лазером (532 нм) мощностью 50 мВт, 10 сканов по 10 секунд (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, аналитик Н.Н. Анкушева, при содействии к.г.-м.н. С.З. Смирнова).

Методом газовой хроматографии был проанализирован валовый газовый состав флюидных включений в кварце (ГЕОХИ РАН, г. Москва, аналитик О.Ф. Миронова, 11 образцов). Анализы выполнены на газовом хроматографе серии «Цвет-100» с пиролитической приставкой П-75. Содержимое включений извлекалось термическим вскрытием и подавалось на детекторы: катарометр для определения CO_2 и H_2O и пламенно-ионизационный – для определения CH_4 и тяжелых углеводородов. В качестве сорбента использовался «Полисорб-1». Навеска для поинтервального анализа составляла 50–150 мг.

Для определения температуры, солёности и состава флюидных включений (250 включений) проведены термобарогеохимические исследования по стандартной методике (Ермаков, Долгов, 1979; Реддер, 1987). Включения исследовались в прозрачно-полированных шлифах в микрокриотермокамере THMSG-600 (Linkam), позволяющей производить измерения температур фазовых переходов в интервале -196 до +600 °С, с микроскопом Olympus (геологический факультет ЮУрГУ, г. Миасс). Управляющее программное обеспечение LinkSys V-2.39. Точность измерений ± 0.1 °С в интервале температур -20...+80 °С и ± 1 °С за пределами этого интервала. Солевой состав растворов во включениях оценивался по температурам эвтектик (Борисенко, 1977). 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 температурам плавления последних кристаллических фаз (Bodnar, Vityk, 1994).

Объекты исследований

Аркаимская площадь располагается в пределах Магнитогорской металлогенической зоны на Южном Урале (рис. 1). В палеозойских вулканических комплексах установлены золотоносные зоны

сульфидно-кварцевого оруденения в андезибазальтах, гематит-кварцевые породы в перекрывающих алевролитах и сульфидно-кварцевые жилы в трахибазальтах, трахириолитах и дайках микрограносиенитов (Зайков и др., 2001).

Как установлено ранее, золото-сульфидно-кварцевая минерализация в среднедевонских вулканитах Аркаимской площади сопоставима с золото-серебряным или золото-сульфидным (муртыктинским) типами месторождений (Михайлов и др., 2003). Раннекаменноугольные субщелочные вулканы перспективны на барит-полиметаллическое и золотое оруденение (Зайков, 1999).

Среднедевонский вулканический комплекс представлен андезибазальтами гумбейской свиты (D_2gm_1), в которых локализованы три золотоносные зоны сульфидно-кварцевого оруденения (Зайков и др., 2009). Они залегают согласно напластованию вмещающих пород и охватывают разрез общей мощностью 800 м (рис. 2).

Восточная зона в основании гумбейской свиты имеет длину около 1 км, мощность – 150–200 м. Вмещающими породами являются пироксеновые андезибазальты, подверженные пиритизации и окварцеванию. Кварц образует сеть тонких кварцевых

прожилков белого цвета, иногда с просечками хлорита и розового кварца с кристаллами лимонита по пириту; в окварцованных и лимонитизированных породах. Кварц серовато-белый, крупно- и среднезернистый, плотный, комковатого сложения, часто полупрозрачный друзовидный, с редкими мелкими выделениями гидрооксидов железа и пленкой карбонатов по поверхности. Также присутствует серый кавернозный кварц с пустотами и порами, с большим количеством гидрооксидов железа на поверхности и по трещинам.

Центральная зона представлена прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией в кровле гумбейской свиты. В её восточной части вскрыты кварцевые маломощные прожилки с рассеянной вкрапленностью халькопирита и налетами малахита. Кварц формирует маломощные прожилки с редкой рассеянной вкрапленностью халькопирита и налетами медной зелени.

Западная зона приурочена к алевролитам и вулканомиктовым песчаникам новобуранной свиты (D_2nb). Она имеет мощность 150–300 м и длину 1 км, в её основании развиты серицит-кварцевые метасоматиты с кварцевыми жилами. Их мощность варьирует от 3–5 до 50 см, протяжённость 10–15 м.

