

УДК 549.514 51+553,623.7 (470.22)

КАРЕЛО-КОЛЬСКАЯ КВАРЦЕНОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ

Л. А. Данилевская

Институт геологии Карельского научного центра РАН

Приведены результаты изучения кварцевого сырья Карело-Кольского региона за последние 15 лет. Представлена систематизация генетических типов кварцевых образований региона. На основе детальных минералого-технологических исследований основных перспективных объектов кварцевого сырья сделаны выводы о качестве сырья и возможных областях применения. Определены наиболее важные задачи по дальнейшему изучению кварцевого сырья региона. Сделан вывод о перспективности освоения Карело-Кольского региона как кварценосной провинции.

К л ю ч е в ы е с л о в а : кварцевое сырье, Карело-Кольская кварценосная провинция, генетический тип, минералого-технологические исследования, высокочистые концентраты.

L. A. Danilevskaya. KARELIAN-KOLA QUARTZIFEROUS PROVINCE

The results of studies of quartz raw material in the Karelian-Kola region over the past 15 years are reported. The genetic types of quartz formations in the region have been systematized. Having carried out detailed mineralogical and handling studies of the most promising sources of quartz raw material we drew conclusions about the quality of the raw materials, and their potential applications. The priority tasks for further investigation of quartz raw materials in the region are defined. It is argued that the Karelian-Kola region is a promising quartziferous province for the mining industry.

Key words : quartz raw material, Karelian-Kola quartziferous province, genetic type, mineralogical and handling studies, high purity concentrates.

Введение

Кварцевое сырье является одним из важнейших видов минерального сырья с широким диапазоном использования более чем в 20 отраслях промышленности. Кроме того, оно входит в четвертую группу перечня стратегических видов сырья, наряду с U, Mn, Cr. В целом под «кварцевым сырьем» следует подразумевать кварцсодержащие породы, которые могут рассматриваться как потенциальные источники получения кварцевых концентратов средней и

повышенной чистоты: мономинеральные (жильный кварц, ядра и блоки пегматитового кварца – традиционные типы сырья); полиминеральные (кварциты, кварцсодержащие сланцы и т. п. – нетрадиционные типы сырья).

В настоящее время отечественная промышленность обеспечена на длительную перспективу рядовым кварцевым сырьем (для варки различных стекол, синтеза искусственных кристаллов) [Ярмак, Турашева, 1998; Борисов и др., 2004]. Наиболее дефицитным (с постоянным ростом потребления в среднем

5–8 % в год) является кварцевое сырье, пригодное для получения кварцевых концентратов высокой и ультравысокой чистоты (с суммарным содержанием элементов-примесей <100 ppm и <30 ppm), которые используются для производства плавленного кремнезема, поли- и монокристаллического кремния [Шатнов, Тигетова, 2004; Белоусова, Петров, 2010 и др.]. Дефицит данных видов кварцевого сырья, наблюдающийся как в России, так и во всем мире, обусловлен возросшими требованиями к качеству кварцевых продуктов и существующей монополией в этой отрасли американской компании Unimin (90 % рынка) [Белоусова, Петров, 2010], запасы сырья у которой ограничены.

Россия по числу разведанных запасов кварцевого сырья является одной из лидирующих стран в мире – запасы гранулированного и прозрачного кварца составляют 4,6 млн т, однако отсутствие подготовленного фонда сырья для производства высокочистых концентратов (ВЧК) значительно снижает интенсивность их освоения [Турашева, 2004; Шатнов, Тигетова, 2004]. В связи с этим первоочередными задачами являются: переоценка существующей минерально-сырьевой базы кварца с учетом современных требований промышленности к ВЧК; поиск новых, в том числе нетрадиционных, типов кварцевого сырья; совершенствование технологий переработки кварцевого сырья; разработка методик прогнозирования качества кварцевых продуктов на стадии проведения поисково-разведочных работ [Борисов и др., 2004; Серых и др., 2004 и др.]. На территории России выделяют четыре кварценозные провинции: 1 – Уральскую (с Приполярно-Уральской и Южно-Уральской субпровинциями), 2 – Карело-Кольскую, 3 – Прибайкальскую, 4 – Южно-Якутскую. Наибольшее количество разведанных запасов и ресурсов кварцевого сырья находится в пределах Уральской провинции. На долю Карело-Кольской провинции приходится около 6 % учтенных запасов и ресурсов кварцевого сырья для плавки прозрачного кварцевого стекла [Борисов и др., 2011].

Проводившиеся в последние 15 лет в Институте геологии работы по изучению кварцевого сырья на территории Карело-Кольской кварценозной провинции показали, что помимо традиционно известных месторождений пегматитов Беломорско-Лапландской пегматитовой провинции, жильного гранулированного кварца месторождения Перчатка и Кейвского кварцево-вожильного района, можно выделить целый ряд объектов кварцосодержащих пород, пер-

спективных для получения ВЧК и других востребованных кварцевых продуктов [Данилевская и др., 2004; Данилевская, Щипцов, 2007 и др.]. Ресурсный потенциал Карело-Кольской кварценозной провинции может быть значительно расширен за счет вовлечения в процесс освоения новых перспективных объектов, за счет комплексной оценки многокомпонентных руд, а также с использованием новых подходов в обогащении кварцевого сырья, в том числе нетрадиционных типов.

Генетические типы кварцевого сырья

Исследование генетической принадлежности проявлений кварцевого сырья является важным моментом в их изучении. Содержание этих исследований позволяет раскрыть понятие о природе кварцеобразующих растворов, их геохимической специфике, процессах вторичных изменений, что является важным фактором при разработке критериев прогноза и поисков месторождений кварцевого сырья, а также при оценке его минералого-технологических особенностей и обогатимости.

Классификации месторождений кварцевого сырья по генетическим признакам разрабатывались различными исследователями [Ермаков, 1958; Лазько, 1958; Гудков, 1967; Карякин, Смирнова, 1967; Минерагения..., 1977; Емлин и др., 1988]. Общая систематика кварцевых образований по формационному принципу была представлена Е. П. Мельниковым [Геология..., 1988]. Онтогенический подход в классификации жильного кварца Урала предложен Ю. А. Поленовым [2008]. Детальная классификация природных типов жильного кварца, основанная на степени перекристаллизованности первичного кварца, была представлена Г. И. Крыловой [2001].

На основе исследованных геологических условий формирования кварцевых образований, их минералого-петрографических и геохимических особенностей впервые проведена систематизация всех изученных в разной степени кварцосодержащих пород Карело-Кольского региона, в основу которой были положены формационные принципы классификации эндогенных и экзогенных серий Е. П. Мельникова, а также онтогенические принципы, учитывающие полигенность развития кварцосодержащих пород и позволяющие проследить историю формирования кварца с учетом его генезиса и последующих преобразований в результате рекристаллизации и перекристаллизации, заложенные в классификации жильного кварца Ю. А. Поленова (табл. 1). Выделены разновидности кварца на основе особенностей его мик-

роструктуры, которые отражают степень деформации и перекристаллизации кварца, что в свою очередь определяет качественные характеристики сырья. На данный момент нет однозначных датировок возраста ряда кварцевых

образований, об их приуроченности к определенным геологическим процессам можно судить только по косвенным признакам, в связи с этим в систематизации кварцевых образований временной фактор не учитывается.

Таблица 1. Генетические типы кварцевого сырья Карело-Кольской кварценосной провинции

Генетический тип	Подтип	Степень деформации и перекристаллизации (разновидность)	Месторождение, проявление
Эндогенная серия			
Пегматитовый	Керамические пегматиты (первично-зернистый)	Деформированный	Кюрьяла Яккима
	Мусковит-керамические пегматиты (первично- и вторично-зернистые, частично перекристаллизованные)	Деформированный, слабо рекристаллизованный	Хетоламбино Левин Наволок Риколатва Слюда
Метаморфогенно-пегматитовый	Мусковитовые пегматиты (вторично-зернистый перекристаллизованный)	Слабо деформированный, слабо рекристаллизованный	Малиновая Варакка
	Мусковит-редкометалльные пегматиты (вторично-зернистый, перекристаллизованный)	Интенсивно деформированный	Тэдино
Магматогенно-гидротермальный (с наложенными метасоматическими изменениями)	Жильный золоторудный (первично-зернистый, частично перекристаллизованный)	Слабо деформированный, рекристаллизованный в условиях ЗФ	Майское
	Метаморфогенно-гидротермальный	Жильный первично-зернистый (молочно-белый)	Койкары Корпярви Ихоярви Семиостровский, Червуртский (Б. Кейвы) Фенькина Лампи
Метаморфогенно-метасоматический	Жильный первично-зернистый (переходный)	Слабо деформированный в условиях ЗФ	Меломайс
		Интенсивно деформированный и рекристаллизованный в условиях нижних ступеней ЭАмФ	
	Жильный вторично-зернистый рекристаллизованный, в том числе гранулированный	Интенсивно деформированный и рекристаллизованный с наложенной кристаллизацией в условиях ЗФ	Б. Кейвы Маягино (М. Кейвы)
		Интенсивно деформированный и рекристаллизованный в условиях нижних ступеней ЭАмФ, минерализованный	
Метаморфогенно-метасоматический	Кварц-кианитовые метасоматиты	Слабо деформированный	Б. Кейвы
	Кварц-мусковитовые метасоматиты	Гранулированный в условиях АмФ Гранулированный в условиях ЭАмФ	Перчатка Рухнаволок Хизоваара Кукаозеро Шуерецкое Б. Кейвы Маягино (М. Кейвы)
Метаморфогенно-осадочный	Кварцитовый Перекристаллизованные кварциты	Рекристаллизованный в условиях ЭАмФ	Хизоваара Семиостровский (Б. Кейвы) Восточная Хизоваара
		Слабо перекристаллизованный Перекристаллизованный в условиях ЗФ Интенсивно перекристаллизованный в условиях ЭАмФ и АмФ Интенсивно перекристаллизованный с наложенной вторичной рекристаллизацией в условиях ЭАмФ	Метчангъярви Семиостровский (Б. Кейвы) Кукаозеро
Экзогенная серия			
Эрозионно-осадочный	Прибрежно-морские россыпи		Одинчижный и др.

Примечание. Фации метаморфизма: ЗФ – зеленосланцевая, ЭАмФ – эпидот-амфиболитовая, Аф – амфиболитовая.

Характерной особенностью является преобладание кварцевых образований метаморфогенной группы, что обусловлено спецификой Карело-Кольского региона как территории с длительной геологической историей развития и неоднократным проявлением процессов тектономагматической активизации и метаморфизма, в результате которых часто сформировавшиеся кварцсодержащие породы вовлекались в последующие геологические события и неоднократно испытывали процессы деформации и перекристаллизации. Разнообразие генетических типов кварцевых образований обусловлено развитием на данной территории различных геолого-фациальных комплексов пород, отличающихся по составу, геохимической специфике рудоконтролирующих растворов, РТ-условиям формирования. Все эти факторы определяют специфику типоморфных свойств кварца, которые уникальны не только для определенных типов кварцевого сырья, но и для конкретных месторождений и проявлений.

