



УДК 553.87:553.061.12/.17(470.55/.58)

## ОСОБО ЧИСТЫЙ ЖИЛЬНЫЙ КВАРЦ – МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ ПОЛИХРОННОГО И ПОЛИГЕНННОГО ГЕНЕЗИСА

В. Н. Огородников, Ю. А. Поленов, А. Н. Савичев, В. В. Бабенко

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

В России минерально-сырьевая база кварца, используемого в высокотехнологичных производствах, традиционно объединяет месторождения пьезооптического кварца, горного хрусталя, гранулированного, прозрачного и молочно-белого жильного кварца. Востребованность и обеспеченность различными видами кварцевого сырья неоднозначна. Специальные кварцевые материалы и изделия на их основе все более широко применяются в радиоэлектронной, авиационной, химической, электротехнической, металлургической и других отраслях народного хозяйства; прозрачные кварцевые и оптические стекла и изделия из кварца все чаще используются в качестве конструкционного материала для оснащения искусственных спутников и космических кораблей; панорамного остекления самолетов, изготовления приборов ночного видения, оптических локаторов, систем перехвата и оптической связи; в конструкциях радарных установок и в быстродействующих ЭВМ. Резко возрастает потребность в кварцевых трубах и стержнях для получения световодов и супертонкого кварцевого волокна. Нами было выявлено, что качество кварцевого сырья обусловлено его структурно-текстурными особенностями и физико-химическими факторами, которые определяют его генезисом и, в свою очередь, определяют технологические свойства кварца. Все это позволило нам выделить семь генетических типов жильного кварца. Два из них сформировались в докембрии (один – в геодинамической обстановке кратонизации, второй – рифтогенеза), остальные – в коллизионных геодинамических обстановках. Все эти типы размещаются в пяти структурно-формационных зонах Уфалейского метаморфического комплекса.

**Ключевые слова:** Уфалейский кварценозный район, кварц, чистота, прозрачность, структурные примеси, генетические типы, геодинамические режимы, метаморфическая дифференциация, метасоматоз, перекристаллизация.

## HIGH-PURITY VEIN QUARTZ – MINERAL RAW MATERIALS OF POLYCHRONOUS AND POLYGENOUS GENESIS

V. N. Ogorodnikov, Yu. A. Polenov, A. N. Savichev, V. V. Babenko

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

The mineral raw materials base of Russian quartz, used in high-tech manufacturings, traditionally unites deposits of piezooptical quartz, clear quartz, granular, clear and milky-white vein quartz. The demand for quartz and reserves of different quartz raw materials is ambiguous. Special quartz materials and products based on them are increasingly used in radioelectronic, aviation, chemical, electrotechnical, metallurgical and other branches of the national economy. Clear quartz and optical glasses and quartz products are being increasingly used as a structural material for the equipment of artificial satellites and spacecrafts, panoramic glazing of aircrafts, manufacture of night vision devices, optical locators, systems of interception and optical communication, and have application in the construction of radar installations and in high-speed computers. There is a sharp increase in a need for quartz tubes and rods for the production of optical fibers and superthin quartz ones. The authors revealed that the quality of quartz raw materials is caused by its structural and texture features and physicochemical factors determined by its genesis and in turn define the technological properties of quartz. All of this allowed them to identify 7 genetic types of vein quartz. Two types formed in the Precambrian: one – in the geodynamic setting of cratonization, the second – in the geodynamic setting of rifting, the rest – in collision geodynamic settings. All these types are located in 5 structural and formational zones of the Ufaley metamorphic complex.

**Keywords:** Ufaley quartziferous region, quartz, purity, clarity, structural impurities, genetic types, geodynamic regimes, metamorphic differentiation, metasomatism, recrystallization.

DOI 10.20403/2078-0575-2018-1-88-98

### Генетическая типизация жильного кварца Уфалейского кварценозного района

На первоначальном этапе изучение кварцевых жил Уфалейского кварценозного района (Южный Урал) велось авторами с практической целью – для оценки возможности использования жильного кварца для получения высококачественного кварцевого стекла, для чего которого требуется природный особо чистый кварц.

По мере накопления результатов исследования различных типов кварца появилась возможность их применения для расшифровки генезиса кварцевых жильных образований. Это чрезвычайно важно, поскольку природная чистота жильного кварца является следствием генезиса кварцевых жил и может быть использована в качестве критерия прогнозирования и оценки объектов как рудного, так и нерудного минерального сырья.



