

УДК 549.514.51

ОСОБЕННОСТИ КАЧЕСТВА ЖИЛЬНОГО КВАРЦА УРАЛЬСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С.К. КУЗНЕЦОВ*, В.П. ЛЮТОЕВ*, С.Н. ШАНИНА*, Е.Н. СВЕТОВА**, Н.В. СОКЕРИНА*

*Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

**Институт геологии Карельского НЦ РАН, г.Петрозаводск
sokerina@geo.komisc.ru

С использованием методов газовой хроматографии и электронного парамагнитного резонанса получены новые данные о составе и содержании в жильном кварце уральских месторождений флюидной фазы и структурных элементов-примесей, являющихся важными показателями качества сырья. Показано, что наиболее низкое содержание флюидной фазы характерно для прозрачного, гранулированного и мелкозернистого кварца. Мелкозернистый и гранулированный кварц отличаются также низким содержанием структурных примесей.

Ключевые слова: **жильный кварц, газовая хроматография, электронный парамагнитный резонанс, кварцевое сырье**

S.K. KUZNETSOV, V.P. LUTOEV, S.N. SHANINA, E.N. SVETOVA, N.V. SOKERINA. PECULIARITIES OF VEIN QUARTZ QUALITY, THE URALS DEPOSITS

New data on the composition and content of the fluid phase and structural elements-impurities, which are important quality characteristics of raw materials, in the vein quartz of the Urals deposits were obtained using the methods of gas chromatography and electron spin resonance. It was shown that the lowest content of the fluid phase is characteristic of transparent granulated and fine-grained quartz. This quartz is also marked by low content of structural impurities.

Key words: **vein quartz, gas-chromatography, electron spin resonance, quartz raw material**

Гидротермальные месторождения жильного кварца и горного хрусталя, формирование которых связано с процессами регионального метаморфизма, локализованы в пределах складчатых областей и щитов в различных регионах мира. Наиболее крупные месторождения находятся в России, Бразилии, США. Жильный кварц и горный хрусталь имеют большое промышленное значение и представляют собой высококачественное сырье для плавки специальных видов стекла и синтеза монокристаллов. Моноблоки горного хрусталя являются ценным пьезооптическим сырьем.

В связи с развитием оптики и электроники требования к качеству кварцевого сырья возрастают. Наиболее чистые кварцевые концентраты производятся фирмой ЮНИМИН (США), применяющей эффективные способы глубокого обогащения природного кварца. В России имеются значительные запасы различных видов кварцевого сырья. Тем не менее, существует проблема получения концентратов, соответствующих уровню мировых стандартов. Это обуславливает необходимость проведения дальнейших геологических и технологических работ, включающих переоценку уже разведанных месторож-

дений, поиск новых месторождений, совершенствование способов обогащения сырья [1, 2 и др.].

Большой интерес в отношении особо чистого кварца представляет Уральская кварцевожильно-хрусталеносная провинция, в пределах которой сосредоточены многочисленные месторождения молочно-белого и прозрачного гигантозернистого кварца, гранулированного кварца, горного хрусталя, пьезооптического кварца. Сведения о геологическом строении провинции и различных месторождений, кварцевых жилах, хрусталеносных гнездах, жильном кварце и горном хрустале изложены во многих работах [3 –7 и др.]. В последнее время нами с использованием методов газовой хроматографии и спектроскопии получены новые данные об особенностях качества жильного кварца некоторых месторождений.

Общие сведения о жильном кварце

Основные месторождения жильного кварца и горного хрусталя находятся на Приполярном (Желанное, Додо, Пуйва и др.) и Южном (Кыштымское, Вязовское, Пугачевское, Ларинское, Астафьевское и др.) Урале в пределах Центрально-Уральского и Восточно-Уральского поднятий (рисунок). Кварце-

