# ПРИКЛАДНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ЖИЛЬНОГО КВАРЦА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ФЕНЬКИНА-ЛАМПИ (КАРЕЛИЯ)

© 2021 г. д. чл. Е. Н. Светова<sup>1, \*</sup>, д. чл. С. Н. Шанина<sup>2</sup>, В. Б. Пикулев<sup>3</sup>, О. В. Букчина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии Карельского НЦ РАН, ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, 185910 Россия <sup>2</sup>Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, 167982 Россия <sup>3</sup>Петрозаводский государственный университет, ул. Ленина, 33, Петрозаводск, 185910 Россия \*e-mail: enkotova@rambler.ru

> Поступила в редакцию 24.03.2021 г. После доработки 28.05.2021 г. Принята к публикации 30.09.2021 г.

В статье представлены результаты минералого-технологических исследований жильного кварца месторождения Фенькина-Лампи в Карелии, рассматриваемого в качестве перспективного источника высокочистого кварцевого сырья. Рассмотрены основные минералогические особенности кварца, позволяющие спрогнозировать качество кварцевого сырья и способствующие выбору оптимальных режимов обогащения. Показано, что кварц характеризуется высокой водонасыщенностью, осложняющей процесс обогащения традиционными методами. По данным ИК-спектроскопии основное количество воды в кварце присутствует в молекулярной форме в виде газово-жидких включений. Методом газовой хроматографии в составе газовой фазы, выделяющейся при нагревании кварца установлены H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub> и углеводородные газы. Газоотделение происходит как в низкотемпературной (100-600 °C), так и в высокотемпературной (600-1000 °C) областях, что в целом негативно характеризует качество кварца как сырья для наплава стекла и требует нетрадиционного подхода к обогащению. Предложена схема обогащения, включающая электромагнитную сепарацию, обработку СВЧ электромагнитным полем и ультразвуком, классификацию по узким классам крупности и кислотное выщелачивание в растворах HCl и НF. Оценено влияние отдельных операций обогащения на качество получаемых концентратов. Показано, что применение направленных воздействий, учитывающих технологические особенности кварца позволяет значительно улучшить качество получаемых кварцевых продуктов и снизить общее содержание элементов-примесей с 529 ppm до 43 ppm в концентратах крупностью -0.315 + 0.2 и -0.2 + 0.1 мм.

*Ключевые слова:* жильный кварц, технологическая минералогия, обогащение, элементы-примеси, ИК-спектроскопия, газовая хроматография, электронная микроскопия, ICP-AES, месторождение Фенькина-Лампи **DOI:** 10.31857/S0869605521060083

Месторождение Фенькина-Лампи, расположенное в Медвежьегорском районе Карелии, было разведано в 1960-е годы Остреченской партией Карельской комплексной геолого-разведочной экспедиции (Николаевский, Зиновьева, 1963). В результате опробования кварцевых жил была показана пригодность исходного кварца для производства карбида кремния, кристаллического кремния марки КР-3 и динаса. Запасы кварца на месторождении оценены в 172.6 тыс. т. Дальнейшие комплексные исследования, проводимые с 1995 г. сотрудниками Института геологии КарНЦ РАН (ИГ КарНЦ РАН), позволили отнести жильный кварц месторождения Фенькина-Лампи к потенциально перспективным нетрадиционным источникам высокочистого кварцевого сырья в Карелии (Данилевская и др., 2004; Голованов и др., 2006). Установлено, что после предварительного обогащения с применением магнитной сепарации кварц данного месторождения соответствует концентрату промежуточной чистоты для наплава кварцевых стекол марки КПО-5 согласно ТУ 5726-002-11496665-97 (Данилевская, Гаранжа, 2003). Процесс глубокого обогащения традиционными методами осложняют присутствующие в кварце газово-жидкие включения, негативно влияющие на качество кварцевых концентратов. Эти включения вносят вклад в микропримесный состав кварца и снижают степень прозрачности получаемых на его основе кварцевых стекол (Крейсберг и др., 2007). Экспериментальные исследования показывают, что применение различных режимов и комбинаций флотации, СВЧ-обработки, термоудара и кислотного выщелачивания в процессах глубокого обогащения, ориентированных, в том числе, и на удаление газово-жидких включений, позволяет значительно улучшить качество кварцевых продуктов (Данилевская и др., 2004; Данилевская, Скамницкая, 2009; Скамницкая и др., 2019; Светова и др., 2019).

В настоящей работе приводятся новые данные, касающиеся изучения водонасыщенности кварца месторождения Фенькина-Лампи методами ИК-спектроскопии и газовой хроматографии, а также рассматривается влияние отдельных операций обогащения на качество получаемых кварцевых концентратов.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ И СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТИПЫ ЖИЛЬНОГО КВАРЦА

Месторождение Фенькина-Лампи приурочено к южному крылу Кумсинской синклинальной структуры, прослеживаемой вдоль р. Кумса в субширотном направлении и объединяемой с Онежской мульдой вблизи г. Медвежьегорска (Николаевский, Зиновьева, 1963). Кумсинская синклиналь сложена палеопротерозойскими (ятулийскими 2.30-2.08 млрд лет) эффузивно-пирокластическими, вулканогенно-осадочными и терригенно-осадочными породами (Соколов и др., 1970; Светов, 1979; Онежская...., 2011). Месторождение локализовано преимущественно в области распространения кварцито-песчаников и карбонатизированных песчано-глинистых сланцев и представлено двумя разобщенными кварцевыми телами (жилами) (рис. 1). Северная жила имеет длину 245 м, мощность до 70 м; Южная – 120 м, мощность до 20 м (Данилевская, Гаранжа, 2003). Жилы разбиты сетью трещин в направлении, субпаралельном простиранию (C3 330°), в меньшей степени развита трещиноватость северо-восточного направления (CB 45°). С трещинами связано развитие мелких прожилков вторичного кварца и полостей, содержащих мелкие (от 0.3 до 3-5 см) полупрозрачные кварцевые кристаллы, кристаллы и ксеноморфные выделения кальцита, мелкочешуйчатые агрегаты талька в срастании с хлоритом. Формирование жил предположительно связано с тектономагматической активизацией территории во время свекофеннской орогении (2.0-1.8 млрд лет), проявленной в заложении трещин растяжения, которые впоследствии заполнялись гидротермальными растворами (Онежская..., 2011). По структурно-морфологическим особенностям строения кварцевые тела относятся к группе трубообразных залежей и карманов (Голованов и др., 2006). По мнению Л.А. Данилевской и А.В. Гаранжи (2003), изучавших температурные условия формирования, минеральные парагенезисы, характер диафтореза, данное месторождение является типичным примером кварцевых образований зеленосланцевой кварцево-жильной формации гидротермально-метаморфического типа с интенсивно развитыми процессами катаклаза и кристаллизационных изменений, выделенной Е.П. Мельниковым (1988).

В пределах кварцевых жил выделяются четыре структурно-технологических типа кварца, образующие отдельные зоны и участки: І — молочно-белый крупно-гигантозернистый, ІІ — серовато-белый средне-крупнозернистый, ІІІ — светло-серый средне-



**Рис. 1.** Схема геологического строения месторождения жильного кварца Фенькина-Лампи (на основе: Николаевский, Зиновьева, 1962; Данилевская, Гаранжа, 2003).

Fig. 1. Geological scheme of the Fenkina-Lampi vein quartz deposit (based on Nikolaevsky G.M., Zinovieva Z.A., 1962; Danilevskaya, Garanzha, 2003).

