

УДК 549.514 51+553.623 (470.22)

КВАРЦЕВОЕ СЫРЬЕ КАРЕЛИИ

Л. А. ДАНИЛЕВСКАЯ

Институт геологии Карельского научного центра РАН

В статье приведены результаты исследований кварцевого сырья различных генетических типов в пределах трех макроструктур Карелии: Беломорского подвижного пояса, Карельского кратона, Свеккофеннского геоблока. Показано разнообразие генетических типов кварцевых образований на территории Карелии, в том числе рассмотрены кварцсодержащие породы (метасоматиты) и сливные кварциты как перспективные на кварцевое сырье различного назначения. Выявлены характерные минералого-петрографические и геохимические особенности различных генетических типов кварцевых образований на территории Карелии в зависимости от условий их геологического формирования.

Особое внимание уделено изучению типоморфных признаков кварца, которое составляет важную предстацию определения обогатимости кварцевого сырья, корректировки технологических схем его переработки и отбраковки труднообогащаемого сырья. Показан комплексный подход в исследовании типоморфных свойств кварца различных генетических типов, который позволяет не только характеризовать особенности исходного кварцевого сырья, но и прогнозировать качество кварцевых концентратов.

L. A. DANILEVSKAYA. QUARTZ RAW MATERIAL OF KARELIA REGION

The article contains the results of analysis of raw quartz of different genetic types that can be found in three macrostructures in Karelia: the Belomorski mobile belt, the Karelian craton and Svecofennian geological block. It shows the diversity of genetic types of quartz formations in the territory of Karelia. The quartz-containing rocks (metasomatites) and recrystallized quartzites have been studied as potential sources of quartz material of various applications. The typical mineralogical-petrographical and geochemical specific features of different genetic types of quartz formations in the territory of Karelia depending on the conditions of their geological formation have been analyzed.

A special attention has been given to investigation of the typomorphic properties of quartz which is an important preliminary assessment of washability of the quartz material, of selection of the processing technology and rejection of the material that is unsuitable for separation. A comprehensive approach is demonstrated in investigation of the typomorphic properties of quartz of different genetic types which permits not only to characterize the specific features of the raw quartz but also to forecast the quality of the quartz concentrates.

Ключевые слова: кварцевое сырье, генетический тип кварца, минерагения, жильный кварц, пегматиты, кварциты, типоморфные свойства, газовой-жидкие включения, структурные примеси.

Введение

Кварц (кремнезем) является широко распространенным в земной коре минералом. Благодаря своим уникальным свойствам – высокой светопрозрачности, химической стойко-

сти, огнеупорности, способности образовывать различные эвтектики и химические соединения, обладающие ценными техническими свойствами, – он находит применение во многих, в том числе наукоемких отраслях промышленности.

Кварцевое сырье – это кварцсодержащие породы, из которых кварц может быть извлечен как полезный компонент. Области применения определяются вещественным составом, структурой, физико-механическими свойствами и обогатимостью сырья.

Кварцевое сырье относится к стратегическим видам минерального сырья. По сферам использования в промышленности оно подразделяется на плавочное сырье, кварц для варки стекол, шихтовый для синтеза монокристаллов и кристаллосырье – горный хрусталь и морион.

Требования к исходному сырью предъявляются только для пьезооптического кварца, участки кристаллов которого должны быть лишены трещин, свиелей, включений и двойников. Строгих качественных ограничений к остальным природному сырью нет. Требования предъявляются к промпродуктам (или концентратам) в виде кусков, крошки, крупки, которые получают в результате применения различных процессов обогащения кварцевого сырья. Качество промпродуктов регламентируется требованиями значительного числа ОСТов и ТУ, предъявляемыми заводами-потребителями, где в основном лимитируются содержания элементов-примесей, минеральных примесей, газо-жидких включений (газонасыщенность) и гранулометрический состав.

Пьезосырье является наиболее дорогостоящим. Основные направления использования пьезокварцевых пластин – высокочастотные резонаторы для подвижной радиосвязи, кварцевые фильтры радиоаппаратуры, радарные и радиопередающие устройства, телекоммуникационная аппаратура, высокочастотные кварцевые генераторы и генераторы-термостаты, линии задержки радиоимпульсов и т. д. (Шатов, Зюзин, 1998). В последнее время природный кварц в основном заменяется искусственными кристаллами, которые выращиваются в специальных ростовых лабораториях.

Наиболее дефицитным и также дорогостоящим в настоящее время является плавочное сырье – высокочистые кварцевые концентраты («особо чистый кварц» – ОЧК) (Мусафронов, Серых, 1997), которые используются для изготовления однокомпонентного кварцевого стекла. Такое стекло обладает уникальной комбинацией химических, механических, термических и оптических свойств, обусловивших широкий спектр его применения в различных приборах и процессах, где ему практически нет замены (светотехническая, полупроводниковая, волоконно-оптическая промышленность).

Основная часть кварцевого сырья используется для варки различных многокомпонентных стекол. Существует большое число сортов стекла, изготавливаемых для разных целей, – оконное, бутылочное, хрустальное, лабораторное, оптическое и др. Главный потребитель кварцевого стекла сегодня – строительная индустрия.

Важным компонентом, получаемым из кварцевого сырья и пользующимся повышенным спросом, является сверхчистый металлический кремний, который применяется в производстве электротехнических изделий, солнечных батарей и приборов микроэлектроники (Ясманов, Юрьев, 2000).

Россия является одной из немногих стран мира, которые обладают собственной минерально-сырьевой базой (МСБ) кремнезема различного назначения, в том числе и для производства ОЧК. Однако запасы различных видов сырья не одинаковы. В России выделены три основные кварценозные провинции – Уральская, Карело-Кольская и Прибайкальская (Тохтасьев, 1992). МСБ кварцевого сырья включает месторождения пьезооптического кварца, горного хрусталя, прозрачного рекристаллизованного и гранулированного кварца для плавки, молочно-белого кварца для стекловарения и кварцитов (Государственный баланс запасов..., 1997). Долгое время основным районом добычи кварцевого сырья была Уральская кварценозная провинция. Большая часть запасов кварцевого сырья, в том числе для плавки, сосредоточена именно там. Однако, несмотря на значительные разведанные запасы кварцевого сырья для плавки, кварцевая отрасль в настоящее время фактически осталась без активных запасов сырья. Это прежде всего связано с возросшими требованиями к кварцевым концентратам, что определяется ужесточением требований к качеству конечной продукции. Проведенная в последние годы геолого-экономическая переоценка запасов кварцевого сырья на территории России показала, что: 1) теоретический фонд высокочистого плавочного сырья хватит на 3 года, а рядовым плавочным сырьем РФ обеспечена на 12–13 лет; 2) при обеспеченности теоретическими запасами кварца для синтеза искусственных кристаллов активный фонд данного сырья составляет не более 10 лет, при этом число потребителей постоянно возрастает; 3) запасы кварца, используемого для варки многокомпонентных стекол, обеспечивают отечественную промышленность на длительную перспективу (200–300 лет).

Таким образом, актуальность исследований кварцевого сырья на территории Карелии обусловлена экономической ситуацией, сложившейся в кварцевой отрасли в настоящее время, а также благоприятными геологическими (наличие мощной коры континентального типа, проявления полихронного метаморфизма от зеленосланцевой до гранулитовой фации, разнотектонической активности) и экономико-географическими (удобное расположение района и развитая инфраструктура) предпосылками.

Традиционно состояние минерально-сырьевой базы кварцевого сырья территории Карелии связывается с пегматитами Чурино-Лоухского района, где выявлены и утверждены запасы

кварца для использования в производстве оптического стекла, синтезе искусственных кристаллов и кварцевой керамике. Что касается вообще всей территории, то в 1960–1970-е годы в Карелии изучались и оценивались кварцевые образования участка Фенькина-Лампи и кварциты месторождения Метчангъярви 1 и 2 для использования в металлургическом производстве, а еще ранее пегматиты северного Приладожья при поисках мориона. Широкомасштабные региональные исследования кварцевого сырья на территории Карелии проводились в 1995–2000 гг. Институтом геологии Карельского научного центра РАН совместно с Северной поисково-разведочной экспедицией по проекту «Прогнозно-минералогическое изучение Республики Карелия в масштабе 1 : 1 000 000 с целью выявления объектов, перспективных на минеральное сырье для производства специальных кварцевых изделий». Проведено ревизионное обследование и опробование потенциально перспективных участков, составлена прогнозно-минералогическая карта кварценоности Республики Карелия в масштабе 1 : 1 000 000 с выделением промышленно-генетических типов кварца. Результаты исследований показали большой потенциал не только традиционно известной Беломорской провинции, но и всей территории Карелии, основную часть которой занимает Карельский кратон.

Основные генетические типы кварцевого сырья

Территория Карелии согласно принятой схеме соподчиненности кварценозных площадей и объектов (Жильный кварц Урала., 1995) является частью Карело-Кольской кварценозной провинции. Минералогическое районирование Карелии на кварцевое сырье связано с глубинным строением региона. На ее территории выделены структуры первого порядка (субпровинции) – крупные мезоструктуры Беломорский подвижный пояс, Карельский кратон и Свекофеннский геоблок (Щипцов и др., 2001). История геологического развития данных территорий, формирование определенных геолого-фациальных комплексов определяют специфику кварцевого сырья каждой из мезострук-

тур. В результате изучения ряда месторождений и проявлений кварцевого сырья на территории Карелии выделены основные генетические типы в пределах этих мезоструктур. В качестве новых генетических типов для данного района выявлены сливные кварциты, кварцевая галька и кварцевые метасоматиты, которые являются нетрадиционными источниками добычи кварцевого сырья.

В пределах Беломорского подвижного пояса выделяются следующие генетические типы кварцевого сырья: пегматитовый, силекситовый, жильный и кварцевая галька.

На минерагению кварца Беломорского подвижного пояса, сложенного наиболее древними породами архея, оказали влияние коллизионные процессы свекофеннского периода, когда на рубеже 2,0–1,8 млрд лет все породы беломорского комплекса претерпели интенсивный диафорез эпидот-амфиболитовой фации высоких давлений (кианит-гранат-биотит-мусковитовая субфация), результатом которого стали проявления метасоматоза и пегматитогенеза свекофеннского периода. С ним прямым образом связаны пегматиты, силекситы и кварцевые жилы, образованные главным образом в ранне-свекофеннский и позднесвекофеннский этапы метаморфической эволюции коллизионных режимов Беломорской структуры (Гродницкий, 1982). Сформировались месторождения и проявления пегматитов, образующие Беломорский пегматитовый пояс. Среди них известны разрабатываемые месторождения пегматитового кварца мусковитовых и керамических пегматитов: Хетоламбино, Малиновая Варакка, Плотина, Карельское и Чкаловское. Средние содержания элементов-примесей в кварце этих месторождений представлены в табл. 1.

