РУДЫ И МЕСТОРОЖДЕНИЯ

УДК 550.84:549.514.51 (470.5)

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В ОСОБО ЧИСТОМ КВАРЦЕ УРАЛЬСКОГО ТИПА (УФАЛЕЙСКИЙ КВАРЦЕВО-ЖИЛЬНЫЙ РАЙОН, ЮЖНЫЙ УРАЛ)

А.Н. Савичев¹, П.А. Красильников²

¹Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; ansavichev@mineralogy.ru ² АО Кыштымский ГОК, г. Кыштым, Челябинская обл., 456860 Россия

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF TRACE ELEMENTS OF HIGH PURITY QUARTZ OF THE URALIAN TYPE (UFALEY QUARTZ VEIN AREA, SOUTH URALS)

A.N. Savichev¹, P.A. Krasilnikov²

¹Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; ansavichev@mineralogy.ru ²AO Kyshtym Mining Enterprise, Kyshtym, Chelyabinsk district, 456860 Russia

Особо чистый кварц (ОЧК) уральского типа – гидротермально-метасоматическая разновидность природного кварца, отличная по своему генезису от других сырьевых источников ОЧК. По результатам статистических исследований промышленных партий кварцевой крупки, произведенной из ОЧК уральского типа (жила № 175 Кыштымского месторождения гранулированного кварца), сделано предположение о том, что крупка наследует структурные элементы-примеси и минеральные включения. Приведена количественная оценка этих примесей с определением статистических характеристик. Корреляционные связи между элементами-примесями обусловлены генетическими особенностями гидротермально-метасоматического кварца.

Илл. 5. Табл. 5. Библ. 17.

Ключевые слова: особо чистый кварц уральского типа, гидротермально-метасоматический кварц, элементы-примеси, статистика

High-purity quartz (HPQ) of the Uralian type is a hydrothermal-metasomatic variety of natural quartz, which has distinct genesis in comparison with other HPQ types. According to the results of statistical studies of economic quartz concentrates produced from HPQ of the Uralian type (vein no. 175 of the Kyshtym deposit of granular quartz), it is suggested that quartz concentrate inherits structural trace elements and mineral inclusions. Quantitative estimation of these trace elements is provided. The correlations between trace elements are caused by genetic features of hydrothermal-metasomatic quartz.

Figures 5. Tables 5. References 17.

Key words: high-purity quartz of the Uralian type, hydrothermal-metasomatic quartz, trace element contents, statistics.

Введение

Особо чистый кварц (ОЧК) – один из видов полезных ископаемых, интерес к которому неуклонно растет в связи с производством современных высокотехнологичных материалов. Критерии оценки качества природных разновидностей ОЧК основаны на оценке качества кварцевой крупки – промежуточного продукта, полученного в результате обогащения этого сырья методами минералургии (Минералургия..., 1990). Как правило, критерии оценки качества природных разновидностей кварца отражают технологические требования, предъявляемые к кварцевому продукту (крупке), которые изложены в различных технических условиях, ГОСТах и стандартах обогатительных предприятий, которые, в свою очередь, разработаны технологами по плавке кварцевого стекла.

В мировой практике природные разновидности ОЧК представлены кварцем разного генезиса: из кварцевых ядер гранитных пегматитов, гидротермальных кварцевых жил и породного кварца (плагиопегматиты, кварциты и другие источники) (Мусафронов, 1999; Götze, Möckel, 2012). При этом сами природные кварцевые источники по своим генетическим параметрам должны соответствовать требованиям, предъявляемым к ОЧК. Другими словами, из «плохого» природного кварца, особо чистая кварцевая крупка не получится, или получится, но будет очень дорого стоить.

Следует предположить существование на геохимическом уровне генетической связи между природным кварцем разного генезиса и полученной из него глубоко обогащенной кварцевой крупки. Эта связь проявляется в качестве микропримесей в крупке: структурных и микроминеральных, а также флюидных включений. Все используемые минералургией методы обогащения природного кварца направлены на его максимальную очистку от всех типов примесей с минимальными затратами. В тоже время, выбор промышленно значимых сырьевых источников для получения высокочистой кварцевой крупки (ВЧК) основан на длительном тестировании природных кварцевых объектов и связан с большим количеством лабораторных и технологических исследований.

Как правило, характеристика качественных показателей объектов природного кварца основана на малом количестве проб (менее 10–15, редко более), что дает нам право частичного восприятия информации многочисленных исследований, например (Götze et al., 2017). В подавляющем большинстве случаев из литературных источников остается неясным, как осуществлялась пробоподготовка. Сведения и выводы о химической чистоте природного кварца, полученные для такого количества проб, носят скорее декларативный характер. Качественные параметры промышленных партий, насколько нам известно, в публичном пространстве исследуются впервые.