крупнозернистый, IV – серый средне-крупнозернистый, кавернозный (Данилевская, Гаранжа, 2003). Выделение и оконтуривание данных участков предполагало возможность их селективной отработки для получения кварцевых продуктов различного назначения. Однако результаты будущих исследований, в том числе изложенные в данной работе, показали, что существенной разницы в текстурно-структурных особенностях, содержании минеральных и газово-жидких включений между выделенными типами кварца (за исключением IV типа, более минерализованного) не прослеживается. Основной практический интерес представляет более чистый в отношении минеральных примесей кварц I–III типов. По данным микроэлементного ICP-AES анализа общее содержание элементов-примесей в предварительно обогащенной кварцевой крупке (магнитной сепарацией) в среднем составляет 209 ррт при вариациях по 23 пробам от 117 до 450 ррт (Данилевская и др., 2004).

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования послужила кварцевая коллекция из фонда отдела минерального сырья ИГ КарНЦ РАН, собранная во время проведения технологического картирования. Изучались образцы кварца I—III типов, лабораторные испытания по обогащению проводились на крупной технологической пробе массой около 10 кг.

Микроскопические исследования, а также эксперименты по обогащению кварца реализованы на базе аналитического и лабораторного оборудования ИГ КарНЦ РАН (г. Петрозаводск). Микроструктурные особенности кварца, распределение в нем газово-жидких включений (форма, величина и наполнение) изучены с помощью оптического микроскопа ПОЛАМ Р-211 в шлифах и тонких двуполированных кварцевых пластинках. Морфология и состав минеральных примесей в кварце проанализированы с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH (Tescan, Чехия) с энергодисперсионным детектором INCA Energy 350 в аншлифах кварца и кварцевой крупке разных степеней очистки, напыленных углеродом.

Определение состава и содержания газовой фазы, выделяемой из кварца при нагревании, выполнено на газовом хроматографе "Цвет-800" с пиролитической приставкой в ЦКП "Геонаука" Института геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Исследованы 30 образцов исходного кварца, а также продукты обогащения разных степеней очистки в виде кварцевой крупки фракции -0.5 + 0.25 мм навеской 0.5 г. Перед исследованием крупка прогревалась до 100 °С для удаления воды, сорбированной ее поверхностью. Нагрев образцов проводили в кварцевом реакторе в течение 5 мин, в качестве газа-носителя использовался гелий. В основных экспериментах измерение концентрации выделяемых газов из кварцевой крупки выполнено в двух температурных интервалах: 100–600 и 600–1000 °С. Для отдельных образцов газовыделение проанализировано в ходе ступенчатого нагрева до 1000 °С с шагом 100–200 °С (использовалась навеска 1 г). Минимально определяемое содержание по основным компонентам составляет (ppm): для N<sub>2</sub> и CO – 5 × 10<sup>-3</sup>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> и CO<sub>2</sub> – 8 × 10<sup>-3</sup>, H<sub>2</sub>O – 1.1. Вероятная относительная погрешность метода – 16%.

Изучение особенностей структурного состояния воды в кварце проведено с использованием инфракрасного Фурье-спектрометра ФТ-801 (НПФ Simex, г. Новосибирск) в Петрозаводском государственном университете (г. Петрозаводск). Изучено 9 образцов кварца в виде плоскополированных пластинок толщиной 0.4–1 мм. ИК-спектры получены на квадратной апертуре, ограничивающей исследуемую поверхность образцов площадью 1 см<sup>2</sup>. ИК-спектры регистрировались в геометрии "на пропускание" при комнатной температуре в диапазоне 450–5000 см<sup>-1</sup> (разрешение – 0.5 см<sup>-1</sup>; количество сканов – 50). С помощью штатной программы обработки ИК-спектров "Заир-3" спектры нормировались на 100% пропускание, пересчитывались в спектры поглощения, вычиталась базовая линия и выбирался для дальнейших исследований диапазон  $\sim$  3000–3800 см<sup>-1</sup>. Далее, с использованием авторского программного обеспечения, написанного на языке Python с библиотек научных вычислений (JCAMP, SciPy, NumPy), спектры нормировались на толщину образца и разбивались на набор отдельных гауссовых линий. При сравнении суперпозиции модельных пиков с экспериментальной кривой минимизировалась среднеквадратичная ошибка.

Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах определено методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) на спектрометре JY 38 (Jobin Yvon, Франция) в Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт" (г. Москва). Кварцевая крупка массой 2 г растворялась в автоклаве в смеси (8 мл конц. HF + 0.2 мл HNO<sub>3</sub> + 0.2 мл маннита 2%), затем в открытой системе упаривалась в стеклоуглеродных тиглях. Осадок растворялся в 1.2 мл 1М HCl и анализировался.

Технологические эксперименты проведены по схеме, разработанной Л.С. Скамницкой. В испытаниях использовано лабораторное оборудование (дробилка щековая ДЩ 100 × 60, роликовый электромагнитный сепаратор СЭ-138Т, ультразвуковой диспергатор УЗДН-2Т (22 Гц), вакуумный сушильный шкаф Esztergom LP-403) и специализированная посуда (кварцевые стаканы и стекло-углеродные тигли). СВЧ-обработка кварцевой крупки проведена в бытовой СВЧ-печи Bosh (900 Вт, 2.45 ГГц).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### Минералого-технологические особенности кварца

Технологические свойства кварца для получения высококачественных кварцевых продуктов определяются структурно-текстурными особенностями, содержанием элементов-примесей, наличием минеральных включений (количеством, размерами, составом, характером срастания с кварцем), газонасыщенностью, структурными дефектами. Опыт работы с различными видами кварцевого сырья Карелии показывает, что выявление вышеперечисленных типоморфных признаков кварца позволяет спрогнозировать качество сырья, способствует выбору оптимальных режимов измельчения и эффективной схемы обогащения для каждого конкретного объекта (Щипцов, Скамницкая, 2000).

**Микроскопические исследования.** По данным анализа шлифов, кварц характеризуется гетеробластовой структурой, местами переходящей в мозаичную. Первичные зерна кварца образуют крупные вытянутые (до 3 см) индивиды, с неровными угловатыми, иногда извилистыми краями (рис. 2, *a*). Погасание волнистое, линейно- и неравномерно блоковое, часто наблюдаются полосы деформации. Локально по трещинам и зонам дислокаций отмечаются мелкие зерна (0.05–0.5 мм) вторичного "микроганулированного" кварца (Кораго, Козлов, 1988) с ровными или ступенчатыми краями, четким погасанием. Значимых микроструктурных различий между выделяемыми структурно-технологическими типами кварца не прослеживается. Можно отметить, что в молочно-белом гигантозернистом кварце І-го типа в большей степени сохранились крупные зерна первой генерации. Для средне-крупнозернистого кварца II-го и III-го типов характерно наиболее интенсивное развитие мелких зерен второй генерации в виде прожилков и мелкогранулированных агрегатов по границам дислокаций (рис. 2, *б*). Текстура кварца в основном массивная, реже линейно-параллельная, обусловленная вытянутостью зерен кварца в одном направлении.

Среди минеральных примесей в кварце преобладают хлорит и кальцит, в меньшем количестве отмечаются слюды (мусковит, биотит), тальк, полевой шпат, оксиды и гидроксиды железа, единичные включения рутила, фторапатита, циркона, турмалина и графита. Основная часть этих примесей распределена по трещинам и границам зерен кварца, что является благоприятным фактором для их удаления при технологиче-



**Рис. 2.** Микроструктура жильного кварца. Фото шлифов в скрещенных николях, масштабные линейки составляют 1 мм. *a* – вытянутые зерна первичного кварца (обр. Ф-53); *б* – развитие прожилков вторичного кварца по границам зерен первой генерации (обр. Ф-49).