Научно-исследовательские, опытно-экспериментальные работы и промышленные испытания пегматитового кварцевого сырья, проводившиеся в 1980-х и 1990-х годах (Родионов, 1986; Ярмак, Кокконен, 1990; Базурин, Дейкун, 1986, 1987; Салтыков и др., 1984, 1985, 1990), показали принципиальную пригодность ряда природных типов кварца пегматитовых жил. ГОК «Карелслюда» проводил отработку по трем направлениям: для плавки прозрачного кварцевого стекла, варки высококачественного многокомпонентного оптического стекла и

Таблица 1. Среднее содержание элементов-примесей в пегматитовом и силекситовом кварце Беломорского подвижного пояса, ppm

Месторождение	Al	Fe	K	Na	Ti	Li	Ca	Mg	Cu	Сумма
Хетоламбино*	27,9	5	13,3	34,4	11,9	5,1	17,6	0,5	2,7	118,4
Малиновая Варакка*	59,85	20,85	10,4	31,3	3,45	2,65	33,85	3,4	1,1	166,85
Плотина*	78	12	11	42	1	1,7	12	0,5	2	160,2
Летняя Варакка*	39,95	2,05	12,25	22	2,5	2,65	8	0,65	0,45	90,5
Карельское**	98,1	0,1	8,3	15,4	11,3	4,9	8,1	0,2	0,1	146,5
Чкаловское***	116,5	15,6	11,8	142,0	5,6	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	291,4
Пиртостров**	111,75	25,13	9,75	51,43	5,75	5,5	5,35	1,25	1	216,9

Примечание. Анализы по данным: * – Салтыков и др., 1990ф; ** – Tatsumori Corp. (Япония); *** – Analytica AB (Швеция).

синтеза искусственных кристаллов кварца. В настоящее время только небольшие партии поставляются ЗАО «Чупа-Кварц» с использованием отвалов рудника Малиновая Варакка.

На побережье Белого моря установлены залежи пляжно-галечных отложений, которые являются уникальным источником кварцевого сырья, поскольку их добыча не требует проведения горных работ и не нарушает экологию. Галечные россыпи образуют пляжи шириной до 30 м и длиной до 500 м в Двинской губе, Жемчужной губе, Лодейной губе и в районе мыса Одинчижный. Прибрежные галечные кварцевые отложения примерно на 47% представлены белым и светло-серым полупрозрачным кварцем с довольно высоким коэффициентом светопропускания (рис. 1). Остальной галечный материал в основном представлен кварцем с включениями минералов, непрозрачными и окрашенными разностями. Коэффициент светопропускания варьирует от 55 до 77%. Источником формирования пляжно-галечных россыпей, по всей видимости, являются кварцевые жилы, находящиеся вблизи береговой линии. Часть таких жил обнаружена в районе Кювиканды и Пижострова. Жилы представляют собой небольшие тела, мощностью до 1–2 м и протяженностью первые десятки метров, залегают в габбро-пироксенитах, серых амфибол-биотитовых гнейсах, полевошпатовых амфиболитах, розовых гранито-гнейсах. Кварц в жилах варьирует по цвету и структурно-текстурным особенностям, часто содержит ми-

неральные включения (полевые шпаты, кальцит, сульфиды).

Кроме того, кварцевые жилы были изучены в районе ст. Шуерецкой, в пределах месторождения гранатов Тербеостров. Образование кварцевых жил на данном участке связано с проявлением кислотного выщелачивания в основном кианит-кварцевой фации, которое проходило наряду с железо-магнезиальным метасоматозом. Кварц белый и дымчатый со всеми оттенками перехода, просвечивающий до полупрозрачного. Коэффициент светопропускания довольно высокий, варьирует от 86 до 96%. Характерно наличие собирательной перекристаллизации с образованием местами гранулированного кварца. Средние содержания элементов-примесей в жильном кварце и кварцевой гальке Беломорья представлены в табл. 2.

Характерной особенностью является повышенное содержание Са, Ti в кварце и низкие содержания Li (кроме жильного кварца Кювиканды).

Важную роль для формирования кварцевых образований на территории Карелии имела тектоно-магматическая активность свекофеннского периода, которая наиболее интенсивно проявилась в пределах зоны сочленения Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса, а также за пределами Карельского кратона – в Ладожском геоблоке. С данной активностью в пределах Парандово-Тикшеозерского зеленокаменного пояса связано формирование пояса слюдоносно-редкометалльных пегматитов, в

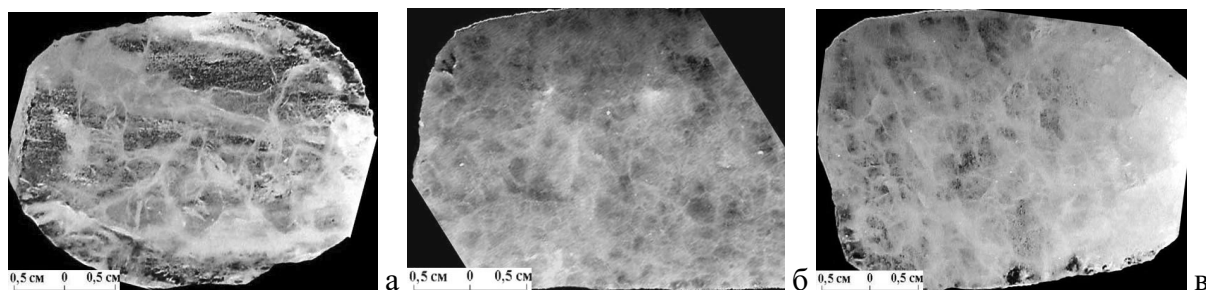


Рис. 1. Кварцевая галька (фото пластинок):

а – полупрозрачный кварц Двинской губы, б – гранулированный кварц мыса Одинчижный, в – просвечивающий кварц Лодейной губы

Таблица 2. Средние содержания элементов-примесей в жильном кварце и кварцевой гальке побережья Белого моря, ppm

Участок	Al	Fe	K	Na	Ti	Li	Ca	Mg	Cu	Cr	Mn	Ni	Сумма
	Жильный кварц												
Кювиканда	79,5	5,05	53	32	13,5	5	34,5	2	1	0	0	0	225,6
Пижостров	67,3	29	23	50,7	9,9	0,3	108	73	0,2	0,1	0	0	361,4
Рябоярви	110	15,3	34	11,3	30	0,5	50	3,8	0,1	0,5	0,1	0,2	255,8
Шуерецкое	50,7	11,8	4	22,2	7,5	0,8	13,8	6,7	0,5	1,0	0,5	0,7	120,0
	Кварцевая галька												
Двинская губа	50,2	7,50	14,5	23,8	12,0	0,3	46,8	3,9	0,3	0,6	0,8	0,2	160,9
Жемчужная губа	26,6	9,5	9,8	29,7	5	0,9	76	4,4	0,1	0,5	0,1	0,2	162,8
Лодейная губа	45	5	14,23	24	9,4	0,7	37,7	1,9	0,4	0,7	0,4	0,1	139,6
Мыс Одинчижный	66,5	7,1	13,7	10,6	22,9	0,2	7,5	1,3	0,3	0,5	0,1	0,2	130,9

Примечание. Анализы выполнены в лабораториях ВНИИСИМС (г. Александров), Tatsumori Corp. (Япония).

которых наблюдается блоковый и ядерный кварц (Пиртима, Рябовара), а также образование кварцевых жил с гранулированным кварцем (Рухнаволок, Хизоваара). Северо-Карельская зона (Кукасозерский сегмент) претерпела при этом интенсивные тектонические преобразования, характеризующиеся М. Г. Леоновым с соавторами как процессы «сплющивания и нагнетания с преимущественно горизонтально-продольным сдвиговым тектоническим течением» (Очерки..., 2001, с. 22). Эти процессы обусловили интенсивную метасоматическую переработку ятулийских кварцитов в пределах северной части Парандово-Тикшеозерского зеленокаменного пояса с образованием пластов сливных кварцитов и кварцевых жил в них (Кукасозеро, Степаново озеро).

Кварцевые жилы с гранулированным кварцем локализованы на трех участках: Рухнаволок, Хизоваара, Кукасозеро в пределах Парандово-Тикшеозерского зеленокаменного пояса.

Формирование их происходило в условиях эпидот-амфиболитовой фации повышенных давлений с проявлениями перекристаллизации и грануляции кварца в результате диафореза с образованием гранулированного кварца с гранобластовой равновесной и неравновесной структурой (рис. 2). Для данного кварца типично невысокое содержание элементов-примесей (табл. 3), варьирующее в различных типах (гранулированном, перекристаллизованном или гранулированном с наложенными деформационными изменениями), но в целом остаются высокими содержания Тi. Интересные закономерности наблюдаются по отношению к Li: наименьшее содержание Li характерно для негранулированного сливного кварца или гранулированного кварца с интенсивно проявленными пластическими деформациями (0,2–0,9 ppm). Наиболее высокие концентрации Li (до 4,7 ppm) наблюдаются в гранулированном кварце с равновесной гранобластовой

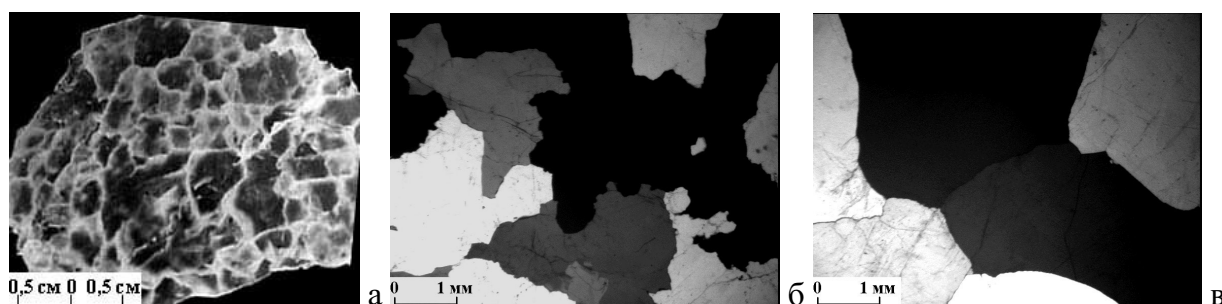


Рис. 2. Гранулированный кварц:

а – фото пластинки; фото шлифов (никколи +); б – равновесная гранобластовая структура; в – неравновесная гранобластовая структура

Таблица 3. Средние содержания элементов-примесей в кварцевом сырье различных генетических типов, ppm

Тип кварцевого сырья	Участок	Al	Fe	K	Na	Ti	Li	Ca	Mg	Cu	Cr	Mn	Ni	Co	Сумма
Слюдоносно-редкометалльные пегматиты	Пиртима	28	2,9	2,5	6,6	7,4	0,84	11	1,2	1,6	0,05	0,12	0,03		62,24
Керамические пегматиты	Кюръяла	150	42,5	7,5	93,5	5,5	5	21,6	2	2					329,6
Кварц-кианитовые метасоматиты	Хизоваара	233	9,5	5	54	20,3	5	7,9	1	1					336,7
Жильный кварц	Рухнаволок	31,1	1,9	4,6	22,8	4	2,1	8,3	0,4	0,4	0,6	0,4	0,6	1	78,2
	Хизоваара	49,5	2	7,9	10	9,9	3,2	5,4	0,9	0,6	0,6	0,2	0,6	1	91,8
	Кукасозеро	73,7	7,5	3,9	22,7	5,6	0,7	26	7,7	0,5	0,7	0,5	0,1		149,9
	Койкары	94,5	4,2	21,5	90	0,6	0,1	28	2,5	0,2	0,2				241,8
	Шайвозеро	33,2	6,1	25,4	56	2,1	0,4	20	2,3	0,4	1	0,2	1		114,9
	Корпиярви	21	2,2	5,3	20	2,1	1	21	1	1	1	1			67
	Ихиярви	32	13	8,3	37	1	1	25	1	1	1	1,2			112
Кварцитовый	Фенькина-Лампи	47,9	12,2	29,2	74,0	2,0	0,4	24,1	16,0	0,2	0,9	0,6	1	1	209,1
	Метчангьярви	380	85	250	21	56	0,1	11	45	0,2	1,8				850,1
	Кукасозеро	790	23	81	420	3,7									1318
Кварцитовый перекристаллизованный	Кукасозеро	110	160	480	81	26									857
	Степаново озеро	87	6,3	15,5	95	12	0,3	7,7	5,6	0,2	1	0,2	1	1	232,8

Примечание. Анализы элементов-примесей сделаны в лабораториях ВНИИСИМС (г. Александров), Tatsumori Corp. (Япония), Analytica AB (Швеция).

структурой. Вариации содержания Li зависят от степени грануляции кварца и интенсивности вторичных деформационных изменений.

Особенностью жильного кварца Парандово-Тикшеозерского зеленокаменного пояса является наличие газово-жидких включений с углекислотой, что говорит о повышенной углекислотности кварцобразующих растворов (рис. 3).

Преобразование ятулийских кварцитов в пределах Парандово-Тикшеозерского зеленокаменного пояса характеризуется перекристаллизацией кварца с образованием структур капельного бластеза, грануляционной мозаичности (рис. 4), уменьшением содержания минеральных примесей и рафинированием химического состава кварцитов. Среднее содержание элементов-примесей в сливных кварцитах значительно ниже, чем в обычных кварцитах, наблюдаются повышенные концентрации Al, Na и Ti (табл. 3).

С регрессивной стадией регионального метаморфизма, проявившейся в более поздний свекофеннский период (1,95–1,65 млрд лет), связаны процессы кислотного выщелачивания. Данные процессы имели большое значение в формировании кварценозных пород, в частности, в пределах Хизоваарской структуры (Парандово-Тикшеозерский зеленокаменный пояс), где по породам основного и среднего состава образовались кварц-кианитовые, кварц-гранатовые и кварц-мусковитовые метасоматиты, а также кварцевые жилы как конечный продукт эволюции метасоматических растворов (Глебовицкий, Бушмин, 1979). Содержание кварца в данных породах в среднем составляет 60–70%. В качестве второстепенных минералов присутствуют кианит, мусковит, биотит, плагиоклаз, аксессуарные – турмалин, рутил, сфен, апатит, графит, сульфиды (рис. 5). Породы характеризуются очень малым содержанием газово-жидких

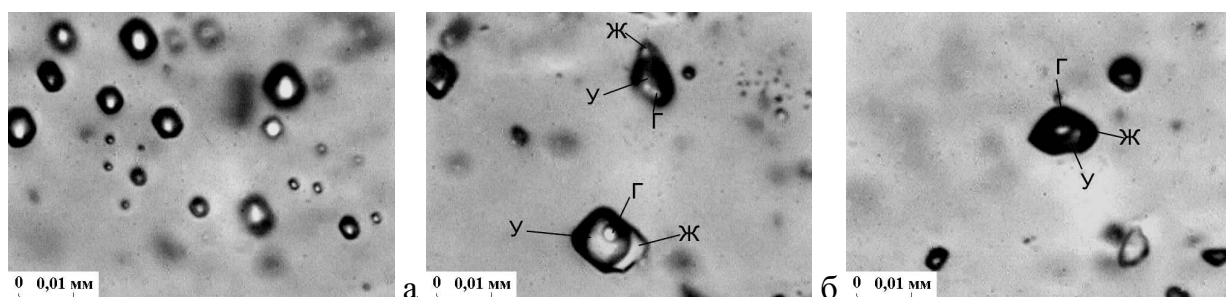


Рис. 3. Газово-жидкие включения в рекристаллизованном и гранулированном кварце Парандово-Тикшеозерского зеленокаменного пояса:

а – включения сухих газов (газообразная углекислота); б – углекисловодные включения (Рухнаволок); в – углекисловодные включения (Хизоваара)

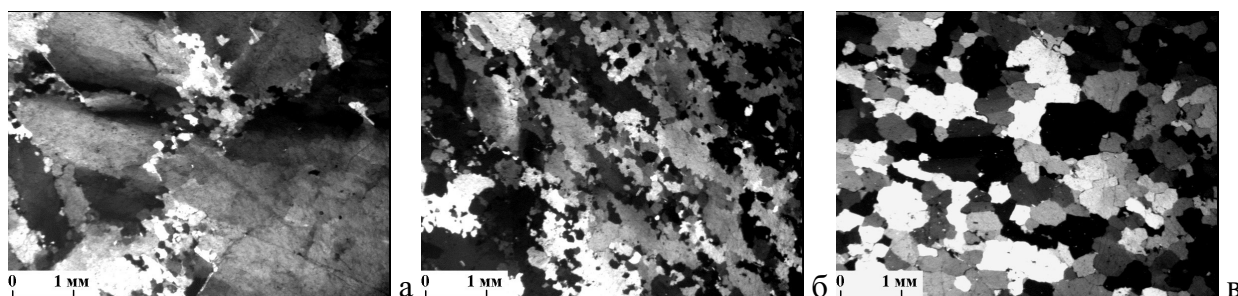


Рис. 4. Сливные кварциты, микроструктуры (фото шлифов, николи +):

а, б – грануляционная мозаичность (Степаново озеро); в – структуры капельного бластеза (Кукасозеро)

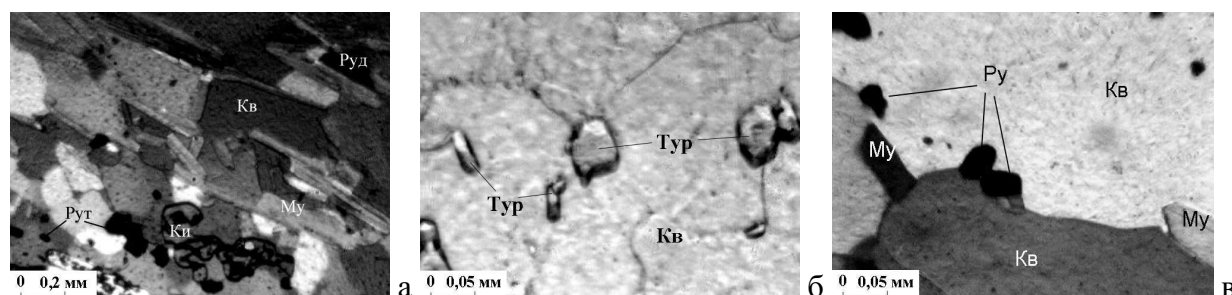


Рис. 5. Минеральные ассоциации в кварцевых метасоматитах Хизоваарской структуры (фото шлифов)

включений, но высокими концентрациями элементов-примесей, особенно Al, Ti, Na и Li (табл. 3), что связано в основном с минеральными включениями. С развитием процессов мусковитизации наблюдается исчезновение Ti-содержащих минералов (рутил и сфен) и появление сульфидов, что связано с изменением геохимической обстановки.

В пределах Карельского кратона формирование жильного кварца также обусловлено проявлениями Свекофеннского тектоногенеза, который характеризуется локальными проявлениями дизъюнктивной тектоники, с чем связаны гранитизация, окварцевание пород и образование кварцевых жил в пределах Тухальского домена (Корпьярви, Ихиярви), катаклиз и низкотемпературная метасоматическая переработка жильного кварца участка Шайвозеро (Северная Карелия). Блоковыми движениями в Кумсинской синклинали (Центральная Карелия) можно объяснить появление трещин растяжения и

формирование крупных кварцевых жил (Фенькина-Лампи). Интенсивность проявления метаморфизма уменьшается по направлению с севера Карельского кратона на юг.

Жильный кварц большинства кварцевых жил Карелии отличается по своим свойствам от жильного кварца Парандово-Тикшеозерского зеленокаменного пояса. Данный кварц характеризуется наличием большого количества газо-жидких включений, что делает его интенсивно замутненным до молочно-белого (рис. 6). В кварце проявлены деформационные процессы с образованием факелов, пластинок и поясов деформации, а также процессы вторичной рекристаллизации с образованием фрагментарного и мозаичного кварца (рис. 7). Кварц-образующие растворы характеризуются водно-солевым составом: наблюдается наличие водно-солевых включений различного процентного содержания и различных генераций в жильном кварце Центральной Карелии (рис. 8).