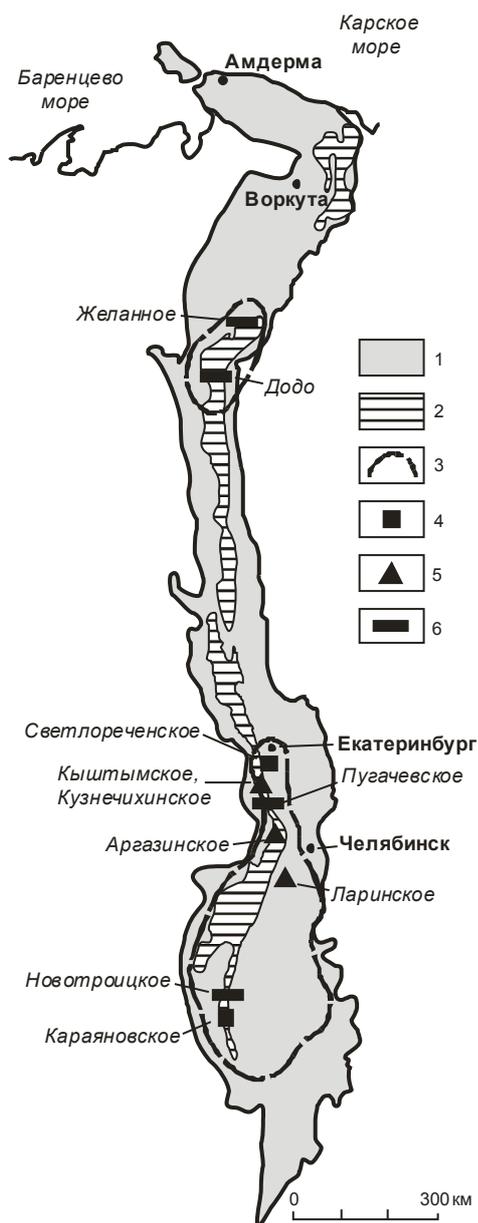


Рис. Схема размещения Приполярноуральской и Южноуральской кварцевожильных провинций и положение основных месторождений.

1 – палеозойские отложения; 2 – Центральноуральское поднятие, сложенное докембрийскими образованиями; 3 – границы кварцевожильных провинций; 4 – месторождения молочно-белого кварца; 5 – месторождения гранулированного кварца; 6 – месторождения крупнозернистого прозрачного кварца.

вые жилы залегают в породах разного состава и возраста. По отношению к сланцеватости вмещающих пород они делятся на согласные и секущие. Форма жил бывает линзовидной, плитовидной, сетчатой. Многие жилы имеют сложную форму из-за изгибов, ступеней, раздувов, апофиз. Мощность жил колеблется в очень широких пределах, достигая нескольких десятков метров. Контакты жил с вмещающими породами, как правило, резкие. Породы около жил часто интенсивно рассланцованы, а сами контакты нарушены. В зальбандах наблюдаются борозды скольжения. Большинство кварцевых

жил имеет простой, почти мономинеральный состав. Вместе с кварцем в незначительном количестве присутствуют серицит, хлорит, кальцит, полевой шпат, гематит, ильменит, сульфиды.

Многие промышленные кварцевые жилы хрусталеносны. Хрусталеносные гнезда чаще всего наложены на секущие кварцевые жилы. Местоположение хрусталеносных гнезд контролируется трещинами, зонами дробления. Они располагаются как внутри, так и в зальбандах жил в зоне их контакта с вмещающими породами. Те и другие гнезда нередко связаны единой системой трещин. В висячем боку жил гнезда встречаются значительно реже, чем в лежачем.

Жильный кварц весьма неоднороден. Наиболее широко развиты жилы с крупно-гигантозернистым молочно-белым кварцем. Таким кварцем сложены жилы различной мощности, залегающие в согласных и секущих относительно сланцеватости пород трещинах, и представляющие собой типичные тела выполнения. В согласных жилах кварц выглядит как сливной с неясными очертаниями индивидов. Весьма характерны структуры катаклаза и пластических деформаций. Встречаются согласные жилы линзовидной формы с прозрачным слабо-дымчатым кварцем, который занимает значительную часть их объема, а некоторые жилы сложены им полностью. Крупно-гигантозернистый кварц секущих жил отличается параллельно-шестоватой текстурой. Величина кварцевых индивидов в мощных жилах достигает нескольких метров по удлинению. Пластические деформации крупно-гигантозернистого кварца секущих жил в отличие от подобного кварца согласных жил обычно очень слабые. В основной массе почти всегда присутствуют прозрачные участки, лишенные видимых минеральных и флюидных включений. Форма их в срезах линзовидная, изометричная, сложная. Величина достигает 10–15 см. Повышенной прозрачностью обладает кварц, находящийся около хрусталеносных гнезд, наложенных на секущие жилы. Ширина зон такого кварца достигает 0,5–0,7 м. С удалением от гнезд прозрачный кварц постепенно сменяется молочно-белым.

