

УДК 553.87

ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В КВАРЦЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАМОРФОГЕННОГО И ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАМОРФОГЕННОГО-МЕТАСОМАТИЧЕСКОГО ГЕНЕЗИСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Корекина Мария Александровна¹,
maria@mineralogy.ru

Савичев Александр Николаевич¹,
ansavichev@mineralogy.ru

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Россия, 456317, г. Миасс, Ильменский заповедник.

Актуальность исследования обусловлена изучением и вовлечением в технологический передел кварцево-жильных образований различных генетических типов.

Цель: определение содержания элементов-примесей в кварце разных генетических типов и степени его пригодности для получения высокочистых кварцевых концентратов.

Объекты: кварцево-жильные объекты гидротермально-метаморфогенно-метасоматического типа (жила Беркутинская, жила Болотная) и гидротермально-метаморфогенного типа (проявление Песчаное, жила Толстиха, месторождение Новотроицкое).

Методы: LA-ICP-MS спектроскопия элементов-примесей, микроскопические исследования кварца, оценка P-T параметров минералообразования.

Результаты. Установлено, что жилы гидротермально-метаморфогенно-метасоматического типа сложены разнозернистым гранулированным прозрачным, полупрозрачным, льдистым, сахаровидным кварцем, в то время как кварцево-жильные объекты гидротермально-метаморфогенного типа являются жилами выполнения и состоят преимущественно из молочно-белого кварца. Кварцево-жильные образования двух генетических типов различаются геологическими условиями локализации, температурами минералообразования, гранулометрическими характеристиками, наличием и расположением минеральных и флюидных включений, а также содержанием основных петрогенетически информативных элементов-примесей (Li, Na, Mg, Al, K, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn). Показано, что гидротермально-метаморфогенный кварц характеризуется более низкими (288–410 °С) температурами образования по сравнению с гидротермально-метаморфогенно-метасоматическим кварцем (415–519 °С), при близких значениях давления (2–4 кбар) и более высокими показателями содержания элементов-примесей (до 535 г/т). Чистота зерен кварца гидротермально-метаморфогенно-метасоматического генезиса связана с многократным воздействием процессов метаморфизма и метасоматоза, при которых происходило вытеснение минеральных и флюидных включений из зерен кварца в межзерновое пространство. Минимальные значения содержания элементов по данным LA-ICP-MS спектроскопии близки к значениям по содержанию элементов в структурной форме и не превышают по всем типам кварца 5–12 г/т, исключение составляет молочно-белый кварц проявления Песчаное (до 25 г/т). Минимальные значения по содержанию элементов-примесей в кварце показывают предел его обогатимости и позволяют при использовании многоступенчатой системы обогащения получать кварцевые концентраты высокой степени чистоты.

Ключевые слова:

кварц, LA-ICP-MS спектроскопия, высокочистый кварц, микроэлементный состав, метаморфизм, метасоматоз, минеральные примеси, флюидные включения.

Введение

Месторождения кварца высокой степени чистоты (high purity quartz – HPQ) являются стратегически важным сырьем для нужд оптоволоконной, космической, медицинской и др. отраслей промышленности. Благодаря широкому распространению в земной коре и уникальным физико-химическим свойствам кварц находит широкое применение для изготовления кварцевых тиглей для солнечных батарей и микросхем, высокотемпературных ламп, прозрачного кварцевого стекла для полупроводников и т. д. [1]. В связи с растущим в последние годы промышленным потенциалом и спросом на кварцевые концентраты высокой степени чистоты все более актуальной является задача поиска новых потенциально пригодных кварцевых объектов. Основным требованием к качественным характеристикам кварцевого сырья является наличие низких концентраций элементов-примесей, суммар-

ное содержание которых в промышленно значимых кварцах не превышает 50 г/т [2, 3]. На микроэлементный состав кварца большое влияние оказывают наличие флюидных и минеральных включений, а также присутствие структурных примесей, изоморфно входящих в кристаллическую решетку кварца. Удаление минеральных и флюидных включений возможно при использовании определенных технологий обогащения, в то время как структурные примеси определяют предел обогатимости кварцевого сырья.

На территории Южно-Уральской кварценозной провинции расположено большое количество месторождений кварца, что определяет ее ведущую роль по запасам кварцевого сырья в России. Большой вклад в изучение кварцево-жильной минерализации Урала внесли работы Г.Н. Вертушкова, Э.Ф. Емлина, Г.А. Синкевича, Е.П. Мельникова, Ю.А. Соколова, В.И. Якшина и др. [4–7]. Не смотря на многочисленные исследования, посвященные микроструктурному

анализу кварца [8, 9], оценке светопропускания [10, 11], изучению флюидных включений [12, 13] и т. д., остается много вопросов по содержанию элементов-примесей, определяющих его промышленную значимость.

Основной задачей исследования является определение содержания элементов-примесей в кварце разных генетических типов и степени его пригодности для получения высокочистых кварцевых концентратов.

При определении генетических типов кварца на основе работ предшественников [5–11, 14], используемых в качестве основных критериев: особенности геологического размещения и условий образования, Р-Т параметры, степень влияния процессов метаморфизма и метасоматоза, гранулометрические характеристики кварцевых зерен и т. д., нами были выделены два генетических типа кварца – гидротермально-метаморфогенно-метасоматический и гидротермально-метаморфогенный. Месторождения и жилы гидротермально-метаморфогенно-метасоматического типа представлены жилами гранулированного прозрачного, полупрозрачного, льдистого, сахаровидного кварца. Кварцево-жилные объекты гидротермально-метаморфогенного генезиса – это кварцевые тела, сложенные крупно-гигантозернистым молочно-белым кварцем. Основным различием кварца двух генетических типов является интенсивность воздействия процессов метаморфизма и метасоматоза, определяющих гранулометрические характеристики кварца и его микроэлементный состав.

Используемый в работе метод LA-ICP-MS спектроскопии обладает высоким разрешением и позволяет проводить локальные исследования, что дает возможность провести предварительную оценку содержания в кварце элементов-примесей [15].

Образцы и методы исследования

Применительно к поставленным задачам было выполнено штучное опробование на кварцево-жилных объектах гидротермально-метаморфогенно-метасоматического типа (жила Беркутинская – 36 образцов, жила Болотная – 38 образцов) и гидротермально-метаморфогенного типа (проявление Песчаное – 6 образцов, жила Толстиха – 12 образцов, месторождение Новотроицкое – 42 образца) на Южном Урале.

Состав элементов-примесей в кварце был проанализирован методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерным пробоотбором (LA-ICP-MS спектроскопии) в Южно-Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс). Данный метод требует особо тщательного выбора области изучения, т. к. в область абляции попадают твердофазные и флюидные включения (ФВ). Предварительно с использованием оптического микроскопа Axiolab (Carl Zeiss) изучены структурно-текстурные особенности кварца, а также количество и локализация минеральных и ФВ.

