

Фенькина Лампи) // Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов: сб. ст. по матер. III Всерос. Семинара по технологической минералогии. Петрозаводск, 2008. С. 863-94.

13. *Ташкер Э.М.* Методические рекомендации по оценке качества кварцевого сырья для плавки и оптического стекловарения. М., 1983. 68 с.

14. Токсичные органические вещества в рудах твердых полезных ископаемых и их влияние на экологическую обстановку / *Богомолов О.Н., Бушев А.Г., Кудрин В.С., Соколов С.В., Сидоренко Г.А., Петров Н.Н., Поленов Ю.А., Семенов Е.И.* // Геоэкология. Серия Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1996. Вып 3. С. 113-121.

15. *Федющенко С.В.* Структурные примеси в промышленном жильном кварце и породообразующем кварце гранитоидов. Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М., 2004. 22 с.

16. *Эйгелес М.А.* Основы флотации несulfидных минералов. М.: Недра, 1964. 407 с.

17. *Jung L.* High purity natural quartz. Quartz Tehnology. Inc. New. Jersey, 1995. 550 P.

ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В КВАРЦЕ И ОСОБО ЧИСТОЕ КВАРЦЕВОЕ СЫРЬЕ

Светова Е.Н.¹, Кузнецов С.К.², Шанина С.Н.², Филиппов В.Н.²

¹Учреждение Российской академии наук Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

²Учреждение Российской академии наук Институт геологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар

Содержание элементов-примесей является важным критерием при качественно-технологической оценке кварцевого сырья. Наиболее чистые в отношении примесей жильный кварц и горный хрусталь гидротермальных месторождений используются для получения пьезооптических изделий и стекла, синтеза монокристаллов. Увеличивающийся спрос на высокотехнологичные материалы, в частности, на оптическое стекло, а также строгие промышленные требования к ним, обозначили в последние годы проблему особо чистого кварцевого сырья [2, 12 и др.]. В решение данной проблемы вовлечены различные академические и отраслевые институты: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН; Институт геологии КарНЦ РАН; Институт минералогии УрО РАН, ФГУП «ВИМС», ФГУП «ЦНИИГеолнеруд», такие предприятия как «Полярный кварц», «Центркварц», «Кыштымский ГОК» и др. Большое значение в настоящее время имеет выявление среди различных минералого-технологических типов кварца особо чистых разновидностей, характеризующихся минимальным содержанием элементов-примесей, повышение эффективности методов обогащения и переработки кварцевого сырья [1, 3, 6, 9 и др.].

Значительные запасы жильного кварца и горного хрусталя, перспективного для промышленного использования известны на Приполярном Урале. Среди кварцевых жил специалистами выделяются несколько минералого-технологических типов кварца, детально описанных в ряде работ [8 и др.]. Наиболее широко в пределах всего региона распространен гигантозернистый слабопрозрачный кварц. В основной массе такого кварца всегда присутствуют участки прозрачного и высокопрозрачного кварца, почти лишенного минеральных и газовой-жидких включений. Выделяются также жилы гранулированного кварца, развивающиеся по гигантозернистому слабопрозрачному кварцу при его кристаллизации под давлением в связи с проявлением процессов дислокационного или регионального метаморфизма. Вместе с этим, в породах разного состава и возраста наблюдаются линзовидные жилы стекловидного кварца, а также небольшие жилы и прожилки, сложенные первично мелкозернистым серым кварцем. Многие кварцевые жилы хрусталеносны. Качество жильного кварца и горного хрусталя как промышленного сырья сильно варьирует в зависимости от содержания элементов-примесей, минеральных, газовой-жидких включений и других характеристик. Имеется большое количество аналитических данных, выполнены минералого-технологические исследования. Однако получение высококачественных концентратов на основе приполярноуральского кварца пока остается проблематичным.

Нами с использованием методов химического и микронзондового анализа, электронной микроскопии, газовой хроматографии и радиоспектроскопии изучены формы вхождения элементов-примесей в промышленных разновидностях жильного кварца и горного хрусталя гидротермально-метаморфогенных месторождений Приполярного Урала. Проанализированы пробы кварца гигантозернистого слабопрозрачного, прозрачного, гранулированного, стекловидного, мелкозернистого и горного хрусталя. Для оценки эффективности обогащения крупки кварца и выявления особенностей удаления минеральных примесей и газовой-жидких включений проведено сравнительное изучение исходных проб кварца и проб кварца, протравленных в течении часа 26%-ным раствором плавиковой кислоты при 95°C. Исследована также крупка гигантозернистого слабопрозрачного кварца, для которой было дополнительно применено горячее хлорирование (кварц прогревался в 25%-ном растворе HCl при 1000°C). Такой процесс очистки считается пригодным для удаления примесей переходных металлов, преобразующихся при высокой температуре взаимодействия в летучие хлориды.