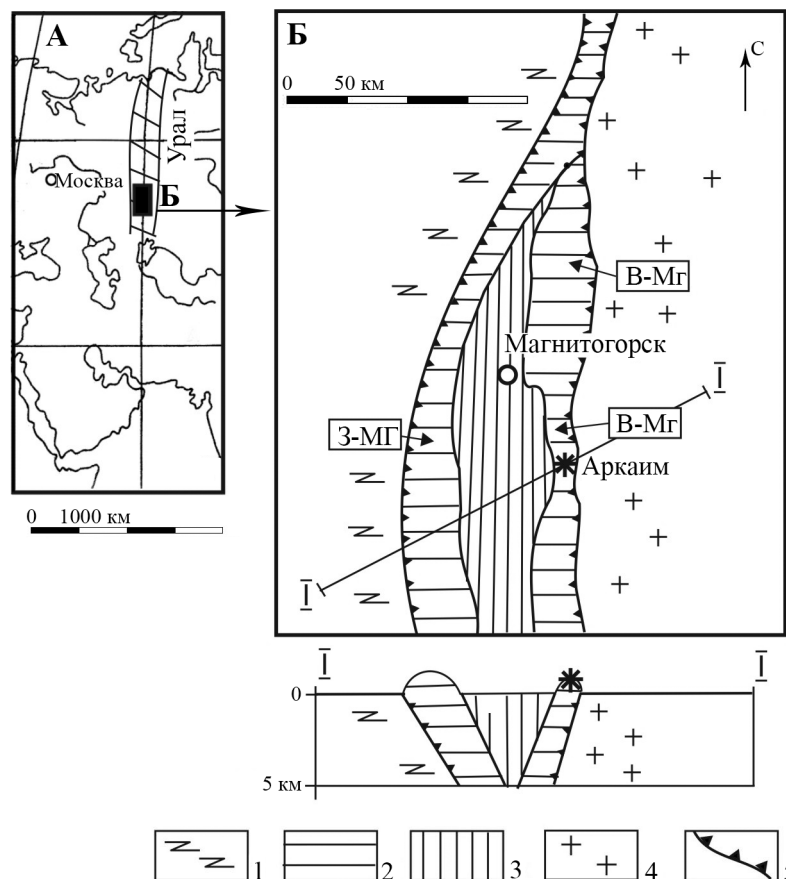


Рис. 1. Схема размещения Аркаимской площади в палеогеодинамических структурах Южного Урала (по: Зайков и др., 2001).

А – географическое положение; Б – геодинамическая схема.

1 – восточный фланг Восточно-Европейской платформы; 2 – палеоостровные дуги (З-МГ – Западно-Магнитогорская, В-Мг – Восточно-Магнитогорская); 3 – Сибайский междугорный бассейн; 4 – Восточно-Уральское поднятие; 5 – зоны Главного Уральского и Восточно-Уральского разломов. Звездочкой (*) показана Аркаимская площадь.

Fig. 1. Location of the Arkaim area in paleodynamic structures of the South Urals.

А – geographical setting; Б – geodynamic scheme.

1 – eastern flank of the East European Platform; 2 – paleoisland arcs (З-МГ – West Magnitogorsk, В-Мг – East Magnitogorsk); 3 – Sibay interarc basin; 4 – East Ural uplift; 5 – Main Ural and East Ural Fault zones. *, Arkaim area.

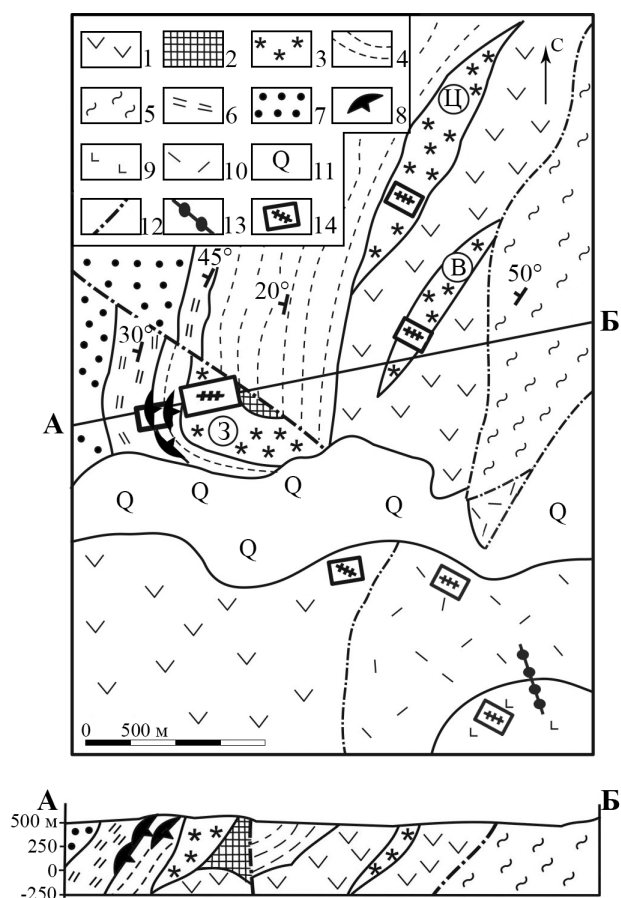


Рис. 2. Схема геологического строения Аркаимской площади (по: Зайков и др., 2009).

1–2 – гумбейская свита (D_2gm): 1– андезибазальты и вулканогенно-обломочные породы, 2 – силициты; 3 – золото-сульфидно-кварцевые зоны: В – Восточная, Ц – Центральная; 3 – Западная; 4 – серицит-кварцевые метасоматиты, 5–8 – новобуранная свита (D_2nb): 5 – алевролиты; 6 – яшмы, 7 – песчаники; 8 – гематит-кварцевые постройки; 9 – трахибазальты березовской свиты (C_1br_1); 10 – трахириолиты греховской свиты (C_1gr_1); 11 – четвертичные отложения; 12 – разломы; 13 – дайка микрограносиенитов (внемасштабный знак); 14 – кварцевые жилы (внемасштабный знак).

Fig. 2. Geological scheme of the Arkaim area (after Zaykov et al., 2009).

1–2–Gumbeyka Formation (D_2gm): 1–basaltic andesites and volcanoclastic rocks, 2 – basalts, silicites; 3 – gold-sulfide-quartz zones: В – Eastern, Ц – Central; 3 – Western; 4 – sericite-quartz metasomatites, 5–8 – Novoburannaya Formation (D_2nb): 5 – siltstones; 6 – jaspers, 7 – sandstones; 8 – hematite-quartz rocks; 9 – trachybasalts of the Beresovskaya Formation (C_1br_1); 10 – trachyrhyolites of the Grekhovskaya Formation (C_1gr_1); 11 – Quaternary sediments; 12 – faults; 13 – microgranosyenite dyke (out of scale); 14 – quartz veins (out of scale).

