

ВИДЫ ПРИМЕСНЫХ ФАЗ И ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ, ВЫДЕЛЯЕМЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ОБОГАЩЕНИЯ КВАРЦА

Данилевская Л.А.¹, Скамницкая Л.С.¹, Дубинчук В.Т.², Раков Л.Т.³

¹ Учреждение Российской академии наук Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск

² ФГУП «ВИМС», Москва

³ Учреждение Российской академии наук ИГЕМ РАН, Москва

Основной проблемой в настоящее время в кварцевой отрасли является подбор оптимальных схем обогащения природного кварца для получения высококачественных, химически чистых кварцевых продуктов, которые могут быть конкурентоспособны на мировом рынке. Важными этапами в решении этой проблемы являются комплексное изучение физико-химических свойств кварца конкретного месторождения и учет их при разработке технологий обогащения. Принципиально важным является понимание, какие примеси, существующие в данном типе кварца, могут быть удалены и на каких стадиях технологической обработки.

В данной статье рассматриваются общие принципы разработки схем обогащения кварца, которые могут быть использованы для всех видов кварцевого сырья. Предлагаемая концепция основана на результатах анализа литературных данных и учитывает собственный опыт авторов в изучении кварцевого сырья различных типов Карело-Кольского региона.

Примеси в кварце. Известно, что концентрация, состав и характер распределения примесей определяют степень обогатимости кварцевого сырья и, соответственно, возможности использования кварцевых продуктов после обогащения в различных областях промышленности [12].

Примеси в кварце с точки зрения возможностей их извлечения могут быть подразделены следующим образом:

1. по видам – на минеральные зерна, пленочные образования, газово-жидкие включения, рассеянные и структурные элементы-примеси;
2. по размерности – на крупные (>10 мкм), средние (5-10 мкм), мелкие (<5 мкм);
3. по характеру локализации – располагающиеся на границах зерен, по микротрещинам, по местам выхода дислокаций, внутри целых зерен.

Минералого-технологические характеристики основных видов примесей. Каждый из вышеуказанных видов примесей характеризуется своей формой вхождения в кварц и влиянием на качество конечного продукта.

Минеральные зерна могут загрязнять кварцевые концентраты собственными минеральными тонкодисперсными обособлениями и целым набором элементов-примесей (Al, Fe, Mg, Na, K и т.д.), присутствие которых могут приводить к окрашиванию продукта передела и снижению его качества. По возможности удаления они могут быть:

- 1) легко удаляемые – крупные, средние и мелкие зерна минералов, находящиеся на границах индивидов кварца, по микротрещинам (рис. 1);
- 2) трудноудаляемые – средние и мелкие зерна, расположенные по микротрещинам, вблизи границ зерен, по зонам дислокаций (рис. 2);
- 3) практически не удаляемые – мелкие включения, находящиеся внутри кварцевых зерен, не приуроченные к зонам дислокаций и микротрещинам (сингенетичные) (рис. 3).

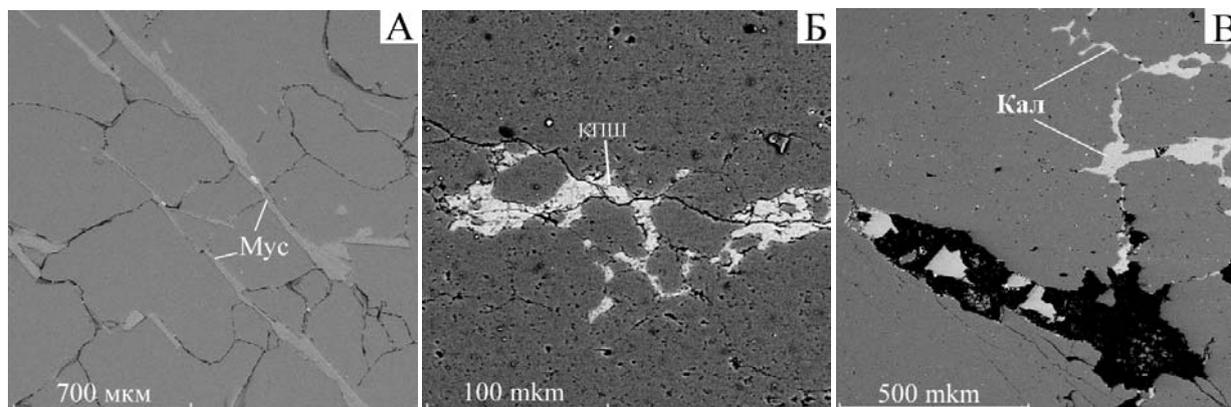


Рис. 1. Легко удаляемые минеральные примеси: А – мусковит, Б – К-полевоый шпат, В – кальцит