Измерения методом LA-ICP-MS спектроскопии проводились на плоскополированных кварцевых пластинах с использованием квадрупольного масс-

спектрометра Agilent 7700x с программным комплексом MassHunter и лазерной приставкой New Wave Research UP-213. Использовался УФ Nd:YAG-лазер с длиной волны 213 нм и настройками плотности потока 17,0–19,0 Дж/см², частотой повторений 20 Гц, газ-носитель в ячейке – He, скорости потока 0,65 л/мин. Настройки масс-спектрометра: мощность высокочастотного сигнала – 1500 Вт; газ-носитель – Ar; скорость потока – 0,9–0,95 л/мин; расход плазмообразующего газа (Ar) – 15 л/мин; расход вспомогательного газа (Ar) – 0,9 л/мин. Анализ проводился с использованием точечного режима абляции с диаметром пучка 80 мкм. Для удаления приповерхностных загрязнений перед каждым анализом выполнялась предварительная абляция продолжительностью 3 с. В течение первых 30 с регистрировался холостой сигнал без абляции вещества, затем в течение последующих 60 с обрабатывался сигнал от аблированного материала. Между анализами проводилась продувка ячейки и газовых каналов в течение 60 с. Калибровка масс-спектрометра осуществлялась по эталонному международному стандартному образцу NIST SRM-612. При этом количество молекулярных оксидных ионов (²³²Th¹⁶O/²³²Th) не превышало 0,2 %. Соотношение ²³⁸U/²³²Th было близко к 1. Для расчета использовался международный стандарт стекла SRM NIST-612. Для учета инструментального дрейфа лазера и масс-спектрометра стандартный образец анализировали через каждые 15 точек. Расчет химического анализа проводился в программном комплексе Iolite [16] с применением стандартных подходов, описанных в [17], и с использованием в качестве внутреннего стандарта ²⁹Si=46,7 мас. %. Погрешность анализов для большинства элементов с концентрациями в пределах 1–1000 г/т не превышает 5 отн. % [15].

Геологическая позиция месторождений кварца

В геологическом отношении кварцево-жилные объекты расположены в пределах Тагило-Магнитогорской и Восточно-Уральской мегазон (рис. 1). Их западная граница проходит по серпентинитовому меланжу зоны Главного Уральского разлома (ГУР). Состав представлен преимущественно ордовикско-нижнекаменноугольными комплексами океанической коры и энзиматической островной дуги, в том числе платиноносного пояса расслоенных базит-ультраосновных массивов, перекрытых шельфовыми карбонатными и рифтогенными вулканическими породами [18, 19].

Жила Беркутинская и жила Болотная входят в состав Кыштымской группы месторождений Уфалейского кварцево-жилного района, расположенной в восточной части Уфалейского гнейсово-амфиболитового комплекса. В состав группы месторождений входят более 3000 кварцевых жил, сложенных преимущественно кварцево-жилными образованиями вторично-зернистого гранулированного кварца, приуроченными к двум крупным поздеколлизийным тектоническим зонам дробления [20]. Их образование происходило под воздействием процессов метаморфизма и метасоматоза, что привело к формированию poste-

пенного перехода от мономинерального кварцевого тела к зоне полевошпатового пегматоида, а затем биотитового сланца и амфиболита [20]. В последующем под влиянием процессов метаморфизма происходила перекристаллизация кварцевых тел с образованием мелких новообразованных зерен.

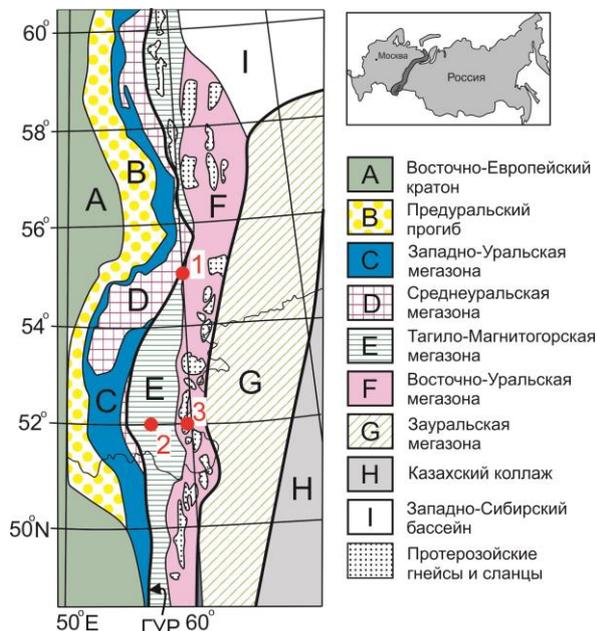


Рис. 1. Структурно-тектоническая карта Южного Урала [19]. Цифрами указано расположение кварцево-жильных объектов: 1 – жила Беркутинская, жила Болотная, жила Толстиха; 2 – Новотроицкое месторождение; 3 – Песчаное проявление

Fig. 1. Structural-tectonic map of the Southern Urals [19]. The numbers indicate the location of quartz-residential objects: 1 – Berkutinskaya vein, Bolotnaya vein, Tolstikha vein; 2 – Novotroitskoe deposit; 3 – Peschanoe occurrence

Кварц гидротермально-метаморфогенного генезиса молочно-белый, массивный, непрозрачный, первичнозернистый, образованный в результате проникновения силикатных флюидов под давлением в открытую систему трещин [21, 22]. Кварцевые тела являются жилами выполнения и образуются в разных геодинамических обстановках, к которым относятся раннеколлизийный и позднеколлизийный режимы [23].

Новотроицкое месторождение молочно-белого кварца входит в состав Сакмарского кварценового района и расположено на территории Зилаирского района (Башкортостан). Кварцевые жилы залегают в толще переслаивающихся графит-мусковит-кварцевых сланцев и графитовых кварцитов с мусковит-кварцевыми сланцами [24].

Песчаное проявление кварца находится на южном контакте Джабыкского гранитного массива. Оно представлено пятью жилами выполнения, состоящими из молочно-белого кварца, залегающими среди лейкократовых разнозернистых гранитов. Максимальная мощность кварцевых жил достигает 2,5 м

при протяженности до 1 км. Контакт вмещающих пород с кварцевым телом резкий. На контакте граниты интенсивно деформированы [25].

Жила Толстиха является крупным объектом, сложенным молочно-белым кварцем, входящим в состав Наилинского месторождения золота. Жила расположена на контакте ультрабазитов Таловского массива с породами зеленокаменного синклинория и залегает среди серпентинизированных дунитов, перидотитов и пироксенитов. Мощность жилы до 50 м при простирации до 1000 м [26].

Результаты и обсуждение

Гидротермально-метаморфогенно-метасоматический кварц разнозернистый с размером зерен до 1 см со ступенчато-зубчатыми, местами извилистыми границами зерен (рис. 2, а). В шлифах характеризуется неравномерно зернистой, гранобластовой структурой.

Выделяется кварц двух генераций. Зерна кварца первой генерации (Qz-1) размером от 4 мм до 1 см (рис. 2, б). В них отчетливо проявлены следы хрупкой и пластической деформации, участки блокового строения. Влияние процессов хрупкой деформации привело к появлению слабо извилистых внутризерновых залеченных трещин, в то время как результатом воздействия на кварцевые тела процессов пластической деформации является появление волнистого погасания.

В кварце диагностируются флюидные включения двух типов. К первому типу относятся одиночные, редко встречающиеся первичные включения неправильной формы, часто каплевидные, с изрезанными краями, с фрагментами ровных граней, размером до 10 мкм. Часть включений этого типа имеют вид отрицательных кристаллов. Наиболее распространенный второй тип включений – вторичные, размером до 5 мкм, приуроченные к залеченным трещинам. По форме это изометричные или эллипсоидально-линзообразные включения, иногда ориентированные субпараллельно или образующие поля. Минеральные включения локализуются в межзерновом пространстве, трассируют трещины и представлены слюдой, полевым шпатом, гранатом, апатитом, рутилом.

Новообразованные зерна кварца второй генерации (Qz-2) размером до 0,4 мм полупрозрачные и прозрачные, слабо деформированы, не содержат флюидные и минеральные включения (рис. 2, б). Данный кварц часто ассоциирует с кварц-полевошпатовыми породами (рис. 2, в) и является результатом процессов перекристаллизации реликтовых зерен (Qz-1).

Кварц гидротермально-метаморфогенного генезиса первичнозернистый, представлен агрегатом крупно-гигантозернистого кварца, сложенного удлинено-шестоватыми и призматическими зернами, размером от 5–6 мм до 1–3 см. Кварцевый агрегат сложен интенсивно блоковыми, участками разлистываемыми зернами (рис. 2, г). Преобладающими являются зерна кварца первой генерации (Qz-1), зерна новообразованного кварца второй генерации (Qz-2) приурочены к приконтактной части блоков.