Таблица 1

Генетическая типизация жильного кварца Уфалейского кварценосного района

Тип кварца по структурным особенностям	Геологические тела	Генетический тип	Родоначальный магматический комплекс	Формационный тип	Геодинамические циклы и обстановки	Эталонные кварцевые жилы
Светло-серый, мелко-среднезернистый (1–3 мм)	Маломощные согласные прожилки	Метаморфической дифференциации	–	Метаморфогенные, первичнозернистые	Метаморфизм карельского мегацикла (1,8–1,7 млрд лет)	–
Серый, полупрозрачный, среднекрупнозернистый (2–10 мм)	Субсогласные тела мощностью до 1 м	Слюдяногорский	Чусовской комплекс субщелочных гранитоидов, «гигантомигматиты»	Метаморфогенный, вторичнозернистый, перекристаллизованный	Рифтогенез рифейского мегацикла (1,35–1,0 млрд лет)	170
Молочно-белый мелкозернистый (1–2 мм)	Крупные тела в шовных рифтогенных зонах	Уфалейский	Битимский комплекс субщелочных гранитоидов, альбититы, карбонатиты	Гидротермально-метасоматический, первичнозернистый	Байкальский (кадомский) коллизионный ороген (620–525 млн лет)	175
Серый, тонкозернистый льдистоподобный	Крупные тела в шовных зонах	Егустинский	Козлогорский комплекс субщелочных гранитоидов-сиенитов, нельсониты	Гидротермально-метасоматический, первичнозернистый	Раннепалеозойская ТМА шовных зон (500–400 млн лет)	П-3, П-21
Молочно-белый, полупрозрачный, крупно-гигантозернистый	Плитообразные тела разной мощности и протяженности	Пугачевский	Нижнеуфалейский комплекс гранитоидов	Гидротермальный, первичнозернистый	Ранняя коллизия палеозойского цикла (360–320 млн лет)	П-3, П-21
Светло-серый, полупрозрачный, гранулированный среднезернистый (до 3–5 мм)	Будинообразные тела разной мощности и протяженности	Кыштымский	Кизильский комплекс микроклиновых гранитов	Метаморфогенный, вторичнозернистый, гранулированный	Поздняя коллизия палеозойского цикла (310–240 млн лет)	101
Бесцветный или стекловидный, гигантозернистый	Плитообразные тела разной мощности и протяженности	Щербаковский	То же	Гидротермальный, первичнозернистый, гигантозернистый	Поздняя коллизия палеозойского цикла (310–240 млн лет)	Щербаковская, жила № 3 и др.

Наши исследования [5, 9, 10, 12] подтвердили наличие разновидностей кварца, имеющих различие в текстурно-структурных особенностях и позволили найти этому генетические объяснения. Нами выделены следующие генетические типы жильного кварца (табл. 1): *метаморфической дифференциации, слюдяногорского, уфалейского, егустинского, пугачевского, кыштымского и щербаковского*.

Распределение выделенных генетических типов кварца в пределах Уфалейского метаморфического комплекса имеет определенные структурные и петрологические закономерности (рис. 1).

**Прожилки метаморфической дифференциации** являются результатом процессов регионального метаморфизма от гранулитовой до амфиболитовой фации, который зафиксирован в уфалейском мета-

морфическом комплексе в докембрии, в карельскую эпоху тектономагматической активизации.

**Слюдяногорский генетический тип** жильного кварца – результат собирательной перекристаллизации с укрупнением зерна ранних прожилков метаморфической дифференциации, располагающихся в долгоживущей Слюдяногорской шовной зоне, заложеной в конце среднего рифея в результате процессов рифтогенеза (грэнвильская эпоха складчатости – 1000±50 млн лет). Вследствие собирательной перекристаллизации в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации в зонах ультраметаморфизма при температурах 650–800 °С и относительно высоком давлении (6–10 кбар) образуется кварц гетеробластового, средне-крупнозернистого строения, который претерпел высокотемпературный от-