Изученность кварцевого сырья и перспективы использования

На данном этапе изучения кварцевого сырья Карело-Кольской кварценозной провинции в Институте геологии КарНЦ РАН проведен комплекс исследований: обобщены данные изученности кварцевого сырья по фондовым материалам (отчеты поисково-оценочных и разведочных работ); в наиболее перспективных районах проведены поисково-оценочные работы с предварительной оценкой качества кварцевого сырья (Костомукшский р-н, Хизоваара, Половина, Кукаозеро, Корпярви, Койкары, Янисярви и др.); на отдельных объектах выполнены минералого-технологическое картирование и исследования по обогатимости кварцевого сырья (Фенькина Лампи, Меломайс, Степаново озеро, Восточная Хизоваара, Питкяниеми и др.); по наиболее перспективным объектам разработаны технологические схемы с получением кварцевых продуктов различного качества и назначения (Меломайс, Восточная Хизоваара, Степаново озеро, Перчатка). Результаты исследований кварцевого сырья Карело-Кольского региона, позволяющие говорить о необходимости проведения дальнейших исследований как в целом по региону, так и на отдельных месторождениях и проявлениях, обобщены в различных публикациях [Щипцов и др., 2001; Данилевская и др., 2004, 2011; Данилевская, Щипцов, 2007а, б; Данилевская, Скамницкая, 2009, 2011].

Исследования кварцевого сырья Карело-Кольского региона основывались на принципах технологической минералогии, которая получила широкое развитие благодаря трудам

В. И. Ревнивцева, В. М. Изоитко, Б. И. Пирогова, О. Б. Дудкина и других [Подготовка..., 1987; Пирогов, 1988, 2006; Дудкин, 1996; Изоитко, 1997 и др.]. Одним из главных подходов технологической минералогии является объединение минералогических и технологических исследований минерального сырья, основанное на двойственной природе технологических свойств минералов [Пирогов, 2006]: с одной стороны, они связаны напрямую с генезисом минералов, а с другой – определяют изменчивость свойств минералов в процессах рудоподготовки и обогащения. Поэтому комплексный подход в изучении типоморфных свойств минералов и одновременном проведении технологических исследований является определяющим моментом в понимании особенностей поведения минералов и возможности управления их свойствами в технологических процессах с целью разработки оптимальных схем обогащения. Данный подход в полной мере может быть применим и к кварцевому сырью, учитывая его специфические свойства [Данилевская, 2009].

В статье приведены последние данные, полученные по результатам исследований различных типов кварцевого сырья региона. Рассмотрены не все генетические типы кварца, приведенные в таблице, а наиболее перспективные на примере исследованных месторождений и проявлений. Схема размещения изученных объектов приведена на рис. 1.

Пегматитовый кварц

Долгое время (до конца 1990-х гг.) месторождения мусковитовых пегматитов Беломорско-Лапландской пегматитовой провинции считались основными объектами, пригодными для плавки прозрачного кварцевого стекла, синтеза искусственного кварца и варки многокомпонентного стекла. До начала 1990-х гг. ГОКом «Карелслюда» производилась добыча кварцевого сырья с рудника Малиновая Варакка, которая прекратилась в связи с ухудшением общей экономической обстановки и состоянием кварцевой отрасли промышленности в стране, а также ужесточением требований к кварцевым продуктам повышенной чистоты [Данилевская, Щипцов, 2007б]. Ревизионно-оценочные работы по отвалам месторождения мусковитовых пегматитов Риколатва, проводившиеся в конце 1995–1997 гг., и технологическое опробование в 2001 г. показали, что кварц из отвалов месторождения соответствует сортам плавочного кварца по ТУ-97, однако дополнительных технологических исследований не проводилось, и кварц не добывается [Данилевская, 2008].

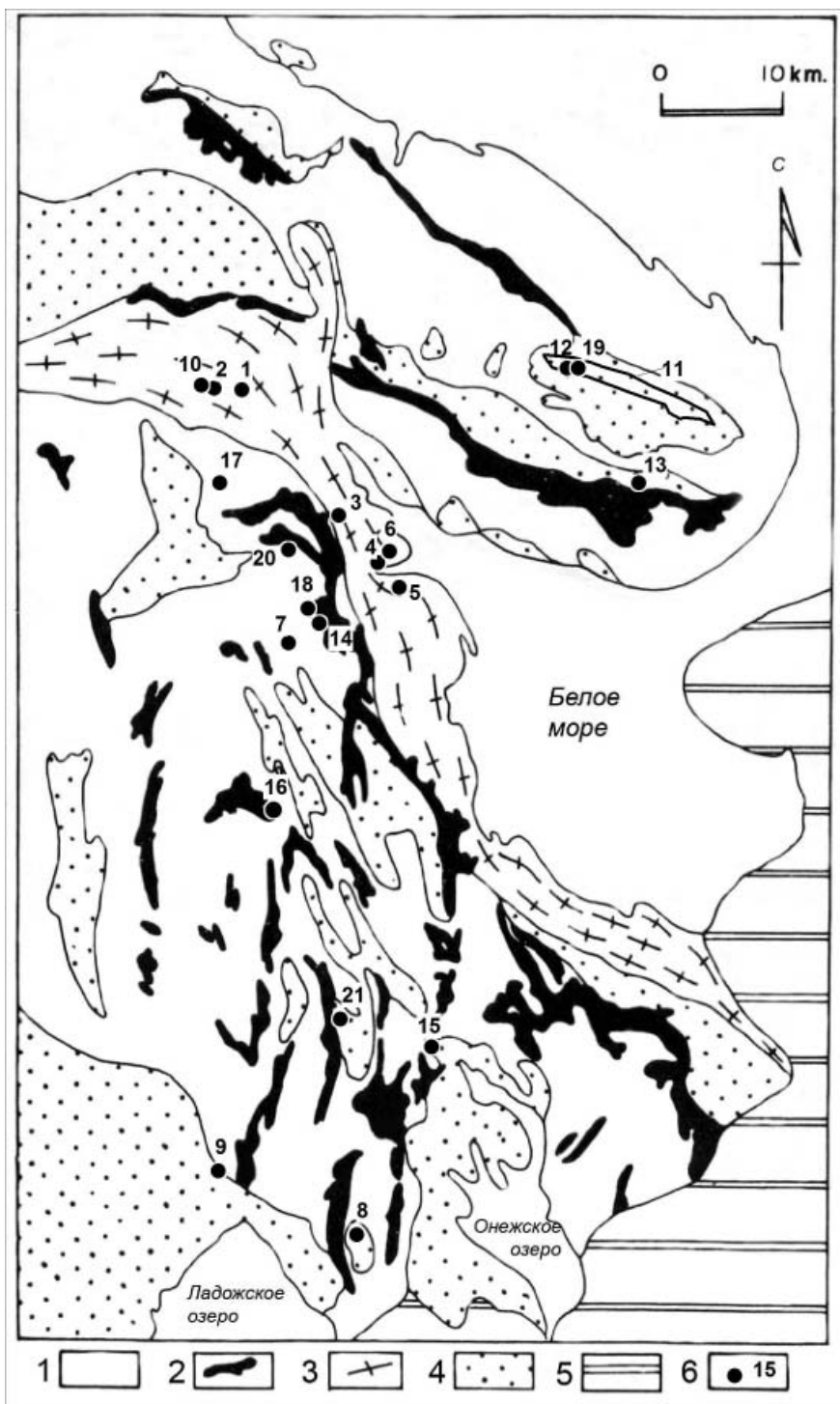


Рис. 1. Схема размещения изученных перспективных объектов кварцевого сырья Карело-Кольского региона на геологической основе (по: [Srinivasan et al., 1993]):

1 – инфракомплекс, включая саамские образования; 2 – лопийские зеленокаменные пояса; 3 – Беломорский подвижный пояс; 4 – протерозойские образования; 5 – платформенный чехол; 6 – месторождения и проявления кварцевого сырья. *Изученные объекты кварцевого сырья:* 1 – Риколатва, 2 – Слюда, 3 – Тэдино, 4 – Малиновая Варакка, 5 – Левин Наволок, 6 – Хетоламбино, 7 – Пиртима, 8 – Кюрьяла, 9 – Яккима, 10 – Перчатка, 11 – Большие Кейвы (Семиостровское, Выхчуртское, Червуртское и Боллуртинское кварцевожильные поля), 12 – г. Песцовая Кейва, 13 – Маягино (Малые Кейвы), 14 – Рухнаволок, 15 – Фенькина Лампи, 16 – Меломайс, 17 – Майское, 18 – Восточная Хизоваара, 19 – Хребет Серповидный (Большие Кейвы), 20 – Степаново озеро, 21 – Метчангярви

На данном этапе проведенной предварительной минералого-технологической оценки пегматитового кварца различных типов Карело-Кольского региона в качестве перспективных можно выделить мусковит-керамические пегматиты месторождений Слюда, Риколатва, Левин Наволок, Хетоламино. По данным содержания элементов-примесей в кварцевых концентратах после предварительного обогащения кварц характеризуется наименьшими суммарными концентрациями примесей (табл. 2). Основные мине-

ральные примеси в кварце данных месторождений находятся в межзерновом пространстве (мусковит, кальцит, полевой шпат) и по микротрещинкам, т. е. могут быть удалены в процессе обогащения (рис. 2, А). Минеральные примеси, усложняющие технологическую обработку, – микровключения плагиоклаза и К-полевого шпата (20–30 мкм), находящиеся внутри зерен кварца (рис. 2, Б). Для очищения от таких включений необходим подбор технологий дробления-измельчения и обогащения.