Наряду с крупно-гигантозернистым жильным кварцем в провинции, преимущественно в пределах высокометаморфизованных Няртинского и Уфалейского гнейсо-мигматитовых комплексов и их ближнего сланцевого окружения, встречаются согласные жилы с гранулированным кварцем. Грануляция, связанная с проявлением процессов метаморфизма, развивается в крупно-гигантозернистом пластически сильно деформированном кварце. Величина зерен новообразованного кварца составляет 0,1–2,0 мм, иногда достигает 5 мм. На южноуральских месторождениях выделяются мелкозернистый гранулированный кварц уфалейского типа и более крупнозернистый кварц кыштымского типа. Форма гранул изометричная, границы ровные, ступенчатые. Пластические деформации, в отличие от первичного кварца, очень слабые или вовсе отсутствуют. Степень грануляции крупно-гигантозернистого кварца варьирует в широких пределах. Во многих жилах такой кварц гранулирован практически полностью.

В метаморфических породах разного состава и возраста часто наблюдаются многочисленные небольшие согласные жилы и прожилки, сложенные первично мелкозернистым серым кварцем. Мощность жил обычно составляет 0,1–0,3 м, протяженность – до нескольких метров. Для мелкозернистого кварца характерна массивная текстура. Иногда отмечается линейность, ориентированная вдоль жил и выражающаяся в вытянутости кварцевых зерен. В гранулированном и особенно первично мелкозернистом кварце присутствует довольно большое количество минеральных примесей, представленных мусковитом, хлоритом, полевым шпатом, кальцитом. Они располагаются между кварцевыми зернами, но иногда находятся внутри них. Отмечается вкрапленность пирита и других сульфидов.

Горный хрусталь, выполняющий полости, наложенные на кварцевые жилы, представляет собой прозрачные хорошо ограненные кристаллы кварца. В естественном состоянии они бесцветны, либо обладают радиационной дымчатой, цитриновой, аметистовой окраской. После искусственного радиационного облучения бесцветный кварц приобретает ту или иную окраску. Дымчатые, дымчато-цитриновые и аметистовые кристаллы существенно различаются по форме, строению, составу, свойствам. В частности, дымчатые кристаллы обычно в значительной степени мозаичны и сдвойникованы по дофинейскому закону. Для дымчато-цитриновых (оливковых) кристаллов кварца мозаичность не характерна. Обычно в них отмечаются единичные крупные дофинейские двойники, тяготеющие к основаниям, и мелкие бразильские двойники, приуроченные к внешним частям кристаллов. Цитриновые кристаллы сильно поражены бразильскими двойниками.

Формирование кварцевых жил уральских месторождений происходило на разных этапах геологического развития региона в связи с проявлением гидротермально-метаморфогенных процессов в позднем докембрии и палеозое. Судя по пересечениям жил, наиболее молодыми являются хрусталеносные кварцевые жилы, залегающие в трещинах, секущих сланцеватость вмещающих пород. В частности, на Приполярном Урале их возраст, согласно изотопно-геохронологическим данным, составляет около 220–250 млн. лет, что соответствует перми-триасу.

Пригодность жильного кварца и горного хрусталя как сырья для плавки стекла и синтеза монокристаллов, а также как пьезооптического сырья определяется многими минералого-технологическими особенностями. Большое значение имеет прозрачность (светопропускание), содержание минеральных и флюидных включений, элементов-примесей. В качестве основных промышленных типов жильного кварца на уральских месторождениях выделяются молочно-белый, прозрачный и гранулированный кварц. Для месторождений Желанного, Додо, Новотроицкого, Пугачевского характерен прозрачный жильный кварц, для Кыштымского, Кузнечихинского, Ларинского, Вязовского Аргазинского – гранулированный, для Светлореченско-

го, Нелобского, Караяновского – молочно-белый. Многие месторождения являются комплексными в связи с развитием различных типов жильного кварца, горного хрусталя, пьезооптического кварца.

Газовая хроматография жильного кварца

В жильном кварце всегда присутствуют флюидные включения, влияющие на прозрачность жильного кварца и снижающие качество сырья. Количество включений в жильном кварце колеблется в широких пределах. В молочно-белом кварце их значительно больше, чем в прозрачном. Форма включений бывает изометричной, трубчатой, линзовидной, неправильной, размер достигает 0,5–0,8 мм. Располагаются они в основном в залеченных трещинах, в виде цепочек, иногда обособленно. В кристаллах кварца включения находятся в трещинах, на границах мозаичных блоков, зон и пирамид роста. Большинство включений двухфазовые: жидкость+газ, реже однофазовые или трехфазовые: жидкость+жидкость+газ. При нагревании кварца происходит гомогенизация включений, а затем – растрескивание. С целью установления состава выделяющегося из кварца газа нами проведено его изучение методом газовой хроматографии. Анализы выполнены на газовом хроматографе Цвет-800. Использовались пробы в виде кварцевой крупки фракции 0,1–0,4 мм.