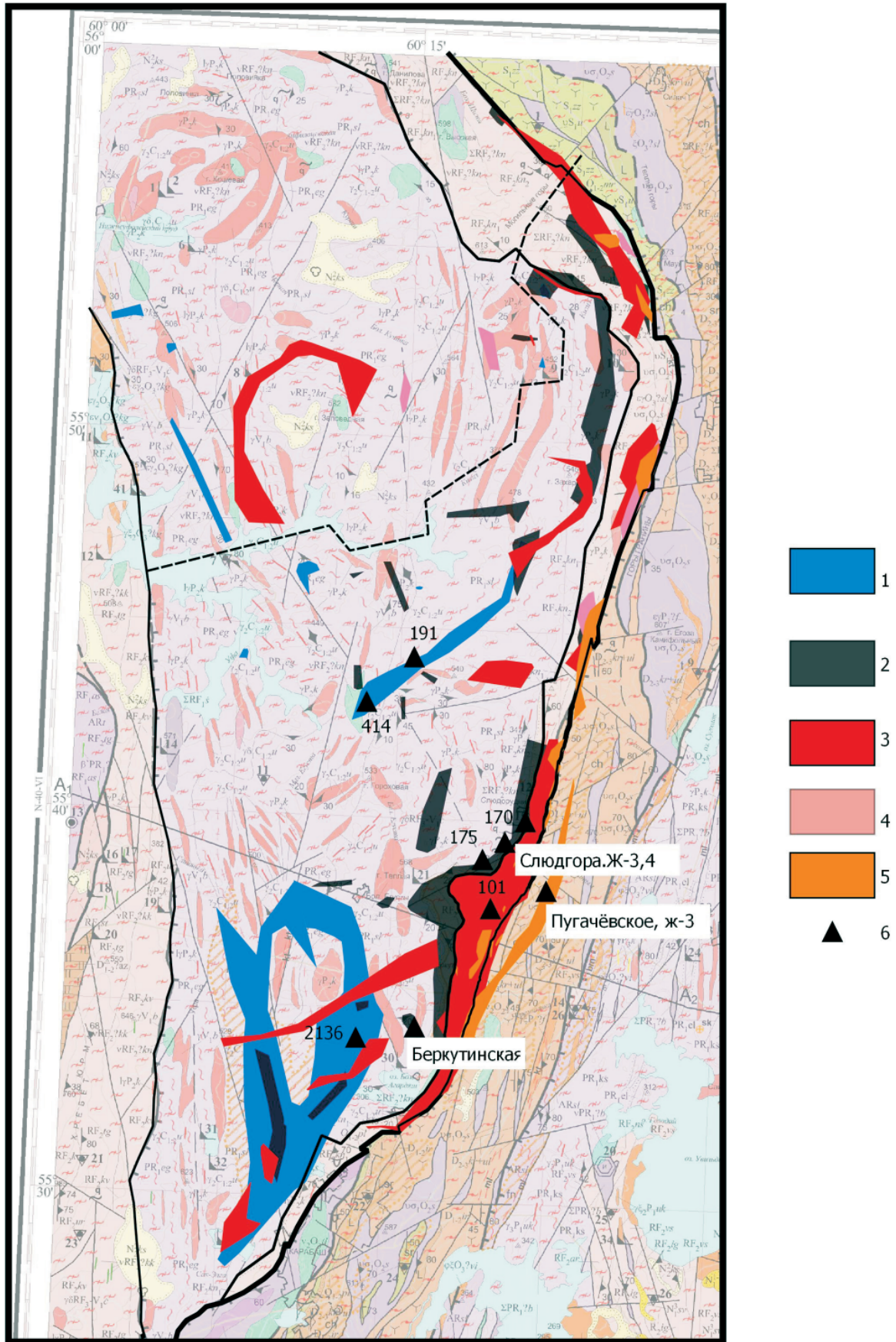


Рис. 1. Распределение генотипов жильного кварца в пределах Уфалейского кварценозного района по материалам кварцевметрической съемки. Геологическая основа – фрагмент геологической карты N-41-1 [2] Типы кварца: 1 – тонкозернистый егустинский, 2 – мелкозернистый уфалейский, 3 – гранулированный кыштымский, 4 – гетерогранобластовый, перекристаллизованный слюдяногорский, 5 – шестоватый кварц жил выполнения щербаковский и пугачевский; 6 – эталонные кварцевые жилы, их номера и названия