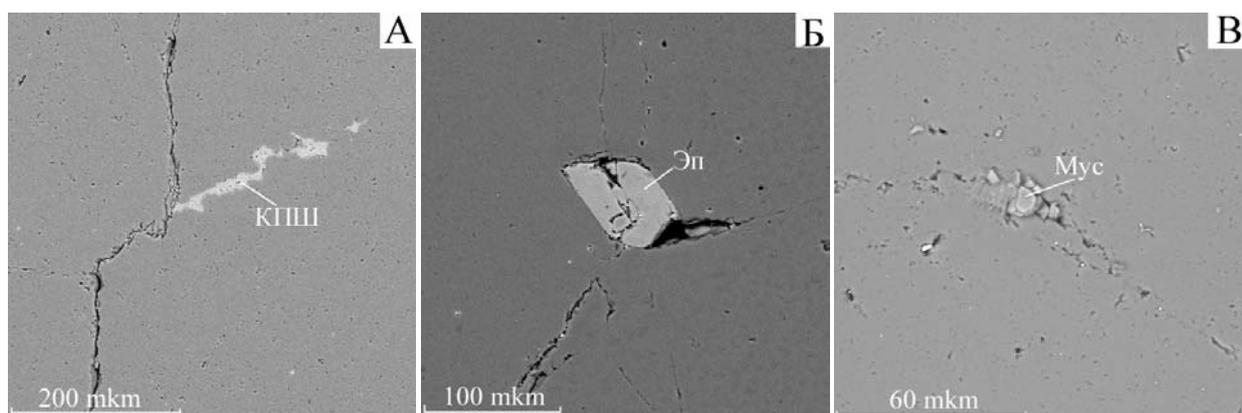


Рис. 2. Трудноудаляемые минеральные включения: А – К-полевой шпат, Б – эпидот, В – мусковит

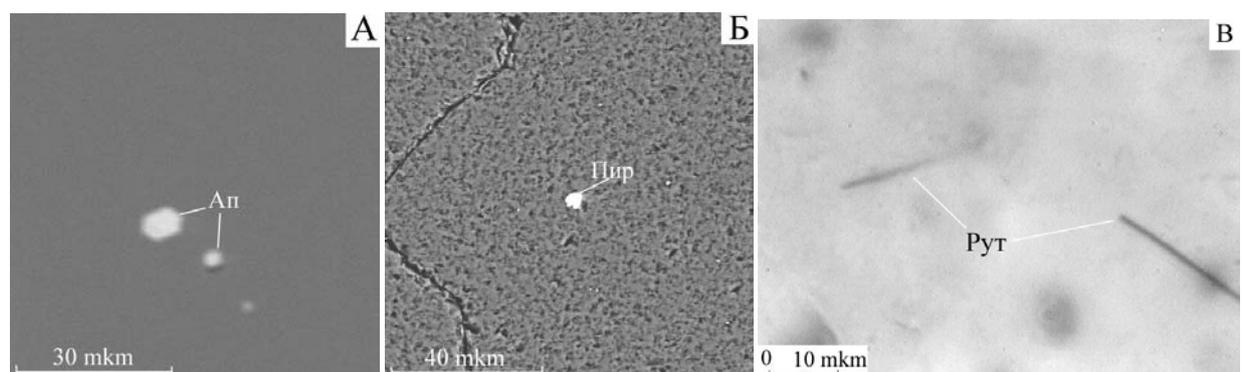


Рис. 3. Практически не удаляемые минеральные микровключения: А – апатит, Б – пирит, В – рутил

Пленочные образования чаще всего связаны с поверхностными налетами гидроксидов железа, марганца, карбонатов и образованием в процессе измельчения аморфной фазы, а также адгезией пылеватых и глинистых частиц.