Таблица 2. Содержания элементов-примесей в кварцевых концентратах из пегматитового кварца после предварительного обогащения, ppm

Месторождение	Fe	Ti	Zr	Al	Mn	Sr	Zn	B	Mg	Ca	Ba	Ni	K	Na	Li	Ge	P	Сумма
Керамические пегматиты недифференцированные																		
Кюрьяла	8	5,5	0,08	370	1,1	0,45	0,32	2,6	0,67	31	0,4	0,03	70	200	18,7	2,8	0,1	711,75
Яккима	11	7,7	0,6	1800	0,64	1,1	0,16	2	0,28	500	0,8	0,05	780	2940	9,5	3,2	72	6129,03
Мусковит-керамические пегматиты дифференцированные																		
Хетоламино	5,6	3,8	0,021	40	0,1	0,22	0,075	0,4	1,1	16	0,16	0,011	8,2	1,3	0,79	1	0,1	78,877
Левин	1,3	3,6	0,01	60	0,047	0,12	0,058	0,87	0,2	9	0,038	0,011	5,5	27	7,3	2,2	0,1	117,354
Наволок	0,9	2,1	0,07	52	0,2	0,4	0,08	1,6	0,33	16	0,2	0,018	8,5	24	3,8	3,5	0,01	113,708
Слюда	0,5	9,1	0,012	90	0,05	0,14	0,036	0,79	0,16	8,3	0,07	0,022	8,3	2,5	5,5	0,99	0,01	126,48
Риколатва																		
Мусковитовые пегматиты																		
Малиновая	3,8	8,4	0,021	120	0,13	0,12	0,1	1,7	0,55	11	0,055	0,013	18,5	85	3,3	3,3	0,1	256,089
Варакка	3,2	6,7	0,3	100	0,1	0,3	0,067	0,44	2,8	21	1,3	0,06	47	34	0,77	1,3	0,3	219,637
Тэдино																		
Мусковит-редкометалльные пегматиты																		
Пиртима	1,9	6	0,13	220	0,11	0,23	0,07	0,68	0,65	7,9	0,46	0,013	125	148	1,7	1,5	0,2	514,543

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории Курчатовского института (г. Москва) методом ICP MS.

В кварце месторождений мусковитовых пегматитов наблюдается большое количество микровключений (мусковит, плагиоклаз, К-полевой шпат) внутри зерен кварца, что значительно затрудняет получение чистых кварцевых концентратов из данного типа кварца. Характерной особенностью кварца из мусковитовых и мусковит-керамических пегматитов являются повышенные концентрации Ti, а также Li в концентратах предварительной очистки. Коэффициент титанистости ($K_t = Ti/\Sigma \text{ общ. эл.} \cdot 100 \%$) довольно высокий – от 2 (Слюда) до 7 (Риколатва), что в целом согласуется с общим повышенным содержанием Ti в пегматитах Беломорско-Лапландского пояса [Слюдоносные пегматиты..., 1976]. По всей видимости, Ti присутствует в кварце в качестве структурной примеси, что связано с повышенными температурами образования и перекристаллизации кварца. Это подтверждает наличие большого количества газовой фазы (ГЖВ) с высоким содержанием газовой фазы, как в виде единичных включений, так и в виде скоплений по трещинкам залечивания (рис. 2, А). Кроме того, Ti образует и само-

стоятельные твердые фазы в виде игловидных включений рутила. Влияние углекисловодных растворов при формировании кварца наблюдается практически во всех месторождениях – характерны цепочки ГЖВ с углекислотой по различным трещинам залечивания (рис. 2, Б).

Вариации концентраций Li в кварце пегматитов связаны с дифференцированностью расплава и степенью перекристаллизации кварца в ходе метасоматоза (в мусковитовых пегматитах) [Слюдоносные пегматиты..., 1976]. В результате наибольшие содержания Li наблюдаются в недифференцированных керамических пегматитах Южной Карелии (Яккима и Кюрьяла Улялежского пегматитового поля), а в мусковитовых, мусковит-керамических и мусковит-редкометалльных пегматитах они значительно варьируют (табл. 2). При этом наблюдается корреляция содержания Li с летучими, в частности с B (коэффициент корреляции 0,8).

Для керамических пегматитов в целом характерны высокие концентрации элементов-примесей в концентратах после предварительного обогащения, что связано с присутствием

большого количества минеральных примесей, особенно полевого шпата. Формирование кварца пегматитов проходило при высоких

температурах, о чем говорит присутствие ГЖВ с высоким процентным содержанием газовой фазы, и при участии водно-солевых растворов.

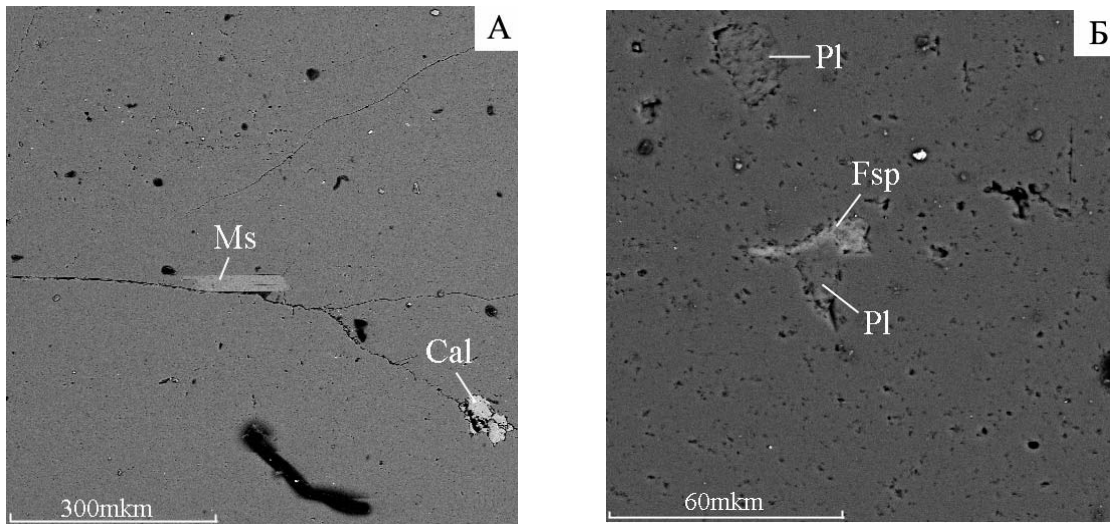


Рис. 2. Минеральные включения в кварце месторождения Риколатва (фото с микроскопа): А – мусковит (MS), кальцит (Cal) по трещинкам; Б – плагиоклаз (Pl), К-полевого шпат (Fis) внутри зерен кварца

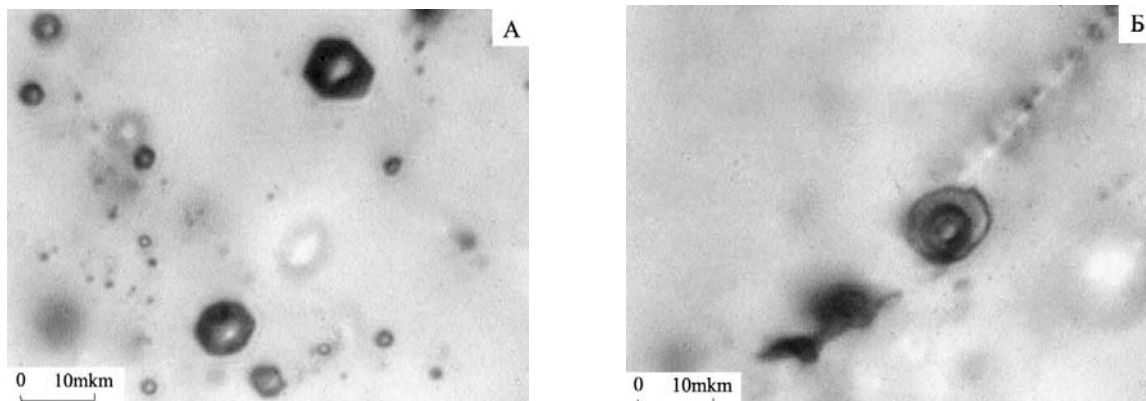


Рис. 3. ГЖВ в кварце (фото шлифов, николи ||): А – существенно газовые включения в кварце Левин Наволок; Б – углекисловодные включения в кварце Малиновая Варакка

В целом на данном этапе исследований можно сказать, что получение ВЧК из пегматитового кварца затруднительно. Это связано как с присутствием трудноудаляемых минеральных включений, так и с высокими концентрациями в некоторых типах пегматитов таких элементов-примесей, как Li и Ti. Проведившиеся в 2001 г. в Кыштыме технологические испытания по глубокому обогащению кварца из отвалов месторождения Риколатва показали, что, несмотря на суммарные низкие концентрации элементов-примесей в концентратах (32–47 ppm), остаются высокие концентрации Ti (2–5 ppm) (по данным Отчета, Кыштым 2002).

Жильный кварц

Наиболее перспективными кварцевожильными площадями на территории Карело-Кольской кварценозной провинции традиционно считались Кейвский (Семиостровское, Выхчуртское, Червуртское и Боллоуртинское кварцевожильные поля) и Енский (месторождение Перчатка, Енское кварцевожильное поле) районы [Данилевская, 2008], где распространены кварцевые жилы с гранулированным и стекловидным кварцем, которые долгое время считались практически единственными источниками кварцевого сырья для плавки прозрачного кварцевого стекла. Однако удаленность и труднодоступность Кейв не давала

возможности проведения детальных разведочных и добычных работ. А неоднородность кварцевого сырья месторождения Перчатка, несмотря на проводившуюся там добычу кварца с 1988 по 1992 г., а также несоответствие сырья возросшим требованиям потребителей стали одними из основных причин прекращения разработок месторождения.

Минералого-технологические исследования кварца месторождения Перчатка основаны на комплексной оценке месторождения, включая и минерализованные разности кварца, минуя стадию ручной рудоразборки, которая дает значительные потери (до 70 %) уже на начальном этапе добычи кварца [Данилевская, Скамницкая, 2010]. Кроме того, помимо указанных площадей на территории Кольского полуострова, жилы с гранулированным кварцем выявлены и на других территориях Карело-Кольского региона – участки Рухнаволоок, Половина, Шуерецкое (Северная Карелия). Проведена предварительная оценка кварца данных участков [Данилевская и др., 2004], а также детальные минералого-технологические исследования кварца участка Рухнаволоок, как наиболее перспективного.

Особенностью жильного гранулированного кварца является повышенная химическая чистота и прозрачность исходного кварца, что обуславливает постоянный интерес к данному типу сырья как источнику получения концентратов для производства прозрачного кварцевого стекла. Жильный гранулированный кварц является вторично-зернистым агрегатом, образованным в результате метаморфизма или диафореза первично-зернистого, как правило, стекловидного кварца. В зависимости от термодинамических условий метаморфизма первично-зернистых кварцевых жил формирование гранулированного кварца может происходить либо за счет α - β перехода с последующей рекристаллизацией и регенерацией (гранулитовая и амфиболитовая фации метаморфизма), либо за счет катаклаза и рекристаллизации (амфиболитовая, эпидот-амфиболитовая фация) [Геология..., 1988].

В пределах Карело-Кольского региона жильный гранулированный кварц образовывался в различных геолого-фациальных и термодинамических условиях и, соответственно, имеет свои типоморфные особенности [Данилевская, Шпаченко, 2010].