Мелкие жилки сгруппированы в отдельные субпараллельные рои, находящиеся на удалении 10–15 м друг от друга. Текстура кварца массивная, реже – мелкоблочная, иногда с друзовыми полостями. Цвет светло-серый, местами отмечены молочно-белые полосы. Величина зёрен не превышает 0.5 мм. По поверхности кварца фиксируются значительные выделения гидроксидов железа, что свидетельствует о первичном сульфидном оруденении жилы.

На данных участках выделены три типа золотого оруденения: прожилково-вкрапленные золотоносные руды в андезибазальтах Западной зоны, продукты их окисления (красноцветные охры, бурые железняки, баритовые, кварцевые и пиритовые сыпучки) в Центральной зоне и делювиальная россыпь золота Восточной зоны (Зайков и др., 2009).

В кремнистых и алевролитовых отложениях, перекрывающих вулканиды и серицит-кварцевые метасоматиты, залегают гематит-кварцевые породы. Кварцевые жилы в них гнездообразные, сетчатые, волосовидные, ветвистые мощностью 1–30 мм (Зайкова, Зайков, 2003).

Породы раннекаменноугольного вулканического комплекса перекрывают девонские вулканиды и представлены трахибазальтами березовской

свиты и трахириолитами греховской свиты (C_1gr_1) (см. рис. 2). Мощность отложений составляет 1 км. В породах развиты сульфидно-кварцевые жилы мощностью 1–5 см, которые сложены молочно-белым или полупрозрачным крупнозернистым кварцем. Породы прорваны дайками микрограносиенитов с жилами кварца (Зайков, 1999; Анкушева, Юминов, 2007).

Колебательная спектроскопия кварца

Инфракрасная спектроскопия является наиболее эффективным и информативным методом для изучения воды и Н-дефектов в номинально безводных минералах, таких как кварц. В работах (Kats, 1962; Aines, Rossman, 1984; Kronenberg, 1994) показано, что инфракрасный спектр кварца в области валентных колебаний воды ($3000–3800\text{ см}^{-1}$) представляет собой широкую диффузную полосу, на которую накладываются узкие полосы обертонов колебаний решётки и так называемых Н-дефектов.

На рисунке 3 представлены характерные инфракрасные спектры образцов кварца из жил Аркаимской площади. Видно, что спектры имеют идентичную форму, отличаются лишь интенсивностью. Как известно, интенсивность линий прямо

пропорциональна концентрации соответствующих данной линии группировкам. Широкая полоса с максимумом 3400 см^{-1} связана с молекулярной водой. Полоса в области 2345 см^{-1} относится к колебаниям связи С-О в углекислом газе.

Для разложения спектра на суперпозицию отдельных линий была использована программа Peakfit. Спектр кварца в «водной» области представляется в виде 7 линий гауссовской формы (рис. 4). Интерпретация полос в «водной» области ($3000\text{--}3800\text{ см}^{-1}$) детально рассмотрена в работах (Kats, 1962; Aines, Rossman, 1984; Kronenberg, 1994; Ito, Nakashima, 2002). Две полосы с максимумами в области 3220 (линия 2) и 3410 см^{-1} (линия 5) соответственно, относятся к симметричным и антисимметричным валентным колебаниям связи О-Н в молекулах воды. Линии с максимумами в области 3199 см^{-1} (линия 1) и 3297 см^{-1} (линия 3) принадлежат обертонам и составным частотам колебаний связей Si-O в кристаллической решётке кварца. Узкая полоса с максимумом 3378 см^{-1} (линия 4) связана с колебаниями группировок Al-OH в тетраэдрах SiO_4 , в которых центральный атом Si замещен атомом Al. В спектрах кварца выделяются ещё две полосы около 3600 см^{-1} (линия 6) и 3740 см^{-1} (линия 7). Интерпретация их неоднозначна, общепринято относить их к валентным колебаниям связи О-Н в силанольных группировках Si-OH; в то же время данные полосы наблюдаются в спектрах слюд и

могут быть отнесены к колебаниям гидроксильных группировок в составе тонкодисперсных минеральных включений, присутствующих в кварце.

Для расчёта концентрации молекулярной воды, углекислого газа и Al-OH использовался закон Бугера-Ламберта-Бера. Калибровочные коэффициенты для молекулярной воды и гидроксильных групп взяты из работ Кроненберга и Катца (Kats, 1962; Kronenberg, 1994). Ввиду отсутствия коэффициента экстинкции для CO_2 в кварце был взят соответствующий коэффициент для силикатных стёкол $1010\pm 60\text{ л}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ (Grzechnik et al., 1996; Moore et al., 2000).

Вычисленные концентрации молекулярной воды, группировок Al-OH и углекислого газа приведены в таблице 1. Относительная погрешность вычислений составляет $\sim 25\%$ (Штенберг, 2014). Она обусловлена погрешностями в определении толщины образца, проведении базовой линии, а также слаборазрешёнными полосами, возникающими при моделировании сложного контура. Видно, что образцы отличаются по концентрации молекулярной воды: от Восточной зоны (обр. 221-3, 221-4) к Западной (обр. 773-С) концентрация воды увеличивается в несколько раз, что может указывать на различные условия образования жил. Кроме того, наблюдается незначительная вариация по содержанию группировок Al-OH. В гематит-кварцевых постройках концентрация воды увели-