Согласно полученным данным, главным компонентом газовой фазы, выделяющейся из кварца при нагревании, являются пары H_2O , содержание которых колеблется от 61,2 до 402,2 мкг/г (табл. 1). Из других компонентов можно отметить CO_2 , CO и N_2 . Крупно-гигантозернистый слабопрозрачный кварц всех изученных месторождений характеризуется наиболее высоким содержанием газовых компонентов, что согласуется с присутствием в нем значительного количества флюидных включений. В частности, содержание H_2O в таком кварце варьирует в пределах от 144,1 до 402,2 мкг/г. В прозрачных разновидностях гигантозернистого кварца и горном хрустале содержание газов значительно ниже. Низким содержанием газов отличаются также мелкозернистый и гранулированный кварц (H_2O – 61,2–154,3 мкг/г). Относительное высокое содержание CO_2 (до 60,7 мкг/г) в некоторых пробах мелкозернистого и гранулированного кварца, вероятно, связано с присутствием включений карбонатов, разлагающихся при нагревании.

При ступенчатом нагревании проб до 600 °С и от 600 до 1000 °С обнаруживается, что основной объем газов выделяется в относительно низкотемпературной области, что особенно заметно для слабопрозрачного гигантозернистого кварца. При дальнейшем нагревании в температурном интервале 600–1000 °С газоотделение заметно ослабевает. Здесь, вероятно, происходит вскрытие мельчайших флюидных включений и удаление части структурной воды. Обращает на себя внимание то, что различие изученных типов кварца по количеству выделяющихся газов в высокотемпературной области становится менее существенным.

Результаты газохроматографического анализа жильного кварца и горного хрусталя

Номер пробы	Месторождение	Характеристика кварца	Содержание, мкг/г							
			H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	TU	Сумма
Южный Урал										
Нт-43/3	Новотроицкое	<i>Крупнозернистый слабопрозрачный</i>	0,2	0,1	3,8	0,1	3,9	144,1	0,4	152,6 (35,3)
К-3/2	Караяновское	—	0	0,0	4,4	0,5	4,3	274,8	0,7	284,7 (42,9)
ТП-175	Кыштымское	<i>Гранулированный</i>	0	1,7	2,9	0,1	2,8	61,2	0,4	69,1 (15,7)
КШ-1	—	—	0	1,1	2,1	0,2	2,4	71,4	0,6	77,8 (18,2)
КШ-2	—	—	0	0,1	0,6	0,2	1,7	65,7	0,5	68,8 (7,8)
КШ-13	—	—	0	0,7	3,5	0,1	25,9	64,3	0,4	94,9 (28,7)
Б-1	Беркутинское	—	0	0	2,3	0,1	2,4	65,2	0,2	70,2 (12,3)
Тп-94	Пугачевское	—	0	0	2,0	0,1	2,0	90,7	0,2	95,0 (23,7)
Кз414/5	Кузнечихинское	—	0	0,6	3,2	0,1	8,0	127,6	0,3	139,8 (39,9)
Приполярный Урал										
ж56/86	Желанное	<i>Крупнозернистый слабопрозрачный</i>	0,2	1,5	5,1	0,2	10,8	255,4	0,4	273,6 (36,3)
ж69/86	—	—	0,7	1,0	11,9	0,2	27,0	295,1	0,2	336,1 (35,5)
2215	—	—	0	4,3	6,6	0,1	9,1	402,2	0,3	422,6 (45,2)
2062	Николайшор	—	0,1	4,3	3,2	0,1	12,1	285,9	0,3	306,0 (32,1)
2064	—	—	0,1	4,2	2,9	0,1	21,5	344,1	0,2	373,1 (35,7)
2065	—	—	0,0	3,2	3,6	0,1	5,6	204,5	0,3	217,3 (27,2)
ж55/86	Желанное	<i>Прозрачный</i>	0,3	0,5	18,3	0,1	16,3	127,7	0,3	163,5 (41,1)
3095	—	—	0	1,6	2,5	0,1	2,1	70,6	0,2	77,1 (17,4)
3102	Николайшор	—	0	0,3	2,3	0,1	1,4	78,8	0,1	83,0 (20,9)
	—	—								
3105	Николайшор	<i>Гранулированный</i>	0,4	0,6	2,0	0,1	4,6	106,5	0,1	114,3 (29,5)
3047	—	—	0	0,4	2,9	0,2	6,3	143,5	0,4	153,7 (22,9)
3048	—	—	0,1	0,5	4,1	0,3	3,1	76,9	0,9	85,9 (13,9)
24/86а	Верхнекожимский р-н	<i>Мелкозернистый</i>	0,4	0	11,4	0,4	25,1	142,0	1,2	180,5 (56,3)
11/86а	—	—	0,0	0,6	1,6	0,1	60,7	154,3	0,4	217,7 (78,7)
3046Г-2	Желанное	<i>Горный хрусталь</i>	0,0	0	1,8	0,1	1,5	75,5	0,2	79,1 (20,1)
2234	—	<i>(дымчатый)</i>	0,0	1,6	2,5	0,1	1,2	77,9	0,1	83,4 (18,6)
31/836к	—	—	0,1	0,5	2,3	0,1	2,1	80,3	0,2	85,6 (9,5)
ЦП-1п	Цю Парнук	—	0,1	0	2,7	0,1	4,8	85,9	0,3	93,9 (20,4)

