

## Кварцевые обособления в сланцах и амфиболитах Восточно-Уфалейской зоны как источник кварцевого сырья (Южный Урал)

© 2019 г. М. А. Игуменцева<sup>1,2</sup>, Л. Я. Кабанова<sup>1,2</sup>, В. Н. Анфилов<sup>1</sup>, М. В. Штенберг<sup>1</sup>,  
И. А. Блинов<sup>1,2</sup>, В. М. Рыжков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт минералогии ИОУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 456317, г. Миасс, Ильменский заповедник, e-mail: maria@mineralogy.ru

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет, 456304, г. Миасс, ул. 8 Июля, 10

Поступила в редакцию 23.03.2018 г., принята к печати 27.06.2018 г.

**Объект исследований.** Объектом исследования являются линзы, желваки и прослои гранулированного кварца, залегающие в амфиолитах и сланцах восточной части Уфалейского гнесово-амфиболитового комплекса. **Материалы и методы.** С использованием метода оптической спектроскопии, на базе микроскопа Axiolab, Olympus BX50, рассмотрены петрографические особенности кварцевых тел из гранат-слюдистых, двуслюдяных, гранат-слюдяных и турмалин-гранат-слюдяных сланцев и амфиболитов. На растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3 Sbu с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-act изучена морфология поверхности кварцевых сколов. Элементный состав исходного и глубокообогащенного кварцевых концентратов определен с использованием оптико-эмиссионного спектрометра Varian-720-ES с индуктивно-связанной плазмой. Регистрация ИК-спектров выполнена на инфракрасном Фурье-спектрометре Nicolet-6700 Thermo Scientific. Спектры моделировались суперпозицией гауссовских линий в программе Peakfit. Наплавление кварцевых стекол из глубокообогащенного концентрата осуществлялось на модернизированной ростовой установке ГРАНАТ-2М в атмосфере аргона. **Результаты.** Кварцевые прослои, линзы и желваки мощностью от 0.5–1.0 до 1.5–3.0 м сложены мелко-среднезернистым до крупнозернистым, прозрачным и полупрозрачным гранулированным кварцем. Кварцевые тела в большинстве случаев имеют неоднородное строение, местами они интенсивно блокированы и деформированы. Кварц характеризуется низкими концентрациями водосодержащих дефектов и элементов-примесей. После проведения глубокого обогащения кварцевой крупки полученные результаты сопоставимы с кварцем марки ЮТА фирмы Unimin. Высокие качественные характеристики кварца связаны с условиями его образования, в том числе с процессами перекристаллизации, при которых происходило “самоочищение” кварцевых зерен и вынос минеральных примесей в межзерновое пространство. **Выводы.** Линзы, желваки и прослои гранулированного кварца восточной части Уфалейского гнейсово-амфиболитового комплекса являются перспективным сырьем для получения высококачественных кварцевых концентратов.

**Ключевые слова:** кварц, жилы, желваки, линзы, кварцевое стекло, газово-жидкие включения, минеральные примеси

## Quartz isolatings in the shales and amphibolites of the East-Ufalei zone as a source for the production of high-purity quartz raw materials (Southern Urals)

Maria A. Igumentseva<sup>1,2</sup>, Larisa Y. Kabanova<sup>1,2</sup>, Vsevolod N. Anfilov<sup>1</sup>, Michael V. Shtenberg<sup>1</sup>,  
Ivan A. Blinov<sup>1,2</sup>, Vyacheslav M. Ryzhkov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS, Miass, 456317 Russia, e-mail: maria@mineralogy.ru

<sup>2</sup>Southern Urals St. Univ., 8 July st., Miass, 456318 Russia

Received 23.03.2018, accepted 27.06.2018

**Research subject.** In this research, we studied lenses, nodules and interlayers of granulated quartz, which are located in amphibolites and shales in the eastern part of the Ufalei gneso-amphibolite complex. **Materials and methods.** Petrographic features of the quartz bodies from garnet-mica, two-mica, garnet-mica and tourmaline-garnet-mica schists and amphibolites were studied using optical spectroscopy on an Axiolab, Olympus BX50 microscope. The surface morphology of quartz chips was examined using a Tescan Vega 3 Sbu scanning electron microscope equipped with an Oxford Instruments X-act energy dispersive spectrometer. The elemental composition of the initial and deeply enriched quartz concentrates was de-

**Для цитирования:** Игуменцева М.А., Кабанова Л.Я., Анфилов В.Н., Штенберг, М.В. Блинов И.А., Рыжков В.М. (2019) Кварцевые обособления в сланцах и амфиолитах Восточно-Уфалейской зоны как источник кварцевого сырья (Южный Урал). *Литосфера*, 19(4), 588–597. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-588-597

**For citation:** Igumentseva M.A., Kabanova L.Y., Anfilov V.N., Shtenberg M.V., Blinov I.A., Ryzhkov V.M. (2019) Quartz isolatings in the shales and amphibolites of the East-Ufalei zone as a source for the production of high-purity quartz raw materials (Southern Urals). *Litosfera*, 19(4), 588–597. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-588-597

terminated using a Varian-720-ES optical emission spectrometer with inductively coupled plasma. IR spectra were recorded by a Nicolet-6700 Thermo Scientific infrared Fourier spectrometer. The spectra were simulated by superposition of Gaussian lines using the Peakfit program. The surfacing of quartz glasses from a deeply enriched concentrate was carried out using a modernized GRANAT-2M growth installation under argon atmosphere. *Results.* Quartz interlayers, lenses and nodules with a thickness of 0.5–1.0 to 1.5–3.0 m are formed by fine-medium or coarse-grained, transparent or translucent granulated quartz. In most cases, quartz bodies exhibit a heterogeneous structure, being intensely blocked and deformed in some places. The quartz under study is characterized by low concentrations of water-containing defects and impurity elements. When conducting deep enrichment of quartz grains, the results obtained are comparable to Unimin IOTA quartz. High quality characteristics of quartz are determined by the conditions of its formation and recrystallization processes, during which the transport of mineral impurities into the intergranular space occurred. *Conclusions.* Lenses, nodules and interlayers of granulated quartz in the eastern part of the Ufalei gnesovo-amphibolite complex are promising raw materials for the production of high-quality quartz concentrates.