Для кварца месторождения Перчатка, сформированного в результате грануляции при α - β инверсии и последующей рекристал-

лизации, происходивших в беспокойной тектонической обстановке в условиях амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций дистен-силлиманитовой серии при высоком давлении (240–620 МПа) и температуре (630–720 °С), характерно проявление пластической деформации: единичные деформационные изгибы, пластинки деформации, линейно- и неравномерно-блоковая микроструктура, местами переходящая в неясно-блоковую. Присутствие ксенолитов амфиболитов в пределах жильной зоны, интенсивное развитие трещиноватости и минерализации по трещинам внутри кварцевых жил обусловило присутствие большого количества разнообразных минеральных примесей в кварцевых жилах, основными являются: мусковит, плагиоклаз, К-полевой шпат, эпидот, амфибол (роговая обманка), кальцит (рис. 4). В подчиненном количестве присутствуют биотит, апатит, хлорит, кианит, сульфиды, рутил. Установлено, что основными минеральными примесями, затрудняющими процессы обогащения, могут быть мелкие включения внутри зерен кварца: плагиоклаза (20–50 мкм, по составу близкого к олигоклазу № 30), эпидота-клиноцоизита (разм. 10–50 мкм), реже амфибола (роговой обманки, разм. 20–30 мкм) и флогопита (50–100 мкм), а также иногда К-полевого шпата, пироксена (авгита) и мусковита (рис. 5).

В пределах Кейвской площади, по данным фондовых материалов, встречаются кварцевые жилы линзовидной и пластообразной формы с гранулированным кварцем различной зернистости, рекристаллизованным крупнозернистым и крупно-грубозернистым и рекристаллизованным кварцем с признаками грануляции, а также жилы, сложенные молочно-белым кварцем. Формирование жил с гранулированным кварцем в пределах Больших Кейв, локализованных в кварц-мусковитовых сланцах песчовотундровской свиты, и Малых Кейв (уч. Маягино), локализованных в зоне контакта кианит-мусковитовых сланцев червуртской свиты с метабазами и породами Имандра-Варзугской зоны, связано с образованием зон сдвиговых деформаций на фоне регионального метаморфизма амфиболитовой фации ставролит-биотит-кианит-мусковитовой субфации (повышенных давлений) [Бельков, 1963]. Интенсивное проявление стресс-метаморфизма обусловило образование катаклаз-гранулированного кварца, представленного крупнозернистым агрегатом зерен с гранобластовой неравновесной структурой.

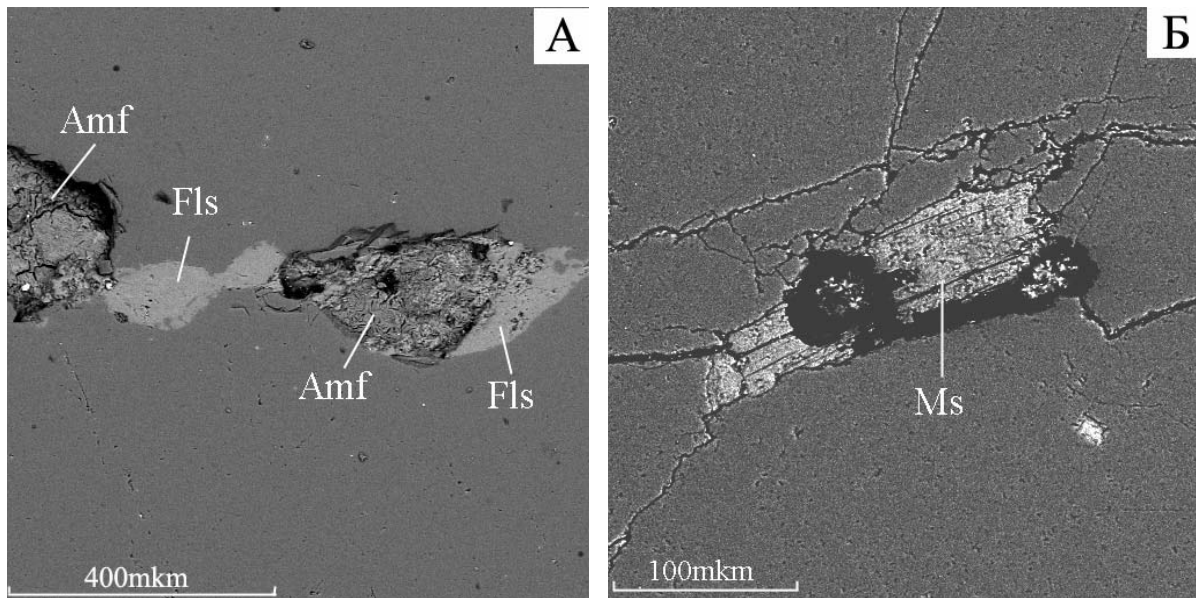


Рис. 4. Основные минеральные примеси в кварце месторождения Перчатка (фото с микроскопа Tescan):

А – К-полевой шпат (Fls), амфибол (Amf); Б – мусковит (Ms)

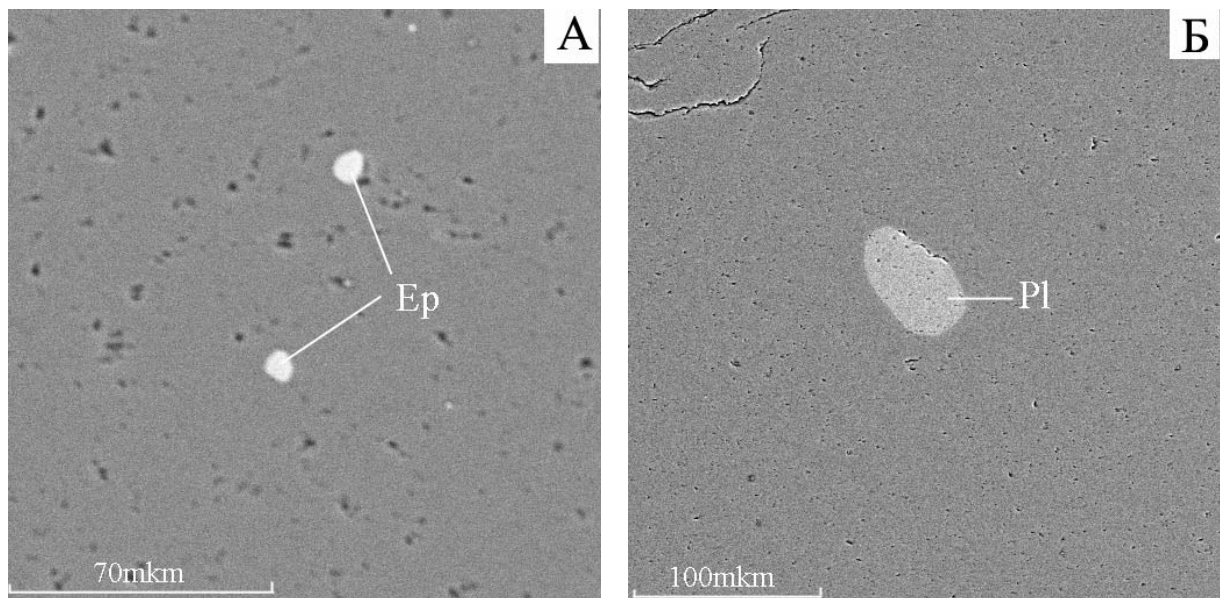


Рис. 5. Микроминеральные включения в кварце месторождения Перчатка (фото с микроскопа Tescan):

А – эпидот (Ep); Б – плагиоклаз (Pl)

В качестве минералов-примесей присутствуют полевой шпат, мусковит, биотит, ильменит, хлорит, рутил, кианит, силлиманит, амфибол, ставролит, пирит, халькопирит, графит, карбонаты, циркон. Наиболее распространенными являются полевой шпат (для гнейсовых толщ) и мусковит (для сланцевых толщ), ильменит, биотит, рутил, кианит и силлиманит имеют второстепенное значение. Проводившиеся в 1993–1997 гг. исследования кварца различных типов в пределах кварцевожильных

полей Кейв показали, что вариации химического состава исходного кварца значительные, даже в пределах типов. Среднее суммарное содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах после обогащения варьирует незначительно, наблюдаются вариации содержания отдельных элементов (табл. 3). Характерно высокое содержание Ti (кроме молочно-белого кварца), что обусловлено присутствием рутиловых иголок в кварце данных типов Кейв.

Таблица 3. Средние содержания элементов-примесей в кварцевых концентратах после полной схемы обогащения, ррт

Тип кварца	Cu	Ti	Ca	Mg	Fe	Al	Mn	Ni	Cr	Na	K	Li	Сумма
Рекристаллизованный с грануляцией	0,08	4,24	2,47	0,24	0,71	31,7	0,07	0,1	0	3,46	7,41	1,04	51,45
Рекристаллизованный	0,05	5,8	5,6	0,45	0,63	23,9	0,06	0	0	3,23	2,78	1,01	43,60
Рекристаллизованный полупрозрачный	0,07	4,44	2,44	0,43	0,79	24,4	0,07	0	0,03	4,05	3,41	0,6	40,76
Стекловидный	0,05	6,61	1,22	0,49	1,01	36,4	0,03	0	0	4,2	4,07	1,59	55,71
Молочно-белый	0,03	2,6	0,8	0,25	0,54	18	0,03	0	0	24,2	3,8	1,6	51,85

Примечание. По данным Отчета о результатах геологоразведочных работ на прозрачный и гранулированный жильный кварц на Кейвской площади (Мурманская область) 1993–1996 гг. (Н. П. Костелов, Ю. А. Шатнов, Н. В. Казаков).

По предварительным данным минералоготехнологических исследований кварца некоторых жил Больших Кейв (уч. Семиостровский) и Малых Кейв (уч. Маягино) выявлено, что пластические деформации в кварце проявлены довольно интенсивно: полосы деформации, блокование. Основные минеральные примеси в кварце жилы г. Песцовой – мусковит, биотит,

хлорит, сульфиды. Характерной особенностью является наличие рутиловых иголок внутри зерен кварца, которые значительно ухудшают качество сырья (рис. 6, А). Для гранулированного кварца участка Маягино основной минеральной примесью является мусковит, который развит по трещинкам и на границах зерен (рис. 6, Б).

