

УДК 549.514.51

**ПОТЕНЦИАЛ МОЛОЧНО-БЕЛОГО КВАРЦА
ЛАРИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГЛУБОКООБОГАЩЕННЫХ КВАРЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ**

М. А. Корекина, А. Н. Савичев

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
E-mail: maria@mineralogy.ru, терр. Ильменского заповедника, 456317, г. Миасс, Россия*

Представлена оценка использования молочно-белого кварца Ларинского кварцево-жильного месторождения для получения глубокообогащенных кварцевых концентратов с суммарным содержанием примесей менее 50 ppm. С помощью методов оптической микроскопии и ICP-OES спектromетрии проанализированы структурно-текстурные особенности молочно-белого кварца и выполнено сравнение элементного состава кварцевых концентратов предварительного обогащения с результатами по концентратам глубокого обогащения. Низкие концентрации элементов-примесей в глубокообогащенных кварцевых концентратах из большого количества кварцево-жильных образований Ларинского месторождения подтвердили возможность их использования в качестве сырья для производства высокотехнологичных кварцевых продуктов.

Молочно-белый кварц, кварцевый концентрат, обогащение, ICP-OES спектроскопия, элементы-примеси

DOI: 10.15372/FTPRI20230117

Кварц — природное сырье, переработка которого с помощью современных технологий обогащения позволяет использовать его для нужд наукоемких и высокотехнологичных отраслей промышленности. Возрастает спрос на кварцевое сырье для получения кварцевых концентратов требуемой в промышленности чистоты [1]. В настоящее время в качестве сырья используются кварцевые концентраты с суммарным содержанием элементов-примесей менее 50 ppm [2–4]. Они применяются как промежуточный продукт для производства прозрачного кварцевого стекла, оптического волокна, поликремния, кварцевых тиглей, светотехнических изделий и т. д.

Ларинское кварцево-жильное месторождение, расположенное на территории Челябинской области в 70 км от г. Миасс, является перспективным объектом для производства промышленно пригодного кварцевого сырья. Активный интерес к месторождению возник в начале 60-х годов прошлого столетия, когда в СССР исследовательскими работами была доказана возможность замены горного хрусталя для плавки прозрачного кварцевого стекла концентратами из

гранулированного и прозрачного кварца [5]. Отметим, что на Ларинском месторождении кроме гранулированного перекристаллизованного кварца находятся жилы, представленные молочно-белым кварцем. Они составляют до 57 % всех жил месторождения [6]. Молочно-белый кварц ранее не попадал в круг интересов промышленности из-за сложности процесса его обогащения — наличия большого количества газово-жидких включений (ГЖВ). Однако активно развивающиеся в последние годы процессы переработки природного кварца позволяют рассматривать его использование для получения глубокообогащенных кварцевых концентратов.

Цель настоящей работы — оценка потенциала кварца Ларинского месторождения для получения кварцевых концентратов уровня HPQ (High Purity Quartz) с суммарным содержанием примесей менее 50 ppm. Для этого проведено поэтапное обогащение кварца традиционными методами, в том числе и с использованием дополнительных операций, таких как СВЧ-декрепитация [7]. Эффективность обогащения определена по результатам оценки содержания элементов-примесей в концентратах предварительного и глубокого обогащения методом ICP-OES спектроскопии.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На Ларинском месторождении выборочно опробованы 13 жил, сложенные молочно-белым кварцем. Отобрано 18 штучных образцов кварца без видимых минералов-примесей, характеризующих типичные текстурно-структурные особенности кварцевых тел. Из образцов изготовлены петрографические шлифы и кварцевая крупка для проведения аналитических исследований качественных показателей кварцевого сырья.

Минералого-петрографический анализ шлифов с определением количества и локализации минеральных и флюидных включений в кварце выполнен при помощи поляризационных микроскопов AxioLab ZS и Olympus BX 51 с цифровыми приставками.

Валовый состав содержания элементов-примесей в кварцевой крупке предварительного и глубокого обогащения изучен с использованием метода ICP-OES спектроскопии (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитики М. В. Штенберг, Р. Т. Занулина). Исследования проведены на оптико-эмиссионном спектрометре Varian-720-ES с индуктивно-связанной плазмой по утвержденной методике количественного химического анализа НСАМ № 499-АЭС/МС (редакция 2015 г.). Пробоподготовка включала отбор методом квартования кварцевой крупки массой ~0.1 г с растворением в 3 мл концентрированной HF квалификации “ос. ч”. Полученный осадок растворялся в 10 мл деионизованной воды и анализировался на комплекс элементов-примесей: K, Na, Al, Cr, Fe, Mn, Mg, Li, Cu, Ca и Ti. Для построения градуировочных кривых использовались растворы с концентраций элементов 0.1, 1 и 10 ppm, приготовленные из мультиэлементных стандартов Inorganic Ventures (IV-21, IV-7, IV-STOCK-29). Измерения проводились в трех параллелях, стандартное отклонение составляло 5 отн. %.