**Keywords:** *quartz, veins, nodules, lenses, quartz glass, gas-liquid inclusions, mineral impurities*

#### Acknowledgments

The authors are sincerely grateful of R.T. Zainullina for the performance of the analytical work.

## ВВЕДЕНИЕ

В пределах Уфалейского гнейсо-амфиболитового комплекса расположено около 3000 мономинеральных кварцевых тел. Значительная их часть приурочена к сланцевому обрамлению комплекса и залегает в Восточно-Уфалейской зоне среди пород куртинской пластины. Породы куртинской пластины, слагающие восточную часть Уфалейского блока, представлены гранат-слюдяно-кварцевыми сланцами с линзами, пластинами и будинами меланократовых пород и гранат-мусковит-кварцевыми бластомилонитами, образовавшимися в условиях эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций.

Юго-восточнее и юго-западнее месторождения кварца Жила № 175 породы представлены в разной степени измененными гранатовыми амфиболитами и разнообразными сланцами, интенсивно деформированными, часто брекчированными, местами смятыми в мелкие пloyчатые складки. Они содержат многочисленные желваки, линзы и прослои гранулированного кварца разной мощности – от нескольких миллиметров до 0.5–1.0 м. Кварц молочно-белый, светло-серый и серый, в разной степени деформированный и перекристаллизованный.

Кварц в прослоях, желваках и линзах образовался в несколько этапов под воздействием динамометаморфизма и в процессе метасоматоза. Динамометаморфизм вызвал интенсивную деформацию вмещающих пород, в результате которой возникли многочисленные трещины, зоны дробления и расланцевания, которые стали путями для проникновения растворов. В процессе перекристаллизации происходили самоочищение кварцевых зерен и формирование кварцевых агрегатов, практически не содержащих газово-жидких включений (ГЖВ). Вынос кальция из вмещающих амфиболитов благоприятствовал появлению минералов группы эпидота (эпидот, цоизит, клиноцоизит), железа и магния – образованию граната и хлоритов, калия – слюды.

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

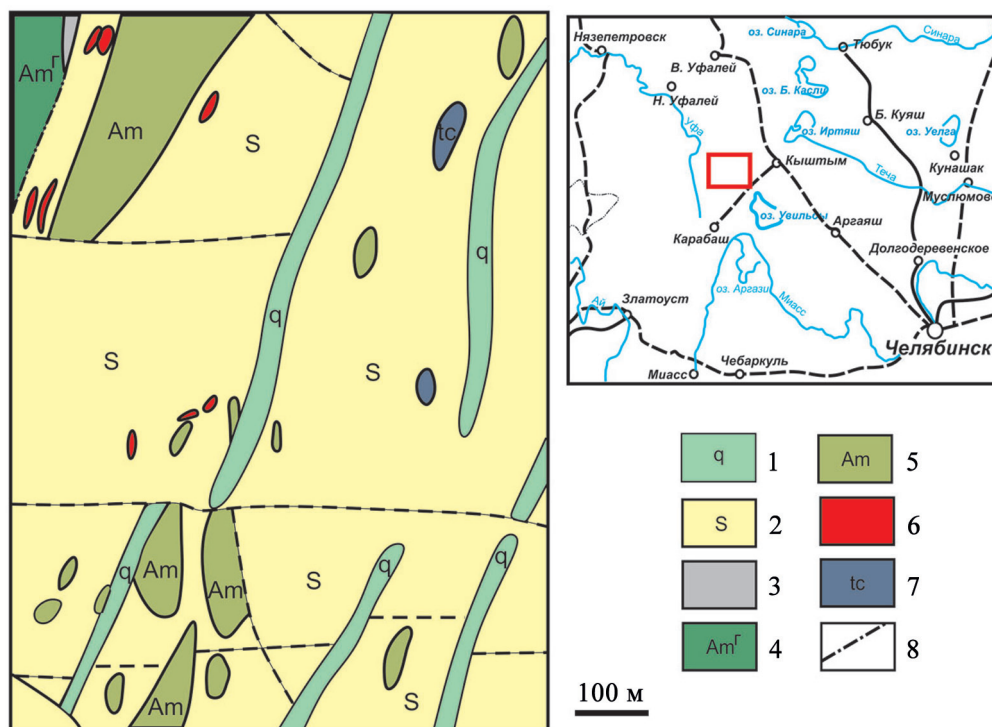
Уфалейский гнейсо-амфиболитовый комплекс является частью Уралтауского мегантиклинория, входящего в состав Центрально-Уральского поднятия. К нему приурочены основные промышленные скопления кварцево-жильных образований Урала с кварцем, содержащим незначительное количество минеральных и ГЖВ. Их появление во многом связано с высокоградиентным динамометаморфизмом и перекристаллизацией. Геологические особенности Уфалейского комплекса детально рассмотрены в работах [Огородников, 2007; Поленов, 2008; Белковский, 2011].

Восточно-Уфалейская зона составляет восточную часть Уфалейского гнейсо-амфиболитового комплекса. С запада она сопряжена с породами слюдяногорской свиты, а с востока граничит с Главным Уральским глубинным разломом. Сложена она в основном породами куртинской свиты, представленными гранат-слюдяно-кварцевыми, амфибол-слюдяно-кварцевыми сланцами и кварцитами (рис. 1).

Участок работ расположен в пределах куртинской свиты, на юго-восточном фланге Кыштымского месторождения гранулированного кварца. Он простирается от северного берега р. Мулиха до жилы № 56. Маршрут пройден по простирацию амфиболитов, которые пересекает тело горнблендитов. В северном окончании горнблендитов находится контакт с интенсивно деформированными гранатовыми слюдяными сланцами.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы для изучения были отобраны из кварцевых жил, желваков, линз и прослоев, находящихся во вмещающих породах, расположенных в юго-восточной и юго-западной частях Кыштымского месторождения гранулированного кварца, на левом борту руч. Мулиха. Петрографические ис-



**Рис. 1.** Фрагмент геологической карты южной части Кыштымского месторождения гранулированного кварца [Мельников, 1988].