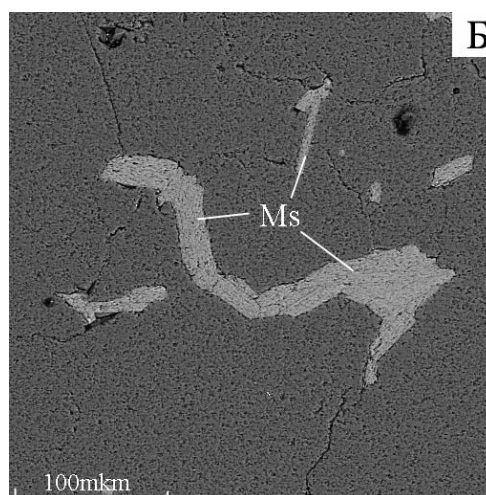
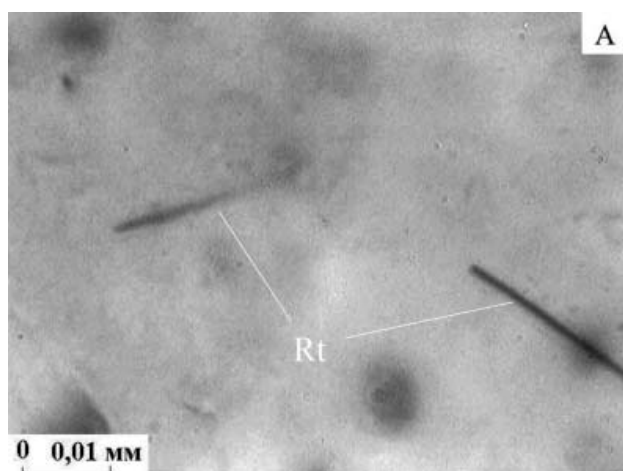


Рис. 6. Минеральные примеси в кварце:

А – рутиловые иголки (Rt) в кварце из жил г. Песцовой (фото шлифа, николи ||); Б – включения мусковита (Ms) в кварце из жил уч. Маягино (фото с микроскопа Tescan)

На участке Рухнаволок, расположенном в центральной части Северо-Карельского зеленокаменного пояса, жилы с гранулированным кварцем образовались в зоне интенсивного рассланцевания амфиболитов [Данилевская и др., 2004]. Формирование их происходило в условиях эпидот-амфиболитовой фации повышенных давлений с проявлениями перекристаллизации и грануляции кварца в процессе диафореза. В результате сформировался среднезернистый гранулированный кварц с гранобластовой равновесной структурой. Характерно незначительное развитие пластических деформаций: факела и пластинки деформаций, блокование. Основные минеральные примеси – слюды, полевошпат, амфибол. Характерной особенностью является наличие

единичных включений волосовидного рутила в зернах кварца.

Газонасыщенность жильного гранулированного кварца всех рассмотренных участков низкая. Коэффициент светопропускания в среднем составляет около 70 %. Газово-жидкие включения представлены несколькими генерациями – первично-вторичные существенно-газовые, вторичные жидко-газовые с разным процентным содержанием газовой фазы. Для кварца участка Рухнаволок характерно присутствие углекисловодных включений.

Предварительные минералоготехнологические исследования показали, что содержание элементов-примесей в кварце после операций предварительной очистки (магнитная сепарация и кислотообработка) варьирует в зависи-

мости от наличия в кварце трудноудаляемых минеральных включений, их количества и видов (табл. 4). Повышенный коэффициент титанистости наблюдается в кварце участка г. Песцовой и Рухнаволок, что обусловлено наличием

рутиловых игл. Повышенное содержание Li в кварце участка Рухнаволок связано с присутствием данного элемента в решетке. Наиболее чистый по содержанию элементов-примесей кварц участка Маягино.

Таблица 4. Среднее содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах после предварительного обогащения, ppm

Участок	Fe	Ti	Zr	Al	Mn	Sr	Zn	B	Mg	Ca	Ba	Ni	Cr	Cu	K	Na	Li	Ge	P	Сумма
Перчатка *	4,46	2,44	0,02	102,8	0,1	0,8	0,04	0,37	1,66	29,2	0,74	0,04	0,01	0,02	14,60	42,2	3,86	0,54	0,01	203,91
Песцовая К.*	1,4	10	0,016	54	0,03	0,084	0,038	0,11	0,48	1,9	0,12	0,016	0,016	0,019	4,7	4,5	0,48	0,82	0,1	78,829
Маягино*	0,68	1	0,02	18	0,02	0,12	0,023	0,15	0,44	4,6	0,08	0,017	0,074	0,023	2,9	8,3	0,28	0,43	0,01	37,167
Рухнаволок**	0,94	3,04	–	33,8	0,43	–	–	–	0,25	3,5	–	0,61	0,61	0,43	3,68	18,27	3,16	–	–	68,74

Примечание. Анализы выполнены * в лаборатории Курчатовского института (г. Москва) методом ICP MS, ** – в лаборатории Tatsumori Corp. (Япония).

Технологические исследования по глубокому обогащению были проведены на кварце месторождения Перчатка и участка Рухнаволок.

Для отработки технологии по глубокому обогащению кварца месторождения Перчатка были отобраны 2 штучные пробы: ПРЧ-7 – стекловидный кварц из зоны трещиноватости, ПРЧ-15 – гранулированный кварц. Обогащение проводилось на исходном сырье без операций предварительной рудоразборки и отделения загрязненных минеральными примесями кусков, на фракции 0,315–0,1 мм, с использованием как стандартных методов

(магнитной сепарации, флотации и кислотного выщелачивания в HCl и HF), так и методов направленного энергетического воздействия. В результате удалось значительно снизить содержание элементов-примесей, полученные концентраты близки по содержанию основных элементов-примесей независимо от типа кварца (табл. 5). Это позволяет говорить о возможности отработки единой комплексной технологии обогащения для кварца данного месторождения и, соответственно, значительно снизить потери кварца при технологической обработке.

Таблица 5. Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах после операций предварительного и глубокого обогащения (Перчатка), ppm

Обогащение	Ti	Fe	Al	Zr	Mn	Cu	Zn	B	Ni	Cr	Ca	Ba	Mg	Na	K	Li	P	Сумма	
Стекловидный кварц																			
Предварит.	2,4	2,2	17	0,012	0,19	0,016	0,02	0,31	0,029	0,01	36	0,18	1,2	7,8	5,5	1,7	0,01	74,577	
Глубокое	2,2	0,74	14	0,04	0,04	0,01	0,01	0,32	0,02	0,02	9	0,02	0,2	1,1	1,3	2,2	0,1	31,32	
Гранулированный кварц																			
Предварит.	2,7	0,75	54	0,015	0,02	0,01	0,051	0,31	0,053	0,012	19	1,2	0,46	16	23	4,5	0,01	122,091	
Глубокое	2,6	0,04	24	0,044	0,01	0,01	0,019	0,29	0,01	0,01	0,7	0,017	0,18	1,9	1,5	3,5	0,1	34,93	

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории Курчатовского института (г. Москва) методом ICP MS.

Испытания по глубокому обогащению жильного гранулированного кварца участка Рухнаволок (жила 3) проводились в лаборатории ОАО «Полярный кварц» (г. Москва) по схеме обогащения, принятой для стекловидного жильного кварца месторождения Додо (Полярный Урал), а также в лаборатории Института геологии КарНЦ РАН.

В результате опытов по глубокому обогащению по схеме обогащения кварца месторо-

ждения Додо (Полярный Урал) установлено, что при существенном снижении общего числа примесей содержание таких примесей, как Al и Li, в кварце остается высоким. На долю Al и Li в составе примесей приходится 71,92 %, в том числе Al – 59 %, Li – 12,92 %. Остаются также повышенные концентрации Ti, обусловленные присутствием неудаляемых включений рутила (табл. 6).

Таблица 6. Содержание элементов-примесей в кварцевом концентрате (Рухнаволок) после глубокого обогащения в лаборатории ОАО «Полярный кварц», ppm

Al	B	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Ti	Zr	Сумма
20,00	0,11	0,07	0	0	1,71	0,11	4,34	0,03	0	4,33	3,2	0	33,9

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории ОАО «Полярный кварц» (г. Москва) методом ICP MS.

Проведенные технологические испытания кварца показали, что в целом по содержанию элементов-примесей полученный концентрат незначи-

тельно отличается от концентрата лаборатории ОАО «Полярный кварц» (табл. 7). Также повышенными остаются содержания Al, Ti и Li.

Таблица 7. Содержания элементов-примесей в кварцевом концентрате (Рухнаволок) после глубокого обогащения в Институте геологии КарНЦ РАН, ppm

Fe	Ti	Al	Mn	Mg	Ca	K	Na	Zr	Zn	B	Ba	Ni	Cr	Cu	Li	Ge	P	Сумма
1,1	2,9	22	0,02	0,16	0,54	0,8	3,6	0,12	0,027	0,04	0,012	0,023	0,024	0,01	4,1	0,23	0,1	35,806

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории Курчатовского института (г. Москва) методом ICP MS.

На данном этапе исследований можно сказать, что получение ВЧК из традиционных типов кварцевого сырья (гранулированного и стекловидного) в ряде случаев может быть проблематично, что обусловлено минералогическими особенностями кварца, образованного в условиях повышенных температур и давлений. Из-за трудноудаляемых минеральных включений и в ряде случаев структурных примесей в кварцевых концентратах после глубокого обогащения остаются высокие концентрации таких элементов, как Al, Ti, Li.

В последнее время возрос интерес к нетрадиционным источникам кварцевого сырья – жильному кварцу с исходно низким качеством (молочно-белый, минерализованный), кварцитах и кварцсодержащим породам. Это обусловлено дефицитом сырья традиционных типов, существующим положительным опытом зарубежных стран (США, Норвегия) по получению высококачественных концентратов из подобных пород, возможностью комплексного использования сырья.

Оценка возможностей использования нетрадиционных типов пород как сырья для получения высоколиквидных кварцевых продуктов заключается, главным образом, в подборе эффективных технологий их обогащения с учетом геолого-минералогических факторов, определяющих технологическое значение особенностей данных комплексов. Исследования проводились по некоторым типам кварцевого сырья Карело-Кольского региона [Данилевская и др., 2006, 2011; Данилевская, Скамницкая, 2009, 2011].

В результате комплексного изучения минералогических особенностей молочно-белого кварца месторождения Фенькина Лампи (Центральная Карелия) и проведения технологических испытаний по улучшению качества кварцевых концентратов с применением методов направленного воздействия удалось значительно снизить концентрации элементов-примесей в

кварцевых концентратах из данного кварца в среднем с 215–273 ppm (в предварительно обогащенном кварце) до 95–106 ppm [Данилевская, Скамницкая, 2009].

Наиболее перспективным объектом нетрадиционного кварцевого сырья на территории Карелии является участок Меломайс в Западной Карелии, где наблюдается мощная (при длине до 1,5 км, мощности – 70–170 м) кварцевожильная зона субмеридионального простирания с огромными ресурсами [Данилевская, Щипцов, 2007а]. Жильная зона представлена интенсивно рассланцованным и минерализованным кварцем. Среднее содержание SiO₂ в исходном сырье – 96,84 %. Проведенные детальные минералогические исследования показали, что основная масса минеральных включений удаляется на стадии предварительного обогащения, но наиболее трудноудаляемыми при глубоком обогащении примесями являются микроминеральные включения К-полевого шпата, плагиоклаза, мусковита, эпидота, расположенные внутри зерен кварца, а также мелкие газовожильные включения [Данилевская и др., 2006; Данилевская, Щипцов, 2007а].