На территории России ведется эксплуатация Кыштымского месторождения гранулированного кварца (Уфалейский кварцево-жильный район, Южный Урал), являющимся сырьевым источником ОЧК с начала 1960-х годов (Щеколдин и др., 1963). Жилы Уфалейского кварцево-жильного района сложены кварцем различных генетических типов, геологическая характеристика которых детально изложена в работе (Огородников и др., 2018). Наибольший интерес для нас представляет зернистый (гранулированный) гидротермально-метасоматический кварц – кварц замещения по (Адамс, 1934), занимающий с середины 1980-х гг. 100 % долю в структуре производства высокочистой кварцевой крупки в России. Этим кварцем сложена жила № 175 Кыштымского месторождения, являющаяся сегодня основным сырьевым источником ОЧК в России. По нашим сведениям (по состоянию на начало 2019 г.) производство высокочистой кварцевой крупки из этого генетического типа ОЧК составило 4.0-4.5 % от мирового потребления. Перечисленное выше дает полное основание характеризовать кварц замещения как уральский тип ОЧК, выделив его из ряда других генетических разновидностей природного ОЧК, используемых для получения ВЧК.

Методы исследований

В основу исследования положены выборка результатов выходных анализов высокочистой кварцевой крупки промышленных партий (фракция 0.1–0.3 мм) в количестве 988 шт. за определенный период времени работы предприятия. Промышленные партии прошли лабораторный контроль, по результатам которого они соответствуют сортам RQ-3K и RQ-2KC стандарта ООО «Русский кварц» и проданы зарубежным потребителям.

Обогащение жильной массы жилы № 175 Кыштымского месторождения проведено в ООО «Русский кварц» по отработанным режимам. Принципиальная схема обогащения приведена на рисунке 1. Схема разработана для промышленного тестирования потенциально пригодных кварцевых объектов и, в большой степени, соответствует промышленным технологиям обогащения, используемым ООО «Русский кварц» для ОЧК уральского типа. Это дает нам право утверждать, что понятия «высокочистая кварцевая крупка» и «особо чистый кварц» в данном случае, тождественны, а определяемые элементы-примеси в ВЧК в полной мере характеризуют ОЧК уральского типа.

Содержания элементов-примесей в обогащенной кварцевой крупке определены методом оптической спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой ИСП-ОАЭ (ICP-OES) на эмиссионном спек-



Puc. 1. Принципиальная схема опытно-промышленного обогащения особо чистого кварца уральского типа. *Fig. 1.* Scheme of experimental processing of high purity quartz of Uralian type.

трометре Varian-720-ES в центральной лаборатории ООО «Русский кварц» (аналитик Л.Ю. Шаткова). Твердые элементы пробы переведены в раствор кислотным разложением смесью кислот (HF + HNO₃). Метод используется для измерения в обогащенной кварцевой крупке содержаний Al, B, Na, K, Li, Mg, Ca, Sr, Ba, Fe, Mn, Cr, Cu, Ni, Ni, Zr в диапазоне концентраций от 0.02 до 200 г/т.

Количество флюидных включений в кварцевой крупке оценено с использованием коэффициента светопропускания. Метод определения коэффициента светопропускания кварцевой крупки в видимой области спектра является наиболее рациональным и экономически конкурентным с точки зрения экспрессной оценки количества включений. Определение светопропускания осуществляют фотоэлектрическим способом путем измерения коэффициента светопропускания на фотокалориметре КФК-2МП (Кварцевые..., 1997). Анализ всех данных выполнен в свободном статистическом пакете R (www.r-project.org) с использованием R Commander GUI (Fox, 2005).

Краткая геологическая характеристика объекта

Кыштымское месторождение гранулированного кварца расположено на восточном склоне Южного Урала в 15 км западнее г. Кыштыма Челябинской области. Общая протяженность месторождения в субмеридиональном направлении 15 км при ширине 1–3 км, где на площади около 20 км² разведано более 100 кварцевых жил. Основным источником высокочистого кварца является уникальный объект – жила № 175, содержащая природный кварц с редким сочетанием свойств. Жила № 175 локализована в юго-восточной части Уфалейского генейсово-мигматитового комплекса (Южный Урал) и приурочена к долгоживущей Слюдяногорско-Теплогорской шовной зоне. Вмещающими породами являются мигматизированные амфиболовые гнейсы уфалейской свиты нижнепротерозойского возраста. Жильная масса насыщена реликтовыми телами карбонатитов, продуктами их метасоматического изменения и многочисленными дайками гранитов различных типов, размеров и форм (рис. 2). В некоторых частях жилы количество реликтов карбонатитов и гранитных даек достигает 40–80 % от общего объема жильной массы.