Согласно ТУ 5726-002-11496665-97, по степени обогащения кварца и качественным показателям выделяют концентраты предварительного обогащения (ручная разборка, дробление, электромагнитная сепарация) и концентраты глубокого обогащения (ручная разборка, дробление, электромагнитная сепарация, СВЧ-декрепитация, кислотное травление) [8].

Схема обогащения молочно-белого кварца Ларинского месторождения приведена на рис. 1 и включает следующие основные операции. Для получения кварцевой крупки образцы дробили вручную до размера ~5 × 5 см и измельчали на дисковой мельнице DM200 Retsch. Последующая классификация кварцевой крупки до промышленно используемой фракции (–0.4 + 0.1 мм) проводилась путем просеивания с использованием полиэтиленовых сит. В процессе дробления кусков кварца происходило частичное удаление минеральных и газово-жидких включений, распо-

ложенных в межзерновом пространстве и по трещинам. Следует учитывать, что прочность кварца выше прочности большинства минеральных включений (слюды, полевых шпатов, гетита и т. д.). Измельчение включений происходит более эффективно на фоне кварца, они накапливаются в мелкой (до 0.1 мм) фракции и удаляются при последующем просеивании. Однако в молочно-белом кварце, характеризующемся низкими содержаниями минеральных включений, наблюдается большое количество ГЖВ. Отмечается эффект, связанный с более полным механическим вскрытием и удалением таких включений, имеющих ленточное и цепочечное расположение по трещинам. При проведении дробления кварца важно учитывать форму границ кварцевых зерен, так как наличие ступенчатых, зубчатых и фьордовых границ значительно ухудшает процесс обогащения.



Рис. 1. Схема обогащения молочно-белого кварца Ларинского месторождения

Полиградиентная электромагнитная сепарация кварцевой крупки выполнялась с целью удаления всего спектра магнитных включений. Процедура проводилась на сепараторе ЭВС-10/05 при последовательной смене токов намагничивающей катушки 2, 5 и 10 А. Удалялась часть железосодержащих минеральных включений, таких как магнетит, биотит, гетит; зерен кварца с примазками и вростками минеральных включений; металлической стружки, натертой на поверхность кварцевых зерен, от сит и деталей дисковой мельницы и магнитного сепаратора. На данном этапе получена кварцевая крупка предварительного обогащения.

Для проведения сверхвысокочастотной декрепитации газовой-жидких включений в кварцевой крупке использовалась бытовая микроволновая печь, в которой в течение 3 мин на частоте 2.3–2.5 ГГц происходило вскрытие ГЖВ. Уникальность применения данного метода при обогащении молочно-белого кварца связана с присутствием в нем большого количества флюидных включений. Основное отличие данной методики от ранее используемых [9, 10] — быстрый нагрев самого включения, при этом температура кварца не меняется. Негативно влияющие на процесс удаления ГЖВ изменение хрупкости кварца и повышение его пластичности не

наблюдаются. Быстрый нагрев газовой-жидких включений происходит вследствие резонансных СВЧ колебаний молекул воды с используемой частотой печи. СВЧ-декрепитация как специальный метод обогащения хорошо зарекомендовала себя в ряде исследовательских работ по очистке кварцевой крупки от газовой-жидких включений [11–13]. Эффективность метода, установленная при изучении кварца месторождений Урала, составляет до 55 % [7].

Кислотная обработка происходит с использованием смеси соляной и плавиковой кислот при нагревании до температуры 60 °С в течение 1 ч. Данный процесс позволяет избавиться от пленочных загрязнений и удалить оставшиеся в кварце после проведения предыдущих этапов минеральных и газовой-жидких включений. Установлено, что использование плавиковой и соляной кислот в реакционной смеси при химическом обогащении кварца значительно снижает содержание элементов-примесей. Так происходит эффективное удаление основных для молочно-белого кварца элементов — алюминия, калия, магния и натрия (входящих в состав газовой-жидких включений). В процессе кислотного травления наблюдается уменьшение массы кварцевой крупки, возникшее при растворении поверхности кварцевых зерен.

Финишная промывка деионизированной водой до уровня нейтральной рН позволяет удалить остатки кислоты с поверхности зерен. Далее проводится сушка кварцевой крупки при нагревании до температуры 60–80 °С, после чего получается кварцевый концентрат глубокого обогащения.

Данная схема зарекомендовала себя при обогащении кварца из разных месторождений [14–20] и относится к лабораторным методам оценки кварцевого сырья. С целью определения эффективности обогащения проведено опробование и дальнейшее сравнение результатов анализа кварцевых концентратов фракции 0.1–0.4 мм, отобранных на начальной стадии обогащения и после обогащения (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В изученных жилах по величине индивидов установлен кварц двух типов: неравномерный мелкозернистый в виде агрегата с размером зерен от 0.01–0.1 мм до 1 см, обладающий катакластической структурой, и шестоватый крупный гигантозернистый кварц. Кварц первого типа в шлифах состоит из реликтовых и новообразованных зерен, преобладающих в шлифе (рис. 2а). Форма реликтовых зерен кварца (Qz-1) удлиненно-призматическая, в продольных сечениях до шестоватой, в поперечных сечениях близкая к изометричной.