На основе разработанной технологической схемы получены кварцевые концентраты по двум классам крупности (табл. 8). Кварцевый концентрат крупности 0,315–0,1 мм соответствует требованиям сорта КГО-1 (глубокого обогащения) ТУ 5726-002-11496665-97 для плавки прозрачного кварцевого стекла. Кварцевые концентраты крупности 1–0,315 мм характеризуются более высокими суммарными содержаниями элементов-примесей, но низкими концентрациями В и Р и могут рассматриваться как сырье для получения кристаллического кремния. Материал крупностью –0,1 мм (шламы) может идти на керамику. Таким образом, кварцевое сырье участка Меломайс может рассматриваться как комплексное с получением трех кварцевых продуктов различного качества и назначения.

Таблица 8. Вариации содержаний элементов-примесей (минимум – максимум) в кварцевых продуктах разной крупности участка Меломайс, ppm

Крупн. мм	Fe	Ti	Zr	Al	Mn	Zn	B	Mg	Ca	Cu	K	Na	Li	Ge	P	Сумма
–0,315– +0,1	0,5–3,4	1,1– 4,9	0,36– 0,69	13–23	0,014– 0,059	0,01– 0,09	0,05– 0,12	0,24– 1,9	1,5–2,9	0,03– 0,05	3–9	2,6– 4,1	0,22– 0,71	0,1– 0,14	0,1– 0,25	28,366– 44,78
–1– +0,315	6,4–17	1,8–2	0,55– 0,74	32–36	0,085– 0,53	0,078– 0,25	0,11– 0,16	2,7–4	3,8–5,5	0,06– 0,11	10–12	6–7,3	0,33– 0,4	0,06– 0,1	0,26– 0,42	69,008– 76,16

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории Курчатовского института (г. Москва) методом ICP MS.

В качестве перспективного нетрадиционно-го источника кварцевого сырья на территории Карело-Кольского региона рассматривается также жильный золоторудный кварц месторождения Майское. По данным концерн «Техстекло» (1991 г.) хвосты обогащенной технологической пробы рудопроявления «Майское» не могут использоваться в промышленности оптического стекловарения и производстве кварцевого стекла, а концентраты, полученные в результате переработки кускового кварца, соответствуют II сорту кварца по ТУ-41-07-008-82 «Кварц жильный прозрачный для производства кварцевого стекла» [Данилевская и др., 2004]. Однако интерес к кварцу этого месторождения возник в результате анализа полученных данных по содержанию структурных примесей в кварце, которые характеризуются низкими концентрациями Al (3,5–6 ppm), Ge (0,05–0,15 ppm), Ti (0,1–0,3 ppm) [Войтеховский и др., 2010].

Образование химически чистого кварца данного месторождения, по всей видимости, связано с многоэтапностью его формирования в условиях невысоких температур (350–300 °С) и влиянием метасоматической переработки на более поздних стадиях при общем снижении температур (до 220 °С), которая привела к перекристаллизации кварца [Вольфсон, 2004].

Проведенные предварительные минералогические исследования кварца месторождения Майское показали, что кварц варьирует от молочно-белого сливного до всех оттенков серого зернистого кварца. Из минеральных примесей, кроме сульфидов и золота, присутствуют альбит, биотит, мусковит, актинолит, кальцит, анкерит, хлорит, олигоклаз, К-полевой шпат, рутил. В качестве трудноудаляемых могут быть микровключения зерен кальцита (10–50 мкм), К-полевого шпата (10–50 мкм), мусковита (10–60 мкм), хлорита (10–60 мкм) (рис. 7).

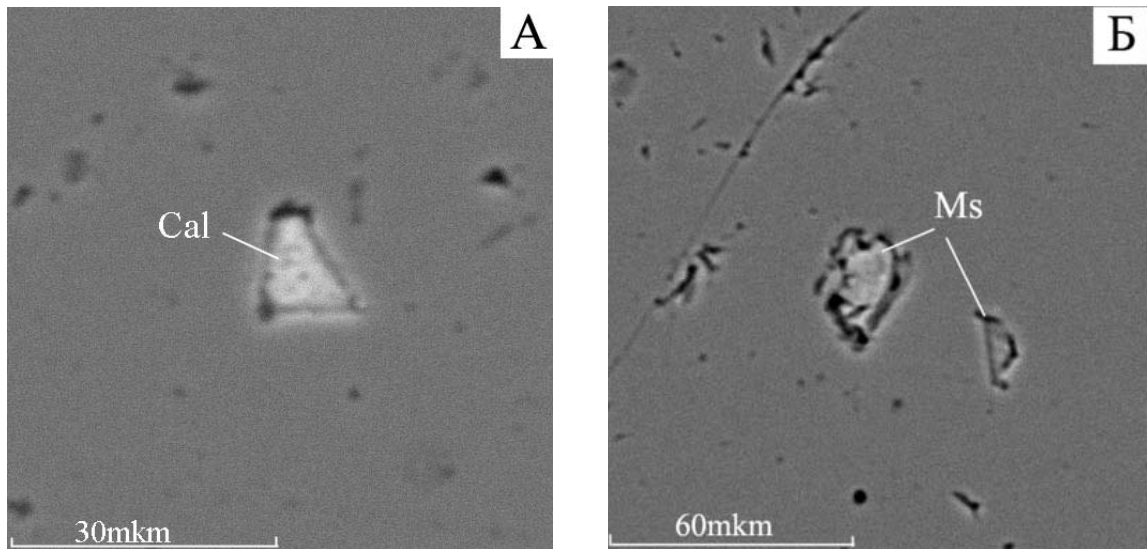


Рис. 7. Микровключения в кварце месторождения Майское (фото с микроскопа Tescan): А – кальцит (Cal), Б – мусковит (Ms)

Технологические испытания по очистке исходного кварца месторождения Майское показали, что в результате глубокого обогащения с

применением методов направленного воздействия удастся значительно снизить концентрации элементов-примесей в кварце (табл. 9).

Таблица 9. Содержание элементов-примесей в кварце месторождения Майское на различных стадиях обогащения, ppm

Ti	Fe	Al	Zr	Mn	Cu	Zn	B	Ni	Cr	Co	Ca	Ba	Mg	Na	K	Li	P	Сумма
Исходный кварц																		
85	800	2600	2,3	4,4	590	3,4	0	5,5	3,1	4,1	200	17	18	770	1000	1,5	14	6118,3
Концентрат после магнитной сепарации																		
1,5	135	260	0,06	1,1	85	2,2	0,5	1,2	0,3	1,2	40	1,1	13	300	40	0,13	0,8	883,09
Концентрат после магнитной сепарации и обработки в HF																		
0,4	35	16	0,018	0,055	40	0,12	0,4	0,07	0,012	0,16	5,5	0,34	1,1	11	7,5	0,05	0,11	117,84
Концентрат после глубокого обогащения																		
0,32	2,3	10	0,01	0,026	0,9	0,04	0,19	0,14	0,01	0,16	2,9	0,26	0,65	7,6	5	0,04	0,1	30,646

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории Курчатовского института (г. Москва) методом ICP MS.

Полученные данные позволяют говорить о перспективности кварца данного месторождения в качестве сырья для производства ВЧК и необходимости проведения дальнейших исследований.

Кварц-мусковитовые метасоматиты и перекристаллизованные кварциты

Изучение кварцсодержащих пород как потенциальных источников кварцевого сырья прежде всего связано с возможностью их комплексного использования, а также с большими площадями их распространения и, соответственно, запасами кварца. Широко известна во всем мире компания Unimin (США), которая поставляет на мировой рынок Iota-кварц (мировой стандарт ВЧК), производимый из плагиопегматитов и аляскитовых гранитов, получая также мусковитовый и полевошпатовый продукты. Норвежская фирма Elkem успешно перерабатывает кварциты месторождения Тана с получением кварцевых продуктов высокого качества для микроэлектроники. Кроме того, в качестве перспективных объектов кварцевого сырья для ВЧК в Норвегии рассматриваются месторождения кианитовых кварцитов [Müller et al., 2007].

На территории Карело-Кольской кварценозной провинции кварцсодержащие породы имеют довольно широкое распространение, включая толщи кварцитов ятулийского возраста, различные кварцсодержащие сланцы, гнейсы, кварцевые конгломераты и т. д. Из изученных к настоящему времени пород перспективными объектами на территории Северной Карелии в границах Хизоваарской структуры являются месторождения кианитовых руд Южная линза и

маложелезистого мелкочешуйчатого мусковита Восточная Хизоваара, образованные в процессе кислотного выщелачивания различных фаций метасоматоза. Здесь кварц рассматривается как попутно извлекаемый компонент [Данилевская и др., 2004].

Наиболее перспективными являются кварц-мусковитовые метасоматиты крупного месторождения Восточная Хизоваара, которое было выявлено и оценено на мелкочешуйчатый маложелезистый мусковит, пригодный для различных областей использования, в том числе и для высокотехнологичных перламутровых пигментов [Щипцов и др., 2003]. Помимо мусковита в качестве полезных компонентов могут быть рассмотрены кварц и кианит. Комплексная отработка месторождения позволит значительно повысить его рентабельность. Содержание кварца в породе составляет 10–71 %, мусковита – 8–42 %. Присутствуют также плагиоклаз – 1,5–28 %; кианит – 2–13,5 %; биотит – 0,1–8 %; рудные минералы – пирит, пирротин, сфалерит (1,5–11 %). В качестве акцессорных минералов встречаются турмалин, рутил, титанит, апатит, кальцит, циркон, монацит. Характерной особенностью является практически полное отсутствие газообразных включений в кварце.

Технологические исследования по выделению кварцевых концентратов из хвостов мусковитового цикла [Данилевская, Скамницкая, 2011], проводившиеся на усредненных пробах, отобранных из керна скважин, позволили значительно снизить содержание примесей в кварце по сравнению с исходным (табл. 10, 11), остаются повышенными концентрации Al, Ti, Na, Ca и Fe.

Таблица 10. Средний химический состав хвостов обогащения мусковитовых кварцитов месторождения Восточная Хизоваара

№ пр./фракция, мм	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	ппп	P ₂ O ₅
1/0,315–0,1	86,23	0,11	8,36	0,03	0,03	0,005	0,19	1,21	1,87	0,72	0,49	0,71	0,08
2/0,2–0,1	89,99	0,16	6,73	0,08	0,02	0,002	0,06	0,31	0,97	0,71	0,07	0,58	0,12

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории Института геологии КарНЦ РАН.