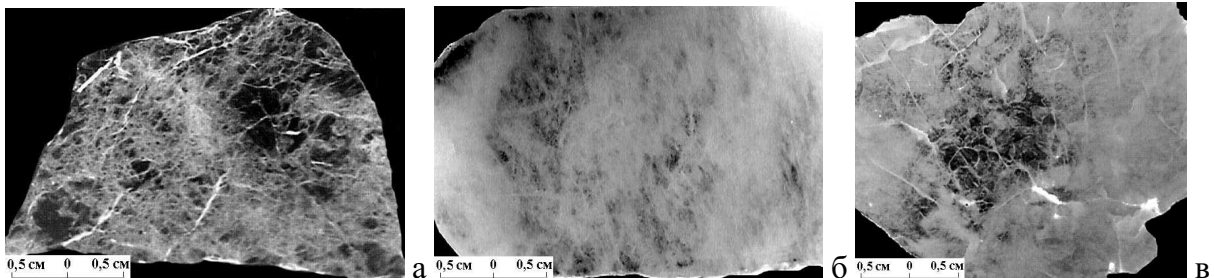


Рис. 6. Молочно-белый кварц (фото пластинок):

а – Корпьярви, б – Ихиярви; в – Фенькина-Лампи

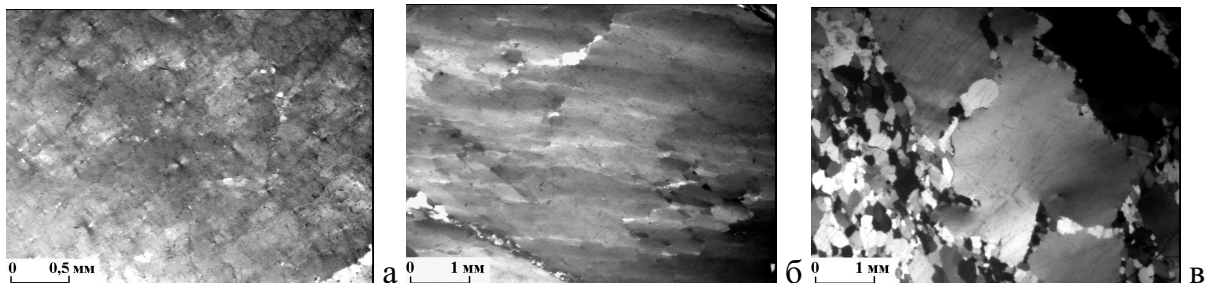


Рис. 7. Микроструктуры жильного кварца 2 (фото шлифов, николи +):

а – факелы и пластинки деформации (Койкары), б – фрагментарная микроструктура (Корпьярви), в – вторичная рекристаллизация (Корпьярви)

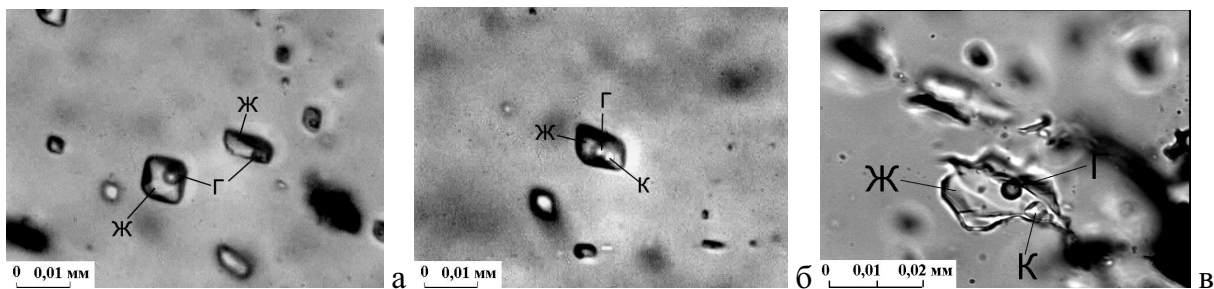


Рис. 8. Газово-жидкие включения (фото шлифов):

а – включения водных растворов с содержанием газовой фазы около 10% (Койкары); б – включение водных растворов с мелким кристалликом галита (Койкары); в – многофазное включение с большим количеством твердой фазы (Фенькина-Лампи)

Содержание элементов-примесей в данном кварце выше, чем в гранулированном, но содержание Ti и Li значительно ниже (табл. 3).

В пределах Карельского кратона широко развиты кварцитовые образования, входящие в состав мощной осадочной толщи нижнего ятулия. Они образуют узкие субмеридионально вытянутые полосы в центральной части Карелии. Осадочные толщи нижнего ятулия включают в себя по три или четыре литолого-стратиграфические пачки мощностью от 300 до 1200 м, сложенные кварценосными породами (кварцевые конгломераты, гравелиты, песчаники, кварциты, серицит-кварцевые сланцы), среди которых выделяются кварциты нижнего ятулия с содержанием кварца до 99%. Мощность данных пород изменяется от первых метров в районе Медвежьегорск – пос. Гирвас до 1000 м и более в центральных структурах Западной Карелии. Здесь известны месторождения кварцитов Метчангъярви, Нестерова Гора, Боконвара, Шалговара.

Кварциты сложены, как правило, хорошо окатанными и хорошо сортированными зернами кварца размерами 0,02–0,2 мм до 0,6 мм (рис. 9). Широко развита регенерация зерен кварца и бластез, в результате чего образуется гранобластовая зубчатая или порфиробластовая структура (размеры порфиробластовых зерен до 0,9 мм). Характерной особенностью данных кварцитов является почти мономинеральный кварцевый состав. Цемент кварцевый и серицито-кварцевый. В качестве минералов-примесей встречаются хлорит, гематит, циркон, рутил, сфен, турмалин, апатит, биотит, пироксен, эпидот, магнетит. Зерна кварца, как правило, имеют субпараллельную ориентировку, как и крупные зерна серицита.

Среднее содержание SiO₂ в кварцитах Метчангъярви – 97,8%. Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах из кварцитов после магнитной сепарации и кислотооттирки остается довольно высоким (табл. 3). Высокие содержания Ti в кварце Метчангъярви связаны с присутствием волосовидных включений рутила внутри зерен кварца.

В пределах северо-западной части Карельского кратона в архейских гранито-гнейсах Вок-

наволоцкого блока была зафиксирована мощная кварцево-жильная зона субмеридионального простирания (участок Меломайс), которая по своим масштабам является уникальным проявлением кварца на территории Фенноскандинавского щита. Данный участок расположен в пределах Костомукшского железорудного района. Вмещающими породами являются плагиогнейсо-граниты фундамента лопийских пород, слагающих Костомукшский зеленокаменный пояс. Кварцевая зона прослеживается около 1 км согласно сланцеватости вмещающих пород, мощность жилы достигает 100 м.

Кварцевая жила интенсивно рассланцована, особенно в краевых частях, где наблюдаются тонкие чередующиеся прослои мелкозернистого кварцевого материала и материала полевошпат-слюдисто-эпидотового состава, приуроченного к субпараллельным плоскостям рассланцевания. Цвет кварца слегка варьирует от светло-серого до серого, практически не просвечивает, в тонких сколах видна полосчатость за счет большого количества субпараллельных трещин (рис. 10, а). Микроструктуры кварца характеризуются проявлением взаимопроникновения зерен, линейной и неравномерной блочностью, мозаичностью с разориентировкой микроблоков (рис. 10, б). Характерно проявление наложенной минерализации по зонам рассланцевания и приуроченной к этим зонам вторичной рекристаллизации кварцевых зерен вблизи трещин с образованием агрегата полигональных гранул с четким погасанием, ровными, иногда размытыми границами (рис. 10, в).

Химические анализы природного жильного кварца участка Меломайс показали среднее содержание SiO₂ 97,3%. От приконтактной части жилы к ее центральным частям постепенное увеличивается содержание SiO₂ и уменьшается содержание примесей. Содержание элементов-примесей в кварце после операций обогащения (магнитная сепарация и выщелачивание) остается довольно высоким, особенно Al (табл. 4). Это связано с присутствием в кварце микровключений минералов, в основном мусковита. По данным химических анализов, природный необогащенный кварц участка

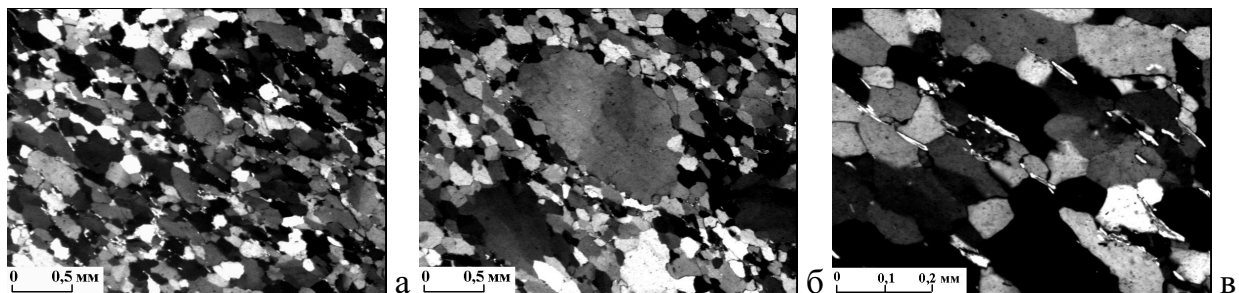


Рис. 9. Кварциты месторождения Метчангъярви-2 (фото шлифов, николи +):

а – микрогранобластовая структура, б – порфиро-гранобластовая структура, в – субпараллельная ориентировка зерен серицита

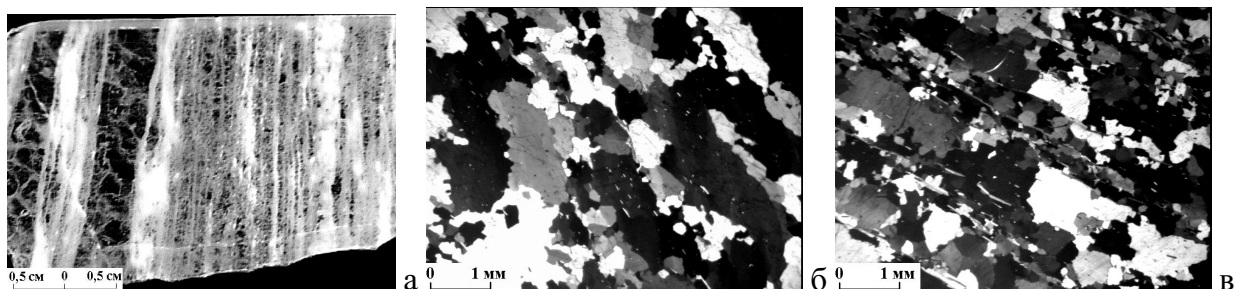


Рис. 10. Жильный кварц участка Меломайс:

а – полосчатость в тонком сколе кварца (фото пластинки); б – взаимопроникновение зерен кварца; в – наложенная минерализация и вторичная рекристаллизация по зонам рассланцевания (фото шлифов, николи +)

Таблица 4. Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах из жильного кварца участка Меломайс, ppm

Номер пробы	Al	B	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Ti	Zr	Сумма
Мел-1	64	0,1	2,33	0,04	0,06	4,77	29	0,86	2,68	0,07	4,4	1,1	0,18	109,29
Мел-27	54	0,14	3,24	0,03	0,07	5,84	27	0,44	5,25	0,08	3,8	1,3	0,54	101,40

Примечание. Обогащение кварца и анализы выполнены в лаборатории ОАО «Полярный кварц» (Москва).