**Fig. 2.** Microphotographs of the vein quartz, crossed nicols, the scale lines are 1 mm. a – elongated grains of primary quartz (sample F-53);  $\delta$  – veinlets of secondary quartz along the grain boundaries of the first generation (sample  $\Phi$ -49).



Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения минеральных включений в жильном кварце месторождения Фенькина-Лампи (Скамницкая и др., 2019). *Cal* – кальцит, *Chl* – хлорит, *Ms* – мусковит, *Mag* – магнетит, *Rt* – рутил.

Fig. 3. BSE images of mineral inclusions in the vein quartz of the Fenkina-Lampi deposit. Cal – calcite, Chl – chlorite, Ms – muscovite, Mag – magnetite, Rt – rutile.

ской обработке (рис. 3, a, b). Осложняют процесс обогащения тончайшие чешуйки мусковита (рис. 3, b) и хлорита, включения кальцита, единичные зерна фторапатита и циркона, находящиеся внутри кварцевых зерен.

Помимо минеральных примесей, находящихся в кварце, значительное влияние на физико-химические и технологические свойства кварца оказывает вода (Емлин и др., 1988). Вода может адсорбироваться по трещинам кристаллов, содержаться в микропорах, газово-жидких и минеральных включениях, находится в кристаллической решетке кварца в виде примесных водородных дефектов. Во всех типах кварца месторождения Фенькина-Лампи газово-жидкие включения имеют высокую плотность распределения (рис. 4) и обуславливают невысокое светопропускание кварца  $T_{\rm cp} = 41\%$  при вариациях от 31 до 53% (Светова и др., 2019). Размер включений варьирует от 1–2 до 30 мкм. Форма включений в основном изометричная, встречаются также извилистые и расшнурованные вакуоли, приуроченные чаще к трещинам залечивания, местам наиболее сильного катаклаза и образования мозаичности (рис. 4,  $\delta$ ). В составе включений



**Рис. 4.** Микрофотографии газово-жидких включений в жильном кварце месторождения Фенькина-Лампи. a – первичные включения с жидкой (*l*), газовой (*g*) и твердой (*s*) фазами;  $\delta$  – цепочки включений вдоль трещин залечивания.

**Fig. 4.** Microphotographs of fluid inclusions in the vein quartz of the Fenkina-Lampi deposit. a – primary inclusions with liquid (l), gas (g), and solid (c) phases;  $\delta$  – chains of inclusions along the healing cracks.

присутствуют жидкая и газовая фазы, иногда отмечаются вакуоли с дополнительной кристаллической фазой (рис. 4, *a*).

Исследование состояния и структурного положения воды. ИК-спектроскопическое изучение кварца основывалось на известной интерпретации полос поглощения на ИК-спектрах в области 3000–3800 см<sup>-1</sup>, приписываемых обертонам колебаний решетки кварца и примесным водородным дефектам (Kats, 1962; Aines, Rossman, 1984; Rossman, 1988; Kronenberg, 1994; Stenina, 2004 и др.). Принималось во внимание, что величина интенсивности отдельных полос поглощения пропорциональна содержанию водородсодержащих дефектов, ассоциированных с этими линиями. На спектрах поглощения образцов всех типов кварца доминируют широкие диффузные полосы с максимумами 3400 см<sup>-1</sup> (рис. 5). Эти полосы ассоциированы с молекулярной водой, содержащейся в основном в трещинах и газово-жидких включениях (Kats, 1962; Aines, Rossman, 1984). Интенсивность полос поглощения варьируется в пределах изученной выборки от 0.3 см<sup>-1</sup> (обр. $\Phi$ -72) до 9 см<sup>-1</sup> (обр. $\Phi$ -47), указывая на неоднородную водонасыщенность образцов кварца. Линии обертонов колебаний Si–O связей в решетке кварца и колебаний OH-групп, связанных со структурными дефектами на ИК-спектрах практически не различимы.

Для интерпретации ИК-спектров было выполнено разложение спектров на суперпозицию элементарных пиков, описываемых функциями Гаусса (рис. 6, табл. 1). Результаты моделирования показали, что спектры изученных образцов кварца I–III типов в целом подобны друг другу, немного различаются набором и амплитудой выделяемых линий. Наиболее интенсивными и характерными для всех образцов являются полосы 3410 и 3220 см<sup>-1</sup>, связанные с симметричными и антисимметричными валентными колебаниями связи O–H в молекулах воды. Линия 3410 см<sup>-1</sup> типична для свободных молекул воды, а линия 3220 см<sup>-1</sup> близка к частоте колебаний кристаллического льда (Штенберг, 2014), что может указывать на связанное состояние OH-групп внутри кристалла. Выделяемые полосы с максимумами 3200 и 3300 см<sup>-1</sup> приписываются к обертонам и составным частотам колебаний Si–O связей в кристаллической решетке кварца. Слабоинтенсивная линия с пиком 3380 см<sup>-1</sup>, присутствующая почти на всех спектрах, обусловлена колебаниями Al–OH группировок в SiO<sub>4</sub> тетраэдрах,



**Рис. 5.** Нормированные ИК-спектры поглощения жильного кварца месторождения Фенькина-Лампи. **Fig. 5.** Normalized IR absorption spectra of vein quartz from the Fenkina-Lampi deposit.

возникающих при замещении Si<sup>4+</sup>  $\rightarrow$  Al<sup>3+</sup> (Kats, 1962). При этом H<sup>+</sup> выступает в роли компенсатора недостающего положительного заряда и встраивается в определенные структурные позиции в SiO<sub>4</sub> тетраэдры. Почти для всех образцов при моделировании спектров были установлены также полосы с максимумами около 3600 см<sup>-1</sup>, которые соотносятся рядом исследователей с колебаниями гидроксильных группировок, входящих в состав тонкодисперсных микроминеральных включений (слюд, гранатов, амфиболов), характерных для природного кварца (Ito, Nakashima, 2002; Штенберг, Быков, 2009).

Анализ ИК-спектров указывает на то, что основное количество воды в изучаемом кварце присутствует в молекулярной форме в виде газово-жидких включений. Кварц содержит незначительное количество водородсодержащих дефектов, связанных со структурными примесями Al в кристаллической решетке и, возможно, гидроксильные группировки, входящие в состав микроминеральных примесей слюды, хлорита.

Таблица 1. Параметры гаусовских линий ИК-спектра кварца (обр. Ф-88-1) месторождения Фенькина-Лампи

 Table 1. Parameters of Gaussian lines of the IR spectrum of quartz (sample F-88-1) of the Fenkina-Lampi deposit

Параметры линий	1	2	3	4	5	6
Положение пика, см $^{-1}$	3202	3217	3298	3383	3429	3628
Амплитуда, см <sup>-1</sup>	0.07	0.72	0.09	0.13	1.78	0.32
Полуширина, см <sup>-1</sup>	33	203	35	94	306	151



**Рис. 6.** Пример моделирования ИК-спектра поглощения средне-крупнозернистого кварца (обр. Φ-88-1) в области 3000–3800 см<sup>-1</sup> набором функций Гаусса. Красные маркеры – экспериментальный спектр, зеленая кривая – суперпозиция гауссовых пиков.