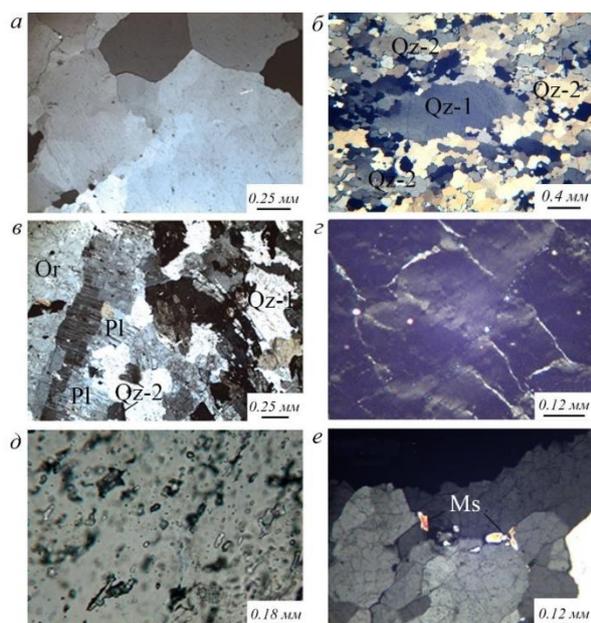


Рис. 2. Гидротермально-метаморфогенно-метасоматический кварц. Ступенчато-зубчатые и извилистые границы зерен (а) (жила Беркутинская); две генерации зерен кварца (Qz-1 – реликтовые, крупнозернистые; Qz-2 – новообразованные, мелкозернистые) (б) (жила Беркутинская); кварц-полевошпатовая порода (в) (жила Болотная); блокованный кварц с цепочками новообразованного кварца на границах блоков (г) (жила Толстикха); флюидные включения в кварце (д) (проявление Песчаное); включения мусковита по трещинам (е) (Новотроицкое месторождение)

Fig. 2. Hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic quartz. Stepped-toothed and sinuous grain boundaries (a) (Berkutinskaya vein); two generations of quartz grains (Qz-1 – relic, coarse-grained; Qz-2 – newly formed, fine-grained) (б) (Berkutinskaya vein); quartz-feldspar rock (в) (Bolotnaya vein); blocked quartz with chains of newly formed quartz at the block boundaries (г) (Tolstikha vein); fluid inclusions in quartz (д) (Peschanoe occurrence); inclusions of muscovite along fractures (e) (Novotroitskoe deposit)

Результатом воздействия процессов динамометаморфизма на кварцевые агрегаты является их катаклиз с широким развитием признаков хрупкой и пластической деформаций. Трещины хрупкой деформации иррациональные, простые и криволинейные, короткие, иногда изогнутые. Приуроченные к ним флюидные включения образуют короткие пунктирно-точечные, а при их сближении ленточные поля, которые в местах пересечения трещин образуют поля неправильной формы (рис. 2, д). Включения имеют форму четких отрицательных кристаллов, чаще с частично гранными и полукруглыми неровными фазовыми границами. Размер включений составляет от 5 до 30 мкм, чаще 10–20 мкм. Следует отметить наличие большого количества крупных первичных флюидных включений. Вторичные флюидные включения (размером до 5 мкм) связаны с залеченными трещинами хрупкой деформации. Минеральные включения

(слюда, гематит, гётит, магнетит, хлорит) расположены в трещинах хрупкой деформации (рис. 2, е).

Микроэлементный состав кварца

Основными элементами-примесями в кварце являются Al, Ti, Na, K, Li, Mg, Mn, Fe, Cr, Cu т. д. В работах [27–29] показано, что к структурным примесям относятся Al, Fe, K, Li, Na, Ti, B, Ge, P, тогда как в минеральных и флюидных включениях кроме вышеперечисленных встречаются Cr, Cu, Mg, Mn, Ca [30, 31]. Элементы-примеси, входящие в кристаллическую решетку кварца, либо заменяют Si^{4+} (Al^{3+} , Fe^{3+} , B^{3+} , Ti^{4+} , Ge^{4+} , P^{5+}), либо находятся в положениях промежуточных каналов – Li^+ , K^+ , Na^+ , H^+ , Fe^{2+} , где ионы действуют преимущественно как компенсаторы заряда для трехвалентных и пятивалентных ионов замещения Al^{3+} , Fe^{3+} и P^{5+} [27].

Результаты изучения микроэлементного состава кварца методом LA-ICP-MS спектроскопии приведены в табл. 1.

Для оценки качества кварца изученных месторождений используются значения содержания микроэлементов в продуктах марки ЮТА фирмы Unimin, мирового лидера по производству кварцевых концентратов высокой степени чистоты [3], а также данные компании «Русский кварц» (Россия) [32] (табл. 1). Более низкие значения кварца RQ-2K, по сравнению с показателями ЮТА, связаны с многолетними разработками на Кыштымском горно-обогатительном комбинате технологий обогащения, среди которых в последние годы активно развивается процесс хлорирования, используемый на последней стадии обогащения и позволяющий удалить связанные ОН-группировки в кварце и уменьшить содержание ряда элементов-примесей.

Основным примесным элементом в кварце является алюминий. Al входит в состав минеральных включений (слюды, полевые шпаты и т. д.), водосодержащих включений, а также присутствует в виде изоморфной примеси в кристаллической решетке кварца. По данным LA-ICP-MS спектроскопии при высоких концентрациях Al (43,9–210,5 г/т) в кварце гидротермально-метаморфогенного типа наблюдаются высокие содержания щелочей (K, Na). Это связано с попаданием в область абляции крупных флюидных включений, а также минеральных микропримесей, таких как слюды.

На рис. 3 показано, что содержание элементов-примесей в гидротермально-метаморфогенно-метасоматическом кварце близко или меньше значений кварца марки ЮТА-std. Чистота кварца связана с влиянием процессов метаморфизма на кварцевожильные образования и с перемещением минеральных и флюидных включений в межзерновое пространство. Многократная деформация привела к перераспределению Al и K в структуре агрегата и накоплению их в виде субмикронных включений, таких как мусковит и биотит.

Повышенные содержания железа и магния объясняются присутствием в кварце железосодержащих минеральных включений, таких как гематит, гётит, магнетит, хлорит.

Таблица 1. Микроэлементный состав кварца, г/т
Table 1. Trace element composition of quartz, g/t