Результаты оценки валового содержания элементов-примесей в различных типах кварца до и после кислотной обработки приведены в таблице 1. Исходный кварц содержит довольно большое количество

элементов примесей: Al, B, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ti, среди которых во всех типах кварца доминирует железо. Обращает на себя внимание также большое содержание алюминия. Наиболее загрязненным практически всеми примесями, особенно кальцием, железом, натрием, алюминием и титаном является первично-мелкозернистый кварц, содержащий большое количество различных минеральных включений.

После магнитной сепарации и кислотной обработки крупки исходного кварца содержание практически всех примесей сильно снижается. Вследствие удаления магнитных минералов, в десятки раз падает содержание железа. Под воздействием кислот, происходит растворение кварцевых зерен, содержащих различные минеральные и газово-жидкие включения, существенно снижается содержание натрия, калия, кальция, марганца, магния, меди. Исключение составляет литий, концентрация которого, во всех типах кварца в процессе очистки остается почти неизменной. Наиболее сложноудаляемой примесью в кварце является алюминий, его содержание в кварце после обработки преобладает над содержанием других элементов. Причем в исходно сильно загрязненном мелкозернистом кварце содержание алюминия в результате эксперимента сокращается на порядок и приблизительно выравнивается с содержанием алюминия в остальных типах кварца. Происходит это в связи с удалением минеральных включений, прежде всего слюд. Минимальным содержанием элементов-примесей (около 8 ppm), по нашим данным, характеризуется обработанный гранулированный кварц.

Таблица 1. Элементы-примеси в основных типах жильного кварца Приполярного Урала, ppm

Номер проб	Al	B	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Ti	Zr	Сумма
<i>Исходная проба</i>														
2215	23	0.27	3.66	0.12	1.3	141	4.4	0.97	0.31	1.06	16	0.63	0.02	193
3095	23	0.15	1.03	0.19	1.1	187	1.2	1.31	0.21	1.32	4.1	0.77	0.02	221
3102	39	0.13	6	0.19	154	197	9.5	1.33	3	1.91	3.1	1.7	0.06	417
3105	25	0.17	6.2	0.14	1.40	132	5.41	0.26	2.4	1.0	1.5	1.1	0.04	177
24/86a	195	0.84	2620	0.84	2.94	872	158	0.3	46	75	435	96	0.76	4503
2234	16	0.1	2.44	0.16	1.58	172	0.58	1.81	0.30	1.31	1.6	0.45	0.01	198
<i>После магнитной сепарации и кислотной обработки</i>														
2215	18	0.15	0.61	0	0.01	0.17	2.01	0.81	0.06	0.03	6.11	0.45	0	28
3095	13	0.09	0.01	0.01	0	0.13	0.26	1.23	0	0	2.57	0.54	0	18
3102	10	0.09	0.02	0	0	0.02	0.07	1.18	0	0	0.54	0.64	0	13
3105	5.2	0.14	0.62	0	0	0.16	0.57	0.19	0.12	0.01	0.31	0.62	0	8
24/86a	16	0.12	15	0.01	0.15	7.6	3.0	0.17	1.32	0.47	1.7	1.3	0.04	47
2234	9.8	0.04	0.14	0.01	0.01	0.1	0.02	1.58	0.03	0	0.09	0.36	0	12

Примечание: Характеристика кварца: 2215 – гигантозернистый слабопрозрачный (м-е Желанное); 3095 – прозрачный реликтовый (м-е Желанное); 3102 – стекловидный (м-е Игшор-Николайшор); 3105 – гранулированный (проявление Нижнениколайшор); 24/86a – мелкозернистый (Верхнекожымский р-н); 2234 – горный хрусталь (м-е Желанное). Анализы выполнены методом ICP-OES в ОАО «Полярный кварц», г. Москва. Параметры кислотной обработки: HF 26%, 95°C, 1 час + промывка в дистиллированной воде + HF 26%, 95°C, 1 час + промывка в дистиллированной воде.

Изучение состава и содержания газовых включений, выделяющихся из кварца при его нагревании, выполнено нами с использованием хроматографа Цвет-800 с пиролитической приставкой. Измерения проводились при поинтервальном (100–600 и 600–1000°C) нагреве крупки навеской около 500 мг, предварительно промытой в дистиллированной воде и прогретой до 100°C для удаления воды, сорбированной поверхностью кварцевых зерен. Основными компонентами газовой фазы, выделяющейся из кварца при нагревании являются H₂O, CO₂, CO (табл. 2). В меньшем количестве присутствуют N₂, H₂ и углеводородные соединения. Большая часть газов выделяется в области до 600°C в связи с растрескиванием относительно крупных газово-жидких включений. В высокотемпературной области (600–1000°C) газоотделение заметно снижается, что обусловлено, вероятно, вскрытием мельчайших газово-жидких включений, а так же удалением структурно-связанной воды [4].