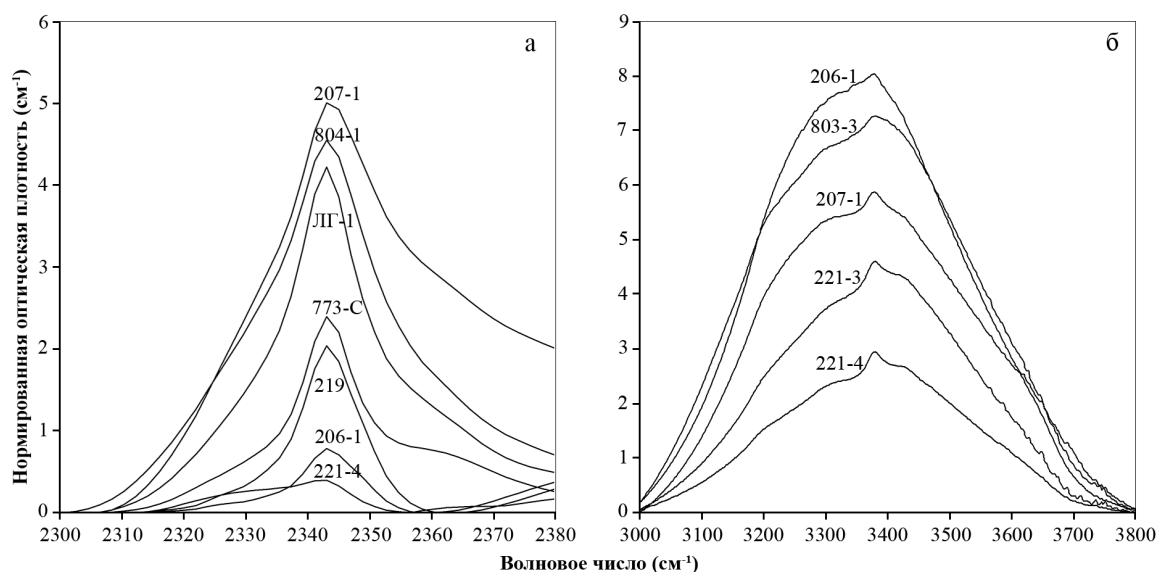


Рис. 3. Нормированные инфракрасные спектры поглощения кварца в области колебаний CO_2 (а) и H_2O (б). Цифры обозначены номера образцов.

Fig. 3. Normalized infrared absorption spectra of quartz in the area of CO_2 (a) and H_2O (b) vibrations. Numbers, samples.

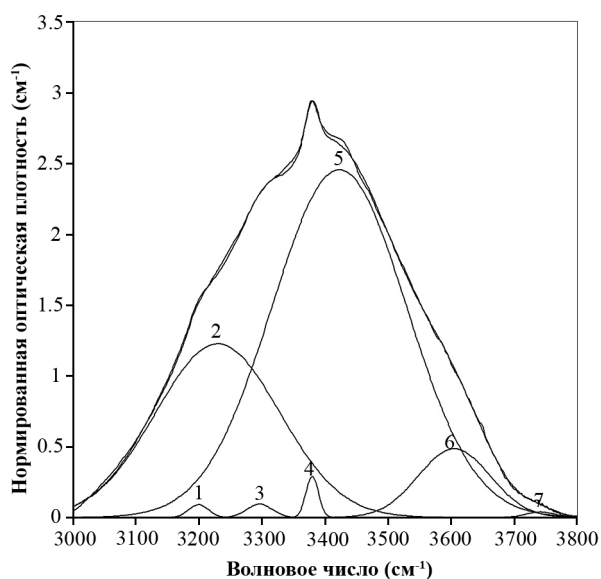


Рис. 4. Моделирование ИК спектра суперпозицией гауссовских линий (обр. 221-4).

Fig. 4. Modeling of the IR spectrum of quartz by the superposition of the Gauss' lines (sample № 221-4).

Таблица 1

Концентрации воды, углекислого газа и группировок Al-OH в жильном кварце, ppm

Table 1

Contents of water, CO₂ and Al-OH groups in vein quartz, ppm

Место отбора	№ обр.	H ₂ O _{молек.}	Al-OH	CO ₂
<i>Золотоносные зоны</i>				
Восточная зона	221-3	340	4.3	18
	221-4	210	3.8	6
Центральная зона	221-1	540	3.0	13
	ЛГ-1	640	3.8	70
Западная зона	773-С	1160	9.1	40
<i>Гематит-кварцевая постройка</i>				
Подводящий канал	206-1	700	3.2	13
	207-1	470	3.5	80
Подошва	803-3	590	1.9	40
Кровля	804-1	660	2.9	75
<i>Сульфидно-кварцевые жилы</i>				
В трахибазальтах	219	760	1.6	33
В трахириолитах	220	430	1.2	80
В микрограносиенитах	220-3	1240	7.0	260

чивается от жил подошвы к кровле. Концентрация углекислого газа, как и концентрация молекулярной воды, несколько возрастает от Восточной зоны к Западной. Максимальное содержание CO₂ наблюдается в кварце из сульфидно-кварцевых жил в микрограносиенитах.

С помощью инфракрасного микроскопа были зарегистрированы спектры флюидных включений в изученных образцах кварца. Эти данные позволили подтвердить существенно водный состав включений, а также наличие углекислого газа во включениях (Штенберг, Анкушева, 2009). Кроме

того, установлено что в «чистых» участках кварца концентрация воды сопоставима с общим содержанием воды, что может указывать на наличие субмикронных включений.