Газово-жидкие включения являются источниками высокодисперсных минеральных образований и элементов-примесей и в основном Na, K, Ca, Mg (мг/л: Na - 77-361, K - 51-420, Ca - 1-19, Mg - 0,6-16), повышенное содержание которых существенно загрязняет кварцевые концентраты. Кроме того, в составе газово-жидких включений могут присутствовать следующие примеси: NH_4^+ - до 1, HCO_3^- - 34-1113, CO_3^- до 123, Cl^- - 47-228, F^- до 4 SO_4 и др [14]. Для примера в табл. 1 представлены содержания примесей в газово-жидких включениях одного из месторождений пегматитового кварца Карелии.

Таблица 1. Состав примесей в газово-жидких включениях пегматитового кварца месторождения Кюрьяла по данным водных вытяжек (методика ВСЕГЕИ)

Вытяжки	Концентрация, мг/л										
	pH	Fe	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{1+}	K^{1+}	Li^{1+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl	$\text{C}_{\text{орг}}$
1	7,62	0.15	1,4	0,4	2,5	2,4	0,19	16,4	4,4	5,5	2,7
2	6,97	2.70	1,0	0,2	2,3	0,9	0,08	6,8	5,2	4,6	2,7

Приведенные данные свидетельствуют о преимущественно сульфатно-хлоридно-бикарбонатном составе газово-жидких исследованных включений. Среди катионов присутствуют Fe^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Li^+ [11].

Газово-жидкие включения в различных типах кварца и на разных месторождениях значительно варьируют не только по составу, но и по размеру включений и по их количеству. Наиболее легко удаляются газово-жидкие включения размером > 10 мкм, если они находятся в межзерновом пространстве, по микротрещинам залечивания и вблизи границ зерен (рис. 4). Включения размером < 10 мкм трудноудаляемы стандартными методами обработки, особенно если они находятся внутри зерен кварца (рис. 5).

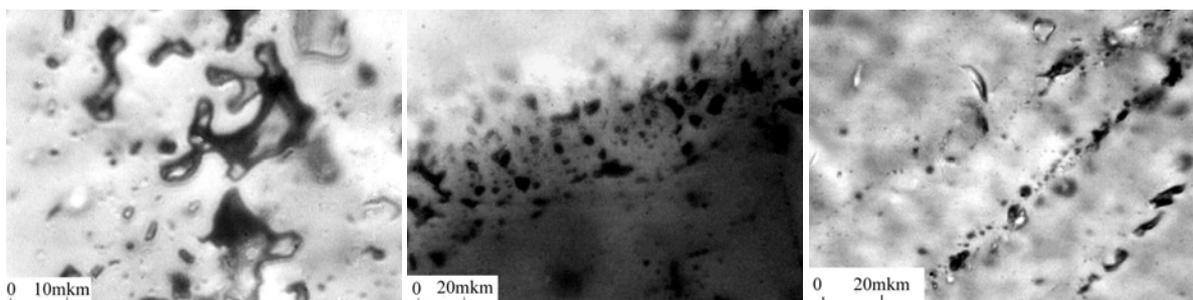


Рис. 4. Наиболее легко удаляемые ГЖВ: крупные (>10 мкм), находящиеся в межзерновом пространстве, по микротрещинам залечивания и вблизи границ зерен

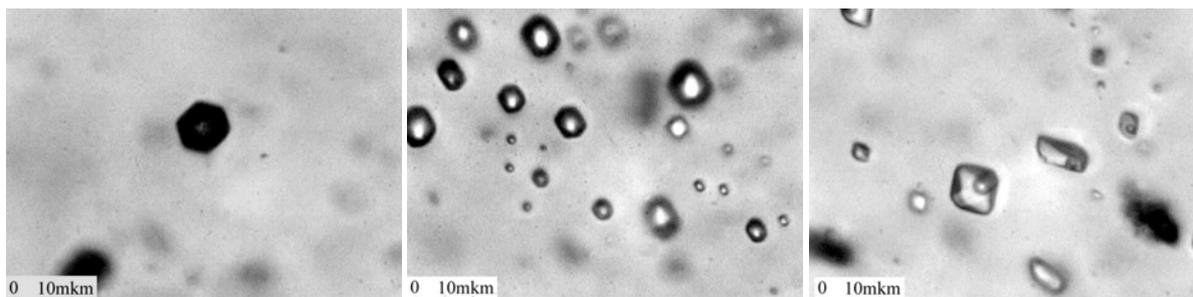


Рис. 5. Трудноудаляемые ГЖВ: мелкие (<10 мкм), внутри зерен кварца, не приурочены к деформациям