1 – кварциты слюдястые, сланцы графито-слюдяно-кварцевые; 2 – гранат-слюдяно-кварцевые, турмалин-гранат-слюдянные сланцы; 3 – гранито-гнейсы; 4 – амфиболиты гранатовые; 5 – амфиболиты гранат-цоизитовые, апогаббровые; 6 – граниты биотит-мусковитовые; 7 – тальк-карбонатные породы; 8 – Куртинский надвиг.

**Fig. 1.** A fragment of the geologic map of the southern part of Kyshtimskoe deposits of granulated quartz [Mel'nikov, 1988].

1 – micaceous quartzite, graphite-micaceous-quartz schists; 2 – garnet-micaceous-quartz, tourmaline-garnet-micaceous schists; 3 – granite-gneiss; 4 – garnet amphibolites; 5 – garnet-zoisite, apogabbroic amphibolites; 6 – biotite-muscovite granites; 7 – talc-carbonate rocks; 8 – overthrust Curtin.

следования выполнены в шлифах на базе оптического микроскопа Axiolab, Olympus BX50, сопряженного с компьютером. Исследования методом растровой электронной микроскопии осуществлены на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3 Sbu с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-act (аналитик Б.А. Блинов). Пробы анализировались при напряжении до 20 кВ в высоком вакууме. Содержание примесных элементов в кварцевой крупке определяли методом ICP-OES на оптико-эмиссионном спектрометре Varian-720-ES с индуктивно-связанной плазмой (аналитик Р.Т. Зайнуллина). Исследование водосодержащих дефектов выполнено методом ИК-спектроскопии на инфракрасном фурье-спектрометре Nicolet-6700 Thermo Scientific (аналитик М.В. Штенберг). Обогащение кварцевых концентратов осуществлено по методике, детально описанной в работах [Игуменцева, 2012; Насыров, 2012]. Наплавление кварцевых стекол из глубокообогащенного концентрата выполнялось на модер-

низированной ростовой установке ГРАНАТ-2М в атмосфере аргона. Мощность установки 10 кВт, максимальная температура 2200°C, максимальный вакуум  $3 \cdot 10^{-3}$  Па, максимальное давление  $1.1 \cdot 10^5$  Па. Температура в печи измерялась с помощью вольфрам-рениевой термодпары.

Режим плавки: 1 – нагрев до температуры 1300°C и поверхностное обезгаживание шихты в вакууме в течение 0.5 ч; 2 – напуск аргона до  $0.1 \cdot 10^5$  Па и нагрев до 1950°C; 3 – плавка стекла в течение 1 ч; 4 – охлаждение до 1350°C; 5 – выдержка в течение 1 ч для снятия термоупругих напряжений в стекле, с поддержанием давления  $0.1 \cdot 10^5$  Па; 6 – охлаждение до комнатной температуры в течение 3 ч.

#### ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КВАРЦА

В гранат-слюдястых сланцах кварцевые прослои мощностью от 0.5–1.0 до 1.5–3.0 м сложены мелко-среднезернистым до крупнозернистым,

прозрачным и полупрозрачным гранулированным кварцем, бесцветным, светло-серым, желтоватым, местами медово-желтым, реже дымчатым. Кварцевые агрегаты в большинстве случаев имеют неоднородное строение, местами они интенсивно блокованы и деформированы. Зерна кварца различаются степенью прозрачности. В одних блоках кварцевый агрегат однородный и в шлифах преобладают участки с равномерно зернистой гранобластовой структурой, прямолинейными ступенчатыми или ступенчато-зубчатыми границами зерен с тонкими пересекающимися залеченными внутризерновыми трещинами. Погасание однородное, следов пластической деформации нет, включений минералов и ГЖВ не обнаружено. Встречаются единичные зерна с волнистым погасанием, содержащие редкие разобщенные включения газа и жидкости, размером 1–2 мкм, приуроченные к краевым частям зерен. Буроватый оттенок кварцевых зерен обусловлен включениями тонкого рудного вещества или пластинок и пленок гематита.

В других блоках кварц белый, местами водяно-прозрачный и полупрозрачный. Размер зерен от 1–2 до 5–6 мм. В шлифах такой кварц образует агрегат с неравномерно-зернистой гранобластовой структурой (рис. 2а), зерна которой имеют прямолинейные зубчато-ступенчатые границы, редкие прямолинейные залеченные внутризерновые трещины, не содержат никаких включений и отличаются однородным погасанием. В таких прожилках зерна кварца без включений минералов и ГЖВ, без следов деформации составляют до 70–90%.

Прослои молочно-белого кварца отличаются однородным строением, иногда блокованные, кварцевые агрегаты местами ожелезнены, деформирова-

ны. В шлифах агрегат кварцевых зерен характеризуется гранобластовой крупнозернистой структурой и массивной, местами фрагментарной текстурой. Зерна кварца содержат следы хрупкой и пластической деформаций. Хрупкая деформация представлена внутри- и межзерновыми залеченными трещинами, часто длинными, извилистыми. К ним приурочено незначительное количество ГЖВ в виде одиночных, цепочечных или ленточных скоплений размером от 1–2 до 10–15 мкм (рис. 2б). Более крупные включения встречаются в цепочках, более мелкие – в полях неправильной формы. Плотность ГЖВ до 10% на 1 см<sup>2</sup> площади шлифа. Пластическая деформация проявлена отчетливо, волнистым погасанием, присутствием плоскостей сжатия и скольжения, наложенных на блокованные и разлитостованные зерна. В зернах встречаются блоки неправильной формы в комбинации с изгибами и локальными трещинами.

Молочно-белый кварц не содержит включений минералов, плотность ГЖВ составляет до 10% на 1 см<sup>2</sup> площади шлифа, включения достаточно крупные и могут быть легко удалены при соответствующей обработке кварцевой крупки.