Примечание. Приведено содержание газов выделившихся из кварца при его нагревании до 1000 °С. В скобках отмечено в том числе содержание газов, выделившихся в интервале 600–1000 °С; ТУ – тяжелые углеводороды.

Структурные элементы-примеси в жильном кварце

В жильном кварце присутствуют многие элементы-примеси. К основным из них относятся Al, Ca, Mg, Mn, Fe, Ti, Cu, Na, K, Li и др. Содержание элементов-примесей является основным критерием качества кварцевого сырья. Методами химико-спектрального анализа и фотометрии пламени в ходе изучения уральских кварцевожильных месторождений получено большое количество данных о валовом содержании примесей в кварце [3]. Химически наиболее чистыми являются высокопрозрачный кварц, горный хрусталь. Для слабопрозрачного жильного кварца характерно повышенное содержание Ca, Na, K и других примесей, что связано с присутствием флюидных включений. В мелкозерни-

стом и гранулированном кварце содержание примесей сильно колеблется. В обогащенном гранулированном кварце оно бывает весьма незначительным. Суммарное содержание примесей (Al, Ca, Fe, Ti, Na, K, Li и др.) в высококачественных кварцевых концентратах не превышает 8–12 ppm, из них основная доля приходится на алюминий.

Как известно, элементы-примеси в кварце могут находиться в неструктурной и структурной формах. Наряду с определением валового содержания примесей большой интерес представляет оценка содержания структурных примесей, в значительной мере обуславливающих предельную обогатимость исходного сырья.

Изучение структурных примесей в кварце уральских месторождений с использованием раз-

личных методов спектроскопии ранее проводилось рядом авторов [8 – 14 и др.]. Нами с использованием метода электронного парамагнитного резонанса получены дополнительные сведения о содержании примесных элементов в различных типах жильного кварца и горном хрустале. Исследования проводились на серийном радиоспектрометре SE/X-2547. Пробы кварца проходили предварительную подготовку, включающую прогрев и облучение разными дозами с целью наиболее полного перевода структурных примесей в парамагнитное состояние.

Среди примесных центров в жильном кварце и горном хрустале преобладают алюминиевые центры, при образовании которых избыточный заряд компенсируется ионами щелочных металлов $[AlO_4/M^+]^0$. При радиационном облучении кварца ион кислорода в примесном Al-тетраэдре теряет электрон, щелочные ионы диффундируют к другим дефектам и в результате возникают парамагнитные алюминиевые центры $[AlO_4]^0$, дающие характерные спектры ЭПР. Эти центры называются также центрами радиационной дымчатой окраски. Возможны и более сложные способы компенсации избыточного заряда при замещении кремния алюминием. Такие алюминиевые центры также могут находиться в парамагнитном состоянии.