Из-за высокой вязкости кварцевого расплава, газопо-жидкие включения сохраняются в стеклах в виде пузырей, и тем самым понижают температуру кристобалитизации, ускоряя при этом скорость процесса плавления.

Рассеянные и структурные примеси (Al, Ti, Li, Ge, Na и др.) присутствуют в кварце в виде отдельных атомов или молекул, сконцентрированных в демпферных зонах [9], вблизи точечных структурных дефектов или выступающих в качестве изоморфных примесей в минерале.

Особыми свойствами обладают рассеянные элементы-примеси. Некоторые из них можно удалить простой термической обработкой в дистиллированной воде [8]. Другие же требуют специального подхода к их очистке.

Подвижность рассеянных примесей определяется степенью их связи с кристаллической решеткой кварца. Примеси, находящиеся в демпферных зонах, связаны с ней слабо и поэтому обладают высокой диффузионной подвижностью. Данное свойство рассеянных примесей может быть заложено в основу технологий очистки кварца. При определенных операциях обработки они частично удаляются из кварца. Однако, в свою очередь, при неправильно подобранных операциях очистки, рассеянные примеси могут мигрировать в решетку кварца, откуда удалить их уже невозможно.

Структурные примеси можно подразделить на идеально изоморфные и связанные с точечными дефектами в кристаллической структуре кварца. На современном этапе развития технологической науки каждый из этих видов структурных примесей также недоступен для удаления при процессах обогащения сырья. Тем не менее, существуют предпосылки для создания технологий очистки кварца от структурных примесей второго вида.

Методы обогащения кварцевого сырья. Существуют традиционные методы обогащения кварцевого сырья, применяемые на разных стадиях обработки и позволяющие удалять определенные виды примесей. Кроме того, известны методы направленного воздействия, меняющие свойства минералов и дающие возможность наиболее эффективно устранять трудноудаляемые примеси из кварца [4].

Магнитная и электромагнитная сепарации как традиционно применяемые методы обогащения кварцевого сырья решают проблемы, связанные с удалением темноцветных магнитных минералов (магнетит, биотит турмалин и др.), слюд (мусковит, хлорит, фуксит и др.) и силикатов. Удаление железосодержащих примесей из кварца осуществляется электромагнитной сепарацией, реже электрической.

Флотация позволяет удалить из кварцевой руды не только железосодержащие примеси, но и силикаты (полевой шпат, кианит, мусковит и др.) [10, 16]. Флотационные свойства окислов и силикатов близки. Общие закономерности флотации полевых шпатов, кварца и кианита с собирателями различного типа в широком диапазоне pH и в присутствии различных регуляторов исследованы и описаны в литературе достаточно широко [5, 10, 1]. Анализ указанных работ показывает, что флотацией полевой шпат и кианит эффективно отделяются катионными собирателями в кислой среде. При флотации анионными собирателями в щелочной среде селективность отделения кварца, полевых шпатов и кианита ниже. Флотация при своей универсальности не

позволяет проводить полную очистку от минералов-примесей, поэтому используется в сочетаниях с другими методами.

С применением вышеуказанных (стандартных) методов удаляются, как правило, минеральные включения $>10\text{-}5$ мкм, находящиеся на границах зерен, вскрывшиеся в процессах дробления, измельчения.

Для удаления минеральных пленок применяется *выщелачивание* в растворах соляной, серной, плавиковой, щавелевой кислот и других веществ, использование которых в зависимости от концентрации и продолжительности режима эффективно на завершающей стадии.

Проводимое на различных стадиях выщелачивание (с использованием соляной, азотной, плавиковой кислот) позволяет высвободиться от минеральных примесей размерами до 2-5 мкм, если они располагаются вблизи границ зерен, по микротрещинам.