Наиболее газонасыщенным является слабопрозрачный гигантозернистый кварц – общее содержание газов, выделившихся при нагревании от 100 до 1000°C варьирует от 190 до 476 ppm. Далее следуют мелкозернистый и гранулированный кварц. Особенностью мелкозернистого кварца является значительное выделение CO₂ в высокотемпературной области, вероятно, за счет разложения микровключений карбонатов. В визуально высокопрозрачных разновидностях кварца содержание выделившихся газов наиболее низкое: в стекловидном – 70–109 ppm, в дымчатых кристаллах горного хрусталя – 79–94 ppm. Существенное различие в количестве выделившихся газов в области 100–600°C для разных типов кварца с переходом в область высоких температур сглаживается.

Таблица 2. Состав газовой фазы, выделившихся при нагревании основных промышленных типов кварца Прполярного Урала, ppm

Характеристика кварца	Число проб	Интервал нагрева, °С	H ₂ O	CO ₂	CO	N ₂	Сумма
Гигантозернистый слабопрозрачный	16	100-600	$\frac{150-429}{267}$	$\frac{5-22}{11}$	$\frac{0.4-2}{1}$	$\frac{0.8-4.3}{1.9}$	$\frac{162-445}{281}$
		600-1000	$\frac{17-44}{27}$	$\frac{0.6-17}{3}$	$\frac{1-10}{4}$	$\frac{0-2}{0.4}$	$\frac{22-49}{35}$
Гигантозернистый прозрачный (реликты в слабопрозрачном кварце)	5	100-600	$\frac{57-183}{120}$	$\frac{2-13}{7}$	$\frac{0.6-1.8}{1.2}$	$\frac{0-0.3}{0.6}$	$\frac{60-198}{129}$
		600-1000	$\frac{13-53}{32}$	$\frac{1-6}{3}$	$\frac{2-17}{9.3}$	$\frac{0-1.6}{0.6}$	$\frac{17-75}{45}$
Гигантозернистый стекловидный	4	100-600	$\frac{30-75}{50}$	$\frac{1-6}{3}$	$\frac{0.5-1.1}{0.8}$	$\frac{0-0.08}{0.03}$	$\frac{33-83}{54}$
		600-1000	$\frac{18-32}{24}$	$\frac{0.6-3.8}{1.5}$	$\frac{1.8-4.3}{3.3}$	$\frac{0-0.3}{0.1}$	$\frac{21-37}{29}$
Гранулированный	5	100-600	$\frac{67-125}{101}$	$\frac{1-8}{4}$	$\frac{0.1-1.5}{0.8}$	$\frac{0-0.4}{0.2}$	$\frac{72-131}{107}$
		600-1000	$\frac{10-31}{22}$	$\frac{0.6-5.6}{3.2}$	$\frac{1.5-9}{4.2}$	$\frac{0-0.4}{0.1}$	$\frac{14-43}{30}$
Мелкозернистый	4	100-600	$\frac{102-133}{117}$	$\frac{5-22}{12}$	$\frac{0.4-1.8}{1.4}$	$\frac{0-0.4}{0.1}$	$\frac{116-144}{131}$
		600-1000	$\frac{21-37}{28}$	$\frac{6-142}{55}$	$\frac{1.2-18}{9}$	$\frac{0-0.8}{0.3}$	$\frac{52-183}{93}$
Дымчатые кристаллы горного хрусталя	4	100-600	$\frac{57-73}{66}$	$\frac{0.7-3.7}{1.9}$	$\frac{0-1.2}{0.6}$	$\frac{0-0.08}{0.02}$	$\frac{59-76}{68}$
		600-1000	$\frac{8-18}{14}$	$\frac{0.3-1.0}{0.5}$	$\frac{1.1-2.1}{1.7}$	$\frac{0-1.6}{0.5}$	$\frac{10-20}{17}$

Примечание: Анализы выполнены в ИГ Коми НЦ УрО РАН на газовом хроматографе «Цвет-800». Здесь и далее в числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – среднее значение.

Для контроля чистоты кварцевой крупки и выявления особенностей удаления минеральных примесей в ходе ее кислотной обработки проведено электронно-микроскопическое изучение поверхности зерен кварца. На сканирующем электронном микроскопе JSM-6400 с энергодисперсионной приставкой Link анализировалась крупка фракции 0.1–0.5 мм до и после обработки ее 26% раствором HF при температуре 95°C. Крупка исходного гигантозернистого слабопрозрачного кварца представлена относительно изометричными зернами с ровной, местами сильно шероховатой бугорчатой, ступенчатой поверхностью (рис. 1а). На сколах наблюдаются множественные следы от вскрытых газово-жидких включений в виде пор с находящимися около них мельчайшими осколками кварца (рис. 1б). На поверхности зерен часто обнаруживаются выделения хлоридов натрия и калия, связанных с кристаллизацией и содержимого газово-жидких включений (рис. 1в). После обработки кислотой поверхность зерен становится чистой, но сильно протравленной, в редких случаях встречаются оставшиеся твердые микровключения. Очевидно, что растворение зерен происходило преимущественно около газово-жидких включений, вдоль залеченных трещин, содержащих эти включения (рис. 2а-в).