Наряду с алюминиевыми центрами в жильном кварце и горном хрустале почти всегда устанавливаются германиевые центры [11 и др.]. В кристаллической структуре кварца ионы германия замещают ионы кремния по схеме простого изovalентного изоморфизма $Ge^{4+} \rightarrow Si^{4+}$. Парамагнитные центры формируются в ходе радиационного воздействия на кварц при захвате в соседнюю междоузельную позицию щелочных ионов. В природном кварце преобладают парамагнитные германиевые центры с ионами лития в качестве компенсатора. Две разновидности центров – $[GeO_4/Li^+]^0_A$ и $[GeO_4/Li^+]^0_C$, отличающиеся расположением компенсирующего иона в одной из двух возможных междоузельных позиций. Ассоциации изоморфных ионов германия с вакансиями кислорода приводят к образованию германиевых аналогов E'-центров – $[Ge(E'_2)eH^+]$ - и $[Ge(E'_1)e]$ -центров. В цитриновых кристаллах устанавливаются структурные примеси титана, в основном в виде титан-водородных парамагнитных центров $[TiO_4H^+]^0_A$, содержание их весьма незначительное.

Характерной особенностью природных аметистов является наличие структурного железа, находящегося преимущественно в трехвалентной форме, образующего парамагнитные $[FeO_4/Li^+]^0$ - и $[FeO_4/H^+]^0$ -центры, а также центры с нелокальной компенсацией заряда – $[FeO_4]^\cdot$. Предполагается, что аметистовая окраска связана с радиационно-стимулированным переходом ионов железа в четырехвалентное состояние с формированием $[FeO_4]^0$ -центров.

Кроме примесных парамагнитных центров в структуре кварца всегда присутствуют различные дефекты вакансионной природы. Наиболее детально изучены электронные центры, на вакансиях

кислорода, – так называемые E'-центры. Разнообразности E'-центров связаны с наличием или отсутствием протонов в каналах, возможно щелочных ионов, и их различным положением. Вблизи вакансий кремния возникают дырочные парамагнитные центры, неспаренный электрон в которых локализуется на двух эквивалентных кислородах с образованием центров типа: O_2^{3-} или O^{2-} . Большинство из них ассоциированы с примесными ионами Al. Центры этого типа в низких концентрациях присутствуют во всех типах уральского кварца.

В табл. 2 приведены результаты оценки содержания алюминиевых и германиевых центров в промышленных типах кварца различных месторождений. В крупно-гигантозернистом кварце содержание $[AlO_4]^0$ центров варьирует от 10 до 36 усл. ед. Наиболее низкие содержания определены в пробах Новотроицкого и Караяновского месторождений. Интересно, что в высокопрозрачном кварце содержание $[AlO_4]^0$ центров часто бывает выше, чем в молочно-белом или слабопрозрачном кварце, слагающем основной объем жил.

В пробах гранулированного кварца месторождений Беркутинского, Кыштымского, Кузнечинского, а также в приполярноуральском гранулированном кварце (Верхнекожимский район) содержание $[AlO_4]^0$ центров в большинстве случаев не превышает 20 усл. ед. Вместе с этим в пробах гранулированного кварца Ларинского, Вязовского, Агардашского, Аргазинского месторождений и в отдельных пробах Кыштымского месторождения содержание $[AlO_4]^0$ центров достигает 40–60 усл. ед. Очевидно, гранулированный кварц по содержанию структурного алюминия весьма неоднороден, что может быть связано с неоднородностью исходного крупно-гигантозернистого кварца.

В первично мелкозернистом кварце, слагающем мелкие согласные жилы и прожилки, содержание $[AlO_4]^0$ центров невысокое и сопоставимо с содержанием их в наиболее чистых разностях гранулированного кварца (14–18 усл. ед.).

В кристаллах горного хрусталя содержание $[AlO_4]^0$ центров колеблется в широких пределах. В устойчивых к радиационному окрашиванию кристаллах содержание центров не превышает 7 усл. ед. В кристаллах, приобретающих дымчатую окраску, их содержание значительно выше. Самое высокое содержание $[AlO_4]^0$ центров характерно для густоокрашенных дымчато-цитриновых и цитриновых кристаллов – до 100 усл. ед., что значительно выше, чем в жильном кварце.

Следует заметить, что при иной подготовке проб к анализам, в частности, с использованием высокотемпературного отжига, содержание $[AlO_4]^0$ центров возрастает в 1,5–3 раза. Этот эффект отмечался многими авторами, хотя его природа остается неясной [2, 15 и др.]. На наш взгляд, повышение содержания парамагнитных алюминиевых центров в кварце, подвергнутом предварительному высокотемпературному отжигу, в значительной степени обусловлено термостимулированным переходом имеющихся в кварце алюмоводородных дефектов в

Содержание парамагнитных центров в жильном кварце и горном хрустале уральских месторождений