Высокотемпературный отжиг кварцевых пластинок с последующей регистрацией ИК спектров позволил установить следующие особенности. Концентрация молекулярной воды убывает по экспоненциальному закону. Нет чётких максимумов газовой выделения. Остаточное количество воды (~ 50 ppm) после отжига при 1200 °С связано с наличием субмикронных включений, которые оста-

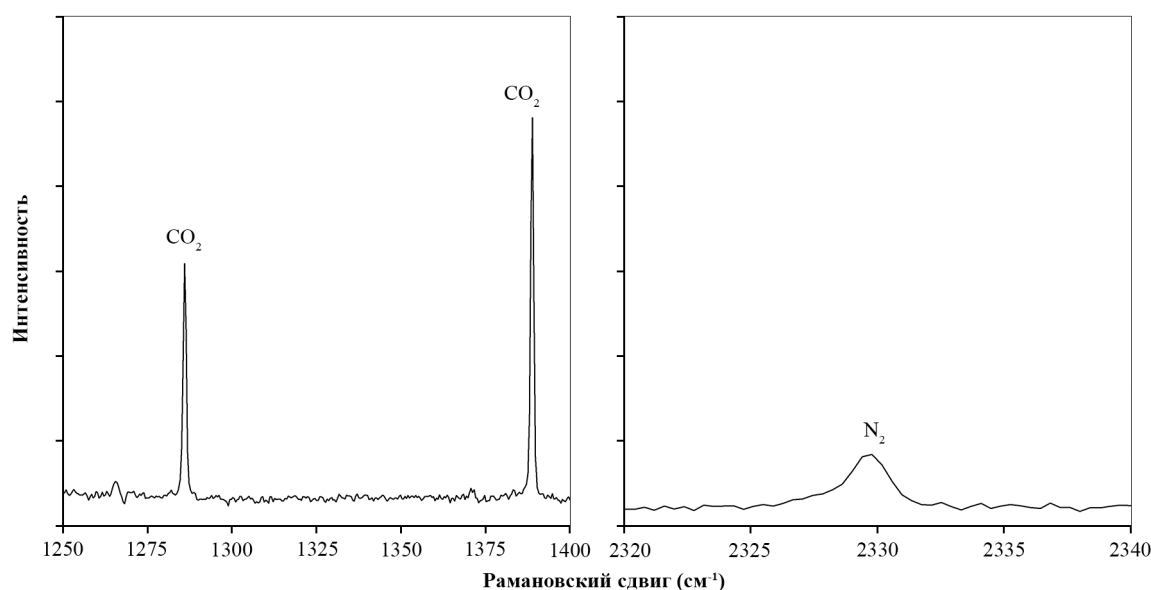


Рис. 5. Типичные спектры комбинационного рассеяния газового пузырька включения в кварце (обр. 803-3).
 Fig. 5. Typical Raman spectra of fluid inclusion in quartz (sample № 803-3).

ются невоскрываемыми даже при такой температуре. Углекислый газ полностью удаляется из кварца при температуре 800–1000 °С (Штенберг, Анкушева, 2010).

По данным спектроскопии КР в газовых пузырьках флюидных включений в кварце из жил Восточной и Западной зон, а также подошвы и кровли гематит-кварцевой постройки фиксируются, в основном, углекислый газ, в меньшей степени – азот. Линии колебаний углекислого газа с максимумами 1285 и 1380 см⁻¹ преобладают над полосой, относящейся к колебаниям азота 2330 см⁻¹ (рис. 5). Кроме того, не было обнаружено полос в области колебаний углеводородов. Все это указывает на водно-углекислотный состав включений.

Таким образом, по данным ИК и рамановской спектроскопии в кварце из жил Аркаимской площади преобладают вода и углекислота. Наблюдается возрастание содержаний: H₂O от 340 до 1160 ppm и CO₂ от 18 до 40 ppm в золотоносных зонах и 470–660 и 13–75 ppm, соответственно, – в гематит-кварцевой постройке. В раннекаменноугольном комплексе максимальные значения воды и углекислоты присущи кварцу из жилы в дайке микрограносиенитов: H₂O 1200 ppm и CO₂ 260 ppm.

Газовая хроматография кварца

Состав растворов включений был преимущественно водный и содержал соединения кислородной группы H₂O, CO, CO₂; углеводороды CH₄ и азот N₂ (табл. 2). Основная масса включений вскрывается

около 500 °С. В составе включений преобладает вода (до 2600 ppm), значение отношения CO₂/H₂O всегда значительно меньше 1 (0.01–0.18). Основными газовыми компонентами флюидов являются H₂O, CO₂, N₂, причём CO₂ превосходит по количеству другие газы (до 460 ppm). Пики на хроматограммах образцов № 773, 222-10, 228-2, 80-4 и 206-1 указывают на присутствие сложных углеводородов (пропана, пропилена). Наблюдается общая тенденция возрастания содержаний летучих компонентов от нижних уровней (Восточная зона, подошва гематит-кварцевой постройки) к верхним (Западная зона, кровля гематит-кварцевой постройки).