Термообработка (окислительный и восстановительный обжиги и др.), широко используются во всем мире в доводочных операциях в схемах обогащения кварца [6, 7, 13]. Отжиги и высокотемпературная обработка применяются во многих схемах обогащения кварцевого сырья, начиная с термодробления. Термообработка способствует возгонке газовой-жидких включений, увеличению степени кристалличности, повышению устойчивости к радиационным повреждениям, но при этом снижается коэффициент светопропускания, повышается склонность к сорбции, образуются и укрупняются поры. При отжиге до температуры фазового перехода происходит декрепитация газовой-жидких включений. Основная масса удаляемых в результате термообработки газовой-жидких включений – это крупные включения (>10 мкм), расположенные по трещинкам залечивания, в межзерновом пространстве, образующие ореолы вблизи границ зерен. В то время как включения размерами <10 мкм не удаляются даже при отжиге до 900°C . В некоторых типах кварца таких включений может быть более половины всего объема [2].

Однако термообработка кварца может играть как положительную, так и отрицательную роль. Нашими исследованиями, проведенными на различных типах кварцевого сырья Карелии, установлено, что в ряде случаев после термообработки в нем значительно увеличивается содержание изоморфного алюминия. Обогащение кварца этой примесью обусловлено переходом рассеянного Al из демпферных зон в кристаллическую решетку кварца [3].

Наряду с перечисленными традиционными методами разработаны новые способы очистки кварцевого сырья, позволяющие проводить глубокое обогащение кварца. В Англии, Германии, США успешно применяется метод высокотемпературного ($900\text{-}1200^{\circ}\text{C}$) хлорирования [17]. Для получения концентратов ультравысокой чистоты разработаны следующие методы: электролитический способ в статическом режиме, очистка во взвешенном состоянии, электрохимическая очистка кварца, очистка методом спонтанной гидротермальной перекристаллизации. Однако следует учитывать, что эти методы не являются универсальными. Их успешное использование возможно только после соответствующей адаптации к конкретным типам кварца.

Все рассмотренные выше методы позволяют удалить практически все минеральные включения, за исключением микровключений (1-2 мкм), находящихся внутри зерен кварца. Эти методы также не дают возможность очищать кварцевые концентраты от мелких (<10 мкм) газовой-жидких включений, которые иногда могут играть существенную роль в загрязнении кварца элементами-примесями.

При получении концентратов ультравысокой чистоты (с суммарным содержанием примесей 10-20 ppm) необходимо учитывать примеси, находящиеся в рассеянной и структурной формах. В этой связи особой задачей при разработке современных технологий очистки кварца является создание эффективных приемов удаления указанных примесей из кварцевого сырья. Важным моментом при этом является подбор методов и их последовательности, чтобы не допустить перехода рассеянных примесей в структурные.

Проведенные нами исследования на ряде объектов Карелии показали, что для удаления микроминеральных включений (до 1-2 мкм), находящихся вблизи поверхности зерен кварца, распределенных по микротрещинам, внутри зерен и по границам дислокаций, а также для вскрытия газовой-жидких включений (<10 мкм), которые не удаляются стандартными методами очистки, эффективно применение методов направленного энергетического воздействия на минерал. Их использование способствует образованию каналов пробоя, по которым при последующем выщелачивании могут быть удалены примеси [9].

Эффективность энергетического воздействия зависит от свойств кварца и способа его обработки: мощности и вида источника энергии, а также длительности облучения кварца. При правильном подборе режимов обработки можно перевести скопления примесей в состояние, благоприятное для их удаления из минерала, путем стимулирования их диффузии в заданном направлении или создания зон избыточного давления в местах их локализации. В последнем случае возможен "прорыв" примесей через образовавшиеся каналы за пределы микроблоков кварца.

Появление таких каналов (или пор) в кварце после энергетического воздействия демонстрируются на микрофотографиях, полученных в результате исследования кварца методом растровой электронной микроскопии (рис. 6, 7). На них видно, что, как правило, поры пусты - все содержимое из них выброшено во внешнее пространство (рис. 6).