**Fig. 6.** Modeling of IR absorption spectrum for coarse-grained quartz (sample F-88-1) in the region  $3000-3800 \text{ cm}^{-1}$  by a set of Gauss functions. Red markers – experimental spectrum, the green line – superposition of the Gauss peaks.

Исследование состава газово-жидких включений. Газохроматографическое изучение кварца показало, что в общем балансе газов, выделяющихся из кварца при нагревании до 1000 °С доминирует  $H_2O(90-99\%)$ , в меньшем количестве присутствуют  $CO_2$ , CO,  $N_2$  и углеводородные газы (УГ) (табл. 2). Суммарное содержание газов в пределах изученной выборки варьирует в широком интервале – от 105 до 1490 ppm. При этом отчетливой закономерности, в связи с принадлежностью образцов кварца к какому-либо из выделяемых типов, не устанавливается. Наиболее однородным по содержанию газовой фазы является молочно-белый крупно-гигантозернистый кварц I-го типа, которому соответствуют наиболее узкие разброс значений общего количества выделяемых газов (рис. 7, a).

Важным технологическим показателем кварца как сырья для наплава стекла является газоотделение в области высоких температур (>600 °C). Высокотемпературные формы включений, по сравнению с низкотемпературными, удаляются наиболее трудно в процессе термического обезгаживания и поэтому определяют прозрачность или пузырчатость получаемого стекла (Крейсберг и др., 2007). Существенное выделение  $H_2O$  (основного компонента газовой фазы и наиболее значимой для технологии наплава стекла примеси) во всех исследуемых типах кварца наблюдается как в низкотемпературной (100–600 °C), так и в высокотемпературной (600–1000 °C) областях (табл. 2, рис 7,  $\delta$ ). Эксперимент, детализирующий процесс термодесорбции газов показывает, что выделение  $H_2O$  происходит после 400 °C, достигает максимального значения к 600 °C (рис. 8, *a*). В интервале от 600 до 1000 °C выделение  $H_2O$  продолжается, постепенно

0					-			-
Тип кварца	№ обр.	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	СО	N <sub>2</sub>	УГ	Сумма	Сумма 100-1000 °С
Ι	Φ-32	414/366	5.89/6.49	-/0.25	0.75/0.47	0.15/1.55	421/374	795
	Φ-50	446/545	4.39/7.81	-/0.41	0.70/0.98	0.06/1.12	451/555	1006
	Φ-53	91 /159	5.89/6.85	-/0.25	0.98/1.40	0.22/1.03	98/169	267
	Φ-65	351/519	4.03/7.57	-/-	0.56/-	0.03/1.05	356/527	884
II	Φ-26	654/254	8.71/6.91	-/0.37	2.15/1.40	0.25/1.13	665/263	928
	Φ-31	401/410	4.99/8.35	-/-	-/-	0.09/1.25	406/420	826
	Φ-33	706/647	4.33/9.80	-/-	-/-	0.08/1.36	711/658	1369
	Φ-34	954/323	5.83/6.73	-/-	-/-	0.23/0.76	960/330	1291
	Φ-51	242/224	7.15/9.08	-/0.21	0.75/1.17	0.16/2.03	250/236	486
	Φ-52	206/244	4.69/6.73	-/0.08	1.50/1.40	0.13/1.39	212/253	465
	Φ-59	81/41	0.84/0.78	_/_	-/-	-/0.28	82/42	124
	Φ-60	570/405	6.97/9.20	-/0.21	1.26/1.87	0.19/1.35	579/417	996
	Φ-63	39/61	2.30/2.16	-/0.17	0.19/0.06	0/1.16	41/64	105
	Φ-68	345/436	4.33/6.55	-/0.21	0.51/0.94	0.06/1.72	350/445	795
	Φ-70	739/301	4.63/5.11	-/0.21	0.51/0.56	0.18/0.84	744/308	1052
	Φ-72	1117/357	7.03/6.61	-/0.08	1.22/0.94	0.34/0.80	1126/365	1491
	Φ-75	325/389	3.67/6.49	- /0.08	0.70/0.70	0.06/1.08	329/397	726
III	Φ-28	23/787	7.03/9.68	-/0.62	0.79/1.40	0.86/6.22	32/804	836
	Φ-29	171/333	5.35/9.20	-/0.41	1.22/0.75	0.10/1.67	178/345	523
	Φ-37	515/352	4.33/6.01	-/0.17	0.47/0.94	0.12/1.06	520/360	880
	Φ-47	559/753	4.15/7.99	-/0.17	-/1.64	0.13/3.80	563/766	1329
	Φ-49	1032/314	27.2/15.6	1.32/1.73	3.93/2.06	2.30/4.14	1066/336	1402
	Φ-54	691/157	5.89/6.49	-/0.12	0.70/0.94	0.31/0.78	698/165	864
	Φ-56	805/370	7.21/8.17	-/0.21	1.12/1.45	0.23/1.37	813/381	1194
	Φ-66	539/522	14.7/11.1	-/0.50	1.36/1.73	0.19/2.00	555/536	1091
	Φ-74	631/641	4.39/6.55	-/0.12	0.89/1.17	0.14/1.64	636/650	1286
	Φ-79	720/559	3.79/6.79	-/-	0.94/-	0.06/1.13	724/567	1291
	Φ-81	354/273	3.67/6.19	-/0.21	-/-	0.11/1.45	357/280	638
	Φ-83	170/167	4.63/12	0.41/0.78	1.26/16.4	0.13/2.67	176/198	374
	Φ-86	36.9/78.7	0.54/0.90	-/-	-/-	-/0.2	37/80	117

Таблица 2. Содержание газов, выделившихся при нагревании кварца месторождения Фенькина-Лампи в температурных интервалах 100-600 °C/600-1000 °C, ppm

Table 2. Content of gases released from quartz of the Fenkina-Lampi deposit at its heating in temperature ranges of 100-600 °C/600-1000 °C, ppm

Примечание. I – молочно-белый крупно-гигантозернистый, II – серовато-белый средне-крупнозернистый, III – светло-серый средне-крупнозернистый. УГ – сумма углеводородных газов (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>). "-" не обнаружено.

снижаясь. Считается, что для низкотемпературного диапазона характерно вскрытие более крупных газово-жидких включений, а для высокотемпературного — растрескивание включений субмикронных размеров, и удаление молекулярно-дисперсной воды, растворенной в структуре кварца (Крейсберг и др., 2007). По-видимому, наблюдаемая значительная высокотемпературная термодесорбция H<sub>2</sub>O в кварце месторождения Фенькина-Лампи обусловлена обилием мельчайших газово-жидких включений и



**Рис. 7.** Вариации и средние значения содержания газовых компонентов, выделившихся при нагревании от 100 до 1000 °C по типам кварца. a – общее содержание газов,  $\delta$  – содержание H<sub>2</sub>O в низкотемпературном (100–600 °C) и высокотемпературном (600–1000 °C) интервалах.

**Fig. 7.** Variations and average values of the content of gas components released from quartz at its heating from 100 to 1000 °C by types of quartz. a – total gas content,  $\delta$  – H<sub>2</sub>O content in low-temperature (100–600 °C) and high-temperature (600–1000 °C) ranges.

присутствием структурно-связанной воды, выявляемой ИК-спектроскопией. Обращает на себя внимание, что в каждом из трех типов кварца присутствуют образцы как с относительно низкой (100–250 ppm), так и с высокой (900–1400 ppm) водонасыщенностью (табл. 2). Это может быть связано с наличием нескольких генераций зерен кварца (в разной степени водонасыщенных) в пределах каждого типа кварца, что установлено ранее при микроскопическом анализе кварцевых зерен (Данилевская, Скамницкая, 2009).