**Двуслюдяные, гранат-слюдяные и турмалин-гранат-слюдяные сланцы** содержат разного размера желваки, сложенные кварцевыми агрегатами с содержанием новообразованного кварца от 10 до 50–60% объема желвака. Размер желваков варьирует в широких пределах от нескольких миллиметров до полуметра. Форма округлая, округло-овальная. Состав и структурные особенности кварцевых агрегатов мало отличаются от таковых гранулированных кварцевых прослоев. Независимо от цвета кварцевых зерен в шлифах кварцевый агрегат

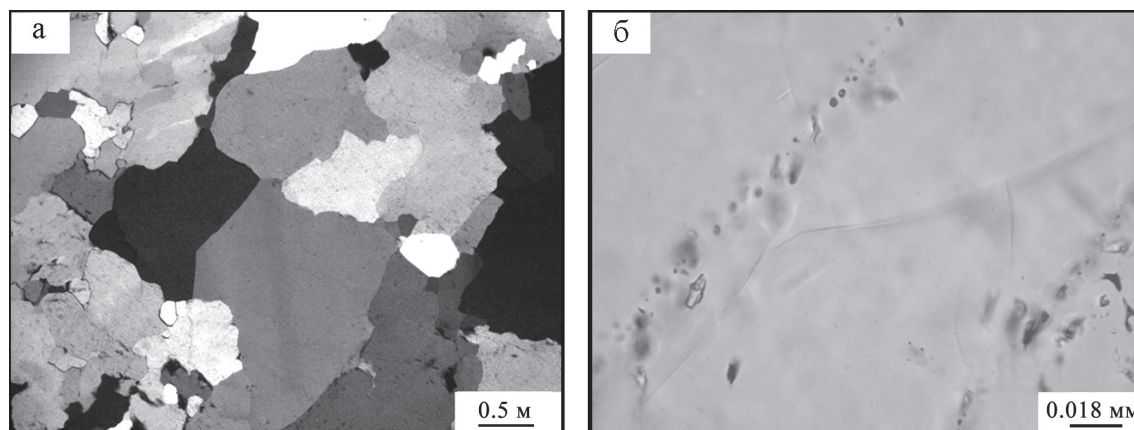


Рис. 2. Кварц гранулированный.

а – кварцевый агрегат с неравномерно-зернистой структурой, б – ГЖВ в зернах кварца. Фото шлифов М6/16, 10/16, с анализатором.

Fig. 2. Granular quartz.

а – non-uniformly granular quartz structure, б – gas-liquid inclusions in quartz grains. Section: with the analyzer.



характеризуется мелко-среднезернистой гранобластовой структурой. Реликтовые зерна кварца достигают размера 1.0–1.5 мм. Границы зерен зубчатые, погасание волнистое. Пластическая деформация в некоторых зернах проявлена единичными изгибами, иногда блокованием. ГЖВ формируют цепочки с разобщенными включениями газа и жидкости размером 1–5 мкм и составляют около 0.5% на 1 см<sup>2</sup> площади шлифа. Новообразованные зерна размером от 0.01 до 1–3 мм преимущественно с прямолинейными или ступенчатыми границами, с однородным погасанием, без следов деформации и ГЖВ. В некоторых местах межзерновое пространство между зернами выполнено опалом.

Наряду с отчетливо проявленными в сланцах прослоями, линзами и желваками сами сланцы “пропитаны” кварцем. Они содержат тонкие, менее 1.0–0.1 мм, слойки и линзы кварца, местами они составляют 70–75%, придавая породе облик кварцита.

В коренных выходах эта “пропитка” гранатовых сланцев отчетливо проявлена порфиробластовой структурой, в которой выделения граната размером до 5–6 мм, местами до 1 см, находятся в линзовидных прослоях, в ассоциации с кварцем. Текстура породы полосчатая, сланцеватая. Полосы выделяются цветом, от серого, почти белого, серого, зеленовато-серого до темно-зеленого, почти черного. Полосы извилистые, прерывистые, часто линзовидные, иногда причудливой формы обособления комбинируются с прослоями, линзами, овоидами. В шлифах полосчатость проявлена отчетливо, сверху вниз отмечается следующее чередование слоев.

– Слюдистый слой, состоящий из скоплений пластинок и чешуек парагонита и биотита, раз-

мером от 0.5–1.0 до 3.0–5.0 мм, с отдельными реликтовыми зернами амфибола и небольшого количества кварца (около 5–7%). Ширина слоя около 1–3 мм.

– Слюдисто-кварцевые слои и линзы, сложенные преимущественно кварцем (90% объема слоя) с примесью биотита и парагонита (или мусковита), на долю которого приходится около 10%, встречаются редкие зерна амфибола. Ширина слоя 5–6 мм (рис. 3а).

– Тонкое чередование слюдистых (1.0–2.0 мм), слюдисто-кварцевых (0.5–3.0) и кварцевых (1.0–5.0 мм) слойков. Общая ширина около 1 см.

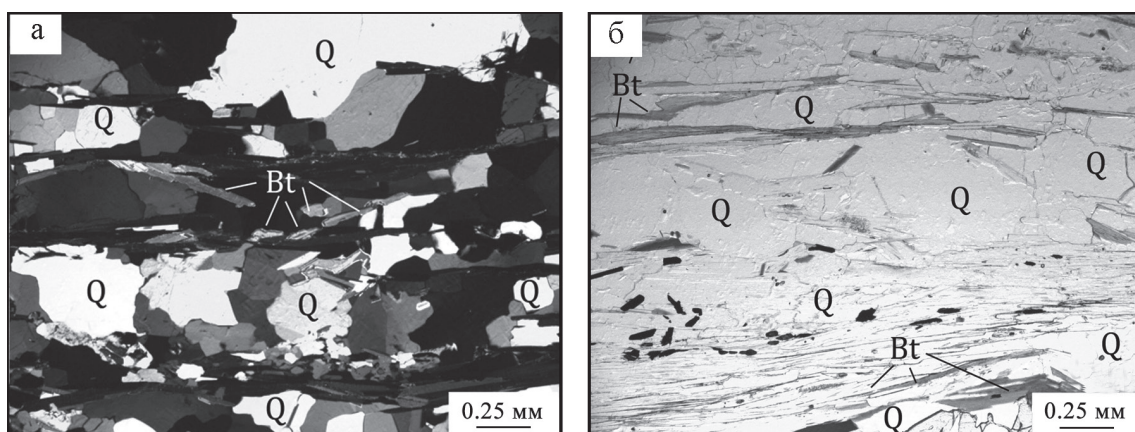
– Кварцево-слюдистый слой с преобладанием слюдистого материала (~60%). Ширина слоя около 5 мм (рис. 3б).