Однако встречаются случаи, когда наиболее крупные примеси застревают в них. На рис. 7 показано зерно кварца из кварцевого концентрата, подвергнувшегося воздействию энергетических полей. В зерне наблюдается большое количество пор. Более крупная пора, показанная пунктирной стрелкой, заполнена обломочным кварцем. Рядом видна другая пора, в которой наблюдается пластинчатое обособление вещества

(выделенное квадратом). На спектрограмме, полученной с этого образования, присутствуют в небольших количествах металлы, а также кремнезем, обязанный своим появлением матрице.

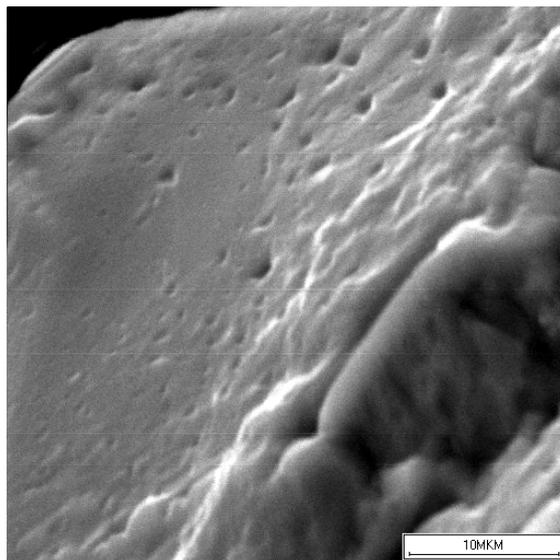
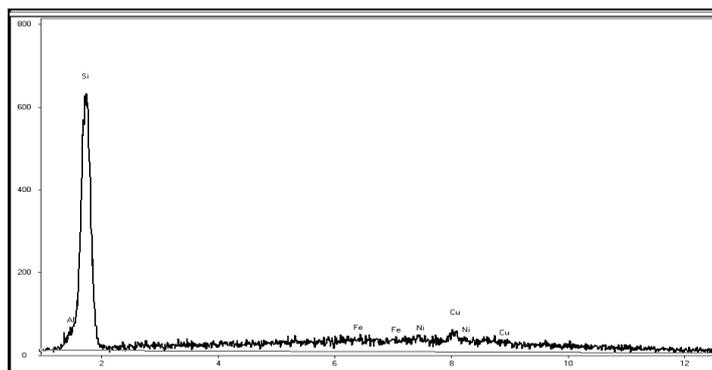
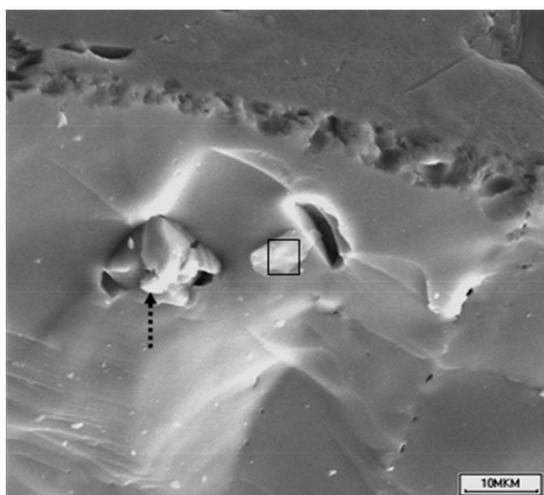


Рис. 6. Поверхность зерна кварца после энергетического воздействия. На поверхности наблюдается большое количество микропор без вещества в них



Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	NiO	CuO
3,35	84,20	2,81	3,87	5,78

Рис. 7. Поверхность зерна кварца после энергетического воздействия. Крупная пора (пунктирная стрелка), заполненная обломочным кварцем, и пора с веществом (квадрат), с которого получен спектр и химический анализ вещества (справа)

Однако на данном этапе использование методов направленного энергетического воздействия не позволяет удалять микровключения (1-2 мкм), находящиеся глубоко внутри зерен кварца и не приуроченные к деформациям кристаллической структуры (микротрещинам и др.), куда могут проникнуть химически агрессивные компоненты. В качестве примера таких включений можно назвать иглы рутила в кварце, удаление которых является значительной проблемой и может быть задачей для будущих работ.