Количественным минералогическим анализом в гранулированном кварце жилы установлены следующие минералы (%): полевые шпаты 0.12–0.51, кальцит 0.02–1.97, биотит 0–2.5, мусковит 0–1.5, хлорит 0–0.55, цоизит 0–1.67, сфен 0–0.19, титаномагнетит 0–0.08, амфибол 0–4.98, пирротин 0–0.15, пирит 0–0.36, эпидот 0.034–0.753, гранат 0.003– 0.043, рутил – знаки, молибденит – знаки (Мельников, 1988). Содержание суммы минералов в гранулированном кварце по данным эксплуатационной разведки колеблется от 0.1 до 31.2 %.

Карбонатитовые реликты размером до 1.5–2.0 м имеют сложную изрезанную форму и полностью включены в кварцевую матрицу. Граница между карбонатом и кварцем рваная, зазубренная, указывающая на рост кварца за счет первоначальной карбонатитовой массы (рис. 2). Карбонатиты сложены кальцитом, флогопит-анитом, амфиболом, эпидотом, магнетитом, пирротином, пиритом и ксенотимом (Огородников и др., 2017).

Считается, что гидротермально-метасоматический генезис гранулированного кварца связан с замещением (окварцеванием) карбонатитов в гипабиссальных условиях в результате воздействия на кварцсодержащие вмещающие породы щелочных гидротермальных растворов поздних стадий карбонатитообразования, выносом из этих пород кремнезема и отложением его в зонах развития жильных карбонатитов и сопряженных с ними нельсонитов (Огородников и др., 2018). Первичные признаки метасоматического замещения карбонатов кварцем наблюдаются, в частности, в теле магматических карбонатитов, вскрытом на горизонте 356 м в карьере жилы № 175. На рисунке 3 видно изменение структурно-текстурных особенностей и минеральной зональности карбонатитов при замещении их кварцем. Индивидуальные особенности метасоматических преобразований в разных частях жилы



Рис. 2. Геологическая схема горизонта 346 м жилы № 175 Кыштымского месторождения гранулированного кварца.

 карбонатиты; 2 – апатит-амфиболовые метасоматиты; 3 – калишпатовые пегматоидные граниты;
4 – граниты лейкократовые серые; 5 – граниты лейкократовые белые. На фото показан фрагмент стенки горной выработки: в основной массе кварца (Qtz) наблюдаются реликты тел карбонатитов сложной формы (Ca).

Fig. 2. Geological scheme of horizon 346 m of vein no. 175 of the Kyshtym granular quartz deposit.

1 – carbonatites; 2 – apatite-amphibole metasomatites; 3 – potassium feldspar pegmatoic granites; 4 – leucocratic gray granites; 5 – white leucocratic granites. Photo shows a fragment of a mine wall: relics of complex bodies of carbonatites (Ca) in quartz (Qtz).

определяются минералогическими и структурными особенностями карбонатитового тела.

На микроуровне включения в кварце представлены таким же набором минералов, что и в карбонатитах и продуктах их изменения. В качестве примера приведем электронно-микроскопические снимки некоторых минеральных включений (рис. 4). Размеры включений составляют 0.1–15 мкм, что значительно меньше, чем фракционный состав кварцевой крупки (100–300 мкм), вследствие чего они не раскрываются даже при глубоком обогащении.



Рис. 3. Замещение магматических карбонатитов кварцем с отчетливой метасоматической зоной мощностью 2–7 см на границе карбонатит–кварц.

Ca-I – магматические среднезернистые карбонатиты с ликвационными дендритными структурами из титаномагнетита; Ca-II – метасоматические рекристаллизованные карбонатиты, развивающиеся по Ca-I; Amf – биметасоматическая реакционная зона на границе карбонатита с кварцем в виде каймы амфибола; Qtz – серый тонкозернистый метасоматический кварц.

Fig. 3. Replacement of igneous carbonatites by quartz with clear metasomatic zone 2-7 cm thick at the carbonatite–quartz boundary.

Ca-I – medium-grained igneous carbonatites with liquation dendritic structures of titanomagnetite; Ca-II – metasomatic recrystallized carbonatites after Ca-I; Amf – bimetasomatic reaction zone at the carbonatite– quartz boundary in form of amphibole rim; Qtz – gray finegrained metasomatic quartz.

Характерной генетической особенностью рассматриваемой разновидности кварца является ее полигенный характер. Это фиксируется несколькими генерациями кварца, образующими неоднородный агрегат, сформированный в результате воздействия на первичную метасоматическую структуру кварца процессов, сопровождающих последующие этапы геологического развития Уфалейского метаморфического комплекса, из которых наибольшее влияние оказали коллизионные процессы (Огородников и др., 2018). Их результатом является преобладание деформационных структур кварцевых агрегатов, заместивших метасоматические. Кварц характеризуется преимущественно тонко-мел-



Рис. 4. Минеральные включения в кварцевой матрице: а – слюда; б – минерал группы амфибола; в – замещение кальцита кварцем по спайности.