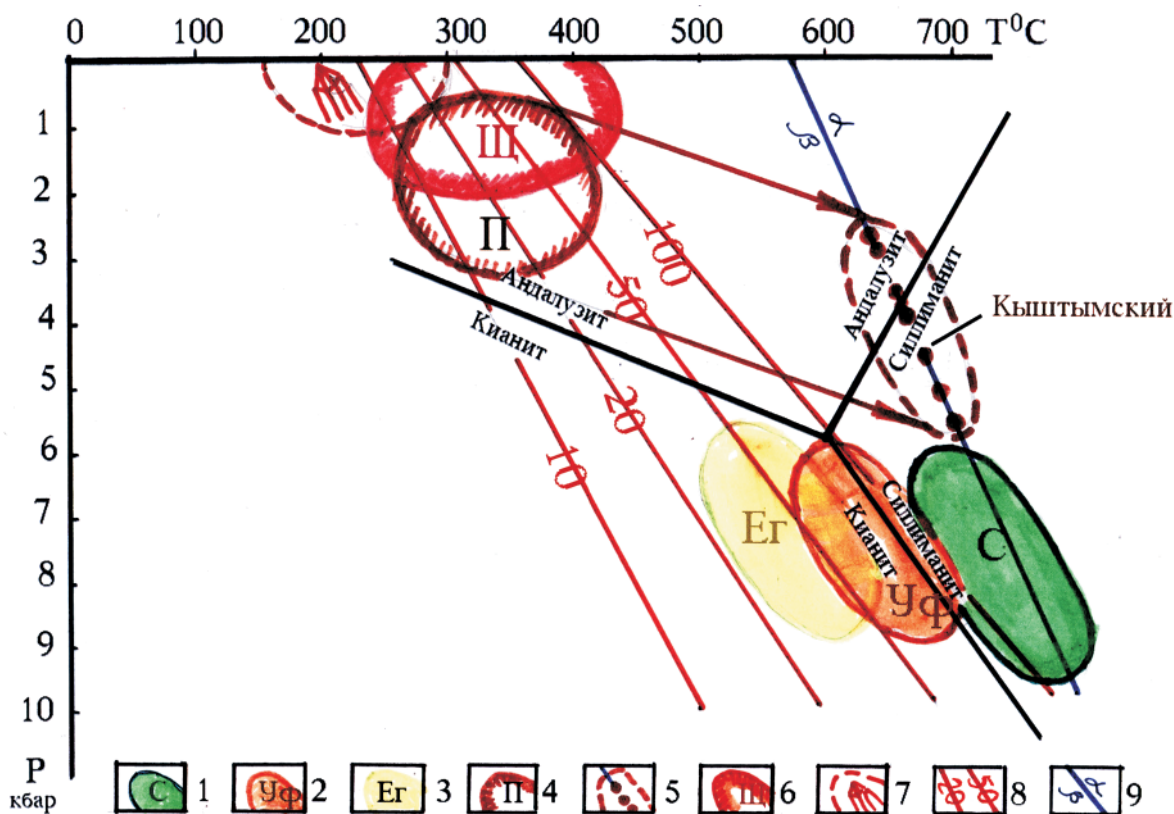


жиг ( $\alpha$ - $\beta$  переход) и образование трещин «сотового» кварца (рис. 2). Следовательно, данный тип кварца характеризуется высокой степенью прозрачности ( $T > 80\%$ ), низкими значениями потерь при прокаливании (ППП) ( $< 1\%$ ) и одновременно – достаточно высокими содержаниями макро- и микропримесей, в том числе структурных элементов-примесей ( $Al > 50\text{--}100\text{ ppm}$ ). Это привело к отсутствию заинтересованности промышленности в данном типе кварца.

Кварцево-жильные образования, сложенные метасоматическим мелкозернистым жильным кварцем **уфалейского генетического типа**, приурочены к Слюдяногорско-Теплогорской шовной зоне и их метасоматический генезис связан с альбититами и ураноносными карбонатитами докембрийского возраста (байкальская эпоха складчатости). Наиболее характерной генетической особенностью данной разновидности кварца является полигенный характер его образования, фиксируемый по неоднородному строению агрегата, сформированного под влиянием нескольких последующих этапов геологического развития Уфалейского метаморфического комплекса (венд-палеозойского

возраста). Для описываемого типа вторично-зернистого кварца нельзя применять термин «гранулированный кварц», так как механизм образования зерен первоначально метасоматический (гранобластовая структура) с последующим метаморфогенным преобразованием. Следует называть его структурой гетерогранобластовой. Высокобарические ( $P = 6\text{--}9\text{ кбар}$ ) и высокотемпературные ( $T = 550\text{--}650\text{ }^\circ\text{C}$ ) условия образования (см. рис. 2) обусловили высокую степень прозрачности кварца ( $50\text{--}75\%$ ), низкие значения потерь при прокаливании ( $0,007\%$ ) и относительно невысокое содержание микропримесей ( $Al_{cp} = 56\text{ ppm}$ ).

**Микро-, тонкозернистый кварц егустинского генетического типа** относится к относительно высокотемпературному ( $T = 500\text{--}650\text{ }^\circ\text{C}$ ) метасоматическому кварцу (см. рис. 2), который развивается только в разновидностях кварца слюдяногорского и уфалейского типов в условиях высокого давления ( $P > 6\text{ кбар}$ ). Жилы с микро-тонкозернистым кварцем развиты в центральных частях Уфалейского метаморфического комплекса. Этот тип кварца генетически связан с развитием поздних редкометалльных



**Рис. 2.** P-T-условия формирования природных кварц-жильных образований различного генезиса. Диаграмма составлена с использованием материалов [7, 12, 17]