Номер пробы	Месторождение	Характеристика кварца	[AlO ₄] ⁰ , усл. ед.	[GeO ₄ /Li ⁺] ⁰ , усл. ед.
Южный Урал				
НТ-43/3	Новотроицкое	<i>Крупнозернистый</i>	10	0,02
К-3/2	Караяновское	—"	14	0,02
ТП-94	Кыштымское	<i>Гранулированный</i>	12	0,02
КШ-13	—"	—"	65	0,11
КШ-1	—"	—"	17	0,10
ТП-175	—"	—"	22	0,11
Б-1	Беркутинское	—"	19	0,15
КЗ-414	Кузнечихинское	—"	22	0,10
ЛР-6/1	Ларинское	—"	47	0,59
ВЗ-35/1	Вязовское	—"	41	0,21
АГ-1	Агардашское	—"	52	0,35
АР-1/01	Аргазинское	—"	44	0,44
Приполярный Урал				
56/86	Желанное	<i>Крупнозернистый</i>	30	0,2
115/86	—"	—"	17	0,2
2215	—"	—"	31	0,3
47/86	—"	—"	17	0,18
2062	Николайшор	—"	36	0,13
2064	—"	—"	19	0,15
2065	—"	—"	18	0,19
120304П	Додо	—"	29	0,16
55/86	Желанное	<i>Высокопрозрачный</i>	27	0,28
3095	—"	—"	50	0,48
40/86	Верхнекожимский р-н	<i>Гранулированный</i>	11	0,02
3105	—"	—"	18	0,06
3047	—"	—"	16	0,01
11/86а	Верхнекожимский р-он	<i>Мелкозернистый</i>	16	0,04
33/86	—"	—"	14	0,02
17/86	—"	—"	18	0,02
11/83к	Желанное	<i>Горный хрусталь (дымчатый)</i>	21	0,29
31/83	—"	—"	12	0,02
ЦП-1П	Ц. Парнук	—"	15	0,22
ЖВ-7	Желанное	<i>Горный хрусталь (цитрин)</i>	102	0,62
ЖВ-11	—"	—"	95	0,75
ВП-1	В. Парнук	—"	60	0,56
Х-1	Хасаварка	<i>Аметист</i>	40	0,03
Х-2	—"	—"	12	0,04

Примечание. Содержание [AlO₄]⁰-центров оценивалось в порошковых образцах кварца, прогретых при 500°C и облученных дозой 30 Мрад, [GeO₄/Li⁺]⁰-центров – в образцах, прогретых при 500°C, облученных дозой 0.5 Мрад.

алюмощелочные, которые под действием радиационного облучения становятся парамагнитными.

Содержание [GeO₄/Li⁺]⁰ - центров в жильном кварце примерно на два порядка ниже содержания алюминиевых центров и не превышает 0,6 усл. ед. В некоторых случаях между ними обнаруживается прямая корреляция, что свидетельствует о подоб-

ном поведении алюминия и германия в процессах минералообразования и зависимости их содержания в кварце от одних и тех же факторов. Высокое содержание германия отмечается в кварце месторождений Ларинского, Вязовского, Агардашского, Аргазинского, в высокопрозрачном кварце месторождения Желанного. Наиболее высокие содержа-

ния $[\text{GeO}_4/\text{Li}^+]^0$ центров характерны для дымчато-цитриновых кристаллов.

В табл. 3 приведены полученные нами результаты оценки содержания $[\text{AlO}_4]^0$ и $[\text{GeO}_4/\text{Li}^+]^0$ центров в жильном кварце некоторых зарубежных месторождений. Как видно, содержание $[\text{AlO}_4]^0$ центров довольно высокое. В жильном кварце уральских месторождений содержание $[\text{AlO}_4]^0$ центров во многих случаях значительно ниже и, в частности, ниже, чем в кварце высококачественных промышленных концентратов, производящихся фирмой ЮНИМИН (США).

Содержание парамагнитных центров в кварце некоторых зарубежных месторождений

Номер пробы	Месторождения, район	Характеристика кварца	$[\text{AlO}_4]^0$, усл. ед.	$[\text{GeO}_4/\text{Li}^+]^0$, усл. ед.
Iota-STD	Спрус Пайн, США	Кварц из плагиопегматитов	42	0,15
Iota-4	—	(обогащенная крупка)	39	0,07
Брз-1	Минас Жераис, Бразилия	Кварц жильный крупнозернистый	51	0,23
Амб-1	Амбунабэ, Мадагаскар	Кварц редкометальных пегматитов	119	0,38
Аф-1	Амбутафуци, Мадагаскар	—	57	0,07
Ак-1	Актас, Казахстан	Кварц жильный крупнозернистый	106	0,08

Заключение

Результаты изучения жильного кварца уральских месторождений с использованием методов газовой хроматографии и электронного парамагнитного резонанса позволяют сделать следующие выводы. Наиболее низким содержанием флюидной фазы наряду с высокопрозрачными разностями крупно-гигантозернистого кварца и горным хрусталем отличается гранулированный и мелкозернистый кварц. Выделение газовой фазы при нагревании кварца происходит в основном в температурном интервале до 600 °С, но продолжается и в области высоких температур.