Фото конца 1980-х гг. из архива А.Н. Савичева; ПЭМ ЭМВ-100Л, ускоряющее напряжении 75 кВ.

Fig. 4. Mineral inclusions in quartz: a - mica; 6 - mineral of the amphibole group; <math>B - replacement of calcite by quartz along cleavage.

Photo by A.N. Savichev (archive of the end of the 1980s); transmitted electron microscope EVM-100L, accelerating voltage of 75 kV.

козернистой разнозернистой катакластической структурой и массивной текстурой; призальбандовые части кварцевой жилы обладают гнейсовидной текстурой, как правило, подчеркнутой многочисленными темноцветными включениями. Первичная структура метасоматического кварца сохранена в белой кварцевой жильной матрице в виде небольших реликтовых участков неправильной формы серого цвета.

Результаты исследования и их интерпретация

Содержание элементов-примесей в кварцевой крупке, полученной в результате обогащения высокочистого кварца уральского типа, приведено в таблице 1. Анализ корреляционной зависимости между элементами-примесями выполнен для ненормально распределенных переменных с использованием непараметрического коэффициента корреляции Спирмена. Корреляционная матрица для элементов-примесей кварцевой крупки приведена в таблице 2.

Корреляционная матрица загружена значениями коэффициента корреляции с высокой силой связи по шкале Чеддока (табл. 2, выделено жирным шрифтом, коэффициент корреляции 0.7–0.9). Для сокращения данных используем факторный анализ методом наклонного вращения промакс для того, чтобы получить небольшой набор переменных (предпочтительно некоррелированных) из большого набора переменных, большинство из кото-

Содержание элементов-примесей в высокочистой кварцевой крупке жилы № 175 Кыштымского месторождения гранулированого кварца

Table 1

Trace element contents of high purity quartz concentrate of vein no. 175 of the Kyshtym granular quartz deposit

Элементы-	Разирананания	Содержание, г/т								
примеси	Гаспределение	cp.	м.	co.	мин.	макс.				
Al	Неоднородное (бимодальное)	6.64	5.60	2.48	3.20	24.0				
Fe	Неоднородное (бимодальное)	0.70	0.47	0.61	0.06	9.30				
Ca	Неоднородное (бимодальное)	1.94	0.73	3.86	0.02	70.0				
Mg	Неоднородное (бимодальное)	1.42	0.15	2.30	0.01	9.60				
Na	Неоднородное (бимодальное)	1.59	0.63	1.82	0.17	11.3				
K	Неоднородное (бимодальное)	0.80	0.31	0.95	0.07	6.40				
Ti	Логнормальное	2.82	2.80	0.14	2.40	3.50				
Li	Нормальное	0.29	0.30	0.01	0.20	0.45				
В	Гамма-распределение	0.09	0.09	0.01	0.07	0.13				
Cr	Однородное	0.03	0.01	0.10	0.01	2.30				
Ni	Гамма-распределение	0.02	0.01	0.04	0.01	0.97				
Mn	Гамма-распределение	0.02	0.01	0.02	0.00	0.25				
Cu	Однородное	0.01	0.01	0.00	0.01	0.24				

Примечание. Количество анализов – 988. Здесь и в табл. 5: ср. – среднее значение показателя, м. – медиана, со. – стандартное отклонение, мин. и макс. – минимальное и максимальное значение показателя, соответственно.

Note. Number of analyses is 988. Here and in Table 5: cp. – mean value, м. – median value, co. – standard deviation, мин. и макс. – minimum and maximum values, respectively. *Таблица 2*

Корреляционная матрица для элементов-примесей высокочистой кварцевой крупки жилы № 175 Кыштымского месторождения гранулированого кварца

Table2

Correlation matrix for trace elements of high purity quartz concentrate of vein no. 175 of the Kyshtym granular quartz deposit

	Al	В	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Ni	Ti
Al	1	0.272	0.788	0.707	0.073	0.785	0.854	-0.135	0.644	0.745	0.867	0.600	0.226
B		1	0.260	0.160	0.079	0.249	0.165	-0.125	0.122	0.213	0.228	0.132	0.108
Ca			1	0.672	0.071	0.858	0.795	-0.211	0.758	0.828	0.824	0.562	0.100
Cr				1	0.106	0.748	0.702	-0.155	0.685	0.788	0.704	0.807	0.182
Cu					1	0.085	0.053	0.029	0.049	0.094	0.067	0.064	0.004
Fe						1	0.798	-0.185	0.781	0.847	0.823	0.630	0.073
K							1	-0.141	0.727	0.739	0.898	0.602	0.141
Li								1	-0.171	-0.196	-0.165	-0.135	0.051
Mg									1	0.752	0.735	0.599	0.017
Mn										1	0.785	0.658	0.136
Na											1	0.598	0.099
Ni												1	0.186
Ti													1