– Слюдистый слой шириной около 1–2 мм.

– Линзовидный слой с гранатом, находящимся в кварцевом агрегате, на границе с вышележащим слоем, “облекается” слюдой. Гранат (альмандин) интенсивно деформирован, содержит включения кварца, биотита, хлорита, рутила. Размер зерна граната 5 мм. Ширина слоя около 7 мм.

Кварц, слагающий линзы и слойки, характеризуется гранобластовой структурой, изометричной или близкой к ней формой зерен, не содержит ГЖВ и следов деформации. Он сходен с кварцем, слагающим линзы и желваки.

В амфиболитах прослой, линзы и желваки серого, белого и желтоватого, часто гранулированного кварца мало отличаются по составу и особенностям строения от кварцевых обособлений в сланцах. Агрегат серого кварца сложен зернами удлиненной и неправильной формы размером от 0.2–0.3 мм до 1.0 см. Реликтовый кварц представлен



**Рис. 3.** Окварцованный гранат-двуслюдяной сланец.

а, б – чередование слойков кварцевого и слюдисто-кварцевого состава. Фото шлифа М7/16: а – с анализатором, б – без анализатора.

**Fig. 3.** Silicified garnet-mica shale.

а, б – alternation layers of quartz and mica-quartz composition. Section: а – with analyzer, б – without analyzer.

удлиненными зернами со следами хрупкой и пластической деформации, с волнистым погасанием и ГЖВ, формирующими поля удлиненной формы. Размер включений 20–30 мкм. Плотность ГЖВ на 1 см<sup>2</sup> площади шлифа оставляет около 5%.

Белый кварц из линз и желваков часто слагает крупнозернистый агрегат прозрачных и полупрозрачных зерен размером до 1.5 см. Кварц среднезернистый с прямолинейными границами зерен. В одних зернах отмечены следы только хрупкой деформации, отраженной в зернах редкими внутризерновыми трещинами. Погасание однородное. В других зернах отчетливо проявлены следы пластической деформации, которая характеризуется волнистым погасанием, изгибами и блокованием. Блоки прямоугольной и ромбовидной формы, местами с изгибами. В межзерновом пространстве возникает новообразованный мелкозернистый кварц округлой формы без следов деформации.

Светлый кварц часто имеет желтоватый оттенок, представлен как реликтовыми, так и новообразованными зернами. Реликтовые зерна неправильной формы с волнистым погасанием и интенсивной деформацией. Внутризерновые трещины содержат ГЖВ в виде цепочек с разрозненными включениями газа и жидкости (рис. 4а) размером до 10 мкм. Содержание ГЖВ на 1 см<sup>2</sup> площади шлифа составляет около 0.1%, размер не превышает 10 мкм. Местами в зернах отмечаются слабое блокование (рис. 4б) и системы тонких субпараллельных изгибов.

Прозрачные новообразованные зерна кварца характеризуются изометричной формой и прямолинейными границами. Зерна слабо деформированы, в некоторых встречаются внутризерновые трещины хрупкой деформации. В таких зернах ГЖВ не обнаружены.

#### МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КВАРЦА

Исследования, проведенные методом растровой электронной микроскопии, как и петрографические исследования, показали однородность строения кварца. Установлено, что большинство крупных отдельных зерен в кварце обладают исключительно однородным строением, на что указывает присутствие на фотографиях плоскораковистого излома (рис. 5а).

Каналы размером около 0.05 мм способствовали очистке кварца от ГЖВ (рис. 5б). Последние на фото представлены порами темного цвета размером 1.5–2.5 мкм (рис. 5в). На поверхности сколов их количество незначительно. Они имеют первичное и вторичное происхождение [Емлин и др., 1988]. В первом случае они расположены беспорядочно на поверхности зерен, а во втором наблюдается их “цепочечное” расположение. На поверхности сколов отмечаются выделения хлоридов натрия и калия, а также пленки гидроксидов железа (рис. 5г).

Незначительное количество ГЖВ было также установлено при исследовании водосодержащих дефектов в кварце методом ИК-спектроскопии. В качестве препаратов использовались плоскопараллельные кварцевые пластинки толщиной 0.3–0.5 мм. ИК-спектры представляют собой широкую диффузную полосу, на которую накладываются узкие полосы Н-дефектов. Спектры кварца подобны и различаются только интенсивностью поглощения. В работах [Aines et al., 1984; Kronenberg, 1994] показано, что интенсивность поглощения в области 3000–3800 см<sup>-1</sup> пропорциональна содержанию воды в кварце.