Меломайс пригоден для использования в стекольном производстве (светопрозрачные и бесцветные изделия). Кварцевое сырье данного участка также является пригодным для получения кристаллического кремния.

На минерагению кварца Ладожского геоблока существенное влияние оказали метаморфизм и гранитизация свекофеннского периода. С формированием гранитных интрузий генетически связаны редкометалльно-редкоземельные и керамические пегматиты Питкярантского и Куркилахтинского пегматитовых полей, включая синхронные с ними кварцевые жилы, образующие в обстановке коллизионного режима. Мусковит-редкометалльные пегматиты и кварцевые жилы, залегающие в восточной береговой зоне залива Мурсуланлахти (полуостров Куйваниеми), и редкоземельно-редкометалльные пегматиты участков Нуолайниемеи и Люппико, а также пегматиты о. Соролонсари занимают секущее положение по отношению к сланцеватости вмещающих амфиболитов и гранито-гнейсов, им свойственно наличие блоковых участков и ядерных кварцевых зон (Гродницкий, 1982).

Характерной чертой пегматитов является широкое проявление процессов кислотного выщелачивания на поздних стадиях их становления, что выражено образованием мусковита, турма-

лина и окварцеванием. Кварцевые ядра пегматитов участков Люппико, Соролонсари и Нуолайниемеи сложены молочно-белым и светло-серым кварцем, местами до дымчатого, иногда в сростании с хлоритом, полевым шпатом, серицитом, встречаются также рудные минералы. В занорышах наблюдаются небольшие кристаллы молочно-белого и дымчатого цвета. Структуры кварца варьируют от крупнозернистой гранобластовой в пегматитовом кварце участка Соролонсари до бластокатакластической, мозаичной в кварце из пегматитов Нуолайниемеи и Люппико.

Кварцевые жилы и ядра пегматитов на участке Мурсула сложены серым просвечивающим и дымчатым полупрозрачным кварцем. В качестве минеральных примесей присутствуют серицит, флогопит, микроклин, плагиоклаз, рудные минералы. Кварц частично перекристаллизованный с укрупнением зерен, слабо трещиноватый.

Особенностью жильного и пегматитового кварца данного района является наличие газво-жидких включений с углекислотой в пегматитовом кварце. Данные содержания элементов-примесей в жильном и пегматитовом кварце приведены в табл. 5. Характерны повышенные концентрации Ti в кварце, особенно в пегматитах. Отмечается довольно высокий коэффициент светопропускания кварца.

Таблица 5. Содержание элементов-примесей в различных типах кварца Свекофеннского геоблока, ppm

Место отбора	Al	Fe	K	Na	Ti	Li	Ca	Mg	Cu	Cr	Mn	Ni	Mo	Sb	V	Co	Сумма	T _{ср} , %
Жильный кварц																		
Мурсула**	66	9,5	23,7	24	5,6	0,3	10	2,9	1,8	1	0,2	1	–	–	–	1	146,5	89
Пегматитовый кварц																		
Мурсула*	66	18	11	20	13	1	16	5,9	1	1	1	–	–	5	1	–	159,9	79
Нуолайниемеи*	85	7,3	12	11	13	4,6	8,6	1,6	1	1	1	–	1	10	1	–	158,1	83
о. Соролонсари*	150	7,7	16	37	11	1	11	1	1	1	1	–	1	5	1	–	244,7	65

Примечание. Анализы выполнены в лабораториях: * – Tatsumori Corp. (Япония), ** – ВНИИСИМС (г. Александров); прочерк – не определялось.

С рифейской формацией гранитов-рапакиви также генетически связано образование пегматитов. Пегматитовые жилы Улягского и Питкярантского массивов рапакиви характеризуются присутствием гнезд с кристаллами мориона, топаза и полевого шпата. В 1940-х годах Питкярантской партией проводились работы по изучению пегматитов и добыче мориона.

Кроме того, с проявлениями регионального метаморфизма андалузит-силлиманитового типа и метасоматоза силлиманит-кварцевой и андалузит-кварцевой фаций связано образование сливных кварцитов и кварцевых жил метаморфогенно-гидротермального происхождения, образованных в результате преобразования кварцитов и кварцито-песчаников ятулия. Кварцевые проявления данного типа наблюдаются в районе оз. Малое Янис-ярви (Питкяниemi, Кухинас-Лампи). Кварцевые жилы, сложенные молочно-белым кварцем, залегают в хлорит-биотит-кварцево-серицитовый порода по габбро-диабазам между мысом Питкяниemi и Хапаниemi. Кварциты имеют полосчатое строение, содержат полосы сливных кварцитов молочно-белого цвета, сложенных рекристаллизованным кварцем.

Структурно-текстурные особенности кварцитов Питкяниemi и Кухинас-Лампи несколько варьируют, содержание минеральных примесей (в основном серицита и биотита) составляет около 5%, в качестве аксессуарных присутствует рутил и апатит. Кварциты характеризуются порфиристо-гранобластовой структурой и сланцеватой текстурой. По химическому составу кварциты данного района варьируют в различных пробах. Наиболее чистые кварциты близки по составу к ятулийским кварцитам месторождения Метчангъярви (табл. 6).

Типоморфные свойства кварца

Типоморфные особенности минералов в первую очередь зависят от условий минералообразования, характеризуемого многофакторностью процессов кристаллизации, что в конечном итоге сказывается на качественной характеристике полезного компонента, в частности, технологических свойствах. Данное обстоятельство определяет выбор технологических схем обогащения. В связи с этим в последнее время технологическая минералогия получила широкое развитие. Благодаря трудам В. И. Ревнищева, В. М. Изоитко, Б. И. Пирогова, О. Б. Дудкина

и других заложены основные принципы влияния на переработку руд геолого-минералогических факторов. В полной мере их можно использовать и для кварца, учитывая при этом специфику кварцевого сырья как практически мономинеральной породы. В данном случае основной целью является не выделение полезного компонента из породы на основе контрастных свойств разных минералов, а его очистка от вредных примесей, к которым относятся минеральные (глинистые, зернистые, пленочные), газожидкие и структурные примеси.

Традиционно качество кварцевого сырья оценивается по существующим ГОСТам и ТУ на различные виды кварцевой продукции. Наиболее дефицитным и дорогостоящим в настоящее время является кварц для плавки, поскольку к нему предъявляются жесткие требования по содержанию элементов-примесей, минеральных и газожидких включений, которые значительно снижают свойства прозрачного стекла. В России качество кварцевого концентрата для плавки прозрачного кварцевого стекла определяется «ТУ 5726-002-11496665-97», где лимитируются содержания элементов-примесей, высокотемпературной воды, минеральных примесей и влаги, коэффициент светопропускания. Однако зачастую этих данных бывает недостаточно, чтобы уверенно прогнозировать положительный результат опытных плавок, как правило дорогостоящих. Изучение типоморфных свойств кварца составляет важную стадию определения обогатимости кварцевого сырья, корректировки технологических схем его переработки и отбраковки труднообогатимого сырья.

Таким образом, для прогнозирования качества кварцевого продукта, отбраковки некачественного сырья, а также выявления типоморфных особенностей, способных повлиять на выбор технологии переработки сырья, кроме лимитируемых ТУ характеристик качества кварцевого сырья необходимо рассматривать комплекс следующих типоморфных признаков кварца:

Элементы-примеси

- суммарные содержания
- вариации содержания определенных групп элементов (окрашивающих, щелочных и др.)

Структурно-текстурные особенности

- структура (однородная, неоднородная, равномернозернистая, гетеробластовая, порфировидная и т. д.)

Таблица 6. Химический состав кварцитов участков Питкяниemi и Кухинас-Лампи (исходная порода)

Участок	Номер пробы	Содержание окислов, %											ппп	Сумма
		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		
Питкяниemi	ЯН-5	98,62	0,01	0,33	0,180	0,00	0,006	0,210	0,07	0,08	0,09	0,01	0,05	99,66
	ЯН-6	97,34	0,06	1,08	0,696	0,00	0,008	0,260	0,07	0,05	0,26	0,00	0,16	99,98
	ЯН-7	98,64	0,01	0,39	0,150	0,00	0,005	0,110	0,07	0,08	0,09	0,01	0,10	99,66
Кухинас-Лампи	ЯН-8	90,98	0,09	5,10	0,684	0,00	0,005	0,210	0,07	0,09	1,71	0,05	0,67	99,66
	ЯН-9	97,98	0,01	0,65	0,192	0,00	0,004	0,260	0,07	0,07	0,22	0,02	0,16	99,64

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории Института геологии КарНЦ РАН.

- текстура (однородная массивная, полосчатая, линзовидная, прожилковая и т. д.)

- субструктура (дислокации, деформационное пластинкование, пояса деформации, блокирование и др.)

- форма и размер зерен

Минеральные включения

- виды минералов

- количество, вариации размеров зерен

- форма вхождения

- сростания с кварцем

Флюидные включения

- коэффициент светопропускания

- декрептоактивность

- плотность ГЖВ

- размер ГЖВ

- распределение ГЖВ

- связь ГЖВ с элементами-примесями

Структурные примеси

- параметры элементарной ячейки кварца

- индекс кристалличности и степень кристаллического совершенства

- содержания Al-O-, Ge⁴⁺, Ti⁴⁺ и других парамагнитных центров.

