

УДК 549.514.5: 622.7 (470.22)

## ВЫСОКОКРЕМНИСТЫЕ ПОРОДЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАРЕЛИИ – ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

**Е. Н. Светова, Т. П. Бубнова, О. В. Букчина**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

Представлены результаты минералого-технологического исследования высококремнистых пород Центральной Карелии, выполненного с целью оценки возможности их использования в качестве перспективного природного материала для получения кварцевых концентратов различного назначения. Вулканогенно-осадочные архейские силициты, галечный кварц из палеопротерозойских кварцевых конгломератов и слабопрозрачный жильный кварц проанализированы методами оптической и электронной микроскопии, микрозондового, рентгенофлуоресцентного и рентгенофазового анализа, атомно-эмиссионной спектрометрии. Проведены исследования обогатимости данных пород. Технологическими испытаниями обогатимости силицитов Эльмусской структуры показана возможность получения на их основе кварц-полевошпатового концентрата, отвечающего требованиям ГОСТ 7030-75 на сырье для производства тонкой керамики ( $Fe_2O_3 \leq 0,2\%$ ,  $K_2O+Na_2O \geq 8\%$ ,  $K_2O/Na_2O = 2$ ). Кварцевые концентраты из галечного кварца конгломератов благодаря низкому содержанию Li, B и P соответствуют требованиям к кварцевому сырью для производства ферросилиция высоких марок. Полученный на основе слабопрозрачного жильного кварца концентрат фракции  $-0,315 + 0,1$  мм с суммарным содержанием примесей 34,6 ppm соответствует требованиям сорта глубокого обогащения КГО отдельных марок (ТУ 5726-002-11496665-97) для производства особо чистого прозрачного кварцевого стекла, применяемого в производстве полупроводниковых материалов, электронике, светотехнике, средств волоконно-оптической связи.

**Ключевые слова:** кварцевое сырье; высококремнистые породы; обогащение; кварцевые концентраты; Центральная Карелия.

### **E. N. Svetova, T. P. Bubnova, O. V. Bukchina. HIGH-SILICA ROCKS OF CENTRAL KARELIA – A POTENTIAL SOURCE OF QUARTZ RAW MATERIAL**

The results of mineralogical-technological study of high-silica rocks of Central Karelia are discussed with a view to assessing the potential of using these rocks as natural material for producing quartz concentrates for various applications. Weakly transparent vein quartz, pebble quartz from Paleoproterozoic conglomerates and volcanogene-sedimentary silicites were subjected to optical and electron microscopy, microprobe analysis, X-ray fluorescence and diffraction analysis, atomic emission spectrometry. Technological studies of the silicites showed they can be enriched to produce quartz-feldspatic concentrate meeting the requirements to feedstock for fine ceramics ( $Fe_2O_3 \leq 0.2\%$ ,  $K_2O+Na_2O \geq 8\%$ ,  $K_2O/Na_2O = 2$ ). Owing to low Li, B and P content, quartz concentrates made from pebble quartz conglomerates fulfill the requirements for raw material for high-grade ferrosilicon production. Processing experiments were carried out, showing that the quartz concentrate of the  $-0.315 + 0.1$  mm fraction obtained from weakly transparent

vein quarts, with 34.6 ppm total impurity content meets the requirements for high purity quartz products of some grades (TU 5726-002-11496665-97) and is suited for extra pure fused glass utilizable in the manufacturing of semiconductor materials, electronics, lighting engineering, means of fiber-optic communication.

**Key words:** quartz raw material; high-silica rocks; processing; quartz concentrates; Central Karelia.

## Введение

В 1995–2000 годах Институтом геологии КарНЦ РАН совместно с Северной поисково-разведочной экспедицией проводились исследования по проекту «Прогнозно-минерагеническое изучение Республики Карелия в масштабе 1:1 000 000 с целью выявления объектов, перспективных на минеральное сырье для производства специальных кварцевых изделий». Результаты выполненных работ, включавших полевые и аналитические исследования, лабораторные испытания обогатимости кварцевого сырья, показали потенциал не только традиционно известной Беломорской пегматитовой провинции, но и всей территории Карелии, где были выделены перспективные минерагенические зоны, кварценозные районы и узлы, в том числе целый ряд новых для региона объектов [Родионов, Щипцов, 2000; Голованов и др., 2006]. Вместе с тем были даны рекомендации по проведению дальнейших поисковых и прогнозно-минерагенических исследований на территории Карелии, которые реализуются и в настоящее время, в отношении как традиционно, так и нетрадиционного кварцевого сырья.

К перспективным на нетрадиционное кварцевое сырье объектам в Центральной Карелии может быть отнесена Гирвас-Эльмусская зона (географически р-н пос. Гирвас – пос. Эльмус в 100–120 км к северу от г. Петрозаводска), в пределах которой широкое развитие имеют кварцевые конгломераты и песчаники, кварциты, аркозы, выходы коренных кварцевых жил и высококремнистые вулканогенно-осадочные породы (силициты). В настоящей работе представлены результаты минералого-технологического исследования некоторых типов кварцевого сырья обозначенной территории, выполненного с целью оценки возможности их использования в качестве перспективного природного материала для получения кварцевых концентратов различного назначения.

## Объекты и методы исследования

Основу исследования составили следующие разновидности высококремнистых пород Цен-

тральной Карелии, имеющие достаточную геологическую изученность: архейские силициты вулканогенно-осадочного генезиса, галечный кварц из палеопротерозойских конгломератов и слабопрозрачный жильный кварц. Места опробования пород схематично представлены на рис. 1.