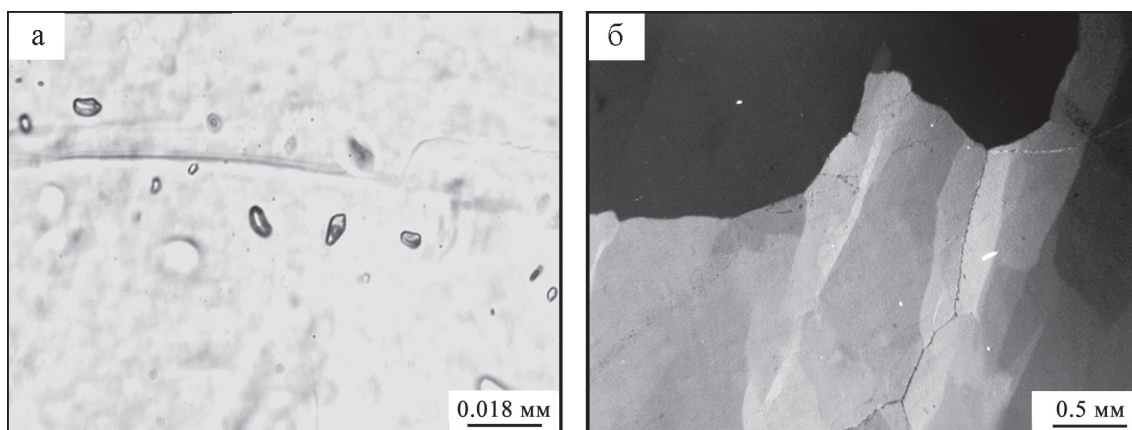


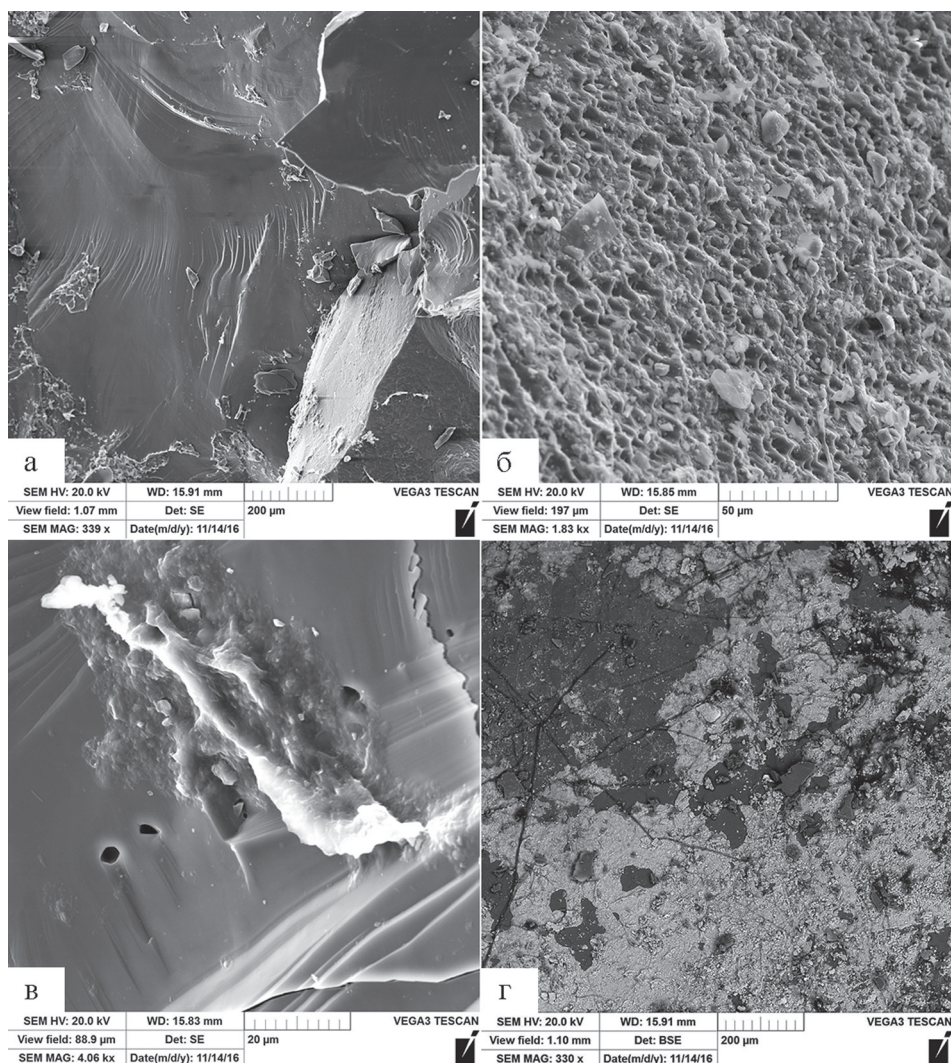
Рис. 4. Кварц из желвака в амфиболите.

а – ГЖВ в зернах белого кварца, б – блокованный кварц. Фото шлифов М11/16-12/16: а – без анализатора, б – с анализатором.

Fig. 4. Quartz from the nodule in amphibole.

а – gas-liquid inclusions in grains of white quartz, б – blocked quartz. Section: а – without analyzer, б – with analyzer.





**Рис. 5.** Электронно-микроскопическое изображение в режиме вторичных электронов сколов кварца.

а – раковистый скол, б – каналы на отдельных гранях кварца, в – газово-жидкие включения, г – пленки гидроксидов железа.

**Fig. 5.** Electron microscopic photo of quartz chips.

a – shell rock, б – channels on individual faces of quartz, в – gas-liquid inclusions, г – films of iron hydroxides.

Для детального анализа спектров выполнено моделирование “водной” области ( $3000\text{--}3800\text{ см}^{-1}$ ) на суперпозицию 7 гауссовских линий. Основной на спектрах является широкая полоса с максимумом  $3410\text{ см}^{-1}$ , относящаяся к молекулярной воде, которая главным образом находится в газово-жидких включениях, трещинах и межзерновом пространстве. Узкие полосы относятся к гидроксидным группам, находящимся в различном структурном окружении [Штенберг и др., 2010]. В частности, узкая полоса с максимумом  $3378\text{ см}^{-1}$  связана с колебаниями группировок Al-OH, образованных при замещении Si на Al в сетке тетраэдров  $\text{SiO}_4$  [Kats, 1962; Kronenberg, 1994].

В табл. 1 приведены значения концентрации молекулярной воды и Al-OH группировок. Видно, что вода в кварце содержится в основном в молекулярной форме, однако ее концентрация незначительна. Содержание молекулярной воды в изученных образцах кварца в среднем составляет 60 г/т, варьируя в пределах 25–110 г/т. Ее низкая концентрация связана в первую очередь с небольшим количеством газово-жидких включений. По данным петрографических и электронно-микроскопических исследований, количество газово-жидких включений составляет до 10% на  $1\text{ см}^2$ , размер их достигает 10 мкм, в единичных случаях – до 30 мкм, расположены они преимущественно по трещинам в квар-