Содержание остальных газовых компонентов, выделяющихся при нагревании кварца по сравнению с  $H_2O$  незначительно:  $N_2$  (0–17 ppm),  $CO_2$  (1.5–4.3 ppm), CO(0-3.1 ppm), УГ (0.1-5.5 ppm). Максимальные значения концентраций данных компонентов отмечаются в двух образцах кварца III типа (Ф-47, Ф-83). В остальных случаях существенных различий в разбросе значений концентраций отдельных газов между разными типами кварца не прослеживается. Значения углекислотно-водного коэффициента CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O для изученной выборки кварца составляют 0.01-0.05, что свойственно кварцу безрудных жил (Сокерина и др., 2010). Термодесорбция углеводородных газов характерна в большей степени для высокотемпературного диапазона, что отчетливо прослеживается также при ступенчатом прогреве кварцевой крупки (рис. 8, б). Эта особенность может быть связана не только с декрепитацией газовожидких включений, но и с процессом разложения малолетучих органических соединений, присутствующих в кварце (Крейсберг и др., 2007). Обращают на себя внимание высокие содержания углеводородных газов в изучаемом кварце относительно этих показателей (0.1–0.9 ppm) для безрудного жильного кварца уральских месторождений (Кузнецов и др., 2011), что может являться геохимической особенностью формирования кварцевых жил.



**Рис. 8.** Динамика выделения газовых компонентов при ступенчатом прогреве (100–1000 °C) образцов кварцевой крупки ( $\Phi$ -28,  $\Phi$ -50). a – H<sub>2</sub>O,  $\delta$  – углеводородные газы (УГ).

Fig. 8. Dynamics of the gas components release at the stepwise heating (100–1000 °C) of quartz samples (F-28, F-50).  $a - H_2O$ ,  $\delta -$  hydrocarbon gases (YF).

Выявленная динамика газовыделения в области высоких температур в целом негативно характеризует качество кварца как сырья для наплава стекла. При разработке эффективной схемы глубокого обогащения данного кварца целесообразно обратиться к нетрадиционным подходам, учитывающим как низкотемпературные, так и высокотемпературные разновидности газово-жидких включений.

#### ОБОГАЩЕНИЕ КВАРЦА

В проводимых ранее испытаниях по обогащению кварца месторождения Фенькина-Лампи использовалась кварцевая крупка крупностью -0.5 + 0.1 и -0.315 + 0.1 мм и применялись различные режимы и комбинации магнитной сепарации, флотации, CBЧ-обработки, термоудара и хлорирования (Данилевская, Гаранжа, 2003; Данилевская, Скамницкая, 2009; Скамницкая и др., 2019). Используемые схемы глубокого обогащения позволяли существенно снизить общее содержание примесей с более чем 500 ppm до 96 ppm в самом качественном из концентратов (Скамницкая и др., 2019). Однако получить концентраты высокой чистоты с содержанием примесей менее 50 ppm (Müller et al., 2007) получить не удавалось.

В настоящей работе представлен эксперимент, выполненный по новой схеме и отработанный на более узких классах крупности материала. Испытание проведено на технологической пробе молочно-белого крупно-гигантозернистого кварца І-го типа. Схема обогащения кварца включала электромагнитную сепарацию, СВЧ- и ультразвуковую обработку в водной среде, последовательное фракционное выщелачивание в соляной и плавиковой кислотах (рис. 9). СВЧ-обработка кварцевой крупки применялась для достижения эффективной декрепитации газово-жидких включений (Насыров, 2009; Hou Y. et al., 2017; Buttress et al., 2019). В отличие от традиционного способа декрепитации включений путем нагрева кварцевой крупки до 600–1000 °С, при СВЧвоздействии происходит быстрый нагрев жидкости в газово-жидких включениях, резкое возрастание давления в их полости и растрескивание окружающего зерна с выходом содержащейся жидкости. При этом нагрева самого кварца не происходит, что способствует снижению себестоимости и увеличению производительности процесса. Применение последующего химического выщелачивания крупки приводит к элиминации примесных элементов и повышению чистоты кварцевой крупки.



**Рис. 9.** Схема обогащения жильного кварца месторождения Фенькина-Лампи и этапы контроля чистоты кварцевых продуктов методами атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES), электронной микроскопии (ЭМ) и газовой хроматографии (ГХ). ДB - дистиллированная вода.**Fig. 9.** Process flow of vein quartz of the Fenkina-Lampi deposit and the monitoring steps of the quartz products purity by ICP-AES, electron microscopy (EM), and gas chromatography (ГХ). ДB - distilled water.

Основные этапы очистки в работе сопровождались контролем чистоты кварцевой крупки, включающем определение содержания элементов-примесей в кварцевых продуктах, электронно-микроскопический анализ зерен кварца, качественную и количественную оценку газовой фазы, выделяющейся при нагревании кварцевой крупки. Последовательность этапов аналитических исследований кварцевых концентратов отражена на схеме обогащения (рис. 9).

Элементы	Исх. крупка	Концентрат предварительного	Концентраты глубокого обогащения —0.63 + 0.1 мм		
		обогащения эм/сеп	после НС1	после HF	
Fe	230	27	1.9	0.85	
Ti	2.6	1.7	0.35	0.18	
Zr	0.18	0.08	0.01	0.01	
Mn	30	6.52	0.70	0.24	
Al	98	36	30	13	
Cu	1.7	1.5	0.10	0.06	
Zn	0.9	1	0.16	0.08	
В	0.4	0.4	0.34	0.23	
Ni	0.25	0.05	0.02	0.02	
Cr	2.9	0.3	0.01	0.01	
Co	0.02	0.01	0.01	0.01	
Ca	63	31	17	6.3	
Sr	0.47	0.47	0.36	0.15	
Ba	1.4	1.3	1.0	0.5	
Mg	7.5	10	2.2	0.5	
Na	57	55	42	26	
К	32	21	17	7.4	
Li	0.09	0.11	0.08	0.07	
Ge	0.3	0.25	0.25	0.25	
Р	0.3	1	0.2	0.2	
Сумма	529	195	113	56	

Таблица 3. Содержание элементов-примесей в кварцевых продуктах разной степени очистки, ppm Table 3. Concentration of trace elements in quartz products in different process steps, ppm

Содержание элементов-примесей в кварцевых продуктах разной степени очистки по данным ICP-AES анализа приведено в табл. 3. Общее содержание примесей в исходной крупке кварца составляет 529 ppm. Среди примесей преобладает Fe (230 ppm), что связано с его техногенным загрязнением при дроблении. Отмечаются высокие содержания Al (98 ppm), Ca (63 ppm), Na (57 ppm), K (32 ppm), Mn (30 ppm), связанные с включениями кальцита, хлорита, полевых шпатов и слюд.

После предварительного обогащения с использованием электромагнитной сепарации общее содержание примесей снижается почти в 3 раза. За счет удаления магнитных техногенных частиц, магнитных минералов и находящихся с ними в сростках кальцита, слюды и других минералов, отмечается существенное снижении концентрации Fe, Ca, Al, K, Ti. Глубокое обогащение кварцевой крупки фракции -0.63 + 0.1 мм, включающее CBЧ и ультразвуковую обработку, последовательное химическое выщелачивание в HCl и HF уменьшает суммарное содержание примесей до 56 ppm (табл. 3, рис. 10). При этом доводка кварца в кислотах, осуществляемая на узких фракциях, позволяет снизить количество примесей до 43–51 ppm (табл. 4). Достижение лучших показателей (43 ppm) отмечается на более мелких фракциях -0.315 + 0.2 и -0.2 + 0.1 мм.