рых связаны друг с другом. Результаты факторного анализа приведены в таблицах 3 и 4. Наибольшими факторными нагрузками (близкими к 1) обладают Al, K и Na – определяющие фактор 1; Cr и Ni – определяющие фактор 2 и Ca – определяющий фактор 3 (табл. 3). С нашей точки зрения, такая интерпретация результатов факторного анализа представляет наиболее реалистичную модель данных, подтверждающую результаты минералогического изучения кварцево-жильной массы.

Таблица 1

Таблица 3

Матрица факторной структуры элементов-примесей в высокочистой кварцевой крупке жилы № 175 Кыштымского месторождения гранулированого кварца

Table 3

Factor structure matrix of trace elements of high purity quartz concentrate of vein no. 175 of the Kyshtym granular quartz denosit

	51 411414	ii qual a depos				
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3			
Al	0.986					
В	0.130					
Ca		-0.182	0.985			
Cr		1.031				
Cu						
Fe	0.488	0.548	0.136			
K	0.989					
Li	-0.178					
Mg	0.872					
Mn	0.240	0.169	0.673			
Na	1.037					
Ni		1.032				
Ti	0.125					

Примечание. Жирным шрифтом выделены основные элементы с максимальной факторной нагрузкой.

Note. Major elements with maximum factor loading are typed in bold.

Корреляция между факторами

Таблица 4

Table 4

Factor intercorrelation matrix

Факторы	1	2	3
1	1.000	-0.384	-0.395
2	-0.384	1.000	
3	-0.395	0.681	1.000

Фактор 1 генетически связан с процессами внедрения в жильную массу более поздних жильных щелочных гранитоидов различной мощности, образующих в кварцевом теле объемный штокверк. Калиевый полевой шпат и плагиоклаз, составляющие основную массу в щелочных гранитоидах, сильнее всего «загрязняют» кварцевую жилу и делают определяющими элементами-примесями Al, К и Na, тогда как B, Li, Mn, Fe и Ti, скорее всего, входят в состав других минералов гранитов.

Факторы 2 и 3, с нашей точки зрения, генетически связаны с реликтовыми минералами карбонатитов, сохранившимися во вновь образованной кварцевой матрице замещения. На это указывает высокая корреляция между этими факторами (0.68) и отрицательная корреляция между фактором 1 и факторами 2 и 3 (табл. 4). Новым для нас оказалось то, что определяющими элементами-примесями фактора 2 являются Cr и Ni. Можно предположить, что эти элементы являются «сквозными» и «доминантными» для полихронных и полигенных процессов в жилолокализующих структурах типа Слюдяногорско-Теплогорской шовной зоны и тесно связаны с процессами образования карбонатитов с ликвационным титаномагнетитом (с примесью Сг и Ni). Исследование Sr, Nd, С и О изотопного состава уфалейских карбонатитов подтверждает наличие глубинного источника, по своим изотопным параметрам близкого ЕМ1 (Недосекова и др., 2006). Замещаемые кварцем карбонаты, флогопит и амфиболы карбонатитов сохранили свое влияние на примесный состав в кварце и сделали Са элементом, определяющим фактор 3.

По результатам анализов кварцевой крупки для всех элементов-примесей построены гистограммы содержания и точечные графики корреляционной зависимости между элементами-примесями. В качестве примера приведем гистограмму содержания Al, на которой можно видеть, что распределение Al в кварцевой крупке неоднородное и имеет два пика содержания (рис. 5б). Более контрастно ситуация с неоднородным распределением Al отражается на корреляционном графике Al-Na (рис. 5в). Возникновение таких неоднородностей связано с соединением двух самостоятельных статистических совокупностей примесей, отличающихся по генезису. Мы предполагаем, что первое распределение связано с фиксацией ИСП МС анализами структурного алюминия (далее Al_{ст}) в кварце. Для подтверждения этого предположения содержания Al_{ст}, измеренные методом ЭПР спектроскопии, сопоставлены с нашими данными, полученными по ИСП MC анализам. В качестве аналога содержания Al использована выборка данных ЭПР спектроскопии по метасоматическому кварцу (Андриянов и др., 2013а). Гистограмма содержания Al_{ст} в метасоматическом кварце по данным ЭПР спектроскопии приведена на врезке рисунка 56. Статистические характеристики содержания Al_{ст} в метасоматическом кварце, полученные по данным ЭПР спектроскопии, следующие (г/т): среднее – 5.37, медиана – 5.5, стандартное отклонение -1.01, минимум -3.2, максимум – 6.9 (количество проб – 17). Эти характеристики близки показателям, полученным для первого модального значения содержания Al ИСП



Рис. 5. Распределение элементов-примесей в кварцевой крупке из особо чистого кварца уральского типа жилы № 175 Кыштымского месторождения гранулированного кварца: а – диаграмма размаха элементов-примесей в высокочистой кварцевой крупке; б – гистограммы содержания Al в кварцевой крупке (на врезке – гистограмма содержания структурного алюминия в метасоматическом кварце); в–д – диаграммы рассеяния элементов-примесей в кварцевой крупке: в – Al–Na, г – Al–Ca, д – Ca–Na.