Таблица 11. Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах (Восточная Хизоваара), ppm

№ пр./фракция, мм	Fe	Ti	Zr	Al	Mn	Sr	Zn	B	Mg	Ca	Ba	Ni	Cr	Cu	K	Na	Li	Ge	P	Co	Сумма
1/0,315–0,1	5,6	60	6,8	66	0,25	0,38	0,15	0,22	8	17	0,92	0,035	0,06	0,22	16	51	0,17	0,8	2,8	0,13	236,485
2/0,2–0,1	29	430	9,5	820	0,08	2,5	0,25	0,33	1	51	0,19	0,4	0,28	0,32	7,8	99	0,12	1,5	1	0,92	1455,19

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории Курчатовского института (г. Москва) методом ICP MS.

Кварцевые продукты соответствуют требованиям, предъявляемым к сырью для производства карбида кремния, диоксидных изделий, стекла (по ГОСТ 22551-77) и керами-

ки. После помола пылевидный кварц пригоден для литья по выплавляемым моделям. Кроме того, кварцевый концентрат, полученный в результате глубокого обогащения по

пробе ПР-1 (крупность 0,315–0,1 мм), соответствует требованиям компании Элкем для производства технического (металлического) кремния специальных марок (Special grade Silicon metal), а концентрат, полученный по пробе ПР-2 (крупность 0,25–0,1 мм), соответствует требованиям компании Элкем для производства ферросилиция высоких марок (HP FeSi-low P and B).

В пределах Кольского региона известны кианитовые сланцы Кейв, образованные в результате полиметаморфизма осадочных толщ и прослеживающиеся в виде узкой (от нескольких сотен метров до первых километров) полосы более чем на сто километров [Бельков, 1963]. Разведано несколько месторождений на кианит, как перспективный вид сырья для производства силумина, огнеупоров и глинозема, однако перспективы использования кварцевого сырья как попутного компонента при комплексной разработке не рассматривались. Вместе с тем кварц, как правило, составляет от 50–60 об. % породы. Наряду с кианитовыми сланцами, составляющими в стратиграфиче-

ском разрезе, по данным И. В. Белькова, пачку Б, интерес могут представлять мусковитовые кварциты (пачка В), распространенные в пределах центральных и западных Кейв, содержание кварца в которых составляет 85–90 об. %, а также метасоматические кианитовые сланцы с голубым кианитом, которые образуют вытянутые линзы на контактах кварцитов и гранат-ставролитовых сланцев, содержание кварца достигает 70 об. % [Бельков, 1963].

Мусковитовые кварциты песчовотундровской свиты Хребет Серповидный (Большие Кейвы) по минеральному составу довольно однородны и значительно отличаются от мусковитовых кварцитов Восточной Хизоваары. В качестве второстепенных минералов, кроме мусковита, данные породы содержат К-полевой шпат, плагиоклаз, иногда хлорит, которые развиты в основном по границам зерен кварца вместе с мусковитом и по микротрещинкам внутри зерен (рис. 8, А). В качестве аксессуарных наблюдаются рутил, эпидот, циркон, титанит и апатит (рис. 8, Б).

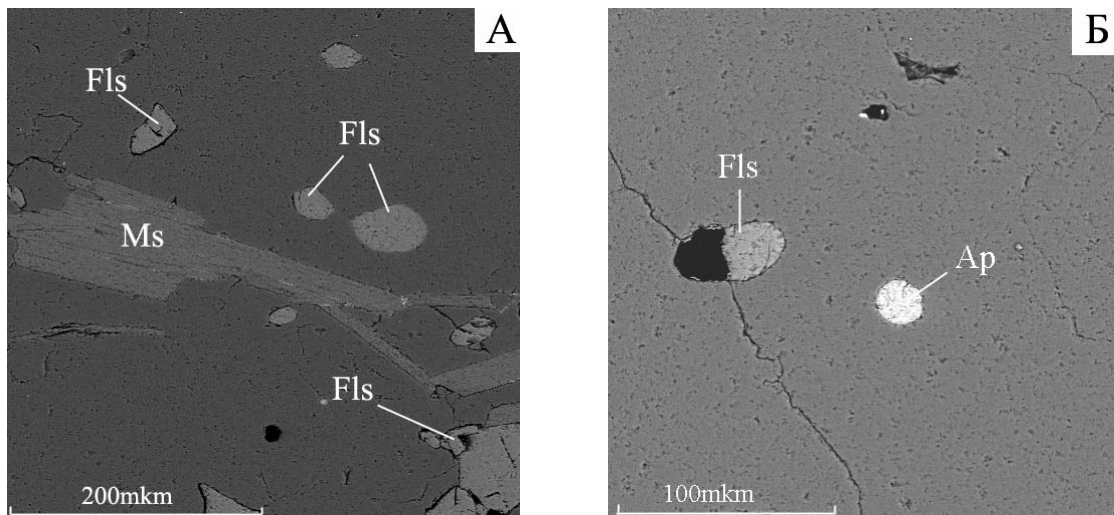


Рис. 8. Минеральные примеси в мусковитовых кварцитах Хребта Серповидного (фото с микроскопа Tescan):

А – мусковит (Ms), К-полевой шпат (Fls); Б – аксессуарный апатит (Ap) и микровключение К-полевого шпата (Fls)

Проведенные исследования по предварительному обогащению этих пород с использованием стандартных операций обогаще-

ния показали, что уже на данной стадии возможно значительное очищение кварца от примесей (табл. 12).

Таблица 12. Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах, полученных из мусковитовых кварцитов после операций предварительного обогащения

Фракция, мм	Fe	Ti	Al	Mn	B	Mg	Ca	Cu	K	Na	Li	Ge	P	Сумма
0,2–0,05	33	70	1400	3,9	5,4	8	22	1	1100	310	1,2	0,6	9,3	2964,4
0,315–0,1	41	30	2700	1,2	0,52	8,6	9,5	0,13	1300	150	0,93	0,9	3,5	4246,28

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории Курчатовского института (г. Москва) методом ICP MS.

Кварцевые концентраты после предварительного обогащения удовлетворяют требованиям

компании Элкем для производства ферросилиция (марки Std FerroSilicon и HP FeSi-low P and B).

На границе Северной Карелии и Мурманской области в пределах северной части Северо-Карельского зеленокаменного пояса имеют распространение кварциты ятулийского возраста (Кукаозерский сегмент, участок Степаново озеро), которые претерпели переработку, вплоть до образования сливных кварцитов, в результате интенсивной тектонической активизации свекофеннского возраста и связанного с ней метаморфизма эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций [Данилевская и др., 2004].

В результате проведенных минералого-петрографических исследований и минералоготехнологического картирования на участке Степаново озеро установлено, что кварциты данного участка характеризуются присутствием зональности, образованной в результате вторичных изменений в процессе метаморфизма и метасоматоза. Среднее содержание SiO₂ в

пробах сливных кварцитов из центральной части тела – 98,86 %. В приконтактовых частях кварцит более мелкозернистый и значительно минерализованный. Основные минеральные примеси – серицит, плагиоклаз, иногда кальцит (редко присутствует пироксен) – распределены вдоль границ зерен. Акцессорные минералы наблюдаются часто в виде мелкодисперсных включений внутри зерен кварца и представлены пиритом, апатитом, эпидотом, реже монацитом, ортитом, цирконом.

По результатам предварительного обогащения кварца данного проявления по различным типам установлены различия в качестве кварцевых продуктов из разных типов кварца на стандартной крупке размерами 0,1–0,5 мм (табл. 13) [Данилевская и др., 2004]. Наиболее обогатимыми являются центральные части кварцевого тела с интенсивной переработкой.

Таблица 13. Качественные характеристики концентратов предварительного обогащения по нескольким пробам (Степаново озеро), ppm

Тип кварца	Al	Fe	K	Na	Ti	Li	Ca	Mg	Cu	Cr	Mn	Ni	Co	Сумма
М/з кварцит (1 проба)	200	18	30,5	374	29,1	0,15	10	16,1	0,2	1	0,2	1	1	681,3
Сливной кварцит (сред. по 2 пробам)	72	3,75	11,9	39,5	7,65	0,23	6	4,7	0,2	1	0,2	1	1	149,1

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории ВНИИСИМС (г. Александров).

Проведенные эксперименты по дообогащению данного кварца, с включением методов направленного воздействия и использованием более мелкого материала двух фракций –

0,313–0,1 мм и 0,2–0,02 мм, позволили значительно улучшить качество кварцевого концентрата, особенно по более мелкой фракции (табл. 14).

Таблица 14. Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах двух фракций после глубокого обогащения (Степаново озеро), ppm

Фракция, мм	Fe	Ti	Al	Mn	Mg	Ca	K	Na	Zr	Sr	Zn	B	Ba	Ni	Cr	Cu	Li	Ge	P	Co	Сумма
0,313–0,1	16	5	31	0,05	0,9	2,6	10	5	2,1	0,035	0,052	0,11	0,22	2,2	0,1	0,048	0,07	0,6	1,2	0,08	77,667
0,2–0,02	0,5	3,9	35	0,04	0,23	0,6	2,8	1,0	0,05	0,1	0,037	0,21	0,017	0,01	0,025	0,06	4,1	0,7	0,2	0,01	49,496

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории Курчатовского института (г. Москва) методом ICP MS.

После проведенных технологических исследований наблюдается значительное снижение содержания Fe, Mg, Zr, Ba, P в кварцевом концентрате, вместе с тем содержание Al, Ti практически не изменяется. Существенные отличия по содержанию Li могут быть связаны с неоднородностью состава кварца по фракциям.

Кварцевые концентраты после проведенных операций обогащения на разной крупности и по различным схемам, в том числе и с применением направленных воздействий, в целом не соответствуют высокочистому кварцу (сортам КГО), в основном из-за высокого содержания Al. По-видимому, с проведением дополнительных исследований по отработке режимов очистки можно повысить качество кварцевых концентратов с учетом исходно низкого содержа-

ния в кварце структурных примесей [Данилевская, Раков, 2006].

Определенный интерес вызывают кварциты палеопротерозойского возраста нижнего ятулия, имеющие широкое распространение в центральной части Карелии. Интерес, прежде всего, вызывают исходно чистые разновидности кварцитов, которые могут рассматриваться как сырье для производства «металлургического кремния» (MG-Si), который является востребованным продуктом на рынке и исходным сырьем для производства поликремния для солнечных батарей и электроники (solar & electronic grade). В частности, кварциты месторождения Метчангъярви характеризуются многоцелевым комплексным использованием (исходное сырье – огнеупорный порошок, декора-

тивный щебень, наполнители в бетон, стекольная промышленность, некоторые разновидности – металлургический кремний; кварцевая крупка после процессов обогащения – стекольная промышленность, кристаллический кремний) [Данилевская и др., 2007].