Среди оставшихся а кварце примесей доминируют Na, Al, K и Ca, вероятно, связанные с составом солевых растворов в газово-жидких включениях и наличием в них минералов-узников, что было предположено нами в предыдущих исследованиях (Скамницкая и др., 2019). Важно отметить эффективность применения плавиковой кислоты





Fig. 10. The dynamics of a decrease of the main trace elements content and their total content in quartz concentrates with the fineness of -0.63 + 0.1 mm at different process steps.

при химическом обогащении кварца, после чего значительно уменьшаются массовые доли Al, Ca, Na, K, Mg.

Согласно электронно-микроскопическим наблюдениям, зерна необогащенной кварцевой крупки часто содержат железооксидные фазы (рис. 11, a), локализованные по микротрещинкам или образующие пленки на поверхности зерен. Реже отмечаются включения плагиоклаза, галита и кальцита. Воздействие СВЧ-излучения на кварцевую крупку приводит к декрепитации большого количества газово-жидких включений, о чем свидетельствуют множественные следы от вскрытых вауолей в виде пор характерного размера и морфологии (рис. 11,  $\delta$ ). Отмечаются также микроминеральные включения кальцита, ангидрита, плагиоклаза, вероятно, вскрытые вследствие раскалывания кварцевых зерен (рис. 11, s). Для удаления с поверхности кварца осажденных микровключений в операции очистки на данном этапе была включена ультразвуковая дезинтеграция кварцевой крупки в дистиллированной воде.

После химического выщелачивания в HCl кварцевые зерна сохраняют относительно гладкую поверхность сколов с локальными участками растворения кварца и единичными железооксидными микровключениями (рис. 11, e). Травление кварцевой крупки в HF сопровождается активным поверхностным растворением кварцевых зерен с образованием сети дефект-каналов и высвобождением микроминеральных включений оксидов железа, хлоридов натрия и калия из близповерхностных областей (рис. 11, d, e). По-видимому, эти включения были скрыты за тончайшими кварцевыми стенками, препятствовавшими их высвобождению при контакте с кислотой, а попав в вакуум при напылении электропроводящим слоем, прорвали их. Образование хлоридов натрия и калия может быть также результатом кристаллизации солевых растворов из вскрывшихся газово-жидких включений.

Таблица 4. Суммарное содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах глубокого обогащения по фракциям, ppm

Крупность, мм	-0.63 + 0.1	-0.63 + 0.5	-0.5 + 0.4	-0.4 + 0.315	-0.315 + 0.2	-0.2 + 0.1
Сумма примесей	56	51	45	44	43	43

Table 4. Total concentration of trace elements in quartz concentrate by fraction, ppm



**Рис. 11.** Электронно-микроскопические изображения зерен, фрагментов поверхности и микровключений кварцевой крупки на разных этапах очистки. a – зерно исходной кварцевой крупки с включениями магнетита (Mag);  $\delta$ , e – поверхность CBЧ-обработанной крупки со следами от вскрывшихся газово-жидких включений (1) и неоднородным микровключением кальцита (Cal); e – область поверхностного растворения зерна кварца с включением магнетита после выщелачивания в HCl;  $\partial$ , e – зерно кварца после выщелачивания в HCl;  $\partial$ , e – зерно кварца после выщелачивания в HF с бороздами травления и вскрывшимися включениями магнетита и галита (Hl).

**Fig. 11.** BSE images of grains, surface fragments, and microinclusions of quartz grains at different process steps. a - a grain of the initial quartz with magnetite inclusions (Mag);  $\delta$ , e - the surface of microwave-treated grain with traces of released fluid inclusions (1) and inhomogeneous calcite (Cal) microinclusions of; e - surface dissolution of quartz grain with the magnetite inclusion after leaching in HCl;  $\partial$ , e - quartz grain after leaching in HF with etching pits and released inclusions of magnetite and halite (HI).

Динамика изменения содержания основных газовых компонентов, выделяющихся при нагревании кварцевой крупки в ходе основных операций очистки приведена в табл. 5. Общее содержание газов, выделяющихся при нагревании кварцевой крупки до 1000 °C после электромагнитной сепарации составляет 1165 ppm. СВЧ воздействие на

Таблица 5. Содержание газов, выделившихся при нагревании кварцевой крупки разной степени
очистки в температурных интервалах 100–600 °С/600–1000 °С, ppm

Table 5. Content of gases released	l from quartz products of c	different process steps at it	s heating in tempera-
ture ranges of 100-600 °C/600-	1000 °C, ppm		

Этапы очистки	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	СО	N <sub>2</sub>	УГ	Сумма
Эл/магнитная сепарация	631/373	31/114	-/6.89	4.49/3.13	0.44/1.78	666/499
СВЧ, 3 мин	444/379	14.9/50	-/4.13	1.96/0.89	0.23/1.42	461/435
СВЧ, 10 мин	278/320	9.44/21.1	-/2.56	-/1.92	0.15/1.63	287/347
HCl 10%	243/302	7.19/19.9	-/5.03	-/0.84	0.10/1.39	250/329
HF 30%	140/103	7.27/16.5	-/4.99	-/1.22	0.49/3.27	148/129

УГ – сумма углеводородных газов (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>). "-" не обнаружено.



**Рис. 12.** Динамика газовыделения при нагревании кварцевой крупки на разных стадиях очистки. a – общее содержание газов, выделившихся в интервале 100–600 °C;  $\delta$  – содержание H<sub>2</sub>O в температурных интервалах 100–600 °C и (600–1000 °C); a – выделение CO и углеводородных газов в диапазоне 100–1000 °C. **Fig. 12.** Dynamics of the gas components release at the heating of quartz grains at individual process steps. a – the total content of gases released in the range of 100–600 °C;  $\delta$  – H<sub>2</sub>O content in temperature ranges of 100–600 °C and CO = 1000 °C.

600–1000 °C; *e* – the CO and hydrocarbon gases release at the heating in the range of 100–1000 °C.

кварцевую крупку в течение 3-х минут привело к снижению общего содержания газов на 23%, а в течение 10-ти минут – на 46% (рис. 12, *a*). При этом отмечается заметное уменьшение содержания низкотемпературной воды (100–600 °C) и малозначимое снижение содержания высокотемпературной воды (600–1000 °C) (рис. 12,  $\delta$ ). По-видимому, СВЧ обработка способствует в большей степени декрепитации газово-жидких включений крупных и средних размеров. Химическое травление в HCl существенно не повлияло на количество выделяющихся из кварцевой крупки газов. А выщелачивание в HF, сопровождаемое активным поверхностным растворением кварцевых зерен, привело к дополнительной декрепитации газово-жидких включений, как в низкотемпературном, так и в высокотемпературном интервалах (рис. 12, *a*,  $\delta$ ). Однако полного вскрытия газово-жидких включений после обогащения не произошло: суммарное содержание газов, выделившихся при нагревании обогащенной кварцевой крупки, составило 277 ррт. Отмечается сложно объяснимое поведение CO и углеводородных газов, содержание которых, возрастает в результате кислотного выщелачивания (рис. 12, *в*).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы минералого-технологические особенности жильного кварца месторождения Фенькина-Лампи в Карелии и рассмотрено влияние отдель-