Зерна прозрачного реликтового, стекловидного кварца и горного хрусталя в отличие от слабопрозрачного кварца часто имеют угловатые зерна с гладкими гранями и характерной для кварца, разлистованностью сколов (рис. 1г-е). Такие поверхности весьма характерны для моноблоков, лишенных включений, трещин и других дефектов. Более неоднородны по морфологии поверхности, но тоже чистые – зерна гранулированного кварца (рис. 1ж). После кислотного травления на поверхности появляются каверны, в том числе сложной, щелевидной формы (рис. 2д, е). На зернах прозрачного кварца нередко наблюдались солевые лепестковидные выделения 10-20 мкм, образованные, по-нашему мнению, во время подготовки образцов (рис. 2г). До этого они были скрыты за тончайшими кварцевыми стенками, а, попав в вакуум при напылении, прорвали их.

Первично-мелкозернистый кварц, являющийся по нашим данным наиболее загрязненным различными элементами-примесями, отличается присутствием большого количества минеральных включений, в частности, хлорита, мусковита (рис. 1з-и). Во многих случаях на зернах исходного кварца наблюдаются глубокие поры или каналы. Местами зерна несут следы природного растворения, с образованием глобулярных неровностей. Мелкозернистый кварц наиболее сильно подвержен воздействию кислоты. Обработанные кислотой зерна сплошь покрыты кавернами и бороздами травления, что обусловлено исходной неоднородностью кварца, высвобождением минеральных включений (рис. 2ж-и).

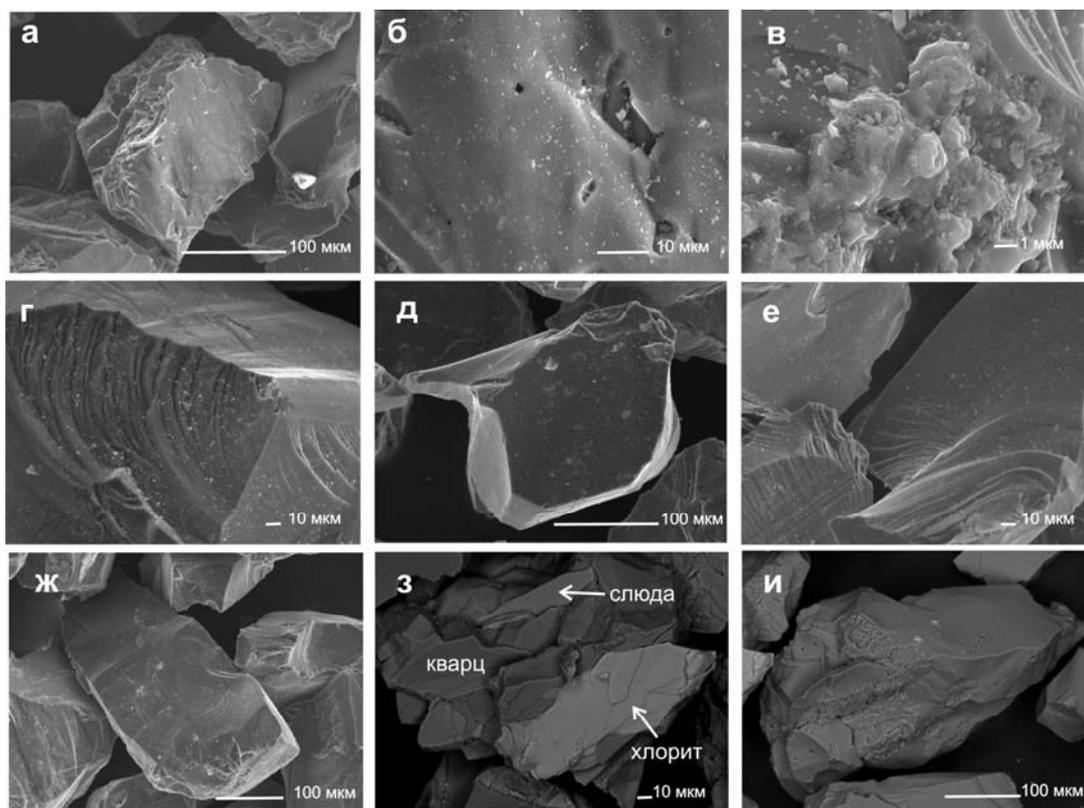


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения исходных зерен кварца: а-в – гигантозернистый слабопрозрачный; г – стекловидный; д – прозрачный е – горный хрусталь, ж – гранулированный; з-и – мелкозернистый