Элемент/жила Element/vein	Беркутинская Berkutinskaya n=36	Болотная Bolotnaya n=38	Толстиха Tolstikha n=12	Песчаное Peschanoe n=6	Новотроицкое Novotroitskoe n=42	IOTA-std	RQ-2K «Русский кварц» «Russian quartz»	LOD
Li	0,11–1,48 0,52/0,41	0,01–2,48 0,64/0,34	0,02–0,14 0,06/0,10	0,30–1,03 0,49/0,14	0,01–18,1 3,06/0,3	0,5	0,3	0,01
Na	0,01–5,7 7,72/0,70	0,02–12,9 2,29/0,76	2,97–108 34,2/3,63	8,7–21,3 17,12/8,42	0,9–82 28,71/22,84	0,05	0,36	0,01
Mg	0,05–8,4 1,21/0,42	0,01–2,8 0,38/0,17	0,12–2,19 0,64/0,40	0,12–0,83 0,43/0,33	0,02–54 4,28/0,37	0,01	0,2	0,01
Al	4,01–14,1 6,94/6,61	5,09–25,7 13,27/12,59	8,5–99,4 58,05/21,96	25,8–43,9 34,99/28,04	7,18–210,5 61,23/29,31	14	4,1	0,05
K	0,01–3,5 0,85/0,59	0,07–7,7 0,88/0,42	4,38–60,7 29,6/2,51	0,03–3,7 1,38/3,36	0,13–56,2 10,79/9,03	0,7	0,13	0,01
Ti	2,79–8,65 5,33/5,09	1,64–5,77 3,49/3,31	0,32–1,52 0,91/1,94	0,36–0,95 0,61/1,1	0,02–38 1,23/0,22	1,2	2,8	0,02
Cr	0,9–0,57 0,39/0,37	0,27–0,62 0,39/0,38	0,18–0,79 0,4/0,4	0,41–0,57 0,48/0,4	0,09–1,8 0,23/0,22	0,006	0,01	0,09
Mn	0,01–0,39 0,07/0,04	0–0,26 0,06/0,03	0,01–0,13 0,05/0,04	0,01–0,12 0,06/0,04	0,01–2,7 0,19/0,09	0,039	0,1	0,01
Fe	0,07–2,54 0,59/0,37	0,02–32,4 1,28/0,25	0,01–2,32 0,5/0,26	0,3–1,3 0,63/0,27	0,01–0,63 3,8/0,77	0,3	0,16	0,01
Ni	0,04–0,44 0,12/0,10	0,04–0,22 0,09/0,08	0,04–0,11 0,07/0,07	0,03–0,15 0,09/0,07	0,06–0,94 0,18/0,12	0,003	0,1	0,001
Cu	0,02–0,7 0,16/0,12	0,02–1,16 0,16/0,14	0,05–7 0,92/0,21	0,06–0,25 0,14/0,18	0,19–3,6 0,7/0,51	0,028	0,01	0,02
Zn	0,01–0,51 0,11/0,06	0,01–0,49 0,13/0,08	0,01–0,19 0,08/0,07	0,06–0,49 0,23/0,08	0,01–1,35 0,68/0,07	0,01	–	0,01
Сумма Total	7,19–46,98 18,02/17,38	7,19–92,5 23,05/22,56	16,6–282,48 125,48/47,11	36,16–74,58 56,64/59,15	8,62–532,19 114,58/77,83	16,84	8,27	

Примечание. Числитель – минимальное и максимальное значения, знаменатель – среднее значение/среднее геометрическое, n – количество измерений, LOD – предел обнаружения.

Note. The numerator is the minimum and maximum values, the denominator is the mean/geometric mean, n is the number of measurements, LOD is the detection limit.

Содержания Li, Cr, Mn по кварцево-жильным объектам меняются незначительно, более высокие значения в ряде образцов связаны с попаданием в область абляции минеральных включений, таких как литий-содержащие слюды, гранаты.

Важным показателем является содержание в кварце титана. В кварце гидротермально-метаморфогенно-метасоматического генезиса концентрации Ti несколько выше (3,49–5,33 г/т), чем в кварце гидротермально-метаморфогенного типа (0,61–1,23 г/т). Титан связан с температурными условиями минералообразования [33–35], а также входит в состав рутиловых игл субмикронного размера при кристаллизации оксида Ti в кварце. Следует отметить, что удаление рутиловых игл из кварцевых концентратов при обогащении практически невозможно.

Элементы (Cu, Ni, Zn), присутствующие в кварце в количествах менее 1 ppm, в единичных случаях до 3–7 ppm, оказывают на качество кварцевых концентратов незначительное влияние, т. к. связаны в основном с минеральными включениями, легко удаляемыми из кварца в процессе обогащения.

Кварц гидротермально-метаморфогенно-метасоматического генезиса характеризуется высоким содержанием Ti и умеренным содержанием Al (рис. 4). Содержание алюминия и Ti в значительной части образцов гидротермально-метаморфогенного кварца расположено вне поля HPQ кварца.

Расчетные значения температуры минералообразования кварца разных генетических типов (табл. 2, 3) получены на основе экспериментально выведенной в работе [36] корреляционной зависимости концентрации структурной примеси Ti в решетке кварца от температуры его кристаллизации («TitaniQ» геотермометр):

$$\lg(X_{Ti}, \text{г/т}) = (5,69 \pm 0,02) - (3765 \pm 24)/T(\text{K}). \quad (1)$$

В работе [16] приведена экспериментально построенная зависимость давления от содержания структурной примеси Ti в кварце:

$$\lg(X_{Ti}) = 5,6459 - 2794,3/T - 660,53 \cdot P^{0,35}/T + \ln(a_{TiO_2}), \quad (2)$$

где T – температура (K); P – давление (кбар); X_{Ti} – содержание Ti в решетке кварца (г/т); a_{TiO_2} – активность TiO_2 в системе ($a_{TiO_2} = 1$ при наличии в кварце включений рутила).

Полученные результаты позволили установить, что температуры образования первичнозернистого гидротермально-метаморфогенного кварца составляют 288–410 °C при значениях давления 1,5–4,6 кбар. Гранулированный гидротермально-метаморфогенно-метасоматический кварц более высокотемпературный (415–520 °C), но с близкими с гидротермально-метаморфогенным кварцем значениями давления – 1,6–4 кбар.

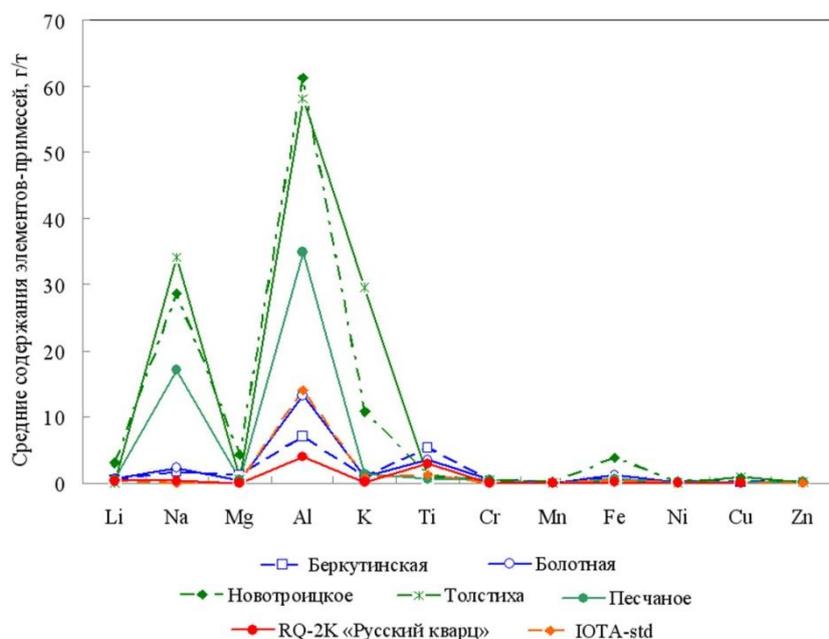


Рис. 3. Средние содержания элементов-примесей в кварце изученных объектов. Для сопоставления приведены значения элементов-примесей в кварце марки IOTA-std фирмы Unimin и кварца марки RQ-2K компании «Русский кварц»

Fig. 3. Average contents of impurity elements in quartz of the studied objects. For comparison, the values of impurity elements in quartz of the IOTA-std brand Unimin and quartz of the RQ-2K brand, Russian quartz are given