Поля развития: 1 – метаморфогенных кварцевых жил перекристаллизации (слюдяногорский тип), 2 – гидротермально-метасоматических кварцевых жил (уфалейский тип), 3 – гидротермально-метасоматических кварцевых жил (егустинский тип), 4 – жил выполнения раннеколлизийного этапа (пугачевский тип), 5 – метаморфогенного, вторично-зернистого, гранулированного кварца (кыштымский тип), показаны точки измеренных температур газово-жидких включений в гранулированном кварце [17], 6 – стекловидного кварца позднеколлизийного этапа (щербаковский тип), 7 – хрусталеносных гнезд; 8 – изолинии предельного насыщения кварца структурным алюминием (ppm); 9 – граница перехода  $\alpha$ - $\beta$  модификаций кварца



и редкоземельных карбонатитовых метасоматитов с апатитом – так называемых нельсонитов. Высокая фтористость растворов привела к очищению зерен кварца от включений и к образованию особо чистого кварца, сделала его «льдистоподобным». Светопропускание в этом кварце 68–92 %, он характеризуется более низким содержанием структурной примеси алюминия (15–35 ppm).

Слюдяногорский, уфалейский и егустинский генетические типы жильного кварца были образованы в докембрии в гнейсово-амфиболитовой толще в абиссальных, низкоградиентных условиях на глубинах более 20 км, что обусловило высокобарические и высокотемпературные условия его образования и преобразования (см. рис. 2).

**Крупнозернистый молочно-белый кварц жил выполнения пугачевского генетического типа** – это массивная разновидность кварца от крупной до гигантозернистой структуры, зерна которого содержат большое количество преимущественно первичных мелких и мельчайших газожидких включений, что определяет его низкое светопоглощение ( $T = 15\text{--}30\%$ ). Образование кварца жил выполнения связано с сдвиго-взбросовыми подвижками во время ранней коллизии (360–320 млн лет) вдоль регионального Главного уральского глубинного разлома (ГУГР) и образования кулисообразных жил вмещающих трещин отрыва (см. рис. 1). Жилы образуются в приповерхностных условиях, давление не превышает 3 кбар, температуры – 250–400 °С (см. рис. 2). Несмотря на низкий показатель светопоглощения относительно низкие температуры растворов обуславливают низкие средние содержания структурного алюминия ( $Al = 20,1\text{ ppm}$ ).

Практическое отсутствие кварцевых жил, сложенных крупнозернистым молочно-белым кварцем на Кыштымском месторождении подтверждает происхождение «гранулированного» кварца **кыштымского генетического типа** по кварцевым телам выполнения молочно-белого кварца пугачевского типа [4, 7, 10, 12]. Только к жильному кварцу, слагающему тела кыштымского типа, применим термин «гранулированный». Кварц этого типа является продуктом рекристаллизации деформированного первично-гигантозернистого кварца жил выполнения палеозойской ранней стадии коллизии. Это происходит под воздействием процессов высокотемпературного дислокационного метаморфизма в зоне активного воздействия ГУГРа уровня амфиболитовой фации ( $T = 610\text{--}700\text{ °C}$ ,  $P = 2\text{--}5\text{ кбар}$ ), связанного с этапом поздней коллизии (310–240 млн лет). Основными процессами, приводящими к образованию кварца кыштымского типа, являются деформация и рекристаллизация крупно- и гигантозернистого кварца жил выполнения. Рекристаллизация – образование за счет крупных индивидов более мелких, т. е. при этом осуществляется грануляция индивидов. Грануляция кварца обусловлена наличием градиента температуры, избыточного тектонического напряжения

и инициирована его полиморфным  $\alpha\text{-}\beta$  превращением с образованием полигональной системы усачных трещин, аналогичной «сотовому» кварцу камерных пегматитов [7, 10, 11]. Этим и обусловлена равномерностерность гранулированного кварца. Высокая чистота «гранулированного» кварца обусловлена первичной чистотой кварцевых жил выполнения пугачевского типа (см. рис. 2) и удалением механических примесей при грануляции кварцевых зерен в межзерновое пространство. Содержание валового алюминия 30–40 ppm, а структурной примеси алюминия в кристаллической решетке кварца – 10–20 ppm.

**Стекловидный гигантозернистый жильный кварц щербаковского генетического типа** представляет собой совокупность разделенных индукционными поверхностями индивидов до 10 см и более по наибольшему сечению. Изучение морфологии, характера сростания и положения в жильном кварце этих индивидов позволяет утверждать, что агрегат сформировался в результате зернистого и друзового роста в открытых полостях, а данный тип жильного кварца является первично прозрачным или слабо замутненным первичными газожидкими включениями. Формирование кварцевых жил щербаковского типа вызвано гидротермальными процессами палеозойской поздней коллизии (310–240 млн лет). Они относятся к наиболее молодым образованиям и нередко приурочены к зонам локализации жил гранулированного кварца, а в ряде жил секут их. Термодинамические условия образования (см. рис. 2) этих жил определяют достаточно высокое предельное количество структурного алюминия (20–30 ppm), причем преобладает алюминий с Na-Li компенсатором. ИК-спектры стекловидного кварца имеют много общих характеристических особенностей с ИК-спектрами горного хрусталя, что обусловлено близкими термодинамическими условиями их образования (см. рис. 2).