Содержание воды в кварце изменяется в широких пределах от 770 до 1500 ppm. Максимальные содержания воды (1460 ppm) присущи кварцу Западной зоны – стратиграфически верхнему уровню палеогидротермальной системы. Для кварца Восточной зоны содержания воды во включениях в 2 раза меньше (770 ppm). Содержание углекислоты изменяется в диапазоне от 19 до 25 ppm, но минимальные концентрации обнаружены в кварце Центральной зоны. Как и концентрация воды, «углекислотность» флюида уменьшается с глубиной. Концентрации N₂ варьируют от 0.27 до 0.4 ppm, причём наблюдается обратная ситуация – они максимальны в кварце Восточной зоны, занимающей нижнюю позицию в палеогидротермальной системе. Среди углеводородов ведущую роль играет метан (0.5–3.3 ppm), также определены пропан и пропилен. С глубиной содержание мета-

Таблица 2

Летучие компоненты флюидных включений в кварце гидротермальных жил Аркаимской площади

Table 2

Volatiles in fluid inclusions in quartz from hydrothermal veins of the Arkaim area

Место отбора	№ пробы	Флюидо-насыщенность, ppm	H ₂ O	CO ₂	N ₂	CH ₄
			ppm			
<i>Золотоносные зоны</i>						
Восточная зона	221-1	772	743	24.53	0.4	3.35
Центральная зона	221-2	906	884	18.70	0	2.9
Западная зона	773	1507	1461	44.4	0.27	0.5
<i>Гематит-кварцевая постройка</i>						
Подошва	222-10	302	294	6.1	0.21	1.5
	228-2	343	335	4.7	0.18	2.4
Подводящий канал	804-3	584	554	25.1	0.11	4.6
	Кровля	804-4	1629	1467	160.6	0.08
<i>Сульфидно-кварцевые жилы</i>						
В трахибазальтах	219	1348	1308	37.96	0.27	3.75
	202-2	1980.5	1926	51.68	0	2.4
В трахириолитах	206-1	750	726	19.0	0.32	4.6
В микрограносиенитах	220-3	3070	2605	461	0	1.7

на увеличивается, а следы сложных углеводородов наблюдаются только в кварце Восточной зоны. Для воды и газов в кварце из жил в гематит-кварцевой постройке наблюдаются такие же закономерности. Кварц кровли постройки характеризуется максимальной флюидонасыщенностью (1630 ppm против 300 ppm – в подошве). Концентрации воды в кварце из жил кровли постройки в 5 раз превышают таковые в подошве постройки (1500 и 300 ppm, соответственно). Содержания углекислоты в жилах кровли также на порядок выше, чем в кварце из жил подошвы постройки (160 и 6 ppm, соответственно). Аналогичная зависимость наблюдается для концентраций азота (0.08 ppm – в кровле, 0.21 ppm – в подошве). Из углеводородов во включениях обнаружен метан, максимальное его содержание присутствует в кварце из подводящего канала постройки (4.6 ppm), минимальное – в её кровле (0.7 ppm).

Флюидонасыщенность кварца из жил в трахибазальтах, трахириолитах и дайке микрограносиенитов варьирует от 750 (трахириолиты) до 3000 ppm (микрограносиениты). Максимальное содержание воды (2600 ppm) свойственно кварцу из жил в микрограносиенитах. Нижняя часть гидротермальной системы характеризуется минимальными содержаниями воды – 730 ppm. Как и концентрация воды, углекислотность флюида максимальна в кварце из

дайки микрограносиенитов (460 ppm), минимальная – в кварце из жилы в трахибазальтах (20 ppm). Азот обнаружен только в кварце из жил в трахибазальтах и трахириолитах в близких количествах (0.27–0.32 ppm). Из углеводородов обнаружен метан (1.7–4.6 ppm). Максимальные содержания метана наблюдаются в кварце из жил в трахириолитах основания, минимальные – в кварце из дайки микрограносиенитов.

Таким образом, по результатам газовой хроматографической анализа концентрации воды и углекислого газа во флюидных включениях увеличиваются от нижних уровней палеогидротермальной системы к верхним: H₂O от 740 до 1500 ppm и CO₂ от 24 до 44 ppm для Восточной и Западной зон и 290–1500 и 6–160 ppm, соответственно, – для подошвы и кровли гематит-кварцевой постройки. В раннекаменноугольном комплексе максимальные значения воды и углекислоты присущи кварцу из жилы в дайке микрограносиенитов: H₂O 2600 ppm и CO₂ 460 ppm.

Результаты термобарогеохимических исследований

В Восточной зоне исследованы флюидные включения в прозрачном крупнозернистом кварце из жил в андезибазальтах. Включения имеют размеры 20–30 мкм, плоскую, вытянутую форму, ча-

Таблица 3

Термобарогеохимические параметры кварца из жил Аркаимской площади

Table 3

Fluid inclusion data on quartz from the Arkaim area

Место отбора	T_3 , °C	Преобл. соль в растворе	$T_{пл}$, °C	C, мас. %, NaCl-экв.	T_r , °C
<i>Золотоносные зоны</i>					
Восточная	-17.2...-22.1	NaCl	-2.3...-3.4	2.5–5.5	245–275
Центральная	-21.0...-21.2		-2.0...3.0	3.5–5	230–250
Западная	-21.7...-22.1		-3.0...-6.0	5.3–7	240–250
<i>Гематит-кварцевая постройка</i>					
Подводящий канал	-20.8...-21.3	NaCl	-2.5...-4.0	2.8–3.2	260–290
Подшва	-21.2...-21.3		-2.3...-2.8	3.0–3.3	200–204
Кровля	-20.6...-21.0		-0.8...-4.5	2.5–6.5	180–190
<i>Сульфидно-кварцевые жилы</i>					
В трахибазальтах	-21.7...-21.7	NaCl-KCl	-4.7...-6.2	7.5–9.5	200–250
В трахириолитах	-23.0...-23.9		-11.5...-9.5	9–15	280–350
В микрограносиенитах	-23.0...-23.7		-8.0...-10.3	14–18	270–310

Примечание: T_3 – температура эвтектики раствора; $T_{пл}$ – температура плавления последнего кристаллика льда; C – концентрация солей в растворе; T_r – температура гомогенизации.

Note: T_{fm} – first melting temperature; T_{fm} – final melting temperature; C – salinity; T_h – temperature of homogenization.