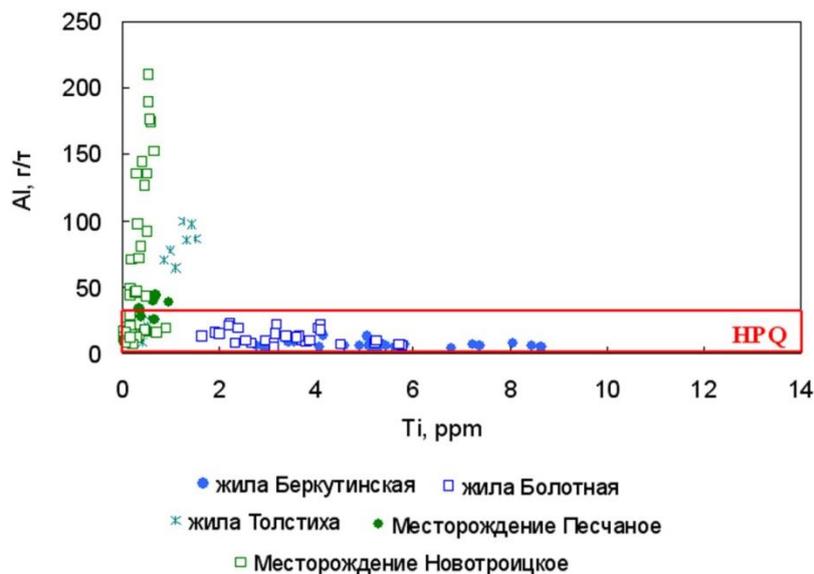


Рис. 4. График зависимости Al от Ti в кварце, на диаграмме выделена зона HPQ кварца, по [35]

Fig. 4. Graph of the dependence of Al on Ti in quartz, the HPQ zone of quartz is highlighted on the diagram, according to [35]

Таблица 2. Расчетные температуры минералообразования (T °C) и давления (кбар) гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца на основе LA-ICP-MS определений содержания Ti (X_{Ti})

Table 2. Calculated mineralization temperatures (T °C) and pressures (kbar) of hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic quartz based on LA-ICP-MS determinations of Ti content (X_{Ti})

Тип кварца Quartz type	Жила Vein	n	T	P 450	P 480
			°C		
Перекристаллизованный гидротермально-метаморфогенно-метасоматический кварц Recrystallized hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic quartz	Беркутинская Berkutinskaya	36	445–519 484	0,8–3,0 1,6	1,4–4,5 2,7
	Болотная Bolotnaya	38	415–475 456	1,8–4,7 2,6	2,9–6,9 4,0

Примечание. T °C – расчетные температуры минералообразования, формула (1), P – давление, формула (2), n – количество измерений.

Note. T °C – calculated temperatures of mineral formation, formula (1), P – pressure, formula (2), n – number of measurements.

Таблица 3. Расчетные температуры минералообразования (T °C) и давления (кбар) гидротермально-метаморфогенного кварца на основе LA-ICP-MS определений содержания Ti (X_{Ti})

Table 3. Calculated temperatures of mineral formation (T °C) and pressure (kbar) of hydrothermal metamorphogenic quartz based on LA-ICP-MS determinations of Ti (X_{Ti}) content

Тип кварца Quartz type	Жила Vein	n	T	P 340	P 360
			°C		
Первично-зернистый гидротермально-метаморфогенный кварц Primary granular hydrothermal metamorphogenic quartz	Толстиха Tolstikha	12	336–410 379	0,6–3,0 1,4	1,0–4,2 2,1
	Песчаное Peschanoe	6	341–386 363	1,1–2,7 1,9	1,7–3,9 2,7
	Новотроицкое Novotroitskoe	42	288–384 335	1,1–6,8 3,3	1,7–9,0 4,6

Примечание. T °C – расчетные температуры минералообразования, формула (1), P – давление, формула (2), n – количество измерений.

Note. T °C – calculated temperatures of mineral formation, formula (1), P – pressure, formula (2), n – number of measurements.

В работе [11] при определении P-T параметров образования кварцевых жил показано, что в более низкотемпературном гидротермально-метаморфогенном кварце количество изоморфного алюминия ниже, чем в высокотемпературном. В [37] при исследовании методом ЭПР-спектроскопии гидротермально-метаморфогенно-метасоматического кварца Кузнечихинского месторождения, установлено, что практически весь алюминий присутствует в составе минеральных включений и водосодержащих группировок, в структурном виде его содержание варьирует в пределах 5–9 г/т.

При изучении содержания структурных примесей в кварце Новотроицкого месторождения методом ЭПР-спектроскопии было установлено, что, как и в первом случае, основная часть Al преобладает в составе минеральных включений и в меньшем количестве в структурной форме (6–12 г/т). При анализе содержания Al в составе водосодержащих группировок, в том числе и флюидных включений методом ИК-спектроскопии, его количество варьирует от 1,2 до 4 г/т в кварце гидротермально-метаморфогенного генезиса (Толстиха), менее 5,7 г/т в кварце Новотроицкого месторождения и от 0,76 до 3,5 г/т в кварце Кузнечихинского месторождения [24, 37].

На рис. 3 и в табл. 1 мы наблюдаем более высокие содержания Al в гидротермально-метаморфогенном кварце, однако на основе вышесказанного следует отметить, что практически весь алюминий является неструктурной примесью и присутствует в кварце в составе минеральных включений.

Особенности технологии обогащения кварца разных генетических типов

Особенности содержания элементов-примесей в кварце различного генезиса, их присутствие в структурной и неструктурной форме позволили предложить ряд последовательных этапов обогащения кварцевого сырья, более подробно рассмотренных в работах [31, 38]. При получении высокочистого кварцевого концентрата используются ряд этапов, позволяющих максимально избавиться от неструктурных примесей, в то время как структурные примеси из кварца удалить практически невозможно. В кварце гидротермально-метаморфогенного и гидротермально-

метаморфогенно-метасоматического типа элементы-примеси преобладают в неструктурной форме, что значительно упрощает процесс обогащения и позволяет избавиться от минеральных и флюидных включений, расположенных по трещинам и в межзерновом пространстве.

Для изученных кварцевых объектов предлагается схема, включающая следующие основные операции обогащения: первая операция заключается в измельчении кварца в крупку фракции $\pm 0,1-0,4$ мм; следующая операция – удаление твердых минеральных включений трехкратной магнитной сепарацией. В случае кварца гидротермально-метаморфогенного генезиса, отличающегося содержанием большого количества флюидных включений, важным будет использование операции СВЧ декрипитации, позволяющей максимально удалить из кварца флюидные включения. Заключительной операцией обогащения является кислотная обработка кварцевой крупки в смеси 10–15 % плавиковой и соляной кислот для избавления от не удаленных при проведении предшествующих этапов минеральных и флюидных включений. Завершается процесс обогащения промывкой кварцевой крупки деионизированной водой до нейтральной pH и ее сушкой.

В промышленных условиях широко используется обладающий высокой эффективностью метод хлорирования, который позволяет удалять из кварца следовые количества водосодержащих группировок и ряд элементов-примесей, остающихся в кварце даже после высокотемпературной обработки.

Заключение

Кварцево-жилные образования гидротермально-метаморфогенно-метасоматического генезиса сложны мелко-среднезернистым кварцем двух генераций (Qz-1 и Qz-2). Важной особенностью кварца данного типа является многоэтапный характер его образования и преобразования, проявленный в неоднородности строения кварцевых агрегатов, сформированных под влиянием процессов метасоматоза и метаморфизма. Метасоматический генезис связан с постепенным переходом от мономинерального кварцевого тела к зоне полевошпатового пегматоида, а затем биотитового сланца и амфиболита. Результатом влияния

процессов высокотемпературного дислокационного метаморфизма ($T=415\text{--}520\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P=2\text{--}4$ кбар) амфиболитовой фации на кварцевые тела является перекристаллизация исходных реликтовых зерен кварца (Qz-1) с образованием более мелких новообразованных «чистых» зерен кварца (Qz-2). Высокая степень чистоты новообразованного кварца обусловлена перераспределением вредных примесей в процессе перекристаллизации из объема зерна в межзерновое пространство и по трещинам.