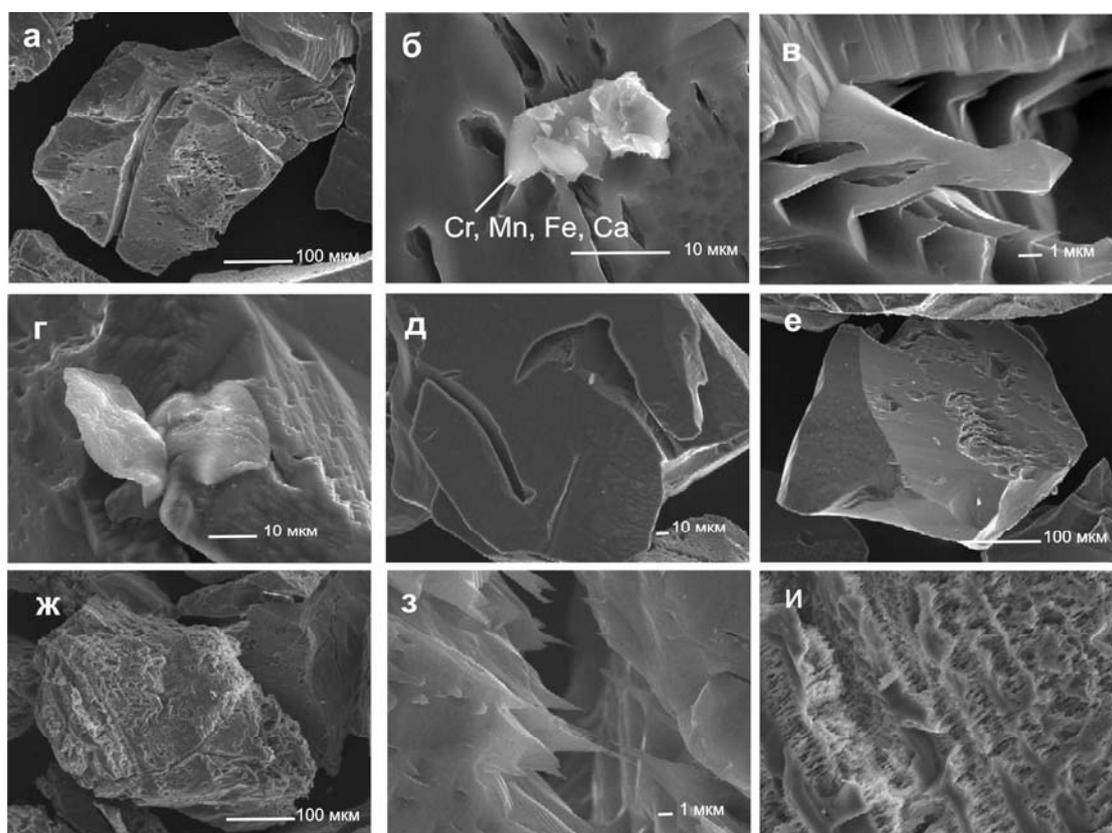


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения зерен кварца после обработки плавиковой кислотой (26 % р-р HF, 95°C): а-в – гигантозернистый слабопрозрачный; г – прозрачный; д – стекловидный е – горный хрусталь, ж-и – мелкозернистый

Важной технологической задачей является удаление газовой-жидких включений из гигантозернистого слабопрозрачного кварца. В связи с этим, в специализированной лаборатории «Анзаплан» в Германии были проведены эксперименты по обогащению крупки такого кварца с использованием магнитной сепарации, травления плавиковой кислотой и горячего хлорирования. В ходе испытаний осуществлялся контроль содержания элементов примесей в кварце методом ICP-MS. Обогащенная разными способами крупка изучена нами методами газовой хроматографии и электронной микроскопии. В таблице 3 приведена динамика изменения содержания элементов примесей в кварце на разных стадиях очистки. Суммарное содержание примесей в исходном кварце (после магнитной сепарации проб) по данным химического анализа составляет 44 ppm. После обработки кварца 26% раствором HF суммарное содержание примесей в кварце снижается в два раза (до 22 ppm). Кардинально уменьшается количество железа, сокращается количество натрия, калия и кальция, а так же других элементов. Процедура горячего хлорирования ведет к снижению суммарной концентрации элементов-примесей в кварце по отношению к исходному приблизительно в три раза (до 15 ppm). В данном случае наблюдается эффект резкого уменьшения содержания не только железа, но и натрия, калия, кальция и даже лития. Сравнивая данные химического анализа гигантозернистого слабопрозрачного кварца, подвергнутого горячему хлорированию с аналогичными данными ЮТА кварца (высококачественного кварцевого концентрата фирмы ЮНИМИН, США), нетрудно заметить, что обогащенный слабопрозрачный кварц превосходит по качеству кварцевый концентрат ЮТА-STD и уступает концентрату ЮТА-4 в содержании алюминия.