*Силициты* – высококремнистые породы, широко проявлены в составе мезоархейских андезит-дацитов, риолитовой (Эльмусская структура) и коматиит-базальтовой (Койкарская структура) ассоциаций Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Центральной Карелии. Формирование осадочных пород приурочено к деятельности подводных гидротермальных систем, существующих в областях активного вулканизма, и соответствует возрастному интервалу 3,0–2,84 млрд лет [Вулканизм..., 1981]. Силициты образуют горизонты в верхних частях изучаемых вулканогенно-осадочных разрезов, представленных стратифицированными, чередующимися слоями полимиктовых конгломератов, песчаников, туфов дацитового состава, туффитов, полевошпатовых граувакк, доломитов с прослоями углеродсодержащих алевролитов. Среди силицитов выделяются тонкослоистые, однородные массивные, сливные и конкреционные разности, между которыми существуют взаимопереходы [Светова, 1988]. Мощность высококремнистых прослоев в разрезах достигает 30–50 м при значительном площадном распространении.

Для оценки возможных областей использования силицитов изучены тонкослоистые разновидности силицитов Эльмусской структуры, варьирующие по цвету от серовато-розовых до темно-красных. Опробование (12 лабораторных проб и одна валовая технологическая проба массой 65 кг) выполнено на трех равноудаленных участках, расположенных вдоль профиля длиной 100 м.

*Палеопротерозойские (ятулийские) кварцевые конгломераты* изучены в районе пос. Гирвас, где они, перекрывая архейские комплексы Койкарской структуры, формируют значительную часть осадочной толщи мощностью 25–30 м (относимой к нижнему уровню ятулия Койкарской формации [Melezhik et al.,

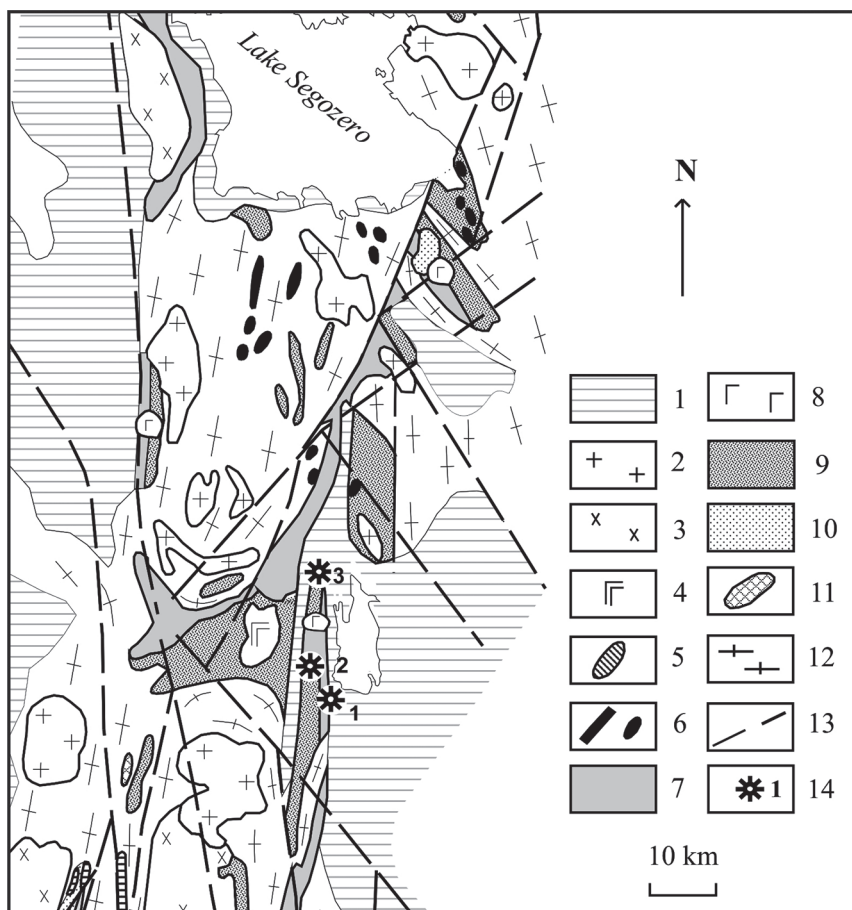


Рис. 1. Упрощенная схема геологического строения центральной части Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса [Светов, 2005]:

палеопротерозойские образования: 1 – супракрустальные образования (2,50–2,10 млрд лет); неоархейские образования: 2 – плагиомикроклиновые граниты (2,85–2,87 млрд лет), 3 – диориты, гранодиориты, санукитоиды (2,74 млрд лет); 4 – габбродиориты; 5 – габбронориты; 6 – основные и ультраосновные породы; мезоархейские образования: 7 – андезидацитовые вулканы и вулканогенно-осадочные породы (2,86–2,85 млрд лет), 8 – высокомагнезиальное габбро, 9 – коматиит-базальтовая ассоциация и вулканогенно-осадочные породы (3,0–2,95 млрд лет), 10 – вулканы БАДР-серии и вулканогенно-осадочные породы (3,05–2,94 млрд лет); 11 – амфиболиты; 12 – гнейсо-граниты и мигматит-граниты (3,15–2,95 млрд лет), 13 – разломы; 14 – места отбора проб: 1 – кварцевые конгломераты п. Гирвас, 2 – кварцевые жилы в пределах Койкарской структуры; 3 – силициты Эльмусской структуры

Рис. 1. A simplified scheme of the geological structure of the central part of the Vedlozersko-Segozersky greenstone belt [Svetov, 2005]:

Paleoproterozoic formations: 1 – supra-crystalline formations (2.50–2.10 Ga); Neoarchean formations: 2 – plagiomicrocline granites (2.85–2.87 Ga), 3 – diorites, granodiorites, sanukitoids (2.74 Ga); 4 – gabbrodiorites; 5 – gabbronorites; 6 – basic and ultrabasic rocks; Mesoarchean formations: 7 – andesidacitic volcanics and volcanic-sedimentary rocks (2.86–2.85 Ga), 8 – high-magnesian gabbro, 9 – komatiite-basalt association and volcanic-sedimentary rocks (3.0–2.95 Ga), 10 – volcanics of the BADR series and volcanic-sedimentary rocks (3.05–2.94 Ga); 11 – amphibolites; 12 – gneiss granites and migmatite granites (3.15–2.95 Ga), 13 – faults; 14 – sampling sites: 1 – quartz conglomerates of the Girvas area; 2 – quartz veins within the Koikarskaya structure; 3 – silicites of the Elmus structure

2013]), сформированную гравелитами, раз-  
нозернистыми песчаниками и алевролита-  
ми, и имеют латеральное распространение до  
2–3 км<sup>2</sup>. Гальки кварца размером от единиц

до первых десятков сантиметров слагают зна-  
чительную часть галечного материала в кон-  
гломератах (до 90 % на отдельных участках),  
присутствуют также гальки силицитов, гра-

фитистых сланцев, подстилающих базальтов. Цемент в конгломератах представлен кварцито-песчаниками – плотными светлыми серо-зелеными породами крупно- и среднезернистой структуры кварцево-серицитового и кварцево-серицито-хлоритового состава с признаками рассланцевания и ожелезнения.