сто со сложными очертаниями. Газовые пузырьки тёмные, крупные, достигающие 40–50 % объема включения. Криометрия включений показала, что в растворах преобладает NaCl. Содержание солей в них 2.5–5.5 мас. %. Температуры гомогенизации включений составляют 245–274 °C (табл. 3).

В Центральной зоне также исследованы флюидные включения в жильном кварце из андезибазальтов. Температуры эвтектики также указывают на преобладание в составе гидротермального раствора NaCl. Концентрации солей в растворе 3.5–5 мас. %. Температуры гомогенизации включений 230–250 °C.

В Западной зоне флюидные включения изучались в кварце из жилков в силицитах. Первичные включения размерами 10–12 мкм достаточно редки, располагаются обособленно друг от друга, имеют округлую изометричную или удлинённую форму, редко – огранённые. Газовый пузырек занимает 10–15 % объёма включения. Криометрией определено преобладание в растворе соли NaCl. Концентрации солей составляют 5.3–7.2 мас. %. Термометрия флюидных включений выявила, что они гомогенизируются при температурах 240–250 °C.

По температурам гомогенизации флюидных включений установлено, что сульфидно-кварцевые жилы Восточной зоны являются наиболее высоко-

температурными. Анализ данных по температурам гомогенизации и частоте встречаемости показал, что для кварца Восточной и Западной зон характерно распределение температур гомогенизации с максимумами при 255–259 °C (Восточная) и 241–245 °C (Западная). Кварц Центральной зоны характеризуется максимумами температур гомогенизации при 231–234 °C и 240–244 °C. Кроме того, в кварце из жил Восточной и Западной зон наблюдается гетерогенизация пар включений, при температурах 292.4, 265.3, 260.6 и 248 °C, что позволяет считать данный интервал температур (250–290 °C) истинными температурами минералообразования (Реддер, 1987).

Солевой состав растворов преимущественно хлоридно-натриевый. В нижней части системы (Восточная, Центральная зоны) солёность флюида составляет в среднем, 3–6 мас. %, повышаясь по направлению к верхней части (до 7 мас. % в Западной зоне). Повышение солёности может быть связано с поглощением воды при взаимодействии гидротермального раствора с вмещающими породами на подъёме к поверхности (Бортников и др., 2004).

В подводящем канале гематит-кварцевой постройки флюидные включения изучались в кварце из гематитсодержащей жилы. Концентрации солей в растворе составляют 2.8–3.2 мас. %. NaCl-экв. В солевом составе преобладают хлориды Na. При

нагревании флюидные включения гомогенизировались в жидкую фазу при 240–290 °С.

В подошве гематит-кварцевой постройки исследован кварц из прожилка мощностью 1–2 см в лиловых брекчиевидных породах. Установлено, что в растворе преобладают соли NaCl с концентрациями 3.0–3.3 мас. % NaCl-экв. При нагревании гомогенизация включений в жидкую фазу происходила в интервале температур 185–210 °С.

В кровле постройки изучены включения в гранозернистом кварце из ветвистых прожилков в массивных гематит-кварцевых породах. В растворе преобладал растворённый NaCl. Концентрация солей в растворах составила 1.5–6.8 мас. % NaCl-экв. Гомогенизация флюидных включений происходила в жидкую фазу при температурах 160–190 °С.

Флюидные включения в кварце из жил в трахибазальтах имеют размеры 10–15, редко до 20 мкм, округлую или овальную форму, часто с элементами огранки. Температуры эвтектики указывают на преобладание в составе раствора соли NaCl. Концентрации солей в растворе 7.5–9.5 мас. %. Температуры гомогенизации включений составили 200–250 °С.

В жилах из трахириолитов изучены двухфазные флюидные включения с газовыми пузырьками 20–50 % объёма включения. В составе гидротермальных растворов преобладают хлориды K и Na в концентрациях 9–15 мас. %. Температуры гомогенизации составили 280–350 °С.

Флюидные включения в кварце из жил в дайке микрограносиенитов имеют небольшой газовый пузырек (10–15 % объёма включения). Температуры эвтектики указывают на преобладание в растворе солей NaCl с примесью KCl. Концентрации солей в растворах включений 14–18 мас. %. Гомогенизировались включения при температурах 270–310 °С.

Термобарогеохимические исследования показали, что в формировании сульфидно-кварцевых жил золотоносных зон и гематит-кварцевых пород участвовали хлоридно-натриевые растворы с температурами 180–290 °С и концентрацией солей 3–7 мас. %. Повышение солёности растворов может быть связано с реакциями гидратации при взаимодействии растворов с вмещающими породами или смешением контрастных растворов. Сульфидно-кварцевые жилы в породах раннекаменноугольного комплекса формировались при участии хлоридно-калиево-натриевых растворов с температурами

150–350 °С и солёностью 9–15 мас. %. Появление солей калия и увеличение солёности растворов может быть обусловлено влиянием магматических растворов.

Выводы

В результате выполнения работ получены данные о воде и главных газовых компонентах кварца из жил двух вулканогенно-гидротермальных систем Аркаимской площади. Основными летучими компонентами флюидных включений являются H₂O, CO₂, N₂, также присутствуют лёгкие углеводороды. Сернистые газы не обнаружены. Сопоставление значений концентраций молекулярной воды и углекислого газа, полученных по данным инфракрасной спектроскопии и газовой хроматографии, показали хорошее соответствие между собой. Наблюдается тенденция увеличения содержания H₂O и CO₂ и уменьшения концентраций углеводородов в кварце из жил вверх по разрезу вулканических комплексов.