ных операций обогащения кварца на качество получаемых концентратов. К основным минеральным включениям, обуславливающим высокое содержание элементов-примесей в исходном кварце относятся кальцит, хлорит, мусковит, тальк, полевой шпат, оксиды и гидроксиды железа, рутил. Преимущественная локализация включений по трещинам и границам кварцевых зерен благоприятна для их удаления при технологической обработке. Кварц в целом характеризуется высокой водонасыщенностью, осложняющей процесс обогащения традиционными методами. По данным ИК-спектроскопии основное количество воды в кварце присутствует в молекулярной форме в виде газово-жидких включений. Отмечается также незначительное количество водородсодержащих дефектов, связанных со структурными примесями Al в кристаллической решетке кварца. Газово-жидкие включения имеют высокую плотность распределения в кварце. Методом газовой хроматографии установлено, что в составе газовой фазы, выделяющейся при нагревании кварца доминирует  $H_2O_2$ , отмечаются  $CO_2$ ,  $CO_3$ ,  $CO_4$ ,  $CO_2$ ,  $CO_3$ ,  $CO_4$ , CON<sub>2</sub> и углеводородные газы. Обшая газонасышенность кварца значительно варьирует в пределах изученной выборки, не обнаруживая строгой закономерности в связи с принадлежностью образцов к какому-либо из выделяемых типов. Для всех типов кварца характерно газоотделение как в области низких (100-600 °C), так и высоких (600-1000 °C) температур, что в целом негативно характеризует качество кварца как сырья для наплава стекла и требует нетрадиционного подхода к обогащению.

С учетом выявленных технологических особенностей кварца предложена схема обогащения, включающая электромагнитную сепарацию, обработку СВЧ электромагнитным полем и ультразвуком, классификацию по узким классам крупности и кислотное выщелачивание в растворах HCl и HF. Электромагнитная сепарация приводит к существенному снижению содержания всех примесей за счет удаления магнитных и слабомагнитных минералов и находящихся с ними в сростках кальцита, слюды и др. CBЧ-обработка кварцевой крупки способствует эффективной декрепитации газовожидких включений крупных и средних размеров, но не обеспечивает вскрытие вакуолей ультрамалого размера. Заключительная доводка крупки в кислотах приводит к дополнительному вскрытию минеральных и газово-жидких включений в результате поверхностного растворения кварцевых зерен. Реализация выбранной стратегии обогащения позволяет получить кварцевый продукт удовлетворительного качества с содержанием примесей 43 ррт из исходно низкосортного кварцевого сырья, что может расширить области его применения в высокотехнологичном производстве.

Авторы благодарят руководителя экспериментов по обогащению Л.С. Скамницкую за консультации и обсуждение результатов, а также Т.П. Бубнову, оказавшую помощь в работе с фондовым кварцевым материалом.

Исследования выполнены в рамках государственных заданий Института геологии Карельского НЦ РАН и Института геологии Коми НЦ РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голованов Ю.Б., Михайлов В.П., Щипцов В.В., Родионов В.С. Кварцевое сырье / В кн. Минерально-сырьевая база Республики Карелии. Книга 2. Петрозаводск: Карелия, **2006**. С. 55–69.

Данилевская Л.А., Гаранжа А.В. Месторождение жильного кварца Фенькина-Лампи: геолого-минералогические аспекты формирования, типоморфные свойства и оценка качества / Геолого-технологические исследования индустриальных минералов Фенноскандии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, **2003**. С. 29–38.

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., Щипцов В.В. Кварцевое сырье Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. 226 с.

*Емлин Э.Ф., Синкевич Г.А., Якшин В.И.* Жильный кварц Урала в науке и технике. Свердловск: Средне-Уральское кн. из-во, **1988**. 272 с.

*Кораго А.А., Козлов А.В.* Текстуры и структуры жильного кварца хрусталеносных областей. Л.: Недра, **1988**. 159 с.

*Крейсберг В.А., Ракчеев В.П., Серых Н.М., Борисов Л.А.* Диагностика газово-жидких примесей в кварце масс-спектрометрическим методом // Разведка и охрана недр. **2007**. № 10. С. 12–18.

Кузнецов С.К., Лютоев В.П., Шанина С.Н., Светова Е.Н., Сокерина Н.В. Особенности качества жильного кварца Уральских месторождений // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2011. Вып. 4. № 8. С. 65–72.

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

*Насыров Р. Ш.* СВЧ декрепитация газожидкостных включений в кварцевых зернах // Обогащение руд. **2009**. № 2. С. 26–27.

Николаевский Г. М., Зиновьева З. А. Отчет о поисково-разведочных работах Остреченской партии в Медвежьегорском районе на месторождении кварца Фенькина-Лампи в 1962—1963 гг. Карельская КГРЭ, геолфонд. Петрозаводск. **1963**.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л.В. Глушанин, Н.В. Шаров, В.В. Щипцов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, **2011**. 431 с.

*Светов А.П.* Платформенный базальтовый вулканизм карелид Карелии. Л.: "Наука", **1979**. 208 с.

Светова Е.Н., Шанина С.Н., Бубнова Т.П. Разработка технологии обогащения низкосортного жильного кварца // Обогащение руд. **2020**. № 3. С. 25–30.

Светова Е.Н., Скамницкая Л.С., Шанина С.Н. Содержание воды в слабопрозрачном жильном кварце месторождения Фенькина-Лампи (Карелия) как критерий его качества // Разведка и охрана недр. **2019**. № 10. С. 35–40.

Скамницкая Л.С., Светова Е.Н., Шанина С.Н. Влияние газово-жидких включений на качество жильного кварца // Обогащение руд. **2019**. № 2. С. 20–26.

Сокерина Н.В., Зыкин Н.Н., Ефанова Л.И., Шанина С.Н., Симакова Ю. С. Условия формирования кварцевых жил золоторудных проявлений Манитанырдского района (Приполярный Урал) // Литосфера. **2010**. № 2. С. 100–111.

Соколов В.А., Галдобина Л.П., Рылеев А.В., Сацук Ю.И., Светов А.П., Хейсканен К.И. Геология, литология и палеография ятулия Центральной Карелии. Петрозаводск, **1970**. 345 с.

Штенберг М.В. Вода и водородсодержащие группировки в жильном кварце Уральских месторождений кварцевого сырья // Литосфера. 2014. № 3. С. 102–111.

Штенбере М.В., Быков В.Н. Инфракрасная спектроскопия водородсодержащих группировок в гранулированном кварце жилы "Беркутинская" (Южный Урал) // ЗРМО. 2007. № 3. С. 139–144.

*Щипцов В.В., Скамницкая Л.С.* Минералого-технологические особенности кварцевого сырья Карелии // Обогащение руд. 2000. № 3. С. 23–31.