Оценка качества кварца из Гирвасских конгломератов на единичных образцах галек проводилась ранее [Щипцов и др., 1998]. С целью определения возможности использования галечного кварца из конгломератов в качестве материала для получения кварцевых концентратов высокой чистоты выполнено детальное опробование разных уровней конгломератовой толщи (по латерали и разрезу). Изучено 12 образцов кварцевых галек размером от 10 до 20 см по длинной оси, макроскопически различающихся между собой по цвету, степени прозрачности и количеству минеральных включений. Для экспериментов по обогащению галечного кварца использованы две валовые технологические пробы кварцевых галек с высокой и низкой степенью минерализации.

*Жильный кварц* в пределах рассматриваемой территории изучен на примере выявленных и описанных ранее коренных кварцевых жил, секущих архейские мафитовые, андезитовые и вулканогенно-осадочные комплексы в центральной части Койкарской структуры [Родионов, Щипцов, 2000; Данилевская и др., 2004]. Опробование выполнено по четырем коренным кварцевым жилам в районе озер Питки-Лампи, Калиево-Лампи и Ристи-Лампи (2 км к северу от пос. Гирвас). Видимая мощность жил варьирует от 3 до 5 м, протяженность – до 20 м. Жилы сложены серовато-белым, иногда до дымчатого, средне- и крупнозернистым слабопрозрачным кварцем. На контакте с вмещающими породами наблюдаются прослои тальк-хлоритового состава мощностью до 3 см, вытянутые параллельно простиранию жил. Отобрано 15 образцов жильного кварца и одна валовая технологическая проба массой 20 кг.

Для химических и минералого-петрографических исследований были изготовлены шлифы, аншлифы и порошковые препараты. На технологических пробах проведены эксперименты по обогащению.

Определение возможности использования нетрадиционных типов пород как сырья для получения высококачественных кварцевых продуктов включает подбор эффективных технологий их очистки, учитывающих типоморфные особенности кварца конкретных объектов. Для выявления минералого-технологических особенностей высококремнистых пород задей-

ствован комплекс методов минералого-петрографического исследования. Изучение шлифов проведено с использованием оптического микроскопа ПОЛАМ Р-211. Силикатный анализ пород выполнен методом рентгенофлуоресцентного спектрального анализа (РФСА) на спектрометре Thermo Scientific ARL Advant'X (аналитик С. В. Бурдюх). Методом рентгеновской дифракции (дифрактометр ARL X'TRA Thermo Scientific) определен фазовый состав высококремнистых пород и получена количественная структурная характеристика кварца (аналитик И. С. Инина). Изучение морфологии и химического состава минералов высококремнистых пород, микровключений в кварце выполнено с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments). Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах определено методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) в НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва). Исследования обогатимости высококремнистых пород проведены под руководством Л. С. Скамницкой на лабораторном оборудовании отдела минерального сырья Института геологии КарНЦ РАН.

## Результаты и обсуждение

**Силициты.** Согласно петрографическим исследованиям, основными породообразующими минералами силицитов являются кварц, калиевые и натриевые полевые шпаты размером от 0,001 до 0,01 мм, в подчиненном количестве присутствует мусковит, биотит, кальцит, хлорит (рис. 2). Среди аксессуаров отмечаются циркон, пирит, титанит, фторапатит, молибденит, алланит, паризит и ряд редкоземельных фаз. Рентгенофазовым анализом установлено, что силициты имеют кварц-полевошпатовый или мусковит-полевошпат-кварцевый состав: в отдельных пробах содержание кварца достигает 52 %, наблюдаются значительные вариации в содержании полевых шпатов и мусковита (табл. 1).

Химический состав силицитов определяется вариациями минерального состава и характеризуется преобладанием  $\text{SiO}_2$  (71–77 мас. %) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13–16 мас. %). В меньшем количестве отмечаются  $\text{K}_2\text{O}$  (4–7 мас. %),  $\text{Na}_2\text{O}$  (1–5 мас. %),  $\text{FeO}$  (0,2–1 мас. %). Усредненные данные о химическом составе малых лабораторных проб по отдельным участкам приведены в табл. 2. По содержанию оксидов щелочных металлов ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) ~ 9 % и величине калиевого модуля ( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} \geq 2$ ) рассматриваемые



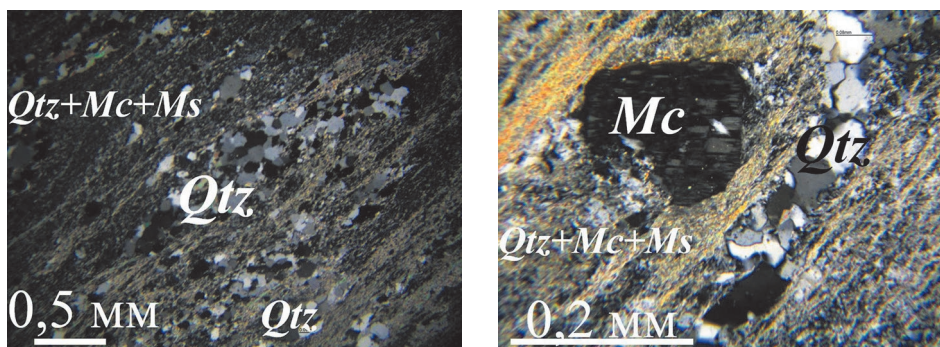


Рис. 2. Тонкослоистая структура силицитов. Фото шлифов, николи ×.