Fig. 5. Trace element pattern of quartz concentrate from high purity quartz of Uralian type of vein no. 175 of the Kyshtym granular quartz deposit: a – box plot of trace element contents of quartz concentrate; δ – histogram of Al content of quartz concentrate (inset – histogram of content of structural Al of metasomatic quartz); B– μ – scatter plots of trace element contents of quartz concentrate: B – Al–Na, Γ – Al–Ca, μ – Ca–Na.

МС методом (табл. 5, строка Al, графа «структурные примеси»). Второй пик распределения, по нашему мнению, фиксирует одновременное присутствие в кварцевой крупке структурного алюминия и алюминия минеральных включений. Таким образом, распределение Al в выборке, характеризующей концентрацию микропримесей в ВЧК, разделено на два генетических класса: класса 1 представлен структурным алюминием (Al_{cr}) и класс 2 представлен суммой структурного алюми-

МИНЕРАЛОГИЯ 1(5) 2019

Статистические параметры содержания структурных и структурных + минеральных примесей в метасоматическом кварце жилы № 175 Кыштымского месторождения гранулированного кварца (г/т) Table 5

Statistical parameters of content of structural and structural + mineral traces in metasomatic quartz of vein № 175 of the Kyshtym crystal quartz deposit (ppm)

	Неоднородное (бимодальное) распределение примесей												
Элементы- примеси	1-е распределение (структурные примеси)						2-е распределение (структурные + минеральные микропримеси)						Количество минеральных
	n	cp.	М.	co.	мин.	макс.	n	cp.	М.	co.	МИН.	макс.	микропримесси
Al	718	5.34	5.4	0.66	3.2	6.90	270	10.1	9.80	2.18	7.0	24.0	4.78
Fe	718	0.42	0.41	0.17	0.06	1.70	270	1.42	1.30	0.76	0.48	9.30	1.30
Ca	718	0.79	0.59	093	0.02	10.6	270	4.53	3.60	3.67	1.10	26.6	3.74
Mg	718	0.19	0.13	0.47	0.01	5.40	270	4.65	4.20	2.06	0.10	9.60	4.46
Na	718	0.61	0.57	0.38	0.17	8.30	270	4.20	4.00	1.52	0.90	11.3	3.59
K	718	0.29	0.27	0.22	0.07	4.80	270	2.1	2.00	0.83	0.32	6.40	1.81
Сумма		7.64											19.68

Примечание. n – количество анализов.

Note. n – number of analyses.

ния и алюминия, входящего в состав минеральных включений (Al_{мин}), т.е. Al_{ст} + Al_{мин}. Особенности распределения в кварцевой крупке Na полностью повторяют картину распределения Al (рис. 56).

Графики, построенные для пар элементовпримесей Al-Ca (рис. 5в), Al-Fe, Al-Mg и Al-K, показывают, что их распределение аналогично бимодальному распределению Al-Na (рис. 5б), т. е. выборка этих элементов-примесей также делится на два генетических класса: структурные примеси и минеральные включения. Корреляция между Al (основным элементом, замещающим Si) и Ca, Fe, Мд и К позволяет предполагать, что первый класс элементов-примесей в ВЧК связан с их внедрением в решетку кварца по схеме компенсационного изоморфизма. Наличие корреляционных связей между Al и Ca, Fe, Mg, K и Na в метасоматическом кварце позволяет предложить следующие схемы изоморфизма (Афанасьева и др., 1959; Каменцев, 1965; Франк-Каменецкий, 1964; Вертушков и др., 1969): $Si^{4+} \rightarrow Al^{3+} + R^+$, где $R^+ = Na^+$, K^+ , Li^+ ; 2 $Si^{4+} \rightarrow 2Al^{2+}$ $+ R^{2+}$, где $R^{2+} = Ca^{2+}$, Mg^{2+} , Fe^{2+} и $Si^{4+} \rightarrow Fe^{3+} + R^+$, где $R^{+} = Na^{+}, K^{+}, Li^{+}.$

На рисунке 5д приведен пример бимодальной перекрестной корреляция между Na и Ca. Аналогичный тип корреляции связывает друг с другом все основные элементы-примеси (Na, Ca, K, Fe и Mg), что указывает на влияние на результаты анализов выделенных выше двух генетических классов примесей. Статистические параметры содержания структурных и минеральных микропримесей в гидротермально-метасоматическом кварце приведены в таблице 5. Минеральные микропримеси вносят в валовый состав кварцевой крупки 72 % основных петрогенных компонентов. Количество таких проб составляет 27 % от общего.