Образование кварцево-жильных объектов молочно-белого кварца гидротермально-метаморфогенного генезиса происходило путем заполнения системы открытых трещин, сформированных в результате сдвиго-взбросовых подвижек в массиве гранитов, диоритов, габбро, в разной степени измененных сланцев и кварцитов. Формирование кварцевых тел происходило в условиях эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма при $T=280\text{--}410\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P=2\text{--}5$ кбар.

Основное различие двух рассмотренных типов кварца заключается в интенсивности процессов метаморфизма. В случае кварца гидротермально-метаморфогенного генезиса участки перекристаллизованного «чистого» кварца расположены в приконтактовой части кварцевых тел, а в кварце гидротермально-метаморфогенно-метасоматического типа процент новообразованных зерен гораздо выше, и они расположены пределах всего кварцевого тела.

Следует отметить, что для кварцев разного генезиса при определенных P - T параметрах характерными являются близкие содержания структурных примесей с преобладанием элементов-примесей в неструктурной форме (в составе минеральных и флюидных включений). Важно отметить, что полученные методом LA-

ICP-MS спектроскопии значения содержаний элементов-примесей были выполнены на кварцевых пластинах и при проведении исследований в область абляции попали как минеральные, так и флюидные включения. В связи с этим мы наблюдаем значительные вариации содержания элементов-примесей по образцам, в зависимости от концентрации минеральных и флюидных включений. Однако в процессе обогащения происходит удаление неструктурных примесей, что позволяет снизить общее содержание элементов-примесей в кварцевой крупке. За основу предела обогащения кварца разных генетических типов мы можем взять минимальные значения содержания элементов-примесей в кварцевых пластинах (LA-ICP-MS), т. к. они близки к содержаниям структурных примесей в кварце [24, 31]. В образцах гидротермально-метаморфогенного генезиса содержание структурного алюминия варьирует: 6–12 г/т в кварце Новотроицкого месторождения; 1,2–4 г/т в кварце жилы Толстиха; от 7–8 до 25 г/т в кварце проявления Песчаное. В кварце гидротермально-метаморфогенно-метасоматического генезиса содержание структурного алюминия меняется от 5 до 9 г/т.

Таким образом, основным критерием наиболее эффективной обогатимости кварца изученных объектов является минимальное содержание элементов-примесей. Данный критерий, положенный в основу выбора гибких технологий обогащения, позволяет использовать кварц рассматриваемых объектов для получения глубокообогащенных кварцевых концентратов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ и Челябинской области в рамках научного проекта № 22-27-20077.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Trace element concentrations and mineralogy of quartz vein deposits from Southeastern Hubei Province, China / J. Wang, Z. Xie, C. Wang, Y. Hu // *Minerals*. – 2022. – V. 12. – № 7. – P. 814.
- Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the Southern Ural region, Russia / J. Götze, Y. Pan, A. Müller, E.L. Kotova, D. Cerin // *Minerals*. – 2017. – V. 7. – № 10. – P. 189.
- Sibelco IOTA. URL: <https://www.sibelco.com> (дата обращения 10.07.2022).
- Вертушков Г.Н. Разлистованный кварц с горы Хрустальной // *Зап. ВМО*. – 1946. – Т. 75. – № 4. – С. 257–264.
- Жильный кварц Урала в науке и технике. Геология основных месторождений кварцевого сырья / А.А. Евстропов, Ю.И. Бурьян, Н.С. Кухарь и др. – М.: Недра, 1995. – 207 с.
- Емлин Э.Ф., Синкевич Г.А., Якшин В.И. Жильный кварц Урала в науке и технике. – Свердловск: Средне-Уральское книжн. изд-во, 1988. – 269 с.
- Мельников Е.П. Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца. – М.: Недра, 1988. – 216 с.
- Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогенез минералов. Индивидуальность. – М.: Наука, 1975. – 339 с.
- Кораго А.А., Козлов А.В. Текстуры и структуры жильного кварца хрусталеносных областей. – Л.: Недра, 1988. – 159 с.
- Жильный кварц восточного склона Урала / Г.Н. Вертушков, Ф.Ф. Борисков, Э.Ф. Емлин, Г.А. Синкевич, Ю.А. Соколов, О.А. Суставов, В.И. Якшин // *Труды СГИ*. – 1969. – Т. 2. – № 66. – С. 82–99.
- Поленов Ю.А. Эндогенные кварцево-жильные образования Урала. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ. 2008. – 269 с.
- Реддер Э. Флюидные включения в минералах. – М.: Мир. 1987. – 637 с.
- Температуры гомогенизации и состав газовой-жидких включений в кварце месторождения «Гора Хрустальная» (Средний Урал) / Н.К. Никандрова, В.Н. Анфилов, М.А. Игуменцева, Л.Я. Кабанова // *Доклады Академии наук*. – 2014. – Т. 456. – № 1. – С. 91–94.
- Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. Минерация шовных зон Урала. – Екатеринбург: Изд. УРО РАН, 2007. – 187 с.
- Express multi-element determination in lake sediments by laser ablation mass-spectrometry (LA-ICP-MS) / A.V. Maslennikova, D.A. Artemyev, M.V. Shtenberg, K.A. Filippova, V.N. Udachin // *Limnology and Oceanography: Methods*. – 2020. – V. 18. – P. 411–423.
- Iolite: freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data / C. Paton, J. Hellstrom, B. Paul, J. Woodhead, J. Hergt // *J. Anal. Atomic Spectr.* – 2011. – V. 26. – P. 2508–2518.
- Longerich H., Günther D., Jackson S. Elemental fractionation in laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry // *Fresenius' journal of analytical chemistry*. – 1996. – V. 355. – № 5. – P. 538–542.
- Arc-continent collision in the Southern Urals / D. Brown, P. Spadea, V. Puchkov, J. Alvarez-Marron, R. Herrington, A.P. Willner, R. Hetzel, Y. Gorozhanina, C. Juhlin // *Earth-Science Reviews*. – 2006. – V. 79. – P. 261–287.
- Puchkov V.N. Structural stages and evolution of the Urals // *Mineralogy and Petrology*. – 2013. – V. 107. – P. 3–37.
- Геологическое строение и генезис кварцевых жил Уфалейского комплекса на примере жилы 2136 / В.Н. Анфилов, Л.Я. Кабанова, М.А. Игуменцева, Н.К. Никандрова // *Доклады Академии наук*. – 2016. – Т. 466. – № 4. – С. 443–446.