Qtz – кварц, Mc – микроклин, Ms – мусковит

Pic. 2. Thin-bedded structure of silicites. Photo of thin sections, nicols ×.

Qtz – quartz, Mc – microcline, Ms – muscovite

Таблица 1. Минеральный состав силицитов Эльмусской структуры по данным рентгенофазового анализа, %

Table 1. Mineral composition of silicites of the Elmuss structure according to the X-ray phase analysis data, %

Минерал Mineral	Участок 1 Site 1				Участок 2 Site 2				Участок 3 Site 3			
	E-4/1	E-4/2	E-4/3	E-4/4	E-5/1	E-5/2	E-5/3	E-5/4	E-6/1	E-6/2	E-6/3	E-6/4
Кварц / Quartz	30,4	29,5	34	44,6	51,8	33,4	36,6	40,4	49	47,9	44,4	44,1
Альбит / Albite	44	39,5	30,9	9,1	19	15,6	43,2	35,1	20,1	19,5	22,4	33,8
Микроклин / Microcline	21,4	28,9	25,9	36,5	10,4	46,6	18,5	20,4	14,5	16	18,5	8,7
Мусковит / Muscovite	4,2	1,8	9,1	8,6	18,0	4,5	1,7	1,6	15,3	15,5	13,9	4,1
Хлорит / Chlorite	–	0,3	–	1,1	0,7	–	–	2,6	1,1	1,1	0,7	3,3
Кальцит / Calcite	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	6

породы соответствуют требованиям промышленности к полевошпатовой продукции, однако по содержанию FeO (входящего главным образом в состав железистых слюд) нуждаются в дополнительном обогащении [Тохтасьев, 1998].

Эксперименты по обогащению силицитов Эльмусской площади подробно изложены в отдельной работе [Скамницкая и др., 2016]. Резюмируя результаты, отметим, что минералогическими исследованиями и магнитным анализом узких фракций силицита (–1 + 0,25 и –0,25 + 0,05 мм) установлено, что качество кварц-полевошпатовых концентратов определяется количеством и размером трудно-раскрываемых микронных включений мусковита, частичное раскрытие которого начинается с класса 0,25 мм и менее. Лабораторные исследования показали, что методом магнитной сепарации измельченного до 0,25 мм и обеспыленного по классу 0,063 мм силицита можно получить кварц-полевошпатовый концентрат с массовой долей Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> менее 0,2 %, отвечающий требованиям ГОСТ 7030-75 на сырье для производства тонкой керамики (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 0,2 %,

Таблица 2. Усредненный химический состав малых лабораторных проб силицитов Эльмусской структуры по данным РФСА, мас. %

Table 2. Average chemical composition of silicites of the Elmuss structure according to the RFA data, wet. %

Оксиды Oxides	Участок 1 Site 1	Участок 2 Site 2	Участок 3 Site 3
SiO <sub>2</sub>	74,60	75,51	74,04
TiO <sub>2</sub>	0,08	0,07	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,15	13,33	14,17
FeO <sub>общ</sub>	0,39	0,41	0,28
CaO	0,93	0,54	0,70
MgO	0,77	0,53	0,62
Na <sub>2</sub> O	3,28	3,21	3,21
K <sub>2</sub> O	5,95	5,69	5,86
п. п. п. LOI	1,12	0,92	0,84
сумма sum	100,09	99,84	99,12
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	9,22	8,90	9,07
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	2,93	2,66	2,08

K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O ≥ 8 %, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O = 2). При этом выделение кварца в отдельный продукт не является

необходимой операцией, т. к. тонкое срастание полевых шпатов и кварца в силицитах является положительным фактором с позиций керамики.

Альтернативным вариантом применения вулканогенно-осадочных силицитов Центральной Карелии может быть их использование в качестве сырья для изготовления высокопрочного щебня и наполнителя при производстве различных строительных материалов [Скамницкая и др., 2017].

**Кварцевые конгломераты.** Минералогическое петрографическое изучение галечного кварца показало, что все разновидности кварцевых галек содержат минеральные включения, развитые как внутри кварцевых зерен, так и по залеченным микротрещинкам. Основной минеральной примесью является мусковит, образующий преимущественно крупные (>200 мкм) лейсты, иногда в ассоциации с включениями магнетита и хлорита. В редких случаях отмечаются включения альбита, микроклина и кальцита. Микроминеральные включения мусковита, циркона, рутила, титанита, сфена, монацита, эпидота локализируются, как правило, внутри кварцевых зерен. Следует отметить, что в общей массе кварцевой гальки встречаются единичные обломки с чрезвычайно большим количеством крупных и мелких минеральных включений апатита, кальцита, амфибола, монацита и окислов железа. Наличие в общей массе гальки такого кварца в случае использования конгломератов

для получения кварцевых концентратов может негативно отразиться на качестве последних. Поэтому в задачи работы входила также оценка качества кварцевого продукта, получаемого на основе сильноминерализованного галечно-го кварца.

По данным силикатного анализа, содержание основных петрогенных оксидов в галечном кварце варьирует, мас. %: SiO<sub>2</sub> (95,8–98,0), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,4–1,1), FeO<sub>общ</sub> (0,1–0,9), CaO (0,2–0,3), K<sub>2</sub>O (0,1–0,4), MgO (0–0,1). На порошковых дифрактограммах образцов галек присутствуют отражения α-кварца, других форм кремнезема не установлено. Значения параметров элементарной ячейки (ПЭЯ) галечного кварца, а также величины индекса кристалличности (I<sub>кр</sub>), рассчитанные в соответствии с известной методикой [Murata, Norman, 1976], свидетельствуют о достаточной однородности кварца из галек и соответствии его гидротермальному жильному кварцу (табл. 3, рис. 3). В предыдущих исследованиях на основании геохимического анализа галечного кварца нами был сделан вывод о том, что основным источником терригенного материала при формировании конгломератовой толщи, вероятнее всего, являлись эродированные гидротермальные жилы нижележащего вулканогенного комплекса [Svetova et al., 2019].