Таблица 3 Содержание элементов-примесей в гигантозернистом слабопрозрачном кварце на разных стадиях обогащения, ppm

Этап обработки	Al	Fe	Na	K	Li	Ti	Zr	Ca	Mg	Cr	Mn	Cu	Ni	P	B	Σ
После магн. сепарации	18	12.0	7.8	2.6	0.6	0.5	<0.1	1.6	0.2	0.1	0.2	0.1	<0.1	<0.1	0.2	44
После HF	14	0.15	4.5	1.5	0.5	0.6	<0.1	0.6	0.1	<0.05	<0.05	<0.05	<0.1	<0.1	Н.о.	22
После гор. хлорирования	14	0.11	0.1	0.1	0.2	0.4	<0.1	0.2	0.1	<0.05	<0.05	<0.05	<0.1	<0.1	Н.о.	15
ЮТА-STD*	16.2	0.23	0.9	0.6	0.9	1.3	1.3	0.5	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.1	0.1	0.08	20.9
ЮТА-4*	8.0	0.3	0.9	0.35	0.15	1.4	0.1	0.6	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.1	0.04	11.8

Примечание. Анализы выполнены методом ICP-MS в лаборатории «Анзаплан», Германия. Параметры обработки: HF - травление в 26% р-ре HF при 95 °С, горячее хлорирование - прогрев крупки до 1000 °С в 25% р-ре HCl.

* – высококачественные кварцевые концентраты, производимые фирмой Unimin, США; источник данных www.iotaquartz.com

При электронно-микроскопическом изучении обнаруживается, что поверхности зерен после горячего хлорирования протравлены гораздо сильнее, чем после обработки плавиковой кислотой, гладкие грани почти отсутствуют (рис. 3). Наблюдаются множественные следы от высвободившихся крупных и мелких твердых включений, а так же газовой-жидких включений, образующих длинные цепочки вдоль ослабленных плоскостей. Встречаются зерна очень глубоко протравленные (до 2–5 мкм), с образованием тонких кварцевых стенок-перегородок. Микроминеральных включений в кварце, обработанном горячим хлорированием, нами обнаружено не было.

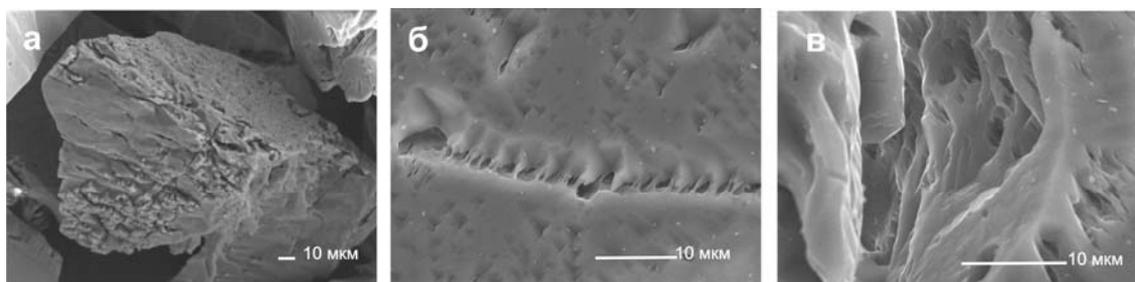


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения поверхности зерен гигантозернистого слабопрозрачного кварца после обработки горячим хлорированием (25% -р-р HCl, 1000°С)

Для сравнения под электронным микроскопом нами изучены зерна двух сортов кварцевой крупки ЮТА (рис. 4). Обращает на себя внимание сильно протравленная поверхность зерен кварца ЮТА-STD, содержащая множественные следы растворения включений: крупных, возможно, слюд и мелких, подобных тем, что мы наблюдали на протравленной поверхности зерен гигантозернистого и мелкозернистого жильного кварца. Следовательно, исходный кварцевый материал для концентрата ЮТА-STD был достаточно загрязнен минеральными примесями, эффективно извлеченными в процессе очистки. Зерна кварцевой крупки сорта ЮТА-4 выглядят иначе: имеют больше гладких, почти нетронутых травлением поверхностей, с острыми краями граней, что свидетельствует, видимо, об исходно более совершенном в отношении чистоты кварце.