Содержание элементов-примесей в кварце является одной из самых важных характеристик качества кварцевого сырья. Суммарные значения примесей строго регламентируются ТУ как для глубоко обогащенного, так и для предварительно обогащенного сырья. Согласно «ТУ 5726-002-11496665-97» количество элементов-примесей в глубоко обогащенных кварцевых концентратах для плавки не должно превышать 20–30 ppm. Мировой стандарт (I-кварц-стандарт), производимый фирмой Unimin Corporation (США), содержит сумму элементов-примесей 22,3–24,8 ppm, а наиболее глубоко очищенный сорт I_g – 9,5 ppm.

На основе изучения различных типов кварцевого сырья Карелии по содержанию элементов-примесей можно сказать, что наиболее чистым природным сырьем является перекристаллизованный, гранулированный жильный кварц и интенсивно рекристаллизованный жильный кварц. Установлено, что кварц некоторых жил данных типов соответствует маркам КПО (ТУ 5726-002-11496665-97) для плавки кварцевого стекла как предварительно обогащенный (Щипцов и др., 2000ф). Жильный кварц, образованный в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма (Центральная Карелия), характеризуется повышенными концентрациями Al, Na, K, Ca, которые связаны в основном с минеральными примесями и газовой жидкими включениями, но в то же время в данном кварце наблюдаются низкие содержания Li и Ti. Наиболее минерализованные и соответственно наиболее загрязненные природные типы кварца – керамические пегматиты, метасоматиты, кварциты и сливные кварциты. Однако содержание Li, который, по всей видимости, является структурной примесью, очень маленькое в кварцитах и перекристаллизованных кварцитах.

Структурно-текстурные особенности кварца существенно влияют на технологические свойства кварца, особенно в процессах дробления и измельчения, так как они определяют прочностные свойства кварца (твердость, дробимость). Дефектность структуры кварца влияет на адсорбцию поверхностно-активных веществ (эффект Ребиндера), понижая предел упругости и прочность измельчаемых частиц (Справочник..., 1982). В результате в процессе дробления (измельчения) до стандартной фракции –0,5+0,1 мм возможно переизмельчение кварца и увеличение потерь. Кроме того, дефектность структуры кварца может сказываться на температуре полиморфных превращений в кварце при его нагреве и плавлении, что в свою очередь может повлиять на потребительские свойства стекла (Емлин и др., 1988; Jung, 1995).

Важными типоморфными признаками являются субструктуры метабазиса кварца (Кораго, Козлов, 1988), которые характеризуют интенсивность проявленных метаморфических процессов и степень дефектности кварцевых зерен. В кварценозных породах Карелии наблюдаются практически все типы субструктур метабазиса (1, 2 и 3-я степень интенсивности проявлений; табл. 7) (Данилевская, 2000).

Возрастание степени деформации (начиная от факелов и пластинок деформации до полос деформации) приводит к увеличению неоднородности структуры самих зерен кварца. При этом факелы и пластинки деформации, деформационные изгибы и волнистое погасание могут играть негативную роль в процессах дезинтеграции при рудоподготовке, так как возникающая аморфизация кварца в участках микродефектов обладает повышенной сорбцией, растворимостью и концентрирует кислородные ЭДЦ, кроме того, с увеличением дефектности увеличивается растворимость кварца в сильных кислотах, а также при плавлении кремнезема состояния напряжения в кварце способствуют более быстрому образованию фазы кристобалита в местах дефектов (Крылова, 2001ф; Sosman, 1965). Наиболее интенсивно данные процессы проявлены в керамических пегматитах (Кюрьяла), перекристаллизованном, гранулированном (Рухнаволок, Хизоваара) и слабо рекристаллизованном жильном кварце (Койкары). Блокирование и появление полос деформации в кварцевых зернах сказывается на степени измельчения и однородности частиц, что в свою очередь влияет на процессы плавки и свойства стекол. Данные субструктуры в большей степени проявились в интенсивно рекристаллизованном (Корпиярви, Шайвозеро, Ихиярви) и катаклазированном жильном кварце (Фенькина-Лампи) Центральной Карелии.

Дальнейшее увеличение степени метаморфизма (проявление рекристаллизационных процессов) приводит к появлению однородных, недеформированных вторично образо-

Таблица 7. Вариации субструктур метагенеза в различных генетических типах кварца в порядке возрастания степени деформационных процессов

Генетические типы и подтипы кварца	Факелы, пластинки деформации	Деформационные изгибы	Волнистое погасание	Блокование	Полосы деформации	Рекристаллизация	Однородная гранобластовая
Керамические пегматиты	2	2	1	1			
Слюдоносно-редкометалльные пегматиты	1	2	1	2	1		
Кварц-кианитовые метасоматиты			1	1			3
Перекристаллизованный жильный (Рухнаволок, Хизоваара)	2	2	2	2	1	1	2
Гранулированный жильный (Рухнаволок, Хизоваара)	3	3	1–2	1–2			3
Жильный минерализованный (Меломайс)			1	2–3		2	
Слабо рекристаллизованный жильный (Койкары)	3	3	2	2	1		
Интенсивно рекристаллизованный (Шайвозеро, Корпиярви, Ихиярви)			2	2	3	3	
Катаклазированный и рекристаллизованный (Фенькина-Лампи)	1	1	2	3	3	2	2
Кварцитовый			1	1			
Кварцитовый перекристаллизованный			1–2	1–2		1–2	

Примечание. 1 – слабо проявлены, 2 – средняя степень интенсивности, 3 – интенсивно проявлены.

ванных зерен кварца, которые характерны для таких генетических типов, как метасоматиты (Хизоваара), перекристаллизованный и гранулированный жильный кварц (Рухнаволок, Хизоваара), интенсивно катаклазированный и рекристаллизованный жильный кварц (Фенькина-Лампи). Однако перекристаллизованному и гранулированному кварцу свойственно также наличие микродефектности кварцевых зерен (табл. 7).

В результате наименее деформированные зерна кварца, характеризующиеся однородной структурой и малым количеством микродефектов, наблюдаются в метасоматитах, кварцитах и перекристаллизованных (сливных) кварцитах.

Важным типоморфным признаком кварцевого сырья являются виды и формы вхождения минеральных примесей. Минеральные включения понижают однородность кварцевого стекла, резко снижая его светопропускание во всех частях спектра (Щеколдин и др., 1968; Емлин и др., 1988). Содержание минеральных включений лимитируется, в высококачественных концентратах сумма минеральных примесей не должна превышать $n \cdot 10^{-4}\%$. Современные технологии обогащения кварцевого сырья позволяют практически полностью освободиться от минеральных примесей. Труднообогащаемым является кварц, в котором содержатся мелкодисперсные включения минералов (серицита, эпидота, хлорита, кальцита и др.). Практически неудаляемыми остаются только микроскопические включения (<10 мкм), в частности, рутил в тонкоигольчатом виде. Чистые рутиловые иглы из-за более высокой по сравнению с кварцем температуры плавления 1835 и 1710 °С соответственно остаются в виде включений и приводят

к образованию пузырьков в стекле при перегреве расплава (Jung, 1995).

Природные жильные типы кварца, выявленные в границах Карелии, в зависимости от вмещающих пород и степени метаморфизма содержат различные минеральные примеси. В основном в жильном кварце Карелии, образованном в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма, в качестве минеральных примесей присутствуют серицит, кальцит, биотит, хлорит, иногда полевой шпат, эпидот и апатит (рис. 11, а, б). Для некоторых кварцев (Шайвозеро, Меломайс) характерно присутствие мелкодисперсных зерен мусковита (рис. 11, в), что значительно усложняет технологии его обогащения.

В жильном перекристаллизованном, гранулированном и пегматитовом кварце Парандово-Тикшеозерского зеленокаменного пояса, образованном в условиях амфиболитовой фации метаморфизма кианит-силлиманитового типа, присутствуют минеральные включения кианита, мусковита, иногда амфибола, а также рудные (магнетит, ильменит, сульфиды). Характерной особенностью данных кварцев является наличие мелких рутиловых иглок в их зернах (рис. 12, а), что обуславливает высокие содержания Ti в кварце. Аналогичные рутиловые иглы наблюдаются в кварцитах и перекристаллизованных кварцитах (рис. 12, б, в).

Одним из наиболее важных типоморфных признаков кварца является газонасыщенность – наличие газово-жидких включений (ГЖВ) в кварце. Роль ГЖВ в процессе технологического передела огромна. Во-первых, включения сохраняются в стеклах в виде пузырей, во-вторых, они понижают температуру кристобалитизации, ускоряя при этом скорость процесса плавления,

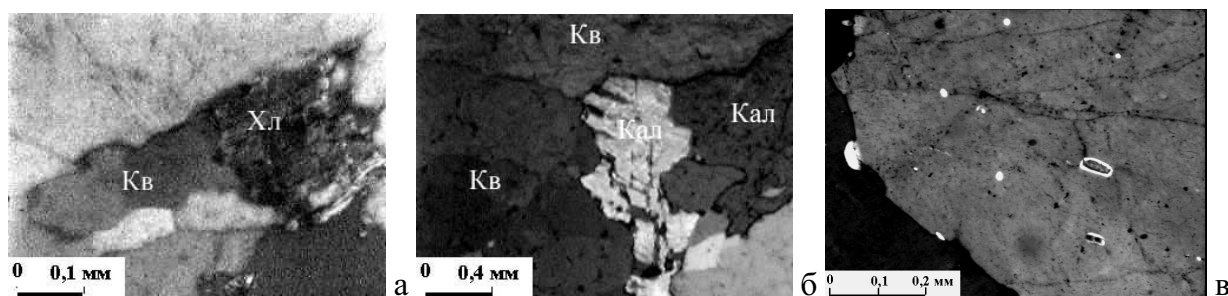


Рис. 11. Минеральные включения в жильном кварце Карелии (фото шлифов, николи +):
а – хлорит (Корпьярви), б – кальцит (Фенькина-Лампи), в – мелкодисперсный серицит (Койкары)