Оценка флюидных включений в кварце является одним из важных показателей его качественных и технологических характеристик, влияющих на плавку прозрачного кварцевого стекла. Количество флюидных включений в кварцевой крупке оценено с помощью коэффициента светопропускания. Статистические параметры коэффициента светопропускания – одни из самых стабильных для этого типа кварца и составляют: mean – 84.4 % (min – 78.2 % max – 97.0%, sd ±4.63 %, 49 проб). Приведённые параметры коэффициента светопропускания дополнительно характеризуют уральский тип особо чистого кварца.

Заключение

Особо чистый кварц уральского типа – генетическая разновидность природного кварца, образованная гидротермально-метасоматическим способом (кварцзамещения) в отличие от других сырьевых источников ОЧК, используемых в мире. Первичные метасоматические структуры кварца значительно преобразованы в катакластические в результате влияния коллизионных процессов. Статистическими исследованиями результатов ИСП МС анализов кварцевой крупки промышленных партий, произведенных из уральского типа ОЧК, установлено, что кварцевая крупка фракции 100-300 мкм, соответствующая количественным показателям стандарта качества, наследует примеси двух генетических групп - структурные и минеральные. Оценка формы вхождения минеральных микропримесей в составе кварцевой крупки не входит в компетенцию данной работы и требует дополнительных высокоточных и сложных минералогических исследований. На данный момент нами предполагаются следующие формы вхождения минеральных микропримесей в кварцевую крупку: в виде включений (своеобразного минерального натира на поверхности абразивной кварцевой крупки, по какой-то причине не удаленной в результате обогащения) или в виде минералов-узников внутри кварцевой крупки.

Литература

Адамс С.Ф. (1934) Микроскопическое изучение жильного кварца / Критерии возрастных соотношений рудообразующих минералов по микроскопическим исследованиям. ОНТИ НКТП СССР, Москва–Ленинград–Новосибирск, 7–42.

Андриянов П.Ф., Магдеева З.У., Непряхин А.Е. (2013ф) Геолого-технологическая оценка возможности использования кварцитов Восточно-Уфалейской высокобарической зоны (участки Острогорский, Тараторский, Беркутинский) в качестве источника получения высокочистых кварцевых концентратов. Окончательный отчет по объекту: за 2011–2013 гг. Уфа, ООО «Суракай».

Афанасьева Н.А., Каменцев И.Е., Франк-Каменецкий В.А. (1959) Колебание параметров элементарной ячейки кварца различного генезиса. *Кристалло*графия, **4**(3), 382–385.

Вертушков Г.Н., Емлин Э.Ф., Синкевич Г.А., Соколов Ю.А., Якшин В.И. (1969) Жильный кварц восточного склона Урала. Часть І. Методы исследования. Свердловск, СГИ, 100 с.

Каменцев И.Е. (1965) О положении примесей в структуре кварца. Записки Всесоюзного минералогического общества, 94(6), 686–691.

Кварцевые концентраты из природного кварцевого сырья для наплава кварцевых стекол (1997) Технические условия ТУ 5726-002-11496665-97. М., 25 с.

Мельников Е.П. (1988) Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца. М., Недра, 215 с.

Минералургия жильного кварца (1990) М., Недра, 294 с.

Мусафронов В.М. (1999) Сырьевая база особо чистого кварцевого сырья, пути ее развития и укрепления. *Разведка и охрана недр*, (3), 2–4.

Недосекова И.Л., Прибавкин С.В., Серов П.А., Ронкин Ю.Л., Лепихина Щ.П., Попова О.Ю. (2006) Sr–Nd–С–О изотопный состав карбонатитов Ильмено-Вишневогорского и Слюдяногорского комплексов как индикатор источников вещества. *Металлогения древних* и современных океанов–2006. Условия рудообразования. Миасс, ИМин УрО РАН, 239–244

Огородников В.Н., Суставов С.Г., Ханин Д.А., Шагалов Е.С., Поленов Ю.А. (2017) Минералогия карбонатитов Уфалейского метаморфического комплекса. Известия УГГУ, **3**(47), 24–33.

Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Савичев А.Н. (2018) Особо чистый кварц Уфалейского кварценосного района (Южный Урал). *Известия УГГУ*, 1(49), 23–32.