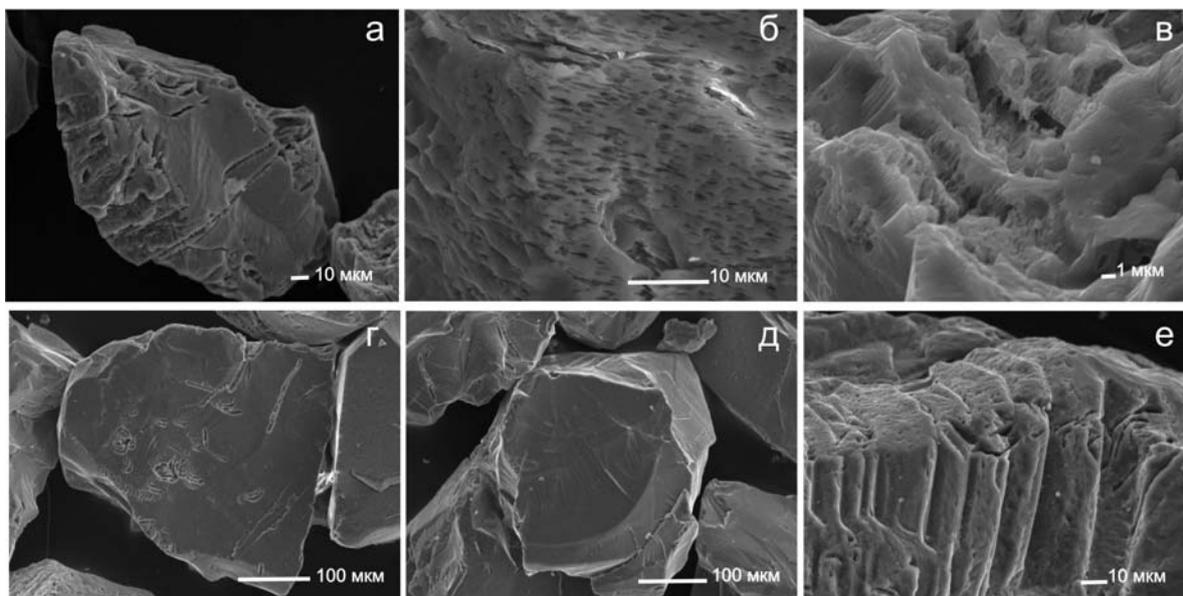


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения поверхности зерен кварцевой крупки фирмы ЮНИМИН (США): а–в – сорт JOTA-STD; г–е – сорт JOTA-4

Данные газовой хроматографии показали, что содержание газовой фазы, выделенной при нагревании гигантозернистого слабопрозрачного кварца после горячего хлорирования снижается более чем в 10 раз – с 256 до 19.4 ppm, из которых 19 ppm – составляют пары воды (табл. 4). Такое снижение содержания элементов-примесей связано с высокотемпературной (1000°C) обработкой кварца, при которой происходит растрескивание газожидких включений. Газохроматографическое исследование крупки кварца JOTA-STD свидетельствует о том, что при ее нагревании до 1000°C содержание выделяющихся газов примерно в 3 раза выше, чем в обработанном горячим хлорированием приполярноуральском слабопрозрачном кварце.

Таблица 4. Состав газовой фазы, выделившейся из гигантозернистого слабопрозрачного кварца при нагревании до 1000°C, ppm

Этап обработки кварца	H ₂ O	CO ₂	CO	N ₂	H ₂	Σ
Исходный	252	3.5	0.3	0	0	256
После HF	219	1.6	0.3	0	0	221
После горячего хлорирования	19	0.2	0.2	0	0	19.4
JOTA-STD	58	5.5	3.2	0.61	0.07	67.4

Примечание. Анализы выполнены в ИГ Коми НЦ УрО РАН на газовом хроматографе «Цвет-800».

Важное значение при качественно-технологической оценке кварцевого сырья имеют сведения об элементах-примесях, входящих в кристаллическую решетку кварца. Современные методы обогащения не позволяют пока извлекать такие примеси, поэтому их количественная оценка задает предельную чистоту сырья, достигаемую после удаления из него всех других форм примесей. Методом электронного парамагнитного резонанса нами оценено содержание в кварце структурных примесей алюминия и германия, относящихся к доминирующим изоморфным примесям в природном кварце. Их определение основано на регистрации и оценке концентрации связанных с ними парамагнитных алюминиевых [AlO₄]⁰- и германиевых [GeO₄/Li⁺]⁰-центров [11]. Измерения нами выполнены на серийном радиоспектрометре X-диапазона SE/X2547 (RadioPAN, Польша) в порошковых препаратах кварца по известной методике [13]. Результаты оценки содержания [AlO₄]⁰ и [GeO₄/Li⁺]⁰-центров в различных типах кварца приведены в таблице 5. Установлено, что наименьшее содержание [AlO₄]⁰ и [GeO₄/Li⁺]⁰-центров, и, следовательно, структурных примесей алюминия и германия характерно для гранулированного кварца, немного больше их содержится в гиганто-зернистом слабопрозрачном кварце, а наибольшие значения отмечены в прозрачном, стекловидном кварце и горном хрустале, что согласуется с результатами ранее проведенных исследований [7, 10]. Сопоставление данных о содержании парамагнитных центров в приполярноуральском гидротермальном кварце и в кварцевых концентратах (JOTA-STD и JOTA-4) фирмы ЮНИМИН, позволяет заметить, что среди промышленных типов приполярноуральского кварца отмечается кварц с незначительным содержанием алюминиевых центров, равным или значительно более низким, по сравнению с содержанием таких центров в эталонном JOTA кварце. К сожалению, содержание структурных элементов-примесей пока не поддается точной количественной оценке, что не позволяет оценить их долю в общем содержании примесей [5].