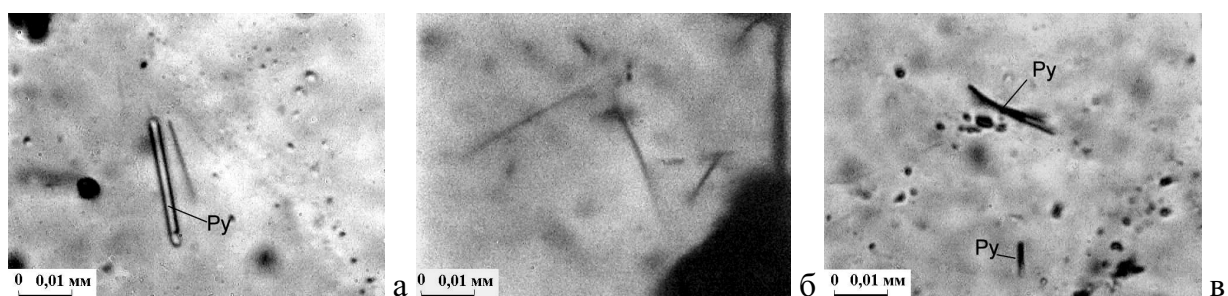


Рис. 12. Включения рутиловых иголок в зернах кварца (фото шлифов, николи +):
а – жильный кварц Хизоваара, б – кварциты Метчангъярви, в – сливные кварциты Степаново озеро

в-третьих, они являются источниками элементов-примесей, в основном Na, K, Ca (Емлин и др., 1988). Традиционно используемые характеристики кварцевого сырья – светопропускание и декрептоактивность – дают представление только об общем содержании ГЖВ, в то время как важными характеристиками являются размеры включений и их распределение, поскольку часть ГЖВ может быть удалена на стадиях дробления, измельчения и термообработки. В данном случае эффективной может быть методика экспрессного анализа включений по шлифам или тонким пластинкам, которая включает в себя подсчет включений по классам крупности, расчет их плотности и площади, занимаемой включениями, на единицу площади кварца. Основанная на методике подсчета ГЖВ в объеме Г. Н. Вертушкова (Жильный кварц., 1969), она может быть применена и для подсчета ГЖВ в жильном кварце Карелии (Данилевская, 1999а, б). Указанная методика позволяет более точно характеризовать количество включений как в общей массе, так и по классам крупности (по размеру), что дает возможность прогнозировать процент удаления включений в процессе технологического передела.

В табл. 8 приведены данные расчета содержания ГЖВ в различных типах кварца Карелии.

При этом важным показателем является содержание самых мелких (0,001–0,005 мм) и крупных классов (>0,01 мм), позволяющее предположить, какой процент включений может быть достаточно легко удален при обогащении кварца, а какая часть включений наибо-

лее трудноудаляема. Процентное содержание данных включений в различных типах кварца Карелии представлено в табл. 9.

Низкой газонасыщенностью характеризуется перекристаллизованный, гранулированный жильный кварц, но содержание мелких ГЖВ в данном типе кварца довольно высокое по сравнению с крупными. Однако основная масса включений распределена в межзерновом пространстве, вблизи границ гранул, по трещинам залечивания и зонам дислокаций внутри зерен, что значительно облегчает их удаление в процессе технологического передела. Наиболее газонасыщенным является жильный интенсивно рекристаллизованный и катаклазированный кварц, однако в нем довольно высокий процент крупных включений, которые могут быть удалены в результате технологического передела. Наиболее трудноудаляемыми являются ГЖВ в кварцитах из-за присутствия в основном мелких включений (>70%), но вместе с тем их количество в целом незначительное.

Структурные примеси в кварце также служат важным типоморфным признаком для прогнозирования обогатимости кварцевого сырья, поскольку при современных технологиях переработки они практически неудаляемы, поэтому их концентрация фактически определяет предел обогатимости кварцевого сырья. Количество структурных примесей в кварце зависит от его генезиса и определяется в основном термодинамическими условиями образования, химизмом растворов, скоростью роста (Каменцев, 1962; Комов, Самойлович, 1985; Емлин и др., 1988 и др.).

Таблица 8. Средняя плотность включений и доля площади, занимаемой включениями, на 1 см² площади кварца

Генетический тип кварца	Участок	Плотность ГЖВ, × 10 ⁵ см ⁻²	Доля площади, занимаемой ГЖВ
Керамические пегматиты	Кюрьяла	0,85	0,007
Слюдоносно-редкометалльные пегматиты	Пиртима	2,95	0,024
Жильный перекристаллизованный, гранулированный кварц	Рухнаволок	1,86	0,012
	Хизоваара	1,77	0,012
Жильный минерализованный кварц	Кукаозеро	2,63	0,014
	Меломайс	3,38	0,016
Интенсивно рекристаллизованный жильный кварц	Шайвозеро	3,56	0,029
	Корпиярви	3,28	0,014
	Ихиярви	2,60	0,021
Катаклазированный, рекристаллизованный жильный кварц	Фенькина-Лампи	10,66	0,072
Слабо рекристаллизованный	Койкары	4,3	0,038
Перекристаллизованные кварциты	Степаново озеро	1,36	0,004
	Кукаозеро	0,57	0,003
Кварциты	Хизоваара	1,20	0,007

Таблица 9. Процентное содержание мелких (0,001–0,005 мм) и крупных (>0,01 мм) включений в различных типах кварца Карелии, %

Генетический тип кварца	Участок	Мелкие вклю- чения	Крупные вклю- чения
Керамические пегматиты	Кюрьяла	49	10
Слюдоносно-редкометалльные пегматиты	Пиртима	48	18
Жильный перекристаллизованный, гранулированный кварц	Рухнаволок	59	12
	Хизоваара	62	6
Жильный минерализованный кварц	Кукаозеро	73	5
	Меломайс	78	3
Интенсивно рекристаллизованный жильный кварц	Шайвозеро	48	12
	Корпиярви	82	2
	Ихиярви	46	28
Катаклазированный, рекристаллизованный жильный кварц	Фенькина-Лампи	58	17
Слабо рекристаллизованный жильный	Койкары	42	27
Перекристаллизованные кварциты	Степаново озеро	53	17
	Кукаозеро	71	6
Кварциты	Хизоваара	67	7

При изучении структурных примесей в кварце наиболее эффективен метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), позволяющий характеризовать закономерности распределения и состав парамагнитных дефектов в кварце. Спектры ЭПР для различных типов кварца Карелии были изучены в Институте геологии и геофизики СО РАН (Новосибирск). Анализы проводились на радиоспектрометре "Radiopan" SE/X 2544 ($\lambda = 3,2$ см, $f_{\text{мод}} = 100$ кГц). Образцы подверглись γ -излучению дозами 2 и 10 Мрад. Доза 2 Мрад использовалась для создания центров Ge и Ti, которые наблюдались при комнатной (293 К) и азотной (77 К) температурах соответственно. При комнатной температуре изучались E'-центры, Al-центры регистрировались в азоте. В результате в природных образцах кварца было зарегистрировано 9 разновидностей парамагнитных дефектов (табл. 10).

Один из важнейших критериев качества кварца – интенсивность парамагнитного центра Al-O-, которая отражает содержание структурного Al в кварце (Раков, 1997). Наиболее высокие интенсивности названного центра наблюдаются для редкометалльно-слюдоносных пегматитов (Пиртима) и перекристаллизован-

ного, гранулированного кварца (Рухнаволок, Хизоваара), что говорит о повышенных концентрациях Al в структуре кварца данных типов. По всей видимости, в кварце этих типов отмечается также повышенное содержание структурного Li, поскольку данная изоморфная примесь, как правило, положительно коррелирует со структурной примесью Al (Jung, 1995). Минимальные концентрации Al-центра характерны для кварц-кианитовых метасоматитов (Хизоваара) и рекристаллизованного жильного кварца (Койкары, Корпиярви). Чуть выше интенсивность алюминиевого центра в кварцитах, силекситах, перекристаллизованном кварце (Кукаозеро) и катаклазированном кварце (Фенькина-Лампи).

Кроме Al-центров важными типоморфными характеристиками являются Ti- и Ge-центры, интенсивности которых соответствуют концентрациям структурного Ti и Ge. Ti-центры обнаружены не во всех типах кварца. Типично отсутствие Ti-Na-центров, которые связаны с наличием иона Na как компенсатора Ti. Ti-Li-центры, характеризующиеся присутствием изоморфной примеси Ti с ионом-компенсатором Li, были обнаружены только в перекристаллизованном,

Таблица 10. Интенсивности парамагнитных центров (относительные единицы) в различных типах кварца Карелии

Генетический тип кварца	Участок	E ₁	E ₂	Ge ₁	Ge ₂	Ge ₃	O ⁻ (O ₂ ³⁻)	Al-O ⁻	Ti-H	Ti-Li
Слюдонсно-редкометалльные пегматиты	Пиртима	8,76		1,08				5,05	0,43	
Кварц-кианитовые метасоматиты	Хизоваара		8,24		1,14		+	0,43		
Кварц-мусковитовые метасоматиты	Хизоваара		21,76		3,78		+	3,4	0,32	
Перекристаллизованный, гранулированный жильный кварц	Рухнаволоок	6,44		2,04				7,06	0,29	15,60
	Хизоваара	2,99		5,59		+		4,51	1,08	
	Кукасозеро	2,34	1,36	0,13	0,15			2,20	0,37	
Жильный минерализованный кварц	Меломайс	3,33	0,47	0,15	0,07		0,74	3,59	+	
Интенсивно рекристаллизованный жильный кварц	Корпиярви	9,24		+				1,54	+	
	Шайвозеро	5,35		0,16				2,19		
Катаклазированный, рекристаллизованный жильный кварц	Фенькина-Лампи	6,95		0,16			0,24	2,56		
Слабо рекристаллизованный Кварцитовый	Койкары	3,37		0,10				1,19	+	
	Метчангьярви		14,83		2,28		1,14	1,57	+	
Кварцитовый	Кукасозеро		1,91		0,48		+	2,55	0,28	
перекристаллизованный	Степаново озеро		12		1,57		0,4	1,99	0,31	

Примечание. Анализы выполнены в Институте геологии и геофизики СО РАН (Новосибирск). «+» – малая интенсивность центров.