Заключение

Карело-Кольский регион является одной из четырех кварценозных провинций на территории России, имеет выгодное территориальное расположение. Проведившиеся в Институте геологии КарНЦ РАН в последние 15 лет исследования кварцевого сырья в пределах данной территории позволили значительно расширить перечень перспективных типов кварцевого сырья, включая нетрадиционные разновидности (кварциты, кварцевые метасоматиты, жильный кварц с исходно низким качеством и др.). Кроме того, была произведена переоценка уже известных объектов с учетом современных требований, расширением спектра исследованных элементов-примесей и с применением новых подходов к обогащению, что позволило улучшить качество кварцевых концентратов, расширяя тем самым спектр их возможного применения.

На данном этапе исследований можно сказать, что среди изученных разновидностей кварцевого сырья наиболее перспективными типами являются кварцевые образования, сформированные в результате метаморфизма и перекристаллизации, протекавших при невысоких температурах и стрессовой нагрузке.

Минералого-технологические исследования кварца показали, что наиболее перспективными объектами кварцевого сырья на данный момент на территории Карело-Кольской кварценозной провинции для производства ВЧК, требующими дальнейших детальных исследований, можно считать: жильный кварц месторождения Майское, участка Маягино (Малые Кейвы), участка Меломайс.

Важными задачами дальнейших исследований кварцевого сырья данного региона являются: подбор технологий обогащения кварцевого сырья месторождения Перчатка с целью улучшения качества кварцевых концентратов; проведение детальных минералого-технологических исследований жильного кварца Больших Кейв и поиск наиболее обогатимых разновидностей кварца; разработка новых подходов к очистке кварца от трудноудаляемых микровключений и ГЖВ и отработка технологий обогащения нетрадиционных типов кварцевого сырья (молочно-белого жильного кварца, сливных кварцитов, кварцевых метасоматитов и т. д.); проведение поисково-оценочных работ по

кварцитам с целью поиска наиболее чистых разновидностей для производства металлургического кремния; выявление новых нетрадиционных типов кварцевого сырья, пригодных для производства востребованных кварцевых продуктов.

Карело-Кольский регион является перспективной для освоения кварценозной провинцией. Расширение и углубление исследований в области изучения геологических условий формирования кварцевого сырья, его минералогических свойств и обогатимости позволят в дальнейшем значительно повысить интерес к региону со стороны кварцотребляющей промышленности, что в целом улучшит его инвестиционную привлекательность.

Автор выражает искреннюю признательность проф., д. г.-м. н. В. В. Щипцову и Л. С. Скамницкой за помощь и поддержку в проведении исследований, а также автор благодарен проф., д. г.-м. н. Ю. Л. Войтеховскому и к. г.-м. н. А. К. Шпаченко за помощь в предоставлении фактического материала и фондовой литературы по кварцевому сырью Кольского п-ова.

Литература

Белоусова Е. Б., Петров И. М. Мировой рынок высокочистого природного кварца // Рынок минерального сырья. 2010. № 1. С. 62–65.

Бельков И. В. Кианитовые сланцы свиты Кейв. М., 1963. 320 с.

Борисов Л. А., Серых Н. М., Федотов В. К. и др. Минерально-сырьевая база кварцевого сырья России – состояние и основные направления ее развития // Неметаллические полезные ископаемые России: современное состояние сырьевой базы и актуальные проблемы научных исследований: Материалы конф. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 41–44.

Борисов Л. А., Серых Н. М., Федотов В. К. Ресурсный потенциал кварцевого сырья для плавки // Современные проблемы изучения и использования минерально-сырьевой базы кварцевого сырья: Сб. ст. по материалам Всерос. совещ. Миасс, 24–27 мая 2011 г. С. 18–20.

Войтеховский Ю. Л., Лютоев В. П., Чернявский А. В. Золоторудный кварц из проявлений Пана-Куолявинской структуры // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов: Тр. Всерос. (с междунар. участием) науч. конф., посвящ. 80-летию Кольского НЦ РАН. Апатиты, 26–29 сент. 2010 г. Апатиты: ООО К & М, 2010. С. 4–7.

Вольфсон А. А. Геолого-генетические особенности золото-кварцевого месторождения «Майское» (Северная Карелия): Дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2004. 165 с.

Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца / Сост. Е. П. Мельников. М.: Недра, 1988. 216 с.

Гудков А. С. Пьезооптический кварц – условия кристаллизации и промышленно-генетическая классификация месторождений // Геология рудных месторождений. 1967. № 5. С. 90–97.

Данилевская Л. А. Кварцевое сырье Кольского полуострова (обзор фондовых материалов и перспективы) // Проблемы рудогенеза докембрийских щитов: Тр. всерос. науч. конф. Апатиты, 2008. С. 29–33.

Данилевская Л. А. Основные принципы технологической минералогии в применении к кварцевому сырью // Тр. VI Всерос. (с междунар. участием) Ферсмановской науч. сессии. Апатиты: ООО К & М, 2009. С. 252–256.

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: Сб. науч. ст. по материалам I Рос. семинара по технологической минералогии. Петрозаводск, 2006. С. 119–124.

Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С. Повышение качества концентратов из молочно-белого жильного кварца // Обогащение руд. 2009. № 5. С. 21–25.

Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С. Месторождение жильного кварца Перчатка: история освоения, геолого-минералогические особенности, новые подходы к оценке сырья // Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова: Тр. VII Всерос. Ферсмановской науч. сессии, посвящ. 80-летию Кольского НЦ РАН (Апатиты, 2–5 мая 2010 г.). Апатиты: ООО К & М, 2010. С. 39–44.

Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С. Перспективы получения кварцевых продуктов из нетрадиционных источников кварцевого сырья // Обогащение руд. 2011. № 6. С. 29–34.

Данилевская Л. А., Шпаченко А. К. Особенности жильного гранулированного кварца Карело-Кольского региона // Современная минералогия: от теории к практике: Материалы XI Съезда РМО. СПб., 2010. С. 332–334.

Данилевская Л. А., Щипцов В. В. Прогноз перспективности нового кварценосного объекта Меломайс в Карелии // Разведка и охрана недр. 2007а. № 10. С. 33–36.

Данилевская Л. А., Щипцов В. В. Состояние и ресурсы минерально-сырьевой базы кварца Республики Карелия // Разведка и охрана недр. 2007б. № 10. С. 29–33.

Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Кварцевое сырье Карелии. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2004. 226 с.

Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Минералого-технологическая оценка и перспективы использования сырья кварцевой жилы Меломайс (Карелия) // Обогащение руд. 2006. № 3. С. 11–15.

Данилевская Л. А., Гаранжа А. В., Щипцов В. В. Возможности комплексной переработки и исполь-

зования кварцитов месторождения Метчангъярви (Карелия) // Материалы Междунар. совещ. Современные методы комплексной переработки руд и нетрадиционного минерального сырья. Апатиты, 2007. С. 85–89.

Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Нетрадиционные типы кварцевого сырья Карело-Кольского региона: новые подходы и перспективы использования // Современные проблемы изучения и использования минерально-сырьевой базы кварцевого сырья: Сб. ст. по материалам Всерос. совещ. Миасс, 24–27 мая 2011 г. С. 54–61.

Дудкин О. Б. Технологическая минералогия комплексного сырья на примере месторождений щелочных плутонов. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. 133 с.

Емлин Э. Ф., Синкевич Г. А., Якшин В. И. Жильный кварц Урала в науке и технике. Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 1988. 272 с.

Ермаков Н. П. Генетические обоснования классификации месторождений пьезооптического кристаллосырья // Тр. ВНИИП. 1958. Т. 11, вып. 1. С. 5–12.

Изюитко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 582 с.

Карякин А. Е., Смирнова В. А. Структуры хрусталеносных полей. М.: Недра, 1967. 240 с.

Крылова Г. И. Изучение физико-химических свойств основных типов кварцев Приполярного Урала с целью разработки рекомендаций по их рациональному обогащению: Отчет ВНИИСИМС. Александров, 2001. 175 с.

Лазыко Е. М. О генезисе хрусталеносных образований и промышленных типах месторождений пьезокварца // Тр. ВНИИП. 1958. Т. 2, вып. 1. С. 13–24.

Минерагения метаморфогенных месторождений горного хрусталя и гранулированного кварца / Соколов Ю. М., Мельников Е. П., Маханек Е. К., Мельникова Н. И. Л.: Наука, 1977. 113 с.

Пирогов Б. И. Теоретические основы технологической минералогии // Теория минералогии. Л.: Наука, 1988. С. 127–134.

Пирогов Б. И. Методология технологической минералогии и природа технологических свойств минералов // Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2006. С. 6–19.

Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке / Ревнивцев В. И., Азбель Е. И., Баранов Е. Г. и др. М.: Недра, 1987. 307 с.

Поленов Ю. А. Эндогенные кварцево-жильные образования Урала. Екатеринбург: УГГУ, 2008. 269 с.

Серых Н. М., Борисов Л. А., Гулин Е. Н., Федотов В. К. Проблемы воспроизводства минерально-сырьевой базы особо чистого кварца на современном этапе // Руды и металлы. 2004. № 1. С. 51–52.

Слюдоносные пегматиты Северной Карелии / Гордиенко В. В., Богданов Ю. Б., Бойцова Ю. Н. и др. Л.: Недра, 1976. 366 с.

Турашева А. В. Состояние и проблемы минерально-сырьевой базы кварцевого плавочного сырья Российской Федерации // Кварц. Кремнезем:

Материалы Междунар. семинара. Сыктывкар, 2004. С. 178–181.

Шатнов Ю. А., Тигетова И. С. Особенности состояния и перспективы развития ресурсной базы кварцевого сырья // Там же. С. 177–178.

Щипцов В. В., Данилевская Л. А., Гаранжа А. В., Родионов В. С. Прогнозно-минерагеническая оценка кварценоности Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2001. С. 71–78.

Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. и др. Мусковитовые кварциты Карелии – новый промышленный тип слюдяного сырья // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 6. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2003. С. 67–77.

Ярмак М. Ф., Турашева А. В. К вопросу переоценки запасов месторождений кварцевого сырья для плавки // Синтез минералов и методы их исследования: геология месторождений пьезооптического и камнесамоцветного сырья. Труды ВНИИСИМС. Т. XV. Александров, 1998. С. 269–272.

Müller A., Ihlen P. M., Wanvik G. I., Flem B. High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway // Miner Deposita. 2007. Vol. 42. P. 523–535.

Srinivasan R., Naha K., Bhaskar Rao Y. J. et al. Middle to late Archean geology of the eastern Baltic shield, with a note on its similarity and contrast with the Archean of southern India // Earth and Planetary Sciences. 1993. Vol. 102, N 4. P. 567–585.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Данилевская Людмила Александровна

старший научный сотрудник, канд. геол.-минер. наук
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: danilevs@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 768092

Danilevskaya, Lyudmila

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian
Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: danilevs@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 768092