Таблица 5. Содержание примесных парамагнитных центров в основных промышленных типах кварца Приполярного Урала и кварцевых концентратах фирмы ЮНИМИН

Характеристика кварца	Число проб	$[AlO_4]^0$, усл.ед.	$[GeO_4/Li^+]^0$, усл.ед.
Гигантозернистый слабопрозрачный	31	$\frac{12-41}{22}$	$\frac{0.03-0.5}{0.2}$
Гигантозернистый прозрачный (реликты в слабопрозрачном кварце)	9	$\frac{17-51}{39}$	$\frac{0.2-0.5}{0.4}$
Гигантозернистый стекловидный	7	$\frac{30-66}{52}$	$\frac{0.3-0.4}{0.3}$
Гранулированный	15	$\frac{1-36}{19}$	$\frac{0-0.1}{0.05}$
Мелкозернистый	11	$\frac{7-23}{13}$	$\frac{0-0.4}{0.2}$
Дымчатые кристаллы горного хрусталя	12	$\frac{15-63}{33}$	$\frac{0.2-0.7}{0.4}$
Сорт ИЮТА-4	1	42	0.15
Сорт ИЮТА-STD	1	39	0.07

Примечание. Измерения выполнены в ИГ Коми НЦ УрО РАН на радиоспектрометре SE/X-2547 (RadioPAN, Польша). Активация парамагнитных центров осуществлялась предварительным отжигом проб при 500°C и облучением: дозой 30 Мрад для $[AlO_4]^0$, 0.5 Мрад для $[GeO_4/Li^+]^0$.

Результаты исследований свидетельствуют о широких вариациях содержания структурных и неструктурных элементов-примесей в различных типах жильного кварца Приполярноуральской провинции. Наиболее низкое содержание примесей характерно для гранулированного и высокопрозрачного крупнозернистого кварца. Гигантозернистый слабопрозрачный кварц, составляющий основную часть промышленных запасов, отличается повышенным содержанием газовой-жидких включений, в состав которых входят натрий, калий, кальций. В ходе глубокого обогащения, включающего горячее хлорирование, происходит существенное понижение этих примесей и возрастание качества сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jung L. High purity natural quartz. V.1. // Quartz Technology. Inc. New Jersey. 1992. 550 с.
2. Бурьян Ю.И., Борисов Л.А., Красильников П.А. Кварцевое сырье – важнейший вид минеральных ресурсов для высокотехнологичных отраслей промышленности // Разведка и охрана недр. 2007. №10. С. 9–12.
3. Данилевская Л.А., Скамницкая Л.С. Микропримеси в кварце и их влияние на степень очистки при обогащении. // Материалы II Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: ИГ КарНЦ РАН, 2007. С. 128-135.
4. Крейсберг В.А., Ракчеев В.П., Серых Н.М., Борисов Л.А. Диагностика газовой-жидких примесей в кварце масс-спектрометрическим методом // Разведка и охрана недр. 2007. №10. С. 12–18.
5. Крылова Г.И. Вопросы надежности идентификации форм и количественных содержаний элементов-примесей в природных кварцах. Материалы II Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск. Кар НЦ РАН, 2007. С. 104–128.
6. Кузнецов С.К., Лютоев В.П., Котова Е.Н., Шанина С.Н. Приполярноуральская кварцевожильно-хрусталеносная провинция и перспективы поисков месторождений особо чистого кварца // Разведка и охрана недр. 2007. №10. С. 36–43.
7. Кузнецов С.К., Лютоев В.П. Закономерности распределения примесных парамагнитных центров в кварце гидротермальных жил. Научные доклады / Коми научный центр УрО РАН. 1993. Вып. 309. 16 с.
8. Кузнецов С.К. Жильный кварц Приполярного Урала. СПб.: Наука, 1998. 203 с.
9. Кузьмина Н.И. Критерии определения пределов обогатимости различных природных типов кварцевого сырья // Разведка и охрана недр. 2007. №10. С. 49–51.
10. Лютоев В.П. Парамагнитные центры в кварце хрусталеносных жил (Приполярный Урал): Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Казань: Изд-во КГУ, 1991. 16 с.
11. Раков Л.Т., Миловидова Н.Д., Моисеев Б.М., Огуцов В.Г. Новый метод оценки кварцевого сырья // Разведка и охрана недр. 1993. №7. С. 36–38.
12. Серых Н.М., Борисов Л.А., Гулин Е.Н., Кайряк А.Д. О перспективах использования МСБ кварцевого сырья России в промышленности высоких технологий // Разведка и охрана недр. 2003. № 1. С. 17–20.
13. Экспрессное определение методом ЭПР содержаний изоморфных примесей в образцах кварцевого сырья: Методические рекомендации. М.: ВИМС, 1991.