#### **Физико-химические факторы, определяющие технологические свойства кварца**

Кварц – основной минерал кварцево-жильных образований, которые являются объектами добычи рудных и нерудных полезных ископаемых. Обычные парагенезисы минералов золота, вольфрама, многих сульфидов с кварцем не случайны и определяются особыми свойствами кремнезема, являющегося главной средой, в которой переносятся рудные компоненты и с которой они кристаллизуются в кварцевых жилах. В связи с этим детальное исследование кварца по разным направлениям имеет большой практический интерес.

За восьмидесятилетний период детального изучения различных разновидностей кварца уральских месторождений исследователями проведены полевые и лабораторные наблюдения с широким использованием современных методов исследования минералов, что позволило определить ос-

новые параметры, влияющие на качество особо чистого кварца – сырьевого источника для высококачественных кварцевых концентратов.

1. Содержание *структурных примесей* в кварце объективно отражает особенности его генезиса и может быть использовано в качестве критерия прогнозирования и оценки объектов, в особенности на ранних стадиях геолого-разведочных работ. Для этой цели используются высокоточные методы ЭПР- и ИК-спектроскопии, с помощью которых можно устанавливать содержание основной структурной примеси (алюминия), достигающее 80 % от всей суммы примесей.

Концентрация структурно связанного алюминия в кварце снижается с падением температуры и повышением давления в минералообразующей системе (рис. 3). Это определяется относительным положением кварцево-жильного поля относительно удаленности от кровли гранитных массивов, поверхности высокометаморфизованного гнейсового блока или шовных зон региональных разломов [8, 15,16].

2. Анализ *химического состава элементов-примесей* жильного кварца и кристаллов горного хрусталя Уральских месторождений (рис. 4) показал, что процессы хрусталеобразования усиливают прозрачность кварца (Т%), но в то же время в них увеличивается количество структурных примесей лития и германия.

Количество алюминия несколько снижается по сравнению с жильным кварцем, что свидетельствует о более низких температурах при хрусталеобразовании. Другие элементы-примеси, связанные с минеральными и газовой-жидкими включениями, испытывают устойчивую тенденцию к снижению при перекристаллизации и новообразовании кварцевых жил, а процессы их грануляции приводят к значительному снижению примесей в кварце. Установлено, что наиболее чистым от структурных примесей является стекловидный и гранулированный кварц высокобарических зон Новотроицкого, Уфалейского и Пугачевского генетических типов, используемых для получения особо чистого прозрачного стекла [5, 7, 12, 15].

3. Важнейшими *физико-химическими факторами*, определяющими генетический тип месторождений и технологические свойства кварца, являются температура и давление минералообразующего процесса, которые находятся в относительном соответствии с температурой и давлением метаморфизма жильовмещающих пород. Повышение температуры кристаллизации способствует вхождению алюминия и щелочей, как основных загрязняющих элементов-примесей, в решетку кварца, а рост давления, наоборот, препятствует этому. Эффект влияния температуры кристаллизации на концентрацию структурных примесей в кварце на порядок превышает эффект влияния давления [8, 12].

Содержание изоморфных примесей в кварце методом ЭПР определялось на основе измерения концентраций связанных с ними парамагнитных

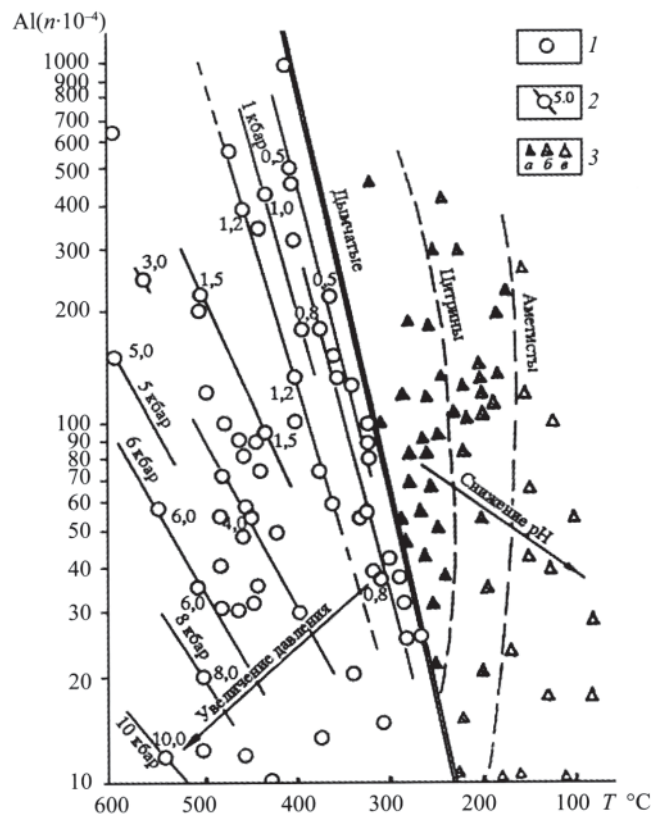


Рис. 3. Зависимость структурной примеси алюминия от P-T-pH параметров образования жильного кварца и кристаллов горного хрусталя [8, 15]