Во фрагментах реликтового кварца (Qz-1) отчетливо проявлены следы деформации. Хрупкая деформация в зернах (Qz-1) представлена многочисленными внутризерновыми и трансзерновыми трещинами, к которым приурочены ГЖВ размером 10–15 мкм. Они формируют цепочки, густо насыщенные включениями газа и жидкости. Ряд зерен имеет форму блоков (рис. 2б). Они удлиненные, ориентированы преимущественно в одном направлении. В сечении шлифа границы блоков часто неправильные, извилистые. Деформированный кварц отличается волнистым погасанием и наличием пластинок Бема. В шлифе встречаются редкие единичные чешуйки слюды и магнетита размером менее 0.01 мм, иногда диагностируемые среди цепочек ГЖВ. Зерна жильного кварца часто сдвойникованы. Двойники имеют ступенчато-зубчатые, с входящими углами границы со смежными зернами. Новообразованный кварц (Qz-2) развивается по полосам деформации среди реликтовых зерен, где создает поля и вытянутые цепочки, участками разделяющие деформированный индивид на фрагменты. Границы зерен извилистые, ступенчато-зубчатые. Новообразованный кварц чистый, прозрачный, без следов деформации и ГЖВ.

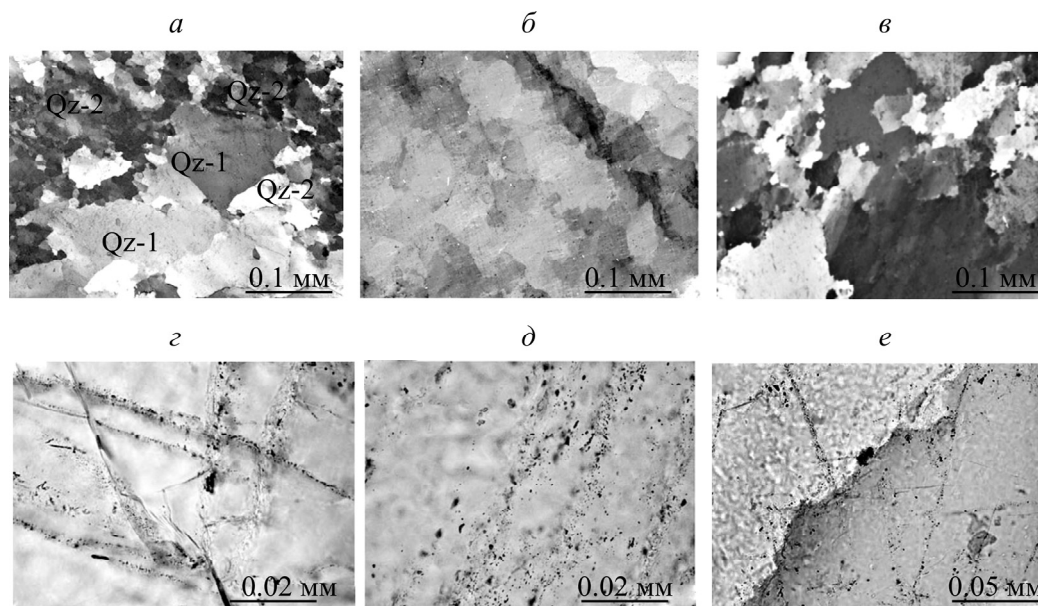


Рис. 2. Микрофотографии шлифов молочно-белого кварца: *а* — реликтовые (Qz-1) и новообразованные (Qz-2) зерна кварца; *б* — блокованный кварц; *в* — сложная форма границ кварцевых зерен; *г* — ленточное расположение флюидных включений в кварце; *д* — высокое содержание флюидных включений в кварце; *е* — минеральное включение (гетит) в межзерновом пространстве

Кварц второго типа сложен зернами удлиненно-призматической формы в продольных сечениях либо неправильной, но близкой к изометричной в поперечных сечениях, размер зерен 0.8–3.0 см. В зернах отчетливо проявлены следы хрупкой и пластической деформаций. Погасание преимущественно однородное, но встречаются деформированные зерна кварца с волнистым погасанием. Границы зерен простые, прямолинейные, но наблюдаются сложные, зубчато-ступенчатые, иногда с входящими углами (рис. 2в). Хрупкая деформация представлена прямолинейными, местами извилистыми, иногда пересекающимися внутризерновыми трещинами. К трещинам приурочены цепочки ГЖВ (рис. 2г). Значительная часть крупных ГЖВ (~ 15 мкм) расположена беспорядочно в объеме кварцевых зерен. Следует отметить, что содержание ГЖВ меняется по образцам (рис. 2д). Ряд зерен блокованы, блоки в большинстве случаев слабо разориентированы. Отмечаются участки фрагментарной структуры. Включения минералов в шлифе представлены единичными чешуйками слюды и гетита, гидрогетитом, псиломеланом (рис. 2е).