**Таблица 1.** Концентрация молекулярной воды и Al-OH в кварце, г/т

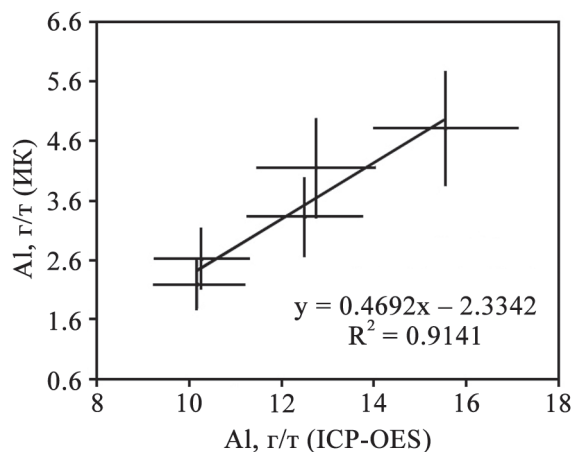
**Table 1.** The concentration of molecular water and Al-OH in quartz, ppm

Образец	H <sub>2</sub> O	Al-OH
M-5A/16	40	2.7
M-6/16	110	2.3
M-10/16	30	1.3
M-11/16	80	1.6
M-12/16	30	3.0
M-226/16	45	2.7
M-36/16	35	3.0
M-56/16	50	2.9
M-6(II)	70	2.6
M-7-1A	40	2.5
M-7B	40	2.5
M-9-(1)	30	1.9
M-9-(2)	25	2.2
M-10	25	2.1
M-14	30	2.4
M-15/17	35	1.4
M-16-(1)	65	4.4
M-16-(2)	65	4.2
M-17A	60	2.4

це. Сравнение данных ИК-спектроскопии с результатами ICP-OES по содержанию алюминия показало хорошую прямую корреляцию (рис. 6).

Содержание группировок Al-OH в образцах низкое и не превышает 3 г/т, что свидетельствует о преимущественно водном составе флюида в газовой-жидких включениях и предполагает отсутствие в кварце ионов Na<sup>+</sup> и K<sup>+</sup>, компенсирующих заряды ионов Al<sup>3+</sup>. На существенно водный состав ГЖВ также указывает отсутствие в спектрах полосы, характерной для углекислого газа (2345 см<sup>-1</sup>).

Для обогащения кварцевых концентратов применена технология, используемая в Институте ми-



**Рис. 6.** Сравнение данных ИК-спектроскопии с результатами ICP-OES по содержанию алюминия.

**Fig. 6.** The comparison of IR-spectroscopy data with the results of ICP-OES on Al.

нералогии УрО РАН [Игуменцева, 2012; Насыров, 2012]. Исходная проба массой ≈1 кг измельчалась до фракции -0.315 + 0.100 мм. В целях удаления газово-жидких включений полученная фракция подвергнута СВЧ-декрипитации – двум этапам магнитной сепарации и двум этапам кислотной обработки. При проведении первого этапа магнитной сепарации удалялись аппаратное железо и часть слюды. Второй этап магнитной сепарации позволил удалить остатки магнитных минералов. Для удаления пленочных загрязнений на поверхности зерен и оставшихся минеральных примесей использована кислотная обработка в смеси соляной и плавиковой кислот.

В табл. 2 приведено содержание элементов-примесей в глубокообогащенном кварце. Для срав-

**Таблица 2.** Содержание элементов-примесей в глубокообогащенном кварце, г/т

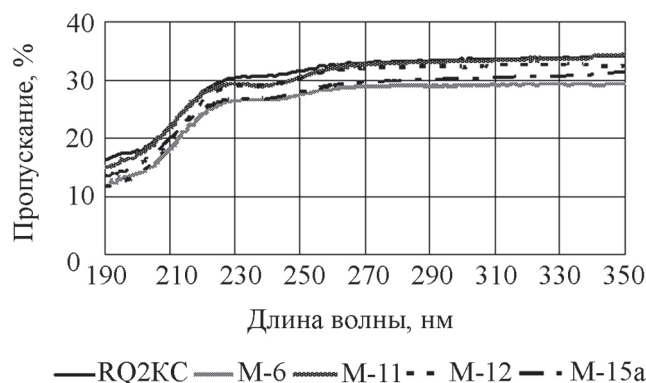
**Table 2.** Content of impurity elements in deeply enriched quartz, ppm

Образец	Al	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Ni	Zn
M6	12.75	7.66	0.39	0.06	6.14	0.18	0.79	1.40	0.11	3.45	0.36	0.44
M10	12.50	13.53	0.34	0.18	6.39	0.90	1.29	2.48	0.10	1.58	0.17	0.75
M11	10.27	9.75	0.31	0.37	7.22	0.19	0.57	1.51	0.12	2.94	0.12	1.48
M12	15.55	10.15	0.05	0.19	4.25	0.56	0.99	1.60	0.10	3.28	0.02	1.26
M15	10.18	11.49	0.24	0.20	6.22	0.19	0.81	1.97	0.11	1.42	0.16	1.04
175-15	7.88	9.81	0.11	0.07	5.21	0.73	0.04	1.66	0.12	2.61	0.04	0.88
175-14	6.85	10.75	0.05	0.10	4.34	0.30	0.02	1.71	0.09	2.62	0.08	0.15
175-12	14.93	10.05	0.03	0.03	3.10	0.19	0.02	1.28	0.08	3.85	0.00	0.23
175-11	7.20	10.51	0.26	0.06	5.91	0.42	0.01	1.90	0.10	2.35	0.11	0.66
ЮТА	16.20	0.50	<0.05	<0.05	0.23	0.60	0.90	<0.05	<0.05	0.90	<0.05	–

Примечание. M6, M10, M11, M12, M15 – кварц из прослоев, желваков и линз; 175-15, 175-14, 175-12, 175-11 – гранулированный кварц жилы № 175 Кыштымского месторождения; ЮТА – кварц марки ЮТА фирмы Unimin.

Note. M6, M10, M11, M12, M15 – quartz from interlayers, nodules and lenses; 175-15, 175-14, 175-12, 175-11 – granulated quartz of the vein No. 175 of the Kyshtym deposit; ЮТА – quartz of ЮТА brand from Unimin.