#### Mineral Processing of Vein Quartz from the Fenkina-Lampi Deposit (Karelia)

### E. N. Svetova<sup>a</sup>, \*, S. N. Shanina<sup>b</sup>, V. B. Pikulev<sup>c</sup>, and O. V. Bukchina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk, Russia <sup>b</sup>Institute of Geology, Komi Scientific Center, Uralian Branch RAS, Syktyvkar, Russia <sup>c</sup>Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia \*e-mail: enkotova@rambler.ru

The paper covers the results of the mineralogical and process investigation of the vein quartz of the Fenkina-Lampi deposit in Karelia, considered as a promising source of high-purity guartz raw materials. The main mineralogical features of the quartz which make it possible to predict the quality of quartz raw materials and contribute to the choice of optimal process flow are considered. It is shown that quartz is characterized by high water content, which complicates the processing by traditional methods. According to IR spectroscopy data, the basic amount of water in quartz is present in molecular form as fluid inclusions. The chromatographic analysis of the gas phase released from quartz at its heating detects  $H_2O$ ,  $CO_2$ , CO, N<sub>2</sub> and hydrocarbon gases. The gas release takes place both at low-temperature (100–  $600 \,^{\circ}\text{C}$ ), and at high-temperature ( $600-1000 \,^{\circ}\text{C}$ ) ranges, which generally negatively characterizes the quartz as a raw material for high-quality fused glass. A process flow including electromagnetic separation, microwave, and ultrasound treatment, fractional acid leaching in HCl and HF is proposed. The effect of individual processing steps on the quality of the obtained quartz concentrates was analyzed. It has been shown that the use of directed operations, taking into account the technological features of quartz, can significantly improve the quartz products quality and reduce the total trace element content from 529 ppm to 43 ppm in concentrates with the fineness of -0.315 + 0.2 and -0.2 + 0.1 mm.

*Keywords*: vein quartz, technological mineralogy, processing, trace-elements, IR spectroscopy, gas chromatography, electron microscopy, ICP-AES, Fenkina-Lampi deposit

#### REFERENCES

Aines R.D., Rossman G.R. Water in minerals? A peak in the infrared. J. Geophys. Res. 1984. Vol. 89. N B6. P. 4059–4071.

Buttress A. J., Rodriguez J. M., Ure A., Ferrari R. S., Dodds C., Kingman S. W. Production of high purity silica by microfluidic-inclusion fracture using microwave pre-treatment. *Minerals Engineering*. **2019**. Vol. 131. P. 407–419.

Danilevskaya L.A., Garanzha A.V. Fenkina-Lampi vein quartz deposit: geological and mineralogical aspects of formation, typomorphic properties and quality assessment. In *Geological and technologi*cal research of industrial minerals in Fennoscandia. Petrozavodsk, **2003**. P. 29–38. (in Russian).

Danilevskaya L.A., Skamnitskaya L.S. Milk-white vein quartz concentrates grade increase. Ore Processing. 2009. N 5. P. 21–25. (in Russian).

Danilevskaya L.A., Skamnitskaya L.S., Shchiptsov V.V. Quartz raw materials of Karelia. Petrozavodsk: Karelian SC RAS, 2004. 226 p. (in Russian).

*Emlin E.F., Sinkevich G.A., Yakshin V.I.* Vein quartz of the Urals in science and thechnology. Sverd-lovsk, **1988**. 272 p. (*in Russian*).

Golovanov Y.B., Mikhailov V.P., Shchiptsov V.V., Rodionov V.S. Quartz raw material. In: Mineral resource base of the Republic of Karelia. Vol. 2. Petrozavodsk: Karelia, **2006**. P. 55–69 (in Russian).

Hou Y., Liu P., Hou Q., Duan H., Xie Y. Study on removal fluid inclusions in quartz sand by microwave explosion. Nanoscience and Nanotechnology Letters. 2017. Vol. 9. N 2. P. 151–154.

Ito Y, Nakashima S. Water distribution in low-grade siliceous metamorphic rocks by micro-FTIR and its relation to grain size: a case from the Kanto Mountain region, Japan. Chem. Geol. 2002. Vol. 189. P. 1-18.

Kats A. Hydrogen in Alpha-quartz. Philips Research Reports. 1962. Vol. 17. P. 201-279.

*Korago A.A., Kozlov A.V.* Textures and structures of vein quartz from the rock crystal bearing areas. Leningrad: Nedra. **1988**. 159 p. (*in Russian*).

*Kreisberg V.A., Rakcheev V.P., Serykh N.M., Borisov L.A.* Diagnostics of gas-liquid impurities in quartz by the mass-spectrometry method. *Prospect and Protection of Mineral Resources.* **2007**. N 10. P. 12–18 (*in Russian*).

*Kronenberg A.K.* Hydrogen speciation and chemical weakening of quartz. *Rev. Miner.* **1994**. Vol. 29. P. 123–176.

Kuznetsov S.K., Lyutoev V.P., Shanina S.N., Svetova E.N., Sokerina N.V. Quality of vein quartz in Ural deposits. News Komi SC UB RAS. 2011. Vol. 4. N 8. P. 65–72 (in Russian).

*Mel'nikov E.P.* Geology, genesis and industrial types of quartz deposits. Moscow: Nedra, **1988**. 216 p. (*in Russian*).

*Müller A., Ihlen P.M., Wanvik J.E., Flem B.* High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway. *Miner Deposita*. **2007**. N 42. P. 523–535.

Nasyrov R.S. Microwave-decrepitation of liquid-gas inclusions in quartz grains. Ore Peocessing. 2009. N 2. P. 26–27 (in Russian).

*Nikolaevskii G.M., Zinov'eva Z.A.* Report on prospecting and exploration work of the Ostrechenskaya party in the Medvezhyegorsk region at the Fenkina-Lampi quartz deposit in 1962–1963. Karelian geological exploration expedition, geological fund. Petrozavodsk. **1963** (*in Russian*).

Paleoproterozoic Onega Structure (Geology, Tektonics, Deep Structure, and Minerageny). Ed. by L.V. Glushanin, N.V. Sharov, V.V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KSC RAS, **2011**. 431 p. (*in Russian*).

Shchiptsov V.V., Skamnitskaya L.S. Mineralogical and technological features of quartz raw material of the Karelia. Ore processing. 2000. N 3. P. 23–31 (*in Russian*).

Shtenberg M.V. Water and hydrogen-bearing groupings in vein quartz from Uralian quartz raw material deposits. *Litosfera*. **2014**. N 3. P. 102–111 (*in Russian*).

Shtenberg M.V., Bykov V.N. Infrared spectroscopyof hydrogen bearing groupings in granulated quartz from "Berkutinskaya" vein (the South Urals). Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc). 2009. N 3. P. 139–144 (in Russian).

Skamnitskaya L.S., Svetova E.N., Shanina S.N. The effect of fluid inclusion on the vein quartz drade. Ore proceesing. 2019. N 2. P. 20–26 (in Russian).

Sokerina N.V., Zykin N.N., Efanova L.I., Shanina S.N., Simakova Yu.S. Formation conditions for the quartz veins of gold ore occurrences in the Manitanyrd region (Subpolar Urals). Litosfera. 2010. N 2. P. 100–111 (in Russian)

Sokolov V.A., Galdobina L.P., Ryleev A.V., Satsuk Yu.I., Svetov A.P., Kheiskanen K.I. Geology, lithology and paleogeography of Yatulian of the Central Karelia. Petrozavodsk: "Karelia", **1970**. 345 p. (*in Russian*)

Stenina N.G. Water-related defects in quartz. Bulletin of Geosciences. 2004. Vol. 79. N 4. P. 251–268. Svetov A.P. Platform basaltic volcanism of Karelian Karelides. Leningrad: Nauka, 1979. 208 p. (in Russian).

Svetova E.N., Shanina S.N., Bubnova T.P. Development of a processing technology for low-grade vein quartz. Ore Processing. 2020. N 3. P. 25–30 (in Russian).

Svetova E.N., Skamnitskaya L.S., Shanina S.N. Water content in the weakly transparent vein quartz of the Fenkina-Lampi (Karelia) deposit as the criterion of its grade. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. **2019**. N 10. P. 35–40 (*in Russian*).