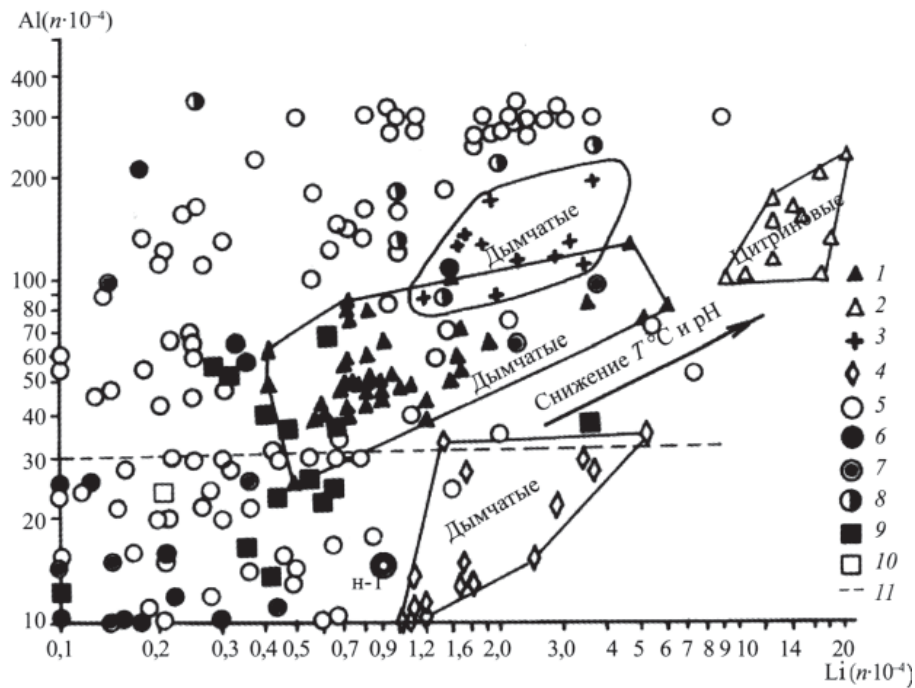
1 – жильный кварц; 2 – давление (кбар), при котором образовались кварцевые жилы; 3 – кристаллы горного хрусталя: дымчатые (а), цитрины (б), аметисты и бесцветные разновидности (в)

центров. Значения концентрации структурной примеси Al, компенсируемого щелочными ионами, для исследованных образцов приведены в табл. 2 [13].

Чаще кварц жил выполнения позднеколлизийного этапа, представленный прозрачным и полупрозрачным крупно- и гигантозернистым агрегатом, отличается повышенным содержанием  $Al^{3+}$  (Na, Li) – до  $(18-54) \cdot 10^{-4}$  мас. %. Таким кварцем сложены жилы Щербаковская и № 3 Кыштымского месторождения.

Первично-зернистый кварц слагает жилы выполнения, которые на Урале сформировались во время ранней и поздней коллизии. Этот кварц в зависимости от условий образования может быть молочно-белым крупно-гигантозернистым и стекловидным крупно-гигантозернистым. Внешне различить эти два вида кварца не представляет никакой проблемы, но разделение их по визуальным наблюдениям на ранне- или позднеколлизийные образования весьма сложно. В решении этой задачи должны помочь точные методы исследования жильного кварца.

При внимательном рассмотрении спектров ЭПР вторично-зернистого кварца, к категории которого относятся все типы гранулированного кварца, можно сделать некоторые генетические и практи-



**Рис. 4.** Соотношение содержаний алюминия ( $n \cdot 10^{-4} \%$ ) и лития ( $n \cdot 10^{-4} \%$ ) в кварце золоторудных, шеелитоносных и хрусталеносных кварцево-жильных месторождений [8]

1–4 – кристаллы хрусталеносных месторождений: Приполярного (1 – дымчатые, 2 – цитриновые) и Южного Урала (3, 4 – дымчатые: 3 – Астафьевского, 4 – Светлинского); 5–8 – жильный кварц различных месторождений: Айдырлинского золоторудного (5), Березовского и Великопетровского золоторудных шеелитоносных (6), Кумакского золоторудного (7), Кочкарского золоторудного (8); 9 – гранулированный кварц Кыштымского месторождения; 10 – стекловидный кварц Пугачевского месторождения; 11 – уровень содержания структурного алюминия в особо чистом кварце; н-т – особо чистый кварц Новотроицкого месторождения