Эксперименты по обогащению галечного кварца из конгломератов выполнены на мате-

Таблица 3. Параметры элементарной ячейки (a, c, V) и индекс кристалличности (I<sub>кр</sub>) жильного кварца и галечного кварца конгломератов Центральной Карелии

Table 3. Lattice cell parameters (a, c, V) and crystallinity index (I<sub>cr</sub>) for vein quartz and conglomerates pebble quartz of Central Karelia

Тип кварца Quartz type	№ пробы Probe No.	a, Å	c, Å	V, Å <sup>3</sup>	I <sub>кр</sub>
Конгломератовый Conglomerate	G-3	4,9137	5,4053	113,02	6,7
	G-4	4,9135	5,4053	113,01	7,4
	G-6	4,9134	5,4049	113,00	7,3
	G-7	4,9134	5,4050	113,01	7,5
	G-8	4,9133	5,4050	113,00	7,4
	G-10	4,9132	5,4048	112,99	7,1
	G-11	4,9136	5,4052	113,02	7,1
	G-12	4,9134	5,4050	113,00	7,2
	G-13	4,9135	5,4052	113,01	7,1
	G-14	4,9135	5,4050	113,01	7,0
	G-15	4,9135	5,4051	113,01	7,7
G-17	4,9135	5,4051	113,01	6,5	
Жильный Vein	Гир-4/1	4,9138	5,4055	113,03	7,6
	Гир-4/2	4,9135	5,4051	113,01	7,8
	Гир-4/3	4,9135	5,4056	113,02	7,7
	Гир-4/4	4,9140	5,4052	113,03	7,8
	Гир-4/5	4,9135	5,4051	113,01	8,3

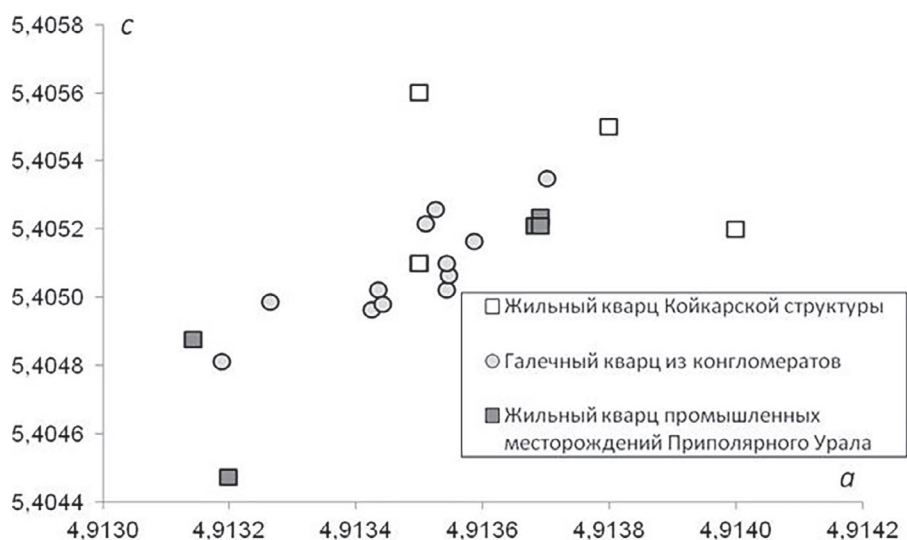


Рис. 3. Соотношение параметров  $a$  и  $c$  (Å) элементарной ячейки кварца из жил и галек конгломератов в сравнении с гидротермальным кварцем промышленных месторождений Приполярного Урала [Светова, Инина, 2012]

Pic. 3. Lattice cell parameters  $a$  and  $c$  ratio for quartz from veins and conglomerate pebbles in comparison with hydrothermal quartz of the Subpolar Urals deposits [Svetova, Inina, 2012]

риале двух технологических проб (№ 1 и № 10) и детально рассмотрены в нашей предыдущей работе [Скамницкая и др., 2014]. Основное отличие технологических проб заключается в степени загрязненности галечного кварца твердыми минеральными примесями. Галечный кварц пробы № 10 по сравнению с кварцем пробы № 1 является более чистым, среди включений в нем преобладают полевые шпаты, кальцит и мелкий мусковит. В кварцевой пробе № 1 доминирует мусковит, развитый в виде мелких чешуек и пластинок по границам кварцевых зерен. Стадия рудоподготовки включала дезинтеграцию горной массы, сортировку с отделением гальки, дробление, сухое измельчение с классификацией. Исходя из состава и размера минеральных примесей предварительное обогащение выполнено на крупке фракции  $-0,4 + 0,1$  мм. Оно включало магнитную сепарацию, поцикловую флотацию железосодержащих минералов, слюд и полевых шпатов, СВЧ-обработку и выщелачивание в HCl (10% р-р, 1 ч, 100 °C). Характеристика кварцевых concentra-

тов, полученных из технологических проб № 1 и № 10, приведена в табл. 4. Валовое содержание примесей в кварцевых продуктах составляет 730 и 323 ppm. В составе примесей доминируют Al, K, Fe, Ca и Na, присутствие которых связано главным образом с невысвободившимися мельчайшими включениями слюды, полевых шпатов, карбонатов и отчасти может быть связано с составом газовой-жидких включений (ГЖВ) и структурными дефектами.

Использование плавиковой кислоты при последующих операциях глубокого обогащения, скорее всего, приведет к dealюминированию кварца, что может стать предметом дальнейших технологических исследований. Однако на данном этапе галечный кварц из конгломератов нельзя отнести к перспективному сырью для получения высокочистых кварцевых концентратов. Положительной характеристикой полученных кварцевых продуктов является низкое содержание Li, B и P, позволяющее рассматривать данный тип кварца как сырье для производства ферросилиция высоких марок.