Свойствами, определяющими качественные характеристики кварцевых концентратов, являются наличие и локализация в них структурных примесей (Al^{3+} , Fe^{3+} , B^{3+} , Ti^{4+} , Ge^{4+} , P^{5+}), входящих в кристаллическую решетку минерала, а также неструктурных примесей, таких как минеральные и газовой-жидкие включения [17–21]. Современные технологии обогащения позволяют избавиться от большей части минеральных примесей в кварце, расположенных по трещинам и в межзерновом пространстве, за исключением субмикроскопических, которые в виде сростков находятся внутри кварцевого зерна [22, 23]. Основная проблема связана с удалением примесей в структурной форме, так как современные методы обогащения не могут решить данную задачу, хотя химическое выщелачивание с использованием смеси кислот ($\text{HF} + \text{HCl}$) позволяет удалить часть структурных примесей с поверхности зерен кварцевой крупки [10, 24–26]. Сложность обогащения молочно-белого кварца связана с большим количеством разноразмерных ГЖВ, расположенных в объеме кварцевых зерен.

Изменение содержаний элементов-примесей в кварцевых концентратах в процессе обогащения проиллюстрировано диаграммой на рис. 3. Анализ элементного состава кварцевых концентратов предварительного обогащения отражает элементный состав примесей в кварце (рис. 3а). Преобладающими примесями являются железо и марганец. Их присутствие связано с наличием в кварце минеральных включений гетита, гидрогетита, псиломелана и других минералов оксидов и гидроксидов Fe и Mn в зоне гипергенеза кварцевых жил.

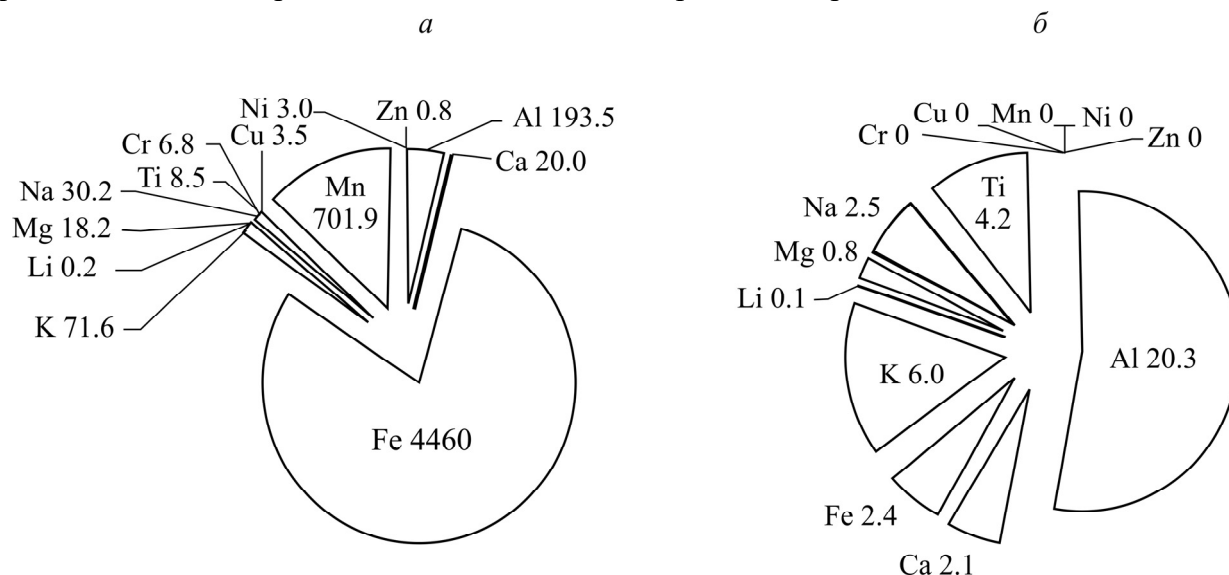


Рис. 3. Среднее содержание основных элементов-примесей в молочно-белом кварце: *а* — исходный продукт; *б* — концентрат HPQ ($n=18$ проб). Значение содержаний приведено в миллионных долях, “0” — ниже предела измерения

В результате обогащения наблюдается резкое уменьшение количества примесных элементов в кварцевых концентратах по всему спектру элементов-примесей. Такие элементы, как Cr, Cu, Mn, Ni и Zn, при их незначительных количествах в необогащенной кварцевой крупке после обогащения не фиксируются в кварцевых концентратах (их содержания находятся за пределами чувствительности анализа). Количественный состав представлен в таблице.

Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах, ppm

Материал	Al	Ca	Fe	K	Li	Mg	Na	Ti	Cr	Cu	Mn	Ni	Zn
Исходный	193.5	20.0	4460	71.6	0.2	18.2	30.2	8.5	6.8	3.5	701.9	3	0.8
Концентрат глубокого обогащения	20.3	2.1	2.4	6	0.1	0.8	2.5	4.2	0	0	0	0	0
Примеси (уменьшение в разы)	9.5	9.5	1858	11.9	2.0	22.8	12.1	2.0	—	—	—	—	—

В глубокообогащенных кварцевых концентратах элементный состав примесей кардинально меняется. Преобладающими элементами среди них становятся Al, K и Ti. (рис. 3б). Диапазоны колебаний содержаний изученного спектра элементов в обогащенных кварцевых концентратах молочно-белого кварца приводятся на рис. 4. Прямоугольники на рисунке ограничены верхними максимальными и нижними минимальными значениями, линия в прямоугольниках — значения медианы. Линии показателей качества приведены по спецификации товарных продуктов [20].

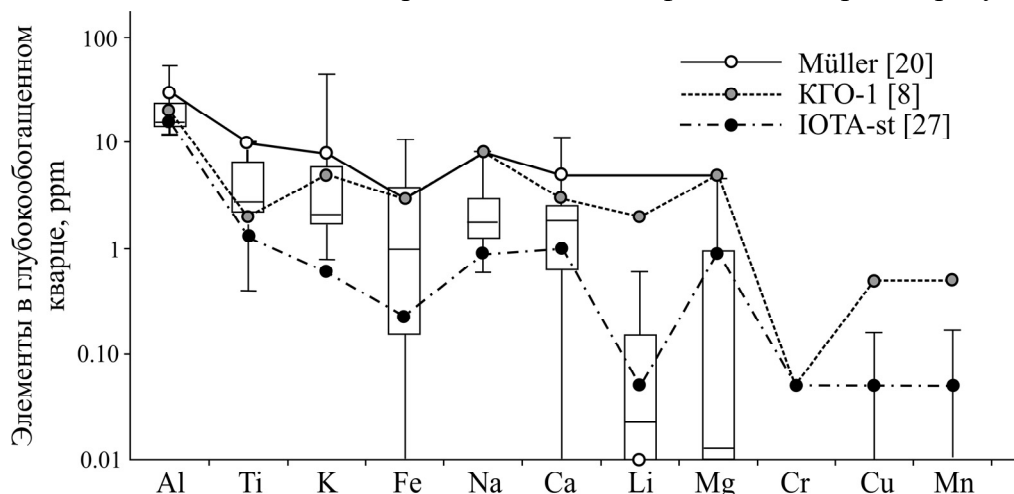


Рис. 4. Диапазоны колебаний элементов-примесей в кварцевых концентратах НРQ из сырья Ларинского месторождения (по данным ICP-OES) в сравнении с показателями качества производителей высокочистого кварца.

В качестве показателя, объективно оценивающего степень очистки кварца, использовалась их сумма (рис. 5). Такой подход к определению параметров, регламентирующих глубокообогащенный кварц уровня НРQ, оправдан на стадии прогнознй оценки качества сырья из-за растущего потребления и расширения спектра высокотехнологичного применения чистых кварцевых продуктов из природного кварца.

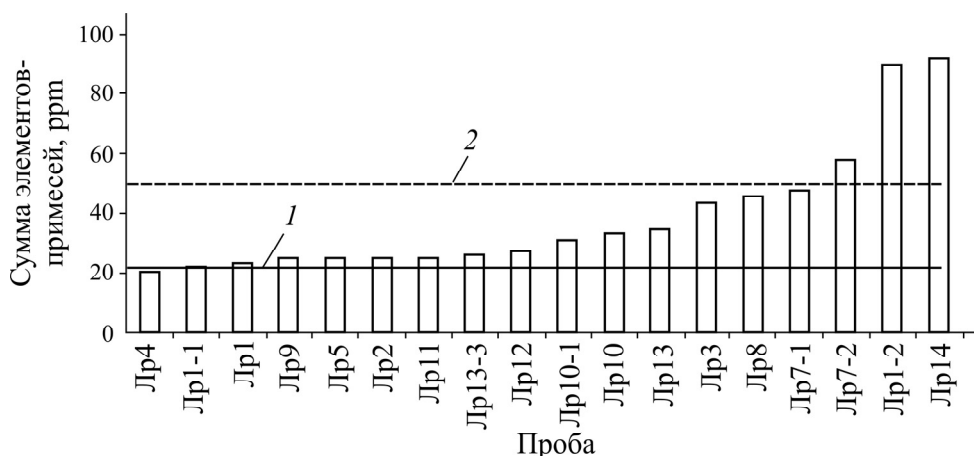


Рис. 5. Сумма элементов-примесей в кварцевых концентратах обогащенного молочно-белого кварца Ларинского месторождения. Пробы отсортированы в порядке увеличения значений. 1 — линия суммы элементов-примесей, сопоставимая со стандартами IOTA/RQ в пределах 8–22 ppm; 2 — линия кварцевых концентратов, которые по сумме элементов-примесей сопоставимы с параметрами высокочистого кварца (НРQ) в пределах 22–50 ppm