21. Паняк С.Г., Макаров А.Б., Страшенко Г.И. Особенности геологического строения и условий формирования Новотроицкого месторождения высокочистого кварца // Известия Уральского государственного горного университета. – 2001. – № 13. – С. 136–139.
22. Корекина М.А. Оценка возможности использования молочно-белого кварца Новотроицкого месторождения для получения кварца, Южный Урал // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 99–108.
23. Mineral deposits of the Urals and links to geodynamic evolution / R.J. Herrington, V.V. Zaikov, V.V. Maslennikov, D. Brown, V.N. Puchkov // Economic Geology. – 2005. – V. 100. – № 5. – P. 1069–1095.
24. Геохимия и условия образования жил молочно-белого кварца максютовского метаморфического комплекса (Южный Урал) / М.А. Корекина, В.П. Лютоев, Д.А. Артемьев, М.В. Штенберг // Геохимия. – 2022. – Т. 67. – № 11. – С. 1–15.
25. Геологическое строение и петрография месторождения жильного кварца «Песчаное» (Южный Урал) / Л.Я. Кабанова, М.А. Игуменцева, Н.К. Никандрова, В.Н. Анфилогов, В.М. Рыжков // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 5. – С. 18–24.
26. Геологическое строение, петрография и технологические характеристики кварца кварцевого месторождения «жила Толстиха» / В.Н. Анфилогов, Л.Я. Кабанова, М.А. Игуменцева, Р.Ш. Насыров, М.В. Штенберг, А.С. Лебедев, В.М. Рыжков, П.А. Ардышев // Разведка и охрана недр. – 2012. – № 12. – С. 12–16.
27. Texture and trace element geochemistry of quartz: a review / S.A. Shah, Y. Shao, Y. Zhang, H. Zhao, L. Zhao // Minerals. – 2022. – V. 12. – № 8. – P. 1042.
28. Götze J., Pan Y., Müller A. Mineralogy and mineral chemistry of quartz: a review // Mineral. Mag. – 2021. – V. 85. – № 5. – P. 639–664.
29. Assessment of shear zone-derived quartz from the Etam Area, Southwest Cameroon as potential high-purity quartz resource: petrography, geochemistry and technological studies / C. Sigue, A. Moundi, C.E. Suh, M.F.M. Santos, E. Fujiwara, C.K. Suzuki, J.L. Ndema-Mbongue // SN Applied Sciences. – 2020. – № 2. – P. 551.
30. Савичев А.Н., Красильников П.А. Исследования по обогащению природного кварца из сырьевых источников с разным количеством флюидных включений // Обогащение руд. – 2022. – № 5. – С. 3–10.
31. Элементы-примеси, содержание и распределение флюидных включений в молочно-белом кварце месторождений южного Урала / М.А. Корекина, А.Н. Савичев, Д.А. Артемьев, О.А. Черкасова // Записки РМО. – 2022. – Т. 151. – № 5. – С. 71–86.
32. Русский кварц. URL: <https://russianquartz.com/?page=sort=ru> (дата обращения 10.07.2022).
33. Huang R., Audetat A. The titanium-in-quartz (TitaniQ) thermobarometer: a critical examination and re-calibration // Geochim. and Cosmochim. Acta. – 2012. – V. 84. – P. 75–89.
34. TitaniQ under pressure: the effect of pressure and temperature on the solubility of Ti in quartz / J.B. Thomas, E.B. Watson, F.S. Spear, P.T. Shemella, S.K. Nayak, J. Lanzirrotti // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2010. – V. 160. – № 5. – P. 743–759.
35. Work D.A., Watson B.E. TitaniQ: a titanium in quartz geothermometer // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2006. – V. 152. – P. 743–754.
36. Rask B.G., Lowers H.A., Reed M.H. Trace elements in hydrothermal quartz: relationships to cathodoluminescence textures and insights into vein formation // Geology. – 2008. – V. 36. – P. 547–550.
37. Микроэлементный состав жильного кварца Кузнецкихинского месторождения (Южный Урал) / М.А. Корекина, В.П. Лютоев, С.Н. Шанина, М.В. Штенберг // Обогащение руд. – 2020. – № 5. – С. 23–29.
38. Ryzhkov V.M., Igumentseva M.A., Shtenberg M.V. Technology for quality assessment of quartz raw materials // Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences / Eds. S. Votyakov, D. Kiseleva, V. Grokhovsky, Y. Shchapova. – Cham: Springer, 2020. – P. 195–199.

Поступила: 15.07.2022 г.

Дата рецензирования: 22.09.2022 г.

Информация об авторах

Корекина М.А., кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник геологического отдела Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

Савичев А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории минералогии рудогенеза Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

UDC 553.87

ELEMENTS-IMPURITIES IN QUARTZ OF HYDROTHERMAL-METAMORPHIC AND HYDROTHERMAL-METAMORPHOGENIC-METASOMATIC GENESIS (SOUTH URALS)

Maria A. Korekina¹,
maria@mineralogy.ru

Alexander N. Savichev¹,
ansavichev@mineralogy.ru

¹ South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geocology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ilimensky reserve, Miass, 456317, Russia.

The relevance of the study is caused by the study and involvement of quartz-vein formations of various genetic types in the technological redistribution.

Purpose: to determine the content of impurity elements in quartz of different genetic types and the degree of its suitability for obtaining high-purity quartz concentrates.

Objects: quartz-vein objects of hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic type (Berkutinskaya vein, Bolotnaya vein) and hydrothermal-metamorphogenic type (Peschanoe occurrence, Tolstikhina vein, Novotroitskoe deposit).

Methods: LA-ICP-MS spectroscopy of impurity elements, microscopic studies of quartz, estimation of P-T parameters of mineral formation.

Results. It was found that veins of hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic type are composed of multi-grained granular transparent, translucent, icy, sugar-like quartz, while quartz-vein objects of hydrothermal-metamorphogenic type are veins of execution and consist mainly of milky-white quartz. Quartz-vein formations of two genetic types differ in geological localization conditions, mineral formation temperatures, granulometric characteristics, the presence and location of mineral and fluid inclusions, as well as the content of the main petrogenetically informative elements-impurities (Li, Na, Mg, Al, K, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn). It is shown that hydrothermal-metamorphogenic quartz is characterized by lower (288–410 °C) formation temperatures compared to hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic quartz (415–519 °C), at close pressure values (2–4 kbar) and higher content of impurity elements (up to 535 g/t). The purity of quartz grains of hydrothermal-metamorphogenic-metasomatic genesis is associated with repeated exposure to the processes of metamorphism and metasomatism, in which mineral and fluid inclusions were displaced from quartz grains into the intergranular space. The minimum values of the element content according to LA-ICP-MS spectroscopy are close to the values for the content of elements in the structural form and do not exceed 5–12 g/t for all types of quartz, with the exception of milky-white quartz of Peschanoe occurrence (up to 25 g/t). The minimum values for the content of elements-impurities in quartz show the limit of its enrichment and allow using a multi-stage enrichment system to obtain quartz concentrates of high purity.

Key words:

quartz, LA-ICP-MS spectroscopy, high-purity quartz, trace element composition, metamorphism, metasomatism, mineral impurities, fluid inclusions.

The study was financially supported by the Russian Science Foundation and the Chelyabinsk Region within the framework of the scientific project no. 22-27-20077 and within the framework of the State Assignment no. GR 122062100023-5.

REFERENCES

- Wang J., Xie Z., Wang K., Hatreis Yu. Trace element concentrations and mineralogy of quartz vein deposits of Southeastern Hubei Province, China. *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 7, pp. 814.
- Götze J., Pan Y., Müller A., Kotova E.L., Cerin D. Trace element composition and defective structures of high-purity quartz from the Southern Urals, Russia. *Minerals*, 2017, vol. 7, no. 10, pp. 189.
- Sibelco IOTA. Available at: <https://www.sibelco.com> (accessed 10 July 2022).
- Vertushkov G.N. Razlistovanny kvarts s gory Khrustalnoy [Leafed quartz from the Crystal Mountain]. *Zap. WMO*, 1946, vol. 75, no. 4, pp. 257–264.
- Evstropov A.A., Buryan Yu.I., Kukhar N.S. *Zhiloy kvarts Urala v nauke i tekhnike. Geologiya osnovnykh mest rozhdeniya kvartsevoogo syrta* [Vein quartz of the Urals in science and technology. Geology of the main deposits of quartz raw materials]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 207 p.
- Emlin E.F., Sinkevich G.A., Yakshin V.I. *Zhiloy kvarts Urala v nauke i tekhnike* [Vein quartz of the Urals in science and technology]. Sverdlovsk, Sredne-Uralskoe knizhnoe izdatelstvo, 1988. 269 p.
- Melnikov E.P. *Geologiya, genesis i promyshlennyye tipy mestorozhdeniy kvartsa* [Geology, genesis and industrial types of quartz deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 216 p.
- Grigoriev D.P., Zhabin A.G. *Ontogeniya mineralov. Individuy* [Ontogeny of minerals. Individuals]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 339 p.
- Korago A.A., Kozlov A.V. *Tekstury i struktury zhilogo kvartala khrustalenykh ekonomicheskikh oblastey* [Textures and structures of vein quartz of crystal-bearing regions]. Leningrad, Nedra Publ., 1988. 159 p.
- Vertushkov G.N., Boriskov F.F., Emlin E.F., Sinkevich G.A., Sokolov Yu.A., Sustavov O.A., Yakshin V.I. Zhilny kvarts vos-tochnogo sklona Urala [Vein quartz of the eastern slope of the Urals]. *Trudy SGI*, 1969, vol. 2, no. 66, pp. 82–99.
- Polenov Yu.A. *Endogennye kvartsevo-zhilye obrazovaniya Urala* [Endogenous quartz-vein formations of the Urals]. Yekaterinburg, UGSU Publ. house, 2008. 269 p.
- Redder E. *Flyuidnye vklucheniya v mineralakh* [Fluid inclusions in minerals]. Moscow, Mir Publ., 1987. 637 p.
- Nikandrova N.K., Anfilogov V.N., Igumentseva M.A., Kabanova L.Ya. Homogenization temperatures and the composition of gas-liquid inclusions from the Gora Khrustalnaya deposit (Middle Urals). *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 456, no. 1, pp. 554–557. In Rus.
- Ogorodnikov V.N., Sazonov V.N., Polenov Yu.A. *Minerageniya shovnykh zon Urala* [Mineralogy of suture zones of the Urals]. Yekaterinburg, URO RAS Publ., 2007. 187 p.
- Maslennikova A.V., Artemyev D.A., Shtenberg M.V., Filippova K.A., Udachin V.N. Express determination of the multi-element composition of lake sediments by laser ablation mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Limnology and oceanography: methods*, 2020, vol. 18, pp. 411–423.