Таблица 4. Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах из жильного кварца (1) и кварцевой гальки конгломератов (2/№ 1, 2/№ 10) Центральной Карелии, ppm

Table 4. Trace elements content in quartz concentrates from vein quartz (1) and from conglomerate pebble quartz (2/№ 1, 2/№ 10) of Central Karelia, ppm

№	Fe	Ti	Zr	Al	Mn	Sr	Zn	B	Mg	Ca	Ba	Ni	Cr	Cu	K	Na	Li	Ge	P	Co	Σ
1	1,6	4,0	0,03	12	0,03	0,13	0,05	0,34	1,1	1,9	0,10	0,03	0,03	0,07	2,5	9,5	0,3	0,32	<0,2	0,01	34,6
2/№ 1	57	6,9	0,61	415	0,51	0,13	0,05	0,9	12	16	3	0,14	0,12	0,32	208	7,7	0,05	1,2	0,1	0,05	730
2/№ 10	36	3,5	0,24	140	0,42	0,32	0,20	2,2	15	28	2,2	0,02	0,05	0,07	80	14	0,07	0,25	0,1	0,01	323

**Жильный кварц.** По данным петрографического изучения, кварц неравнозернистый, в различной степени деформированный (рис. 4, а). В крупных зернах первичного кварца, в межзерновом пространстве или вдоль извилистых трещин деформаций наблюдаются мелкие зерна новообразованного кварца, формирующие тонкие прожилки или гнездообразные скопления (рис. 4, б).

Набор минеральных примесей в кварце из разных жил одинаковый с небольшими количественными вариациями: кальцит, хлорит, плагиоклаз (альбит), слюды, сульфиды, барит. Микроминеральные включения расположены как внутри зерен кварца, так и по трещинам или в межзерновом пространстве. Для кварца характерно большое количество ГЖВ размером от сотых долей миллиметра и меньше, что обуславливает его невысокое светопропускание (50–57 %). Многостадийный характер образования жильного кварца помимо его рекристаллизации привел к образованию флюидных включений нескольких генераций, распределенных неравномерно. Локализация ГЖВ происходит как внутри зерен кварца (рис. 4, в), так и вдоль межзерновых границ (рис. 4, г) или по мелким трещинам. В составе ГЖВ преобладают включения сухих газов, а также водные растворы с содержанием газовой фазы от 10 до 30 %. Устанавливаются также вакуоли с большим содержанием твердой кристаллической фазы.

Содержание  $\text{SiO}_2$  в кварце варьирует в интервале 96,46–98,72 мас. % (в среднем 98,13 мас. %). Основные примеси связаны с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,38–0,92 мас. %),  $\text{MgO}$  (0,06–0,74 мас. %) и  $\text{FeO}_{\text{общ}}$  (0,10–0,41 мас. %), входящими в состав микроминеральных включений слюд, плагиоклазов и карбонатов.

Рентгенографическим исследованием кварца одной из крупных жил установлено, что значения ПЭЯ варьируют:  $a$  – от 4,9135 до 4,9140 Å,  $c$  – от 5,4031 до 5,4055 Å (табл. 3). При сопо-

ставлении этих данных с аналогичными данными для промышленных разновидностей кварца гидротермальных жил Приполярного Урала видно, что параметры  $a$  и  $c$  для жильного кварца Гирвасской площади в большинстве случаев имеют завышенные значения (рис. 3). Можно предположить, что это связано с вхождением в кварцевую решетку некоторых примесей (Al, Li, Fe), приводящим к незначительным ее изменениям, что отмечалось и в других исследованиях [Афанасьева и др., 1959]. Величина индекса кристалличности ( $I_{\text{кр}}$ ), варьирующая в интервале 7,6–8,3, указывает на достаточно хорошую упорядоченность его кристаллической решетки.

Исходя из опыта работы с жильным кварцем, особенностей локализации минеральных включений в кварце, в данном случае была использована следующая лабораторная схема обогащения: стадия рудоподготовки (дезинтеграция жильной массы, измельчение в замкнутом цикле с выделением классов крупности  $-1 + 0,315$  и  $-0,315 + 0,1$  мм), магнитная сепарация и глубокое обогащение, включающее СВЧ-обработку с последующим выщелачиванием в  $\text{HCl}$  (10% р-р, 1 ч, 100°C) и  $\text{HF}_{\text{конц}}$  (1 ч, 100 °C). Для качественной оценки полученных концентратов была определена концентрация в них элементов-примесей, имеющих для промышленного использования кварца ключевое значение. Характеристика наиболее чистого концентрата, полученного в результате глубокого обогащения крупки фракции  $-0,315 + 0,1$  мм, приведена в табл. 2. Основными элементами-примесями являются Al (12 ppm), Na (9,5 ppm), Ti (4 ppm), K (2,5 ppm), Ca (1,9 ppm). Концентрации этих элементов обусловлены главным образом высвободившимися микровключениями слюд, полевых шпатов, что подтверждается электронно-микроскопическим анализом обогащенной кварцевой крупки [Skamnitckaya, Bubnova, 2019]. Кроме того, часть остающихся в кварце примесей может быть связана с составом солевых растворов ГЖВ и структурными примесями.

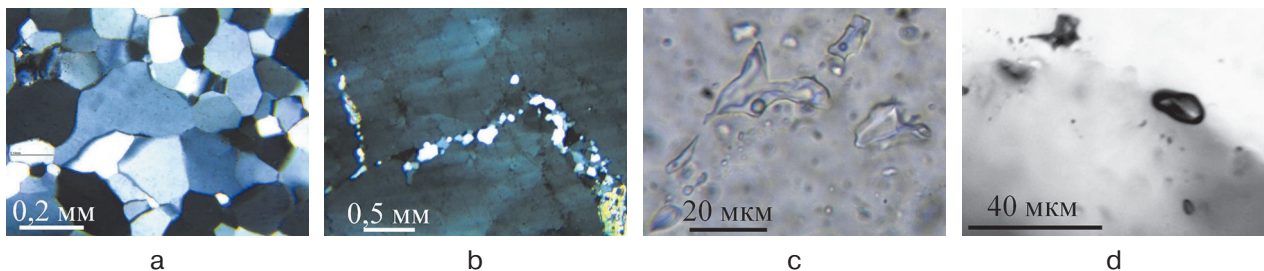


Рис. 4. Фото шлифов: первичный крупнозернистый кварц (а), прожилки вторичного кварца (б), ГЖВ в крупных зернах первичного кварца (с) и во вторичном кварце (д)

Pic. 4. Photo of thin sections: primary coarse-grained quartz (a), secondary quartz vein (b), fluid inclusions in coarse grains of primary quartz (c) and secondary quartz (d)



Полученный кварцевый концентрат фракции  $-0,315 + 0,1$  мм с суммарным содержанием примесей 34,6 ppm соответствует требованиям сорта глубокого обогащения КГО отдельных марок (ТУ 5726-002-11496665-97) для изготовления особо чистого прозрачного кварцевого стекла, применяемого в производстве полупроводниковых материалов, электронике, светотехнике, средств волоконно-оптической связи.