Сравнение показателей качества кварцевых концентратов в виде суммы элементов-примесей, получаемых в результате обогащения молочно-белого кварца, сопоставляются с аналогичными показателями качества продуктов высокочистого кварца торговых марок RQ (ООО “Русский кварц”, Россия) и IOTA High Purity Quartz (Unimin Corporation — Covia с 2018 г.; Sibelco). Спецификация параметров, регламентирующих качество кварцевых концентратов на данных предприятиях [27], основана на природных особенностях кварца месторождений Кыштымского (Россия) и Спрус Пайн (США). Технологии глубокого обогащения разработаны специально для них. Сумма 13 элементов-примесей (Al, B, P, Na, K, Li, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Ti, Cr) в спецификации предприятий находится в пределах 21.93 ppm для сорта IOTA-std и 11.7 ppm и 11.4 ppm для сортов IOTA-4 и RQ-2K соответственно. Кварц данных месторождений по степени природной химической чистоты относится к уникальным.

Расширенное определение параметров, регламентирующих глубоководнообогащенный кварц HPQ, основано на опыте обогащения жильного кварца из месторождений СССР и России, что отражено в технических условиях на кварцевую крупку (кварцевые концентраты) в период 1980 – 1997 гг. В частности, сумма элементов-примесей в глубоководнообогащенных кварцевых концентратах сорта КГО-1 составляет 51 ppm.

Аналогичный подход предложен в [4] с учетом концентраций элементов-примесей в продуктах HPQ, доступных на рынке. Показано более полное определение HPQ как суммы основных девяти элементов Na, K, Li, Al, Ca, Fe, Ti, B и P в проанализированных кварцевых кристаллах (анализ отдельных зерен) или обогащенных кварцевых продуктах (анализ сыпучих продуктов), не превышающей 50 ppm.

Учитывая близкие значения предложенных в [4] параметров для отсека значений химически чистого кварца от “рядового” используется значение суммы элементов-примесей в 50 ppm (линия 2 на рис. 5). Таким образом, полученные данные по сумме элементов-примесей позволяют прогнозировать соответствие природных параметров химической чистоты большей части исследованных жил молочно-белого кварца Ларинского месторождения на уровне особо чистых разновидностей кварца.

Элементный состав примесей в промышленно значимом кварце, содержащий менее 50 ppm примесных элементов, ограничивается следующими значениями: Al < 30 ppm, Ti < 10 ppm, Na и K < 8 ppm, Li и Ca < 5 ppm, Fe < 3 ppm, P < 2 ppm и B < 1 ppm [2, 4]. Характеристика элементного состава примесей позволяет более детально оценить потенциал молочно-белого кварца Ларинского месторождения гранулированного кварца для получения высокочистых кварцевых концентратов (HPQ).

На рис. 6 приводятся точечные диаграммы, позволяющие сравнить концентрации основных элементов-примесей в обогащенных кварцевых концентратах молочно-белого кварца Ларинского месторождения (рис. 3б) с концентрацией алюминия. Выбор элементов сравнения — Ti, Na, K, Ca и Fe обусловлен зафиксированными в кварцевых концентратах ИСР-OES спектроскопией значениями, характеризующими возможность схемы обогащения, предложенной в статье. Содержание элементов-примесей в подавляющей части исследованных кварцевых объектов не превышает значений, допустимых для кварца уровня HPQ (рис. 6). Эти данные необходимы для прогнозирования предела обогащения. Предполагается, что примеси из минеральных и жидких включений могут быть сведены к минимуму или полностью удалены во время переработки данного типа кварца определенной технологией обогащения [17].

Необходимо подчеркнуть, что даже в обогащенных кварцевых концентратах фракции 0.1 – 0.3 мм примесный состав элементов отражает фиксируемую ICP-OES совместную концентрацию структурных примесей, газово-жидких и микроминеральных включений в кварцевой крупке. Наличие микроминеральных примесей в качестве составляющей части элементного состава кварцевых концентратов НРQ характерно для значительного количества кварцевых объектов из разных регионов мира и разных генетических типов кварца [22 – 30].