16. Paton S., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J., Hergt J. Iolite: free software for visualization and processing of mass spectrometric data. *J. Anal. Atomic Spectrometry*, 2011, vol. 26, pp. 2508–2518.
17. Longerich H., Gunther D., Jackson S. Fractionation of elements in plasma mass spectrometry with inductively coupled laser ablation. *Journal of Analytical Chemistry Fresenius*, 1996, vol. 355, no. 5, pp. 538–542.
18. Brown D., Spadea P., Puchkov V., Alvarez-Marron J., Herrington R., Willner A.P., Hetzel R., Gorozhanina Yu., Yukhlin S. Collision of an arc and a continent in the Southern Urals. *Scientific Reviews of the Earth*, 2006, vol. 79, pp. 261–287.
19. Puchkov V.N. Structural stages and evolution of the Urals. *Mineralogy and petrology*, 2013, vol. 107, pp. 3–37.
20. Anfilogov V.N., Kabanova L.Ya., Igumentseva M.A., Nikandrova N.K. Geological structure and genesis of quartz veins in the Ufaiei complex exemplified by the Vein 2136. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 466, no. 2, pp. 109–112. In Rus.
21. Panyak S.G., Makarov A.B., Strashnenko G.I. Features of the geological structure and conditions of formation of the Novotroitsky deposit of high-purity quartz. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2001, no. 13, pp. 136–139.
22. Korekina M.A. Assessment of possibility of using milky-white quartz of Novotroitskoe deposit for obtaining high-purity quartz, South Urals. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 99–108. In Rus.
23. Herrington R.J., Zaikov V.V., Maslennikov V.V., Brown D., Puchkov V.N. Mineral deposits of the Urals and connections with geodynamic evolution. *Economic geology*, 2005, vol. 100, no. 5, pp. 1069–1095.
24. Korekina M.A., Lyutov V.P., Artemyev D.A., Shtenberg M.V. Geochemistry and formation conditions of milk-white quartz veins in the Maksyutovo metamorphic complex, Southern Ural. *Geochem. Inter*, 2022, vol. 60, no. 11, pp. 1122–1135. In Rus.
25. Kabanova L.Ya., Igumentseva M.A., Nikandrova N.K., Anfilogov V.N., Ryzhkov V.M. Geologicheskoe stroenie i petrografiya mestorozhdeniya zhilnogo kvartsa «Peschanoe» [Geological structure and petrography of the vein quartz deposit Peschanoe (South Urals)]. *Razvedka i okhrana neдр*, 2019, no. 5, pp. 18–24.
26. Anfilogov V.N., Kabanova L.Ya., Igumentseva M.A., Nasyrov R.Sh., Shtenberg M.V., Lebedev A.S., Ryzhkov V.M., Ardyshev P.A. Geologicheskoe stroenie, petrografiya i tekhnologicheskie kharakteristiki kvartsa kvartsevogo mestorozhdeniya «zhila Tolstikha» [Geological structure, petrography and technological characteristics of quartz of the quartz deposit «zhila Tolstikha»]. *Razvedka i okhrana neдр*, 2012, no. 12, p. 12–16.
27. Shah S.A., Shao Yu., Zhang Yu., Zhao H., Zhao L. Texture and geochemistry of quartz trace elements: A review. *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 8, pp. 1042.
28. Gotze J., Pan Ya., Muller A. Mineralogy and mineral chemistry of quartz: review. *Mineral. Journal*, 2021, vol. 85, no. 5, pp. 639–664.
29. Sigue K., Maundi A., Suh K.E., Dos Santos M.F.M., Fujiwara E., Suzuki K.K., Ndema-Mbonge J.L. Assessment of shear zone-derived quartz from the Etam area, southwest Cameroon as potential high-purity quartz resource: petrography, geochemistry and technological studies. *SN Applied Sciences*, 2020, no. 2, pp. 551.
30. Savichev A.N., Krasilnikov P.A. Studies on the enrichment of natural quartz from raw sources with different amounts of fluid inclusions. *Obogashchenie Rud*, 2022, no. 5, pp. 3–10. In Rus.
31. Korekina M.A., Savichev A.N., Artemyev D.A., Cherkasova O.A. Elements-impurities, content and distribution of fluid inclusions in milky-white quartz deposits of the Southern Urals. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2022, vol. 151, no. 5, pp. 71–86. In Rus.
32. *Russky kvarts* [Russian quartz]. Available at: <https://russianquartz.com/?page=sort=ru> (accessed 10 July 2022).
33. Huang R., Audetat A. Thermobarometer «Titanium in quartz» (Titanium): critical verification and recalibration. *Geochim. and Cosmochim. Acta*, 2012, vol. 84, pp. 75–89.
34. Thomas J.B., Watson E.B., Spear F.S., Shemella P.T., Nayak S.K., Lanzirrotti J. Titanic under pressure: the effect of pressure and temperature on the solubility of Ti in quartz. *Contribution to mineralogy and petrology*, 2010, vol. 160, no. 5, pp. 743–759.
35. Work D.A., Watson B.E. Titanic: titanium in quartz geothermometer. *Contribution to mineralogy and petrology*, 2006, vol. 152, pp. 743–754.
36. Rask B.G., Lowers H.A., Reed M.H. Trace elements in hydrothermal quartz: interrelation with cathodoluminescence textures and understanding of vein formation. *Geology*, 2008, vol. 36, pp. 547–550.
37. Korekina M.A., Lyutov V.P., Shanina S.N., Shtenberg M.V. Microelement composition of vein quartz of the Kuznechikhinskoe deposit (South Urals). *Obogashchenie Rud*, 2020, no. 5, pp. 23–29. In Rus.
38. Ryzhkov V.M., Igumentseva M.A., Steinberg M.V. Technology for assessing the quality of quartz raw materials. *Minerals: structure, properties, research methods. Springer's writings on Earth and Environmental Sciences*. Eds. S. Votyakov, D. Kiseleva, V. Grokhovskiy, Yu. Shchapova. Cham, Springer, 2020. pp. 195–199.

Received: 15 July 2022.

Reviewed: 22 September 2022.

Information about the authors

Maria A. Korekina, Cand. Sc., junior researcher, South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Alexander N. Savichev, Cand. Sc., senior researcher, South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.