**Рис. 7.** Спектры пропускания стекол в УФ-области спектра.

**Fig. 7.** Optical transmission spectrum in the UV regions quartz glasses.

нения представлены данные по кварцу марки IOTA-STD фирмы Unimin и кварцу жилы № 175. Из табл. 2 видно, что основными элементами-примесями являются Al, Fe, K, Na, Mg, Mn и др. По их содержанию кварц из желваков, линз и прослоев близок к кварцу марки IOTA-STD. Обогащение кварцевых концентратов позволило значительно снизить содержание главных элементов-примесей, однако сохраняется высокая концентрация Ca, Fe, Na, Mg, Mn, Cr, Cu, возможно, из-за не удаленных из концентрата минеральных микровключений.

После наплава получены стекла, с которых зарегистрированы спектры пропускания в УФ-видимой области спектра (рис. 7). Эти данные сопоставлены с данными по стеклам, полученным в атмосфере аргона из концентрата RQ2KC жилы № 175 (Кыштымское месторождение гранулированного кварца). Стекла, наплавленные из кварцевых желваков, линз и прослоев, сопоставимы по качеству со стеклом, полученным из концентрата марки RQ2KC.

## ВЫВОДЫ

Весь комплекс исследований позволил оценить перспективность использования кварца из прослоев, желваков и линз как сырья для получения высококачественного кварцевого стекла. Кварц, претерпевший перекристаллизацию в условиях динамометаморфизма, характеризуется незначительным содержанием газовой-жидких включений и низким содержанием элементов примесей. Обогащенные кварцевые концентраты сопоставимы по чистоте с концентратами ведущих мировых производителей. На основании технологических испытаний сделан вывод о возможности применения кварца из линз, прослоев и желваков для получения концентрата для наплава высококачественного кварцевого стекла.

Авторы выражают искреннюю благодарность Р.Т. Зайнуллиной за выполнение аналитических работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белковский А.И. (2011) Геология и минералогия кварцевых жил Кыштымского месторождения (Средний Урал). Миасс: ИМин УрО РАН, 234 с.
- Емлин Э.Ф., Синкевич Г.А., Якшин В.И. (1988) Жильный кварц Урала в науке и технике. Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 272 с.
- Игуменцева М.А. (2012) Кварц Кыштымского и Кузнецкого месторождений: состав, структура, технологические свойства. Екатеринбург: УрО РАН, 167 с.
- Мельников Е.П. (1988) Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца. М.: Недра, 215 с.
- Насыров Р.Ш. (2012) Влияние отдельных операций технологии очистки природного кварца на качество его концентрата. *Обогащение руд*, (4), 16-20.
- Огородников В.Н. (2007) Минералогия шовных зон Урала. Ч. 3. Уфалейский гнейсово-амфиболитовый комплекс (Южный Урал). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН; УГГУ, 187 с.
- Поленов Ю.А. (2008) Эндогенные кварцево-жильные образования Урала. Екатеринбург: УГГУ, 269 с.
- Штенберг М.В., Игуменцева М.А., Быков В.Н. (2010) Инфракрасная фурье-спектроскопия воды и Н-дефектов в гранулированном кварце Кузнецкого месторождения (Ю. Урал). *Литосфера*, (4), 152-156.
- Aines R.D., Kirby S.H., Rossman G.R. (1984) Hydrogen speciation in synthetic quartz. *Phys. Chem. Miner.*, **11**, 204-212.
- Kats A. (1962) Hydrogen in Alpha-quartz. *Philips Res. Rep.*, **17**, 201-279.
- Kronenberg A.K. (1994) Hydrogen speciation and chemical weakening of quartz. *Rev. Miner.*, **29**, 123-176.

## REFERENCES

- Aines R.D., Kirby S.H., Rossman G.R. (1984) Hydrogen speciation in synthetic quartz. *Phys. Chem. Miner.*, **11**, 204-212.
- Belkovsky A.I. (2011) *Geologiya i mineralogiya kvarcnykh zil Kyshtym'skogo mestorozhdeniya (Srednii Ural)* [Geology and Mineralogy of Quartz Veins of the Kyshtym Deposit (Middle Urals)]. Miass, Inst. Mineral. UrO RAN, 234 p. (In Russian)
- Emlyn E.F., Sinkevich G.A., Yakshin V.I. (1988) *Zhil'nyi kvarts Urala v nauke i tekhnike* [The vein quartz of the Urals in science and technology]. Sverdlovsk, Sredne-Ural'skoe Knizhnoe Izdatel'stvo, 272 p. (In Russian)
- Igumentseva M.A. (2012) *Kvarts Kyshtym'skogo i Kuznetskikhinskogo mestorozhdeniya: sostav, struktura, tekhnologicheskie svoystva* [Quartz from Kyshtym'skoe and Kuznechikhinskoe deposits: composition, structure, technological properties]. Ekaterinburg, UrO RAN, 167 p. (In Russian)
- Kats A. (1962) Hydrogen in Alpha-quartz. *Philips Res. Rep.*, **17**, 201-279.
- Kronenberg A.K. (1994) Hydrogen speciation and chemical

- weakening of quartz. *Rev. Miner.*, **29**, 123-176.
- Mel'nikov E.P. (1988) *Geologiya, genezis i promyshlennye tipy mestorozhdenii kvartsa* [Geology, genesis and industrial types of deposits of quartz]. Moscow, Nedra Publ., 215 p. (In Russian)
- Nasyrov R.Sh. (2012) The influence of individual operations of the technology of purification of natural quartz on the quality of its concentrate. *Obogashchenie rud*, (4), 16-20. (In Russian)
- Ogorodnikov V.N. (2007) *Minerageniya shovnykh zon Urala. Ch. 3. Ufaleiskii gneisovo-amfibolitovyi kompleks (Yuzhnyi Ural)* [Mineralogy of the suture zones of the Urals. P. 3. Ufalei gneiss-amphibolite complex (Yuzhnyi Ural)]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN; UGGU Publ., 187 p. (In Russian)
- Polenov Yu.A. (2008) *Endogennye kvartsevo-zhil'nye obrazovaniya Urala* [Endogenous quartz vein formations of the Urals]. Ekaterinburg, Publishing house of the USMU, 269 p. (In Russian)
- Shtenberg M.V., Igumenceva M.A., Bykov V.N. (2010) Infrared Fourier spectroscopy of water and H-defects in granular quartz of the Kuznechikhinskoe deposit (Yu. Ural). *Litosfera*, (4), 152-156. (In Russian)