## Заключение

Результаты исследований высококремнистых пород Центральной Карелии показывают потенциальную возможность их использования для получения кварцевых продуктов различного назначения. Технологическими исследованиями силицитов Эльмусской структуры показана возможность получения на их основе кварц-полевошпатового концентрата, отвечающего требованиям ГОСТ 7030-75 на сырье для производства тонкой керамики ( $Fe_2O_3 \leq 0,2\%$ ,  $K_2O+Na_2O \geq 8\%$ ,  $K_2O/Na_2O = 2$ ). Галечный кварц из конгломератов по своим структурным и геохимическим характеристикам подобен гидротермальному жильному кварцу, однако кварцевых концентратов высокого качества на его основе получить пока не удалось. Тем не менее низкое содержание Li, B и P, лимитируемых при использовании кварцевого сырья для производства ферросилиция высоких марок, является положительной химической характеристикой полученных концентратов. Полученный на основе слабопрозрачного жильного кварца концентрат фракции  $-0,315 + 0,1$  мм с суммарным содержанием примесей 34,6 ppm соответствует требованиям сорта глубокого обогащения КГО отдельных марок (ТУ 5726-002-11496665-97) для изготовления особо чистого прозрачного кварцевого стекла, применяемого в производстве полупроводниковых материалов, электронике, светотехнике, средств волоконно-оптической связи.

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (тема НИР № АААА-А18-118020290175-2).*

## Литература

Афанасьева Н. А., Каменцев И. Е., Франк-Каме-нецкий В. А. Колебание параметров элементарной ячейки кварца различного генезиса // Кристаллография. 1959. Т. 4, вып. 3. С. 383–385.

Вулканизм архейских зеленокаменных поясов Карелии / Ред. С. И. Рыбаков, А. И. Светова, В. С. Куликов. Л.: Наука, 1981. 152 с.

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

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

Родионов В. С., Щипцов В. В. Отчет о прогнозно-минерагеническом изучении Республики Карелия в масштабе 1:1 000 000 с целью выявления объектов, перспективных на минеральное сырье для производства специальных кварцевых изделий (1995–2000 гг.)». Кн. 1–4. Петрозаводск, 2000. (КарТФГИ).

Светов С. А. Магматические системы зоны перехода океан-континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 230 с.

Светова А. И. Архейский вулканизм Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Карелии. Петрозаводск: Кар. фил. АН СССР, 1988. 148 с.

Светова Е. Н., Инина И. С. Рентгеноструктурные особенности промышленных разновидностей кварца гидротермально-метаморфогенных жил Приполярного Урала // Методы оценки технологических свойств минералов и их поведение в технологических процессах: Сб. статей по матер. докл. V Рос. семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 102–105.

Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Светов С. А. Технологическая минералогия высококремнистых осадочных пород Карелии – нетрадиционного кварц-полевошпатового сырья // Обогащение руд. 2016. № 4. С. 35–42. doi: 10.17580/or.2016.04.06

Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Светов С. А. Перспективы использования архейских силицитов Центральной Карелии (Эльмусская и Койкарская структуры) для производства строительных материалов // Строительные материалы. 2017. № 9. С. 62–66.

Скамницкая Л. С., Светова Е. Н., Светов С. А. Минералого-технологические особенности кварцевых конгломератов Карелии как нетрадиционного источника кварцевого сырья // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 36–42.

Тохтасьев В. С. Минеральное сырье. Сырье полевошпатовое. Справочник. М.: Геоинформмарк, 1998. 46 с.

Щипцов В. В., Астала Ю., Родионов В. С. Характеристика элементов-примесей в основных природных политипных кварцах территории Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 1. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 129–137.

Melezhik V. A., Medvedev P. V., Svetov S. A. The Onega basin // Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Vol. 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences / V. Melezhik, A. R. Prave, A. E. Fallick, L. R. Kump, H. Strauss, A. Lepland, E. J. Hanski (eds.). Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. P. 387–490. doi: 10.1007/978-3-642-29682-6\_9

Murata J., Norman M. B. An index of crystallinity for quartz // *Am. J. Sci.* 1976. Vol. 276. P. 1120–1130.

Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P. Mineralogi-technological evaluation of Girvas occurrence vein quartz (Karelia, Russia) // 19<sup>th</sup> Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. SGEM 2019. Proceed. STEP92 Technology Ltd, 51 “Alexander Malinov” Blvd, 1712. Sofia Bulgaria, 2019. Vol. 1.3. P. 877–882. doi: 10.5593/sgem2019/1.3/S04.113

## References

Afanas'eva N. A., Kamentsev I. E., Frank-Kamenetskii V. A. Kolebanie parametrov elementarnoi yacheiki kvartsa razlichnogo genezisa [Fluctuation of cell parameters of quartz of various geneses]. *Kristallografiya* [Crystallography]. 1959. Vol. 4, iss. 3. P. 383–385.

Danilevskaya L. A., Skamnitskaya L. S., Shchiptsov V. V. Kvartsevoe syr'e Karelii [Karelian quartz raw material]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2004. 226 p.

Golovanov Yu. B., Mikhailov V. P., Shchiptsov V. V., Rodionov V. S. Kvartsevoe syr'e [Quartz raw material]. *Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Kareliya* [Raw material base of the Republic of Karelia]. Book 2. Petrozavodsk: Kareliya, 2006. P. 55–69.