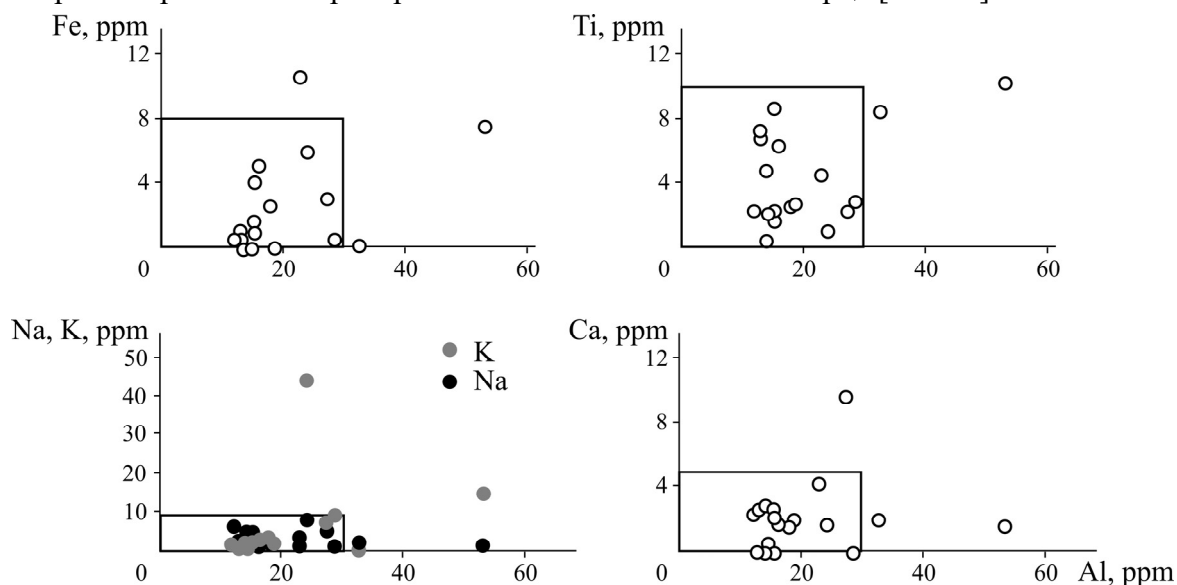


Рис. 6. Содержание основных элементов-примесей в обогащенных концентратах молочно-белого кварца Ларинского месторождения (по данным ICP-OES), нанесенных на область кварца высокой чистоты (НРQ) в соответствии с [2] и [20]

ВЫВОДЫ

Технологическая схема обогащения кварцевого сырья Ларинского месторождения состояла из нескольких последовательных этапов: дробление → измельчение → электромагнитная сепарация → СВЧ-декрепитация → кислотная обработка → промывка → сушка. Важным моментом обогащения молочно-белого кварца являлось введение в технологическую цепочку передела этапа СВЧ-декрепитации, позволяющей более эффективно удалять из кварцевой крупки газово-жидкие включения.

Установлено, что более 80 % кварцевых концентратов, полученные в результате обогащения, по сумме элементов-примесей находятся в интервале 21 – 50 ppm и соответствуют критериям промышленно пригодного кварца (НРQ). Элементный состав основных примесей в глубокообогащенном кварце ($Al < 30$ ppm, $Ti < 10$ ppm, Na и $K < 8$ ppm, Li и $Ca < 5$ ppm, $Fe < 3$ ppm, $P < 2$ ppm и $B < 1$ ppm) на 77 – 88 % соответствует этим критериям [2, 4].