Содержание Al - и Ge - центров в жильном кварце сильно варьирует. В высокопрозрачных разностях и кристаллах горного хрусталя оно может быть выше, чем в основной массе крупно-гигантозернистого слабопрозрачного кварца. Для гранулированного кварца характерно относительно низкое содержание структурных элементов-примесей. Однако встречаются такие его разности, в которых содержание структурных примесей превышает их содержание в крупнозернистом кварце.

Для получения особо чистых кварцевых концентратов наиболее предпочтителен гранулированный кварц, который по содержанию флюидной фазы близок к крупно-гигантозернистому высокопрозрачному, однако во многих случаях отличается от него более низким содержанием структурных примесей. Заслуживает внимания мелкозернистый кварц, содержание структурных примесей в котором также бывает незначительным.

При условии удаления минеральных и флюидных включений на основе жильного кварца уральских месторождений может быть получено кварцевое сырье, по качеству не уступающее высококачественному сырью зарубежных предприятий.

Работа выполнена при поддержке Гранта президента РФ «Ведущие научные школы» НШ-7198.2010.5, Программы ОНЗ РАН № 2(09-Т-5-1015).

Литература

- Таблица 3
1. Мусафонов В.М., Серых Н.М. Сырьевая база природного особо чистого кварца // Минеральные ресурсы России. 1997. № 2. С. 7-12.
 2. Серых Н.М., Борисов Л.И., Гулин Е.Н., Кайряк А.Д. О перспективах использования МСВ кварцевого сырья России в промышленности высоких технологий // Разведка и охрана недр. 2003. № 1. С. 17-20.
 3. Евстропов А.А., Бурьян Ю.И., Кухарь Н.С. и др. Жильный кварц Урала в науке и технике. Геология основных месторождений кварцевого сырья. М.: Недра, 1995. 207 с.
 4. Емлин Э.Ф., Синкевич Г.А., Якшин В.И. Жильный кварц Урала в науке и технике. Свердловск: Средне-Уральск. изд-во, 1988. 272 с.
 5. Кузнецов С.К. Жильный кварц Приполярного Урала. Санкт-Петербург: Наука, 1998. 203 с.
 6. Мельников Е.П. Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца. М.: Недра, 1988. 216 с.
 7. Соколов Ю.М., Мельников Е.П., Маханек Е.К., Мельникова Н.И. Минерагения метаморфогенных месторождений горного хрусталя и гранулированного кварца. Л.: Наука, 1977. 120 с.
 8. Буканов В.В. Горный хрусталь Приполярного Урала. Л.: Наука, 1974. 212 с.
 9. Вотьяков С.Л., Крохалев В.Я., Пуртов В.К., Краснобаев А.А. Люминесцентный анализ структурного несовершенства кварца. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. 70 с.
 10. Котова Е.Н. Структурные примеси в жильном кварце и горном хрустале Приполярного Урала // Теория, история, философия и практика минералогии: Материалы IV Международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2006. С.132-134.
 11. Лютов В. П. Электронный парамагнитный резонанс и термолюминесценция кристаллов кварца Приполярного Урала // Физика минералов и их аналогов. Л.: Наука, 1991. С. 108-111.
 12. Лютов В. П. Особенности вхождения примесей алюминия в кристаллическую структуру минералов кремнезема // Кварц. Кремнезем: Материалы Международного семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2004. С.28-31.

13. Раков Л.Т., Миловидова Н.Д., Моисеев Б.М., Огурцов В.Г. Новый метод оценки качества кварцевого сырья // Разведка и охрана недр, 1993. № 7. С. 36-39.
14. Серкова Л.Е. Типоморфные особенности жильного безрудного кварца (по данным ИК- и ЭПР-спектроскопии): Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Свердловск, 1991. 20 с.
15. Раков Л. Т. Поведение парамагнитных центров при термическом отжиге кварца // Кристаллография, 1989. Т. 34. № 1. С. 260-262.

Статья поступила в редакцию 18.08.2011.