Структурные примеси считаются практически не удаляемыми при современных способах очистки кварца. Вместе с тем работы в данном направлении проводятся. В частности на кафедре минералогии МГУ предложен метод перекристаллизации кварца для очищения его от структурных примесей. Показано, что можно существенно снизить концентрацию структурных примесей: алюминия до первых ат. ppm, германия до концентраций менее 0,02 ат. ppm [15].

Выводы. Таким образом, применение традиционных методов в сочетании с методами направленного энергетического воздействия позволяет удалить большинство примесей в кварце на разных этапах технологического процесса (табл. 2). Практически неудаляемыми примесями являются микроминеральные (<1-2 мкм) и газовой-жидкие включения (<10 мкм), находящиеся внутри зерен кварца и не приуроченные к деформационным искажениям, а также структурные (изоморфные) примеси.

Таблица 2. Примеси в кварце и методы их удаления.

Этапы технологической обработки	Примесные фазы	Методы очистки
1	Минеральные включения >10-5 мкм, приуроченные к границам зерен, микротрещинам	Магнитная, электрическая сепарация, флотация, термообработка, выщелачивание и др.
	Газово-жидкие включения (>10 мкм), приуроченные к границам зерен, микротрещинам залечивания	
	Пленочные образования	Выщелачивание
2	Минеральные включения 2-5 мкм, приуроченные к границам зерен, микротрещинам	Методы глубокого обогащения – высокотемпературное хлорирование, двойное выщелачивание и др.
	Газово-жидкие включения (>10 мкм), приуроченные к границам зерен, микротрещинам залечивания	
3	Микроминеральные включения (1-2 мкм), приуроченные к границам зерен, микротрещинам, зонам дислокаций	Методы направленного энергетического воздействия в сочетании с традиционными методами.
	Газово-жидкие включения (<10 мкм), приуроченные к границам зерен, микротрещинам, зонам дислокаций	
	Некоторые виды рассеянных примесей	
4	Микроминеральные включения (1-2 мкм), внутри зерен кварца	Практически не разработаны
	Газово-жидкие включения (<10 мкм) внутри зерен кварца	
	Структурные примеси	

Реализация этапов технологической очистки кварца может проводиться в иной последовательности, чем указано в табл. 2. Выбор этой последовательности осуществляется с учетом физико-химических особенностей исследуемых образцов кварцевого сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев В.С.* Теория и практика обогащения кианитовых руд. Л.: Наука, 1976. 200 с.
2. *Данилевская Л.А.* Кварцевое сырье Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. Вып. 9. Петрозаводск, 2006. С. 50-67.
3. *Данилевская Л.А., Раков Л.Т.* Структурные примеси в кварце как важный критерий оценки качества кварцевого сырья и прогноза его технологических свойств // Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ. Матер. Первого Российского семинара по технологической минералогии. – Петрозаводск, 2006. С. 119-124.
4. *Данилевская Л.А., Скамницкая Л.С., Щипцов В.В.* Кварцевое сырье Карелии. Петрозаводск, 2004. 222 с.
5. *Класен В.И., Мокроусов В.А.* Введение в теорию флотации. М., 1959. 636с.
6. *Кравец Б.Н.* Практика переработки кварцевого сырья // Известие Вузов. Горный журнал. 1995, №8. С. 160-168.
7. *Кравец Б.Н.* Специальные и комбинированные методы обогащения. М: Недра, 1987. С. 101-122.
8. *Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В.* Геохимические особенности включений в кварце золоторудных месторождений по данным анализа водных вытяжек методом ICP MS/Материалы XIII Международной конференции по термобарогеохимии и IV симпозиума APFIS. Том 1. ИГЕМ 2008. С. 30-33.
9. *Раков Л.Т., Дубинчук В.Т.* Физика процессов обогащения кварца // Материалы IV Всероссийского семинара “Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы”. Казань. 2009.
10. *Ревнивцев В.И.* Обогащение полевых шпатов и кварца. М: Недра, 1970, 129 с.
11. *Скамницкая Л.С., Каменева Е.Е.* Изучение газово-жидких включений в минералах с позиций технологической минералогии. Обогащение руд. 2005. №2. С. 31-36.
12. *Скамницкая Л.С. Данилевская Л.А.* Выбор методов обогащения жильного кварца на основе закономерностей распределения и форм нахождения в нем примесей (на примере участков Меломайс и

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