Показано, что в результате обогащения в большей части изученных кварцево-жильных образований содержания загрязняющих кварцевую крупку примесей могут быть сведены к минимуму или полностью удалены во время переработки данного типа кварца описанной технологией обогащения. Низкие концентрации элементов-примесей в глубокообогащенных кварцевых концентратах подтвердили возможность использования интенсивно рекристаллизованного молочно-белого кварца с высоким содержанием новообразованных зерен в качестве сырья для производства на его основе высокотехнологичных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Страшенно Г. И., Собянин В. А. Прогнозная оценка Южного и Среднего Урала на особо чистый кварц. — М.: Росгеолфонд, 1982. — 235 с.
2. Harben P. W. The industrial mineral hand book, A guide to markets, specifications and prices, London, 2002. — 412 p.
3. Haus R., Prinz S., and Priess C. Assessment of high purity quartz resources, Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics, Eds. Götze J. and Möckel R., Heidelberg, 2012. — P. 29–51.
4. Müller A., Ihlen P. M., Wanvik J. E., and Flem B. High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway, Miner. Depos., 2007, No. 42. — P. 523–535.
5. Емлин Э. Ф., Синкевич Г. А., Якшин В. И. Жильный кварц Урала в науке и технике. — Свердловск, 1988. — 272 с.
6. Мельников Е. П., Менчинский В. В., Петруха Л. М., Кошиль И. М. Ларинское месторождение жильного кварца // Разведка и охрана недр. — 1978. — № 3. — С. 13–17.
7. Насыров Р. Ш. СВЧ-декрепитация газожидкостных включений в кварцевых зернах // Обогащение руд. — 2009. — № 2. — С. 26–27.
8. ТУ 5726-002-1149665-97. Кварцевые концентраты из природного кварцевого сырья для наплава кварцевых стекол. — М., 1997.
9. Белашев Б. З., Кулешевич Л. В. Декрепитация газово-жидких включений в кварце из различных генетических типов золоторудных проявлений Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. — 2005. — Вып. 8. — С. 89–94.
10. Белашев Б. З., Скамницкая Л. С., Лебедева Г. А., Озерова Г. П. Нетрадиционные методы очистки кварца от газово-жидких включений // Геология и полезные ископаемые Карелии. — 2001. — Вып. 3. — С. 131–135.
11. Li F., Jiang X., Zuo Q., Li J., Ban B., and Chen J. Purification mechanism of quartz sand by combination of microwave heating and ultrasound assisted acid leaching treatment, Silicon, 2021, No. 13. — P. 531–541.
12. Lin M., Pei Z. Y., and Lei S. M. Mineralogy and Processing of Hydrothermal Vein Quartz from Hengche, Hubei Province (China), Minerals, 2017, No. 7. — P. 161.
13. Светова Е. Н., Шанина С. Н., Бубнова Т. П. Разработка технологии обогащения низкосортного жильного кварца // Обогащение руд. — 2020. — № 3. — С. 25–30.
14. Игуменцева М. А., Кузьмин В. Г., Анфилов В. Н., Кабанова Л. Я., Рыжков В. М., Штенберг М. В., Зайнуллина Р. Т. Кварц жилы № 175 Кыштымского месторождения гранулированного кварца (Южный Урал) как эталон для оценки качества кварцевого сырья // Разведка и охрана недр. — 2018. — № 5. — С. 48–53.
15. Жабоедов А. П., Непомнящих А. И., Волкова М. Г. Влияние минеральных, флюидных примесей и текстурных особенностей на технологию получения кварцевого концентрата // Современные направления развития геохимии. — Иркутск, 2017. — 151 с.
16. Методические рекомендации по оценке качества кварцевого сырья для плавки и оптического стекловарения. — М.: Союзкварцсамоцветы, 1983. — 68 с.
17. Минералургия жильного кварца / ред. В. Г. Кузьмин, Б. Н. Кравц. — М.: Недра, 1990. — 294 с.
18. Götze J., Plötze M., and Habermann D. Cathodoluminescence (CL) of quartz: origin, spectral characteristics and practical applications, Miner. Petrol., 2001, No. 71. — P. 225–250.
19. Götze J., Pan Y., Müller A., Kotova E. L., and Cerin D. Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the Southern Ural region, Russia, Minerals, 2017, Vol. 7, No. 10. — P. 189.

20. Götze J., Pan Y., and Müller A. Mineralogy and mineral chemistry of quartz: A review, *Mineralogical Magazine*, 2021, No. 85. — P. 639–664.
21. Rusk B. G., Lowers H., and Reed M. H. Trace elements in hydrothermal quartz: Relationships to cathodoluminescent textures and insights into hydrothermal processes, *Geology*, 2008, Vol. 36, No. 7. — P. 547–550.
22. Насыров Р. Ш., Быков В. Н., Кораблев А. Г., Шакиров А. Р., Игуменцева М. А. Тестовые наплавы кварцевого стекла как метод оценки качества кварцевых концентратов // *Разведка и охрана недр*. — 2007. — № 10. — С. 46–47.
23. Götze J., Pan Y., and Müller A. Mineralogy and mineral chemistry of quartz: a review, *Mineralogical Magazine*, 2021, Vol. 85, No. 5. — P. 639–664.
24. Ryzhkov V. M., Igumentseva M. A., and Shtenberg M. V. Technology for Quality Assessment of Quartz Raw Materials, 9th Geoscience Conf. Young Scientists — Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation, Ekaterinburg, 2020. — P. 195–199.
25. Корекина М. А. Оценка возможности использования молочно-белого кварца новотроицкого месторождения для получения высокочистого кварца, Южный Урал // *Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. — 2021. — Т. 332. — № 8. — С. 99–108.
26. Santos M. F. F., Fujiwara E., De Paula F. D., and Suzuki C. K. Opacity measurements on quartz and its influence on silica glass properties, *Int. J. Miner. Process.*, 2013, Vol. 124. — P. 141–144.
27. Sibelco — кварц высокой чистоты IOTA® Возможности, качество, ресурсы, исследования и разработки. — Эл. ресурс <https://www.sibelco.com/materials/quartz>.
28. Savichev A. N. and Krasil'nikov P. A. Uralian ultrapure quartz: raw material source for making transparent quartz glass, *Glass and Ceramics*, 2020, Vol. 77, No. 3–4. — P. 139–144.
29. Савичев А. Н., Красильников П. А. Статистическая характеристика элементов-примесей в особо чистом кварце уральского типа (Уфалейский кварцево-жильный район, Южный Урал) // *Минералогия*. — 2019. — Т. 5. — № 1. — С. 46–56.
30. Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Светова Е. Н., Скамницкая Л. С. Кварцевое сырье Карело-Кольского региона: основные итоги исследований // *Тр. КНЦ РАН*. — 2020. — № 10. — С. 5–25.

Поступила в редакцию 15/XII 2022

После доработки 12/I 2023

Принята к публикации 19/I 2023