По результатам термобарогеохимии, кварцевые жилы в вулканогенных породах Аркаимской площади образованы существенно водными растворами с относительно простым солевым составом NaCl и NaCl-KCl. Установлено увеличение концентраций солей в растворах в направлении от нижних уровней гидротермальных систем (сульфидно-кварцевые зоны) к верхним (гематит-кварцевые породы) и некоторое понижение температур растворов.

Таким образом, установлено, что концентрации летучих компонентов в жильном кварце Аркаимской площади изменяются в зависимости от пространственного положения жил в вулканических комплексах. От нижних уровней вверх наблюдается увеличение общей флюидонасыщенности и углекислотности и уменьшается восстановленность минералообразующего раствора.

Авторы признательны своим коллегам из Института минералогии УрО РАН за плодотворное обсуждение результатов работы, а также лично к.г.-м.н. Смирнову С.З. (ИГМ СО РАН) за предоставленную возможность исследования флюидных включений в кварце методом КР спектроскопии.

Исследования проводились при финансовой поддержке гранта РФФИ для молодых ученых и аспирантов (№ 14-05-31330).

Литература

- Анкушева Н.Н., Юминов А.М. О рудоносных гидротермальных системах Магнитогорской металлогенической зоны: результаты изучения флюидных включений // Уральский минералогический сборник № 14. Миасс: ИМин УрО РАН. 2007. С. 105–128.
- Бархударян Н.Б., Гребенчиков А.Н. Применение метода ИК-спектроскопии к изучению кварцево-золоторудных месторождений // Тр. ЦНИГРИ. 1974. Вып. 112. С. 75–84.
- Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–28.
- Бортников Н.С., Симонов В.А., Богданов Ю.А. Флюидные включения в минералах из современных сульфидных построек: физико-химические условия минералообразования и эволюция флюида // Геол. рудных месторожд. 2004. № 1. Т. 46. С. 74–87.
- Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. М.: Недра. 1979. 272 с.
- Зайков В.В. Геологическое строение и полезные ископаемые района музея-заповедника Аркаим // Природные системы Южного Урала. Челябинск: ЧГУ. 1999. С. 5–35.
- Зайков В.В., Масленников В.В., Зайкова Е.В., Херрингтон Р. Рудно-формационный и рудно-фациальный анализ колчеданных месторождений Уральского палеоокеана. Миасс: ИМин УрО РАН. 2001. 313 с.
- Зайков В.В., Анкушева Н.Н., Юминов А.М., Зайкова Е.В. Аркаим: древние рудоносные вулканы. Миасс: Геотур. 2009. 196 с.
- Зайкова Е.В., Зайков В.В. Признаки придонного гидротермального происхождения железисто-кремнистых построек Магнитогорско-Мугоджарской островодужной системы Урала // Металлогения древних и современных океанов. Миасс: ИМин УрО РАН. 2003. С. 208–215.
- Михайлов И.Г., Сурин Т.Н., Зайков В.В. Золотоносность Восточно-Магнитогорской палеоостровной дуги (Ю. Урал) // Металлогения древних и современных океанов-2003. Миасс: ИМин УрО РАН. 2003. С. 60–69.
- Реддер Э. Флюидные включения в минералах: в 2-х т., 1987. Т. 1. Пер. с англ. М.: Мир. 560 с.
- Сокерина Н.В., Шанина С.Н., Исаенко С.И. Газовый состав рудообразующего флюида золоторудного проявления Синильга, Приполярный Урал // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар: Геопринт. 2012. № 3. С. 12–15.
- Штенберг М.В. Вода и водородсодержащие группировки в жильном кварце уральских месторождений кварцевого сырья // Литосфера. 2014. № 3. С. 102–111.
- Штенберг М.В., Анкушева Н.Н. Структурное положение воды в кварце гидротермальных жил Аркаимской площади, Южный Урал (по данным ИК-Фурье спектроскопии) // Проблемы минералогии, петрологии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Пермь: Перм. ун-т. 2009. Вып. 12. С. 78–85.
- Штенберг М.В., Анкушева Н.Н. Исследование кварца гидротермальных жил Аркаимской площади методом инфракрасной Фурье-спектроскопии при низких и высоких температурах // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Пермь: Перм. гос. ун-т. 2010. С. 69–74.
- Aines R.D., Rossman G.R. Water in minerals? A peak in the infrared // J. Geophys. Res. 1984. Vol. 89. № 6. P. 4059–4071.
- Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Pontignana-Siena, 1994. P. 117–130.
- Grzechnik A., Zimmermann H.D., Hervig R.L., King P.L., McMillan P.F. FTIR micro-reflectance measurements of the CO₃²⁺ ion content in basanite and leucite glasses // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. Vol. 125. P. 311–318.
- Ito Y., Nakashima S. Water distribution in low-grade siliceous metamorphic rocks by micro-FTIR and its relation to grain size: a case from the Kanto Mountain region, Japan // Chem. Geol. 2002. Vol. 189. P. 1–18.
- Kats A. Hydrogen in Alpha-quartz // Philips Res. Rep. 1962. Vol. 17. P. 201–279.
- Kronenberg A.K. Hydrogen speciation and chemical weakening of quartz // Rev. Mineral. 1994. Vol. 29. P. 123–176.
- Moore G., Chizmeshya A., McMillan P.F. Calibration of a reflectance FTIR method for determination of dissolved CO₂ concentration in rhyolitic glasses // Geochim. Cosmochim. Acta. 2000. Vol. 64. №. 20. P. 3571–3579.

Поступила в редакцию 24 июля 2015 г.