гранулированном кварце участка Рухнаволоок, причем наиболее высокие концентрации свойственны гранулированному кварцу, что, по-видимому, связано с повышенными температурами его формирования. Ti-H-центры в небольшом количестве присутствуют в редкометалльно-слюдонсных пегматитах, перекристаллизованном, гранулированном кварце, кварц-мусковитовых метасоматитах и перекристаллизованных кварцитах (табл. 10). Максимальная концентрация данных центров наблюдается в жильном кварце Хизоваары. Ti-H-центры практически отсутствуют в жильном кварце (кроме гранулированного), в кварцитах (Метчангьярви), кварц-кианитовых метасоматитах (Хизоваара), т. е. в кварце данных типов практически не содержится структурного Ti. Высокие содержания Ti в кварце кварцитов и метасоматитов связаны только с присутствием примеси рутила.

Особенностью всех кварцев Карельского кртона является практическое отсутствие центра Ge₃ (Ge³⁺-(Li₂H)). Изоморфная примесь Ge в различных типах кварца Карелии входит в структуру или с ионом-компенсатором Li, или с H. Присутствие центра Ge₂ (Ge³⁺-Li⁺) наблюдается в кварцевых метасоматитах, обычных и перекристаллизованных кварцитах, перекристаллизованном кварце (Кукасозеро) и гранитизированном кварце (Меломайс), причем максимальными концентрациями данного центра отличаются кварц-мусковитовые метасоматиты и кварциты участка Метчангьярви (табл. 10). Высокие концентрации Ge₁-центра (Ge³⁺) свойственны перекристаллизованному, гранулированному кварцу (Рухнаволоок, Хизоваара). Ge-центры практически отсутствуют в интенсивно рекристаллизованном кварце (Корпиярви). В целом минимальные концентрации структурной примеси Ge характерны для силекситов, перекристаллизованного кварца (Кукасозеро), гранитизированного кварца (Меломайс) и всех типов кварца зеленосланцевого кварцево-жильного комплекса.

Радиационные дефекты в кварце представлены E₁ и E₂-центрами и дырочными O⁻ и O₂³⁻-центрами. Наличие E₁-центра (электрон в вакансии кислорода (SiO₃³⁻)) в кварце практически исключает наличие E₂-центра, кроме перекристаллизованного кварца Кукасозеро и жильного кварца Меломайс, где присутствуют оба центра сразу (табл. 10). E₂-центр коррелирует с Ge-Li-центрами и свидетельствует о близости ионов Li⁺. Данный центр кроме упомянутых типов кварца характерен для метасоматитов и кварцитов. Наибольшая концентрация E₂-центра наблюдается в кварц-мусковитовых метасоматитах и кварцитах (Метчангьярви), минимальная – в кварцитах и кварцевых жилах участка Кукасозеро. Дырочные центры в целом малотипичны для кварца Карелии, в большом количестве они присутствуют в минерализованном и катаклазированном жильном кварце, а также в кварцитах (табл. 10).

Таким образом, совокупность выделенных типоморфных особенностей кварцев различных генетических типов позволяет прогнозировать поведение кварцевого сырья в процессах обогащения, что дает возможность определить следующие перспективы для кварца Карелии как сырья для получения высококачественных концентратов: 1. Труднообогащаемым является кварц керамических пегматитов участка Кюрьяла из-за присутствия трудноудаляемых при обогащении минералов-примесей (мелкодисперсные плагиоклаз, мусковит, биотит, иголки рутила); 2. Наличие тонких иголок рутила и довольно высокие концентрации парамагнитных центров в кварце мусковит-редкометалльных пегматитов участка Пиртима делают проблематичным получение высококачественных концентратов из данного сырья; 3. Перекристаллизованный и гранулированный жильный кварц участков Рухнаволоок, Хизоваара и Кукасозеро, а также кварц мусковит-редкометалльных пегматитов участка Пиртима отличаются низкой газонасыщен-

ностью, равномерным гранулометрическим составом, что является благоприятным фактором при его обогащении, но получение высокочистых концентратов будет затруднено из-за присутствия волосовидного рутила в гранулах кварца (особенно Хизоваарского), а также из-за высокой интенсивности парамагнитных центров, что говорит о повышенных концентрациях структурного Al, Ge, Ti и Li; 4. Жильный кварц участка Меломайс – в целом труднообогащаемое сырье из-за сильной минерализованности и довольно высокой плотности ГЖВ, но положительным моментом является отсутствие игольчатого рутила в зернах кварца, распределение основной массы примесей как минеральных, так и газовой-жидких включений по трещинам и границам зерен, что значительно облегчает их удаление, а также низкие концентрации парамагнитных центров; 5. Жильный рекристаллизованный кварц центральной части Карелии, несмотря на зараженность исходного сырья элементами-примесями, является в целом перспективным сырьем для получения высокочистого кварца, так как отсутствует трудноудаляемый игольчатый рутил, и содержание структурных примесей незначительное. Однако данное сырье труднообогащаемое из-за присутствия минералов-примесей и высокой плотности включений; 6. Полиминеральные породы (кварциты и метасоматиты) в целом отличаются практическим отсутствием ГЖВ и деформаций, равномерным гранулометрическим составом кварца. Но сильная минерализованность делает эти породы труднообогащаемыми, а наличие в кварцитах Метчангъярви большого количества игольчатых и волосовидных включений рутила не позволяет получить высокочистые концентраты из данного кварца при современных способах очистки. Возможность получения высокочистого кварца из метасоматитов участка Хизоваара определяется решением проблемы разделения чистых зерен кварца и зерен с вросками зерен рутила. При этом наиболее перспективными являются кварц-кианитовые метасоматиты, так как они более крупнозернистые и содержат минимальное количество структурных примесей.

Заключение

Проведенные исследования кварцевых образований на территории Карелии показали наличие большого разнообразия генетических разновидностей кварца, впервые в данном регионе были выявлены и обоснованы как важные в практическом отношении проявления гранулированного кварца, сливных кварцитов и кварцевых метасоматитов.

Комплексный подход в исследовании типоморфных свойств кварца различных генетических типов позволил не только охарактеризовать особенности исходного кварцевого сырья, но и прогнозировать качество кварцевых концент-

ратов. В результате были выявлены разновидности кварцевого сырья Карельского кратона, перспективные для получения высокочистых кварцевых концентратов.

В целом территория Карелии является перспективным районом для постановки детальных поисково-оценочных работ на кварцевое сырье различного назначения.

Исследования поддержаны «Фондом содействия отечественной науке».

Литература

- Глебовицкий В. А., Бушмин С. А., 1979. Кислотное выщелачивание и железо-магнезиальный метасоматоз в метаморфических комплексах Балтийского щита // Процессы глубинного петрогенезиса и минерации в докембрии СССР. Л.: Наука. С. 175–230.
- Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Пьезооптическое и кварцевое сырье, 1997. М., Союзгеолфонд.
- Гродницкий Л. Л., 1982. Гранитные пегматиты Балтийского щита. Л.: Наука. 295 с.
- Данилевская Л. А., 1999а. К минералогии жильного кварца Карелии // Вопросы геологии и экологии Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С. 28–33.
- Данилевская Л. А., 1999б. Новые генетические типы кварца на территории Северной Карелии // Геология и полезные ископаемые Северо-Запада и Центра России: Материалы X молодежной науч. конф., посвящ. памяти К. О. Кратца. Апатиты: Кольский научный центр РАН. С. 103–110.
- Данилевская Л. А., 2000. Особенности микроструктуры жильного кварца Карелии // Геология и геоэкология Фенноскандии, Северо-Запада и Центра России: Материалы XI молодежной науч. конф., посвящ. памяти К. О. Кратца. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С. 117–121.
- Емлин Э. Ф., Синкевич Г. А., Якшин В. И., 1988. Жильный кварц Урала в науке и технике. Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во. 272 с.
- Жильный кварц восточного склона Урала, 1969 / Вертушков Г. Н., Емлин Э. Ф., Синкевич Г. А. и др. Ч. 1 (методы исследования) / Тр. Свердлов. горн. ин-та. Свердловск. 100 с.
- Жильный кварц Урала в науке и технике. Геология основных месторождений кварцевого сырья, 1995 / Евстропов А. А., Бурьян Ю. И., Кухарь Н. С. и др. М.: Недра. 207 с.
- Каменцев И. Е., 1962. Влияние условий кристаллизации на вхождение посторонних примесей в решетку кварца // Вестник Ленингр. ун-та, сер. геологии и географии. Вып. 3, № 18. С. 109–112.
- Комов И. Л., Самойлович М. И., 1985. Природный кварц и его физико-химические свойства. М.: Недра. 124 с.
- Кораго А. А., Козлов А. В., 1988. Текстуры и структуры жильного кварца хрусталеносных областей. Л.: Недра. 159 с.
- Мусафонов В. М., Серых Н. М., 1997. Сырьевая база природного особо чистого кварца // Минеральные ресурсы России. № 2. С. 7–10.
- Очерки постаршейской геодинамики Карельского массива, 2001 / Леонов М. Г., Колодяжный С. Ю.,

- Зыков Д. С. и др. М.: ГЕОС. 120 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 536.)
- Раков Л. Т., 1997. Генетическое и поисковое значение структурных дефектов в кварцевых месторождениях полезных ископаемых // Минеральное сырье: Вопросы фундаментальной и прикладной минералогии. № 1. С. 74–84.
- Справочник по обогащению руд, 1982. М.: Недра. 366 с.
- Тохтасьев В. С., 1992. Полевошпатовое и кварцевое сырье России и перспективы его промышленного использования. М. 51 с.
- Шатнов Ю. А., Зюзин А. Я., 1998. Минеральное сырье. Пьезооптическое сырье: Справочник. М.: ЗАО «Геоинформмарк». 42 с.
- Щеколдин А. А., Гладов И. А., Базурин А. З., 1968. Природа некоторых включений в прозрачном кварцевом стекле // Стекло и керамика. № 11. С. 17–18.
- Щипцов В. В., Данилевская Л. А., Гаранжа А. В., Родионов В. С., 2001. Прогнозно-минерагеническая оценка кварценоности Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 4. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С. 71–79.
- Ясманов Н. А., Юрьев В. А., 2000. Новый подход к определению МСБ кварца для производства чистого кремния // Разведка и охрана недр. № 2. С. 17–21.
- Jung L., 1995. High purity natural quartz. Quartz Technology, Inc., New Jersey. 550 p.
- Sosman R. B., 1965. The phases of silica. Rutgers University Press. New Brunswick. 389 p.