Rodionov V. S., Shchiptsov V. V. Otchet o prognoznomineragenicheskom izuchenii Respubliki Kareliya v masshtabe 1:1000000 s tsel'yu vyavleniya ob'ektov, perspektivnykh na mineral'noe syr'e dlya proizvodstva spetsial'nykh kvartsevykh izdelii [Report on the forecast mineralogical analysis of the Republic of Karelia on a scale of 1:1000000 in order to identify objects promising for mineral raw materials for the production of special quartz products]. Books 1–4. Petrozavodsk, 2000. (KaRTFGI).

Shchiptsov V. V., Astala Yu., Radionov V. S. Kharakteristika elementov-primesei v osnovnykh prirodnykh politipnykh kvartсах territorii Karelii [Trace elements characteristic of base quartz polytypes of Karelia]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Minerals of Karelia]. Iss. 1. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1998. P. 129–137.

Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P., Svetov S. A. Tekhnologicheskaya mineralogiya vysokokremnistykh osadochnykh porod Karelii – netraditsionnogo kvartspolevoshpatovogo syr'ya [Process mineralogy of Karelian high-silica sedimentary rocks – a nonconventional source of quartz-feldspathic mineral material]. *Obogashchenie rud* [Mineral Processing J.]. 2016. No. 4. P. 35–42. doi: 10.17580/or.2016.04.06

Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P., Svetov S. A. Perspektivy ispol'zovaniya arkheiskikh silitsitov Tsentral'noi Karelii (El'musskaya i Koikarskaya struktury) dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov [Prospects of the use of the Archean silicites of Central Karelia (Elmuskaya and Koykarskaya structures) for producing building materials]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials]. 2017. No. 9. P. 62–66.

Skamnitskaya L. S., Svetova E. N., Svetov S. A. Mineralogicheskoe osobennosti kvartsevykh konglomeratov Karelii kak netraditsionnogo istochnika kvartsevog syr'ya [Mineralogical-technological specialties of Karelian quartz conglomerates as a nonconventional source of quartz material]. *Obogashchenie rud* [Mineral Processing J.]. 2014. No. 2. P. 36–42.

Svetova E. N., Svetov S. A., Stepanova A. V. Trace elements in quartz as geochemical indicators of the sources of terrigenous material in conglomerates // Proceed. Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting. 2019. P. 248–252. doi: 10.26352/D924F5042

Поступила в редакцию 18.05.2020

Svetov S. A. Magmatichekieskie sistemy zony perekhoda okean-kontinent v arkhee vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo shchita [Magmatic systems of the ocean-continent transition zone in the Archaean of the eastern part of the Fennoscandian Shield]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. 230 p.

Svetova A. I. Arkheiskii vulkanizm Vedlozersko-Segozerskogo zelenokamennogo poyasa Karelii [The Archaean volcanism of the Vedlozero-Segozero Greenstone Belt of Karelia]. Petrozavodsk: Kar. fil. AN SSSR, 1988. 148 p.

Svetova E. N., Inina I. S. Rentgenostrukturnye osobennosti promyshlennykh raznovidnostei kvartsa gidrotermal'no-metamorfogennykh zhil Pripolyarnogo Urala [X-ray structural features of industrial varieties of quartz hydrothermal-metamorphogenic veins of the Subpolar Urals]. *Metody otsenki tekhnol. svoistv mineralov i ikh povedenie v tekhnol. protsessakh* [Methods for assessing the technol. properties of minerals and their behavior in technol. processes]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2012. P. 102–105.

Tokhtas'ev V. S. Mineral'noe syr'e. Syr'e polevoshpatovoe. Spravochnik [Raw material. Feldspar raw material. A reference book]. Moscow: Geoinformmark, 1998. 46 p.

Vulkanizm arkheiskikh zelenokamennykh poyasov Karelii [Volcanism of the Archaean greenstone belts of Karelia]. Eds. S. I. Rybakov, A. I. Svetova, V. S. Kulikov. Leningrad: Nauka, 1981. 152 p.

Melezhik V. A., Medvedev P. V., Svetov S. A. The Onega basin. *Reading the Archive of Earth's Oxygenation. The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences.* V. Melezhik, A. R. Prave, A. E. Fallick, L. R. Kump, H. Strauss, A. Lepland, E. J. Hanski (eds.). Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. P. 387–490. doi: 10.1007/978-3-642-29682-6\_9

Murata J., Norman M. B. An index of crystallinity for quartz. *Am. J. Sci.* 1976. Vol. 276. P. 1120–1130.

Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P. Mineralogi-technological evaluation of Girvas occurrence vein quartz (Karelia, Russia). 19<sup>th</sup> Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. SGEM 2019. Proceed. STEP92 Technology Ltd, 51 “Alexander Malinov” Blvd, 1712 Sofia Bulgaria 2019. Vol. 1.3. P. 877–882. doi: 10.5593/sgem2019/1.3/S04.113

Svetova E. N., Svetov S. A., Stepanova A. V. Trace elements in quartz as geochemical indicators of the sources of terrigenous material in conglomerates. *Proceed. Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting.* 2019. P. 248–252. doi: 10.26352/D924F5042

Received May 18, 2020

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Светова Евгения Николаевна**

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: ensvetova@igkrc.ru, enkotova@rambler.ru  
тел.: +79814015434

### **Бубнова Татьяна Петровна**

научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: bubnova@krc.karelia.ru  
тел.: (814) 768092

### **Букчина Ольга Васильевна**

ведущий геолог  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: obukchina@mail.ru  
тел.: (814) 768092

## **CONTRIBUTORS:**

### **Svetova, Evgeniya**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: ensvetova@igkrc.ru, enkotova@rambler.ru  
tel.: +79814015434

### **Bubnova, Tatyana**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: bubnova@krc.karelia.ru  
tel.: (814) 768092

### **Bukchina, Olga**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: obukchina@mail.ru  
tel.: (814) 768092