Франк-Каменецкий В.А. (1964) Природа структурных примесей и включений в минералах. Ленинград, ЛГУ, 239 с.

Щеколдин А. А., Синкевич Г. А., Петров Н. А. (1963) Гранулированный жильный кварц - новое сырьё для получения прозрачного кварцевого стекла. Стекло и керамика, **11**, 6–8.

Fox J. (2005) The R Commander: a basic statistics graphical user interface to R. *Journal of Statistical Software*, **14**(9), 1–42.

Götze J., Möckel R. (2012) Quartz: deposits, mineralogy and analytics. Berlin–Heidelberg, Springer, 360 p.

Götze J., Pan Y. , Müller A., Kotova E. L., Cerin D. (2017) Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the Southern Ural region, Russia. *Minerals*, **7**(10), 189.

References

Adams S.F. (1934) [Microscopic study of vein quartz]. In: Kriterii vozrastnykh sootnoshenii rudoobrazuyushchikh mineralov po mikroskopicheskim dannym [Criteria of age correlations of ore-forming minerals based on microscopic studies]. ONTI NKTP USSR, Moscow–Leningrad–Novosibirsk, 7–42. (in Russian)

Andriyanov P.F., Magdeeva Z.U., Nepryakhin A.E. (2013) [Geological and technological assessment of possible using of quartzites of East Ufaley high-pressure zone (Ostrogorskiy, Taratorskiy, Berkuty areas) as a source of high-purity quartz concentrates]. [Unpublished final report of 2011–2013], Ufa, OOO Surakay. (in Russian)

Afanas'eva N.A., Kamentsev I.E., Frank-Kamenetskiy V.A. (1959) Fluctuation of unit cell parameters of quartz of various genesis. *Krystallografya [Crystallography]*, 4(3), 382–385 (in Russian)

Frank-Kamenetskiy V.A. (1964) [Nature of structural admixtures and inclusions in minerals]. Leningrad, LGU, 239 p. (in Russian)

Fox J. (2005) The R Commander: a basic statistics graphical user interface to R. *Journal of Statistical Software*, **14**(9), 1–42.

Götze J., Möckel R. (2012) Quartz: deposits, mineralogy and analytics. Berlin–Heidelberg, Springer, 360 p.

Götze J., Pan Y., Müller A., Kotova E. L., Cerin D. (2017) Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the Southern Ural region, Russia. *Minerals*, 7(10), 189.

Kamentsev I.E. (1965) [Traces in quartz structure]. Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Proceedings of the USSR Mineralogical Society], **94**(6), 686–691. (in Russian)

Mel'nikov E.P. (1988) [Geology, genesis and economic types of quartz deposits]. Moskva, Nedra, 215 p. (in Russian)

Mineralurgy of vein quartz (1990) Moskva, Nedra, 294 p. (in Russian)

Musafronov V.M. (1999) [Deposits of high-purity quartz, method of their development and strengthening]. *Razvedka i okhrana nedr [Exploration and protection of mineral resources]*, (3), 2–4 (in Russian)

Nedosekova I.L., Pribavkin S.V., Serov P.A., Ronkin Y.L., Lepikhina O.P., Popova O.Yu. (2006) [Sr-Nd-C-O isotopic composition of carbonatites of Ilmeno-Vishnevogorsky and Sludyanogorsky complexes as an indicator of matter sources]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov–2006. Usloviya rudoobrazovaniya [Metallogeny of ancient and modern oceans–2006. Formation conditions].* Miass, IMin UrO RAN, 239–244 (in Russian) Ogorodnikov V.N., Sustavov S.G., Khanin D.A., Shagalov E.S., Polenov Yu.A. (2017) [Mineralogy of carbonatites of the Ufaley metamorphic complex] *Izvestiya UGGU* [Proceedings of the Ural State Mining University]. **3**(47), 24–33. (in Russian)

Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Savichev A.N. (2018) [Extrapure quartz of the Ufaley quartziferous district (Southern Urals)]. *Izvestiya UGGU [News of the Ural State Mining University]*, 1(49), 23–32. (in Russian)

Quartz concentrates from natural quartz for floating of quartz glasses (1997). *Tekhnicheskie ysloviya TY 5726-002-11496665-97 [Technical specification TS 5726-002-11496665-97]*. Moskva, 25 p. (in Russian)

Shchekoldin A. A., Sinkevich G. A., Petrov N. A. (1963) [Granular quartz vein - new raw material for producing transparent quartz glass]. [Glass and ceramics], 11, 6–8

Vertushkov G.N., Emlin E.F., Sinkevich G.A., Sokolov Yu.A., Yakshin V.I. (1969) [Vein quartz of the eastern slope of the Urals. Part I. Research methods]. Sverdlovsk, SGI, 100 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2019 г.