ческие выводы. Содержание примесей  $Al^{3+}(Na, Li)$  в кварце жилы 170 Кыштымского месторождения по сравнению с содержанием примесей в других типах гранулированного кварца повышенное и достигает  $13,7 \cdot 10^{-4}$  мас. % (см. табл. 2). Это наследственное от вмещающих пород, поскольку жила 170 слюдяногорского типа образовалась в результате перекристаллизации с укрупнением зерен кварца во вмещающих породах под действием метаморфизма ранней и поздней коллизий.

Жилы гранулированного кварца кыштымского типа характеризуются низким содержанием  $Al^{3+}(Na, Li)$  – от 0 до  $2,8 \cdot 10^{-4}$  мас. %. Этот тип кварца образовался в результате рекристаллизации гигантозернистого кварца жил выполнения ранней коллизии при высокотемпературном метаморфизме в этап поздней коллизии.

Ранее считалось, что кварцевые жилы золоторудных и редкометалльных месторождений не пригодны для стекловарения. Наши исследования показали, что кварц этих месторождений ничем не отличается от так называемых «безрудных» кварцевых жил.

#### Размещение кварцево-жильных образований в Уфалейском метаморфическом комплексе

Кварцево-жильные образования Кыштымского кварценосного района являются результатом

длительных и сложных процессов формирования Уфалейского гнейсово-амфиболитового комплекса. Кварцевые тела в значительной степени претерпели преобразования под воздействием более поздних метаморфических, метасоматических и гидротермальных процессов, что привело к существенному усложнению первоначального строения жильного кварца, слагающего кварцевые тела.

В пределах уфалейского метаморфического комплекса кварцевые жилы расположены в разных тектономагматических зонах, являющихся составной частью очень сложных по строению и генетической природе геологических структур – шовных. Все исследованные кварцевые объекты группируются нами в пределах однотипных, часто пространственно разобщенных, тектонометасоматических, структурно-формационных зонах зон (рис. 5).

**Серебрянская структурно-формационная зона (Кузнечихинское месторождение) – I.** Кварцевые жилы, отнесенные к этому типу разреза, локализованы в центральной части уфалейского метаморфического комплекса (см. рис. 5) и пространственно приурочены к зоне оперения Серебрянского сдвиговзброса, по которой проходит граница егустинской и слюдяногорской подсвит уфалейской свиты нижнепротерозойского возраста [6]. Доминирующую роль здесь играют гнейсовидные плагиоклазовые



Таблица 2

Основные параметры ИК-спектров жильного кварца различных генетических типов из месторождений Уфалейского кварцевоносного района [13], с изменениями авторов

Генетический тип	№ жилы	ID	Кол-во проб	Площадь полосы поглощения, см <sup>2</sup>							
				3375 см <sup>-1</sup> ОН-(Al)		3440 см <sup>-1</sup> ОН-(Al-Na)		3475 см <sup>-1</sup> ОН-(Al-Li)		3640–3680 см <sup>-1</sup> HF	
				X <sub>ср</sub>	σ	X <sub>ср</sub>	σ	X <sub>ср</sub>	σ	X <sub>ср</sub>	σ
Егустинский	191	1	19	9	2,2	–	–	–	–	13,1	6,6
	192	2	10	7,9	3	–	–	–	–	12,1	2,4
	194	3	4	10,6	1,5	–	–	–	–	11,1	3,3
Уфалейский	175	4	20	7,2	1,3	–	–	–	–	8,5	1,1
	179	5	5	7,2	1,7	–	–	–	–	15,2	5,6
	185	6	7	10	2,5	–	–	–	–	23,1	10,2
	4	7	5	18,2	8,6	–	–	–	–	5,2	2,1
	3	8	5	36,4	21	4,9	1,2	5,2	0,9	7,1	3,3
Слюдяногорский	170	9	3	15,2	1,6	2,2	1,3	0,5	0,07	0	–
Щербакровский	3	10	15	25,7	6,2	4,4	2,1	0,9	0,3	0	–
	Щер.	11	5	22,5	2,4	2,8	1,6	0,9	0,2	0	–
Кыштымский	101	12	13	15,3	3	0,6	0,2	–	–	0	–
	21	13	8	19,1	2,3	2,3	0,8	0,3	0,05	0	–
	10	14	4	14,2	2,1	–	–	–	–	0	–
	35	15	3	14,7	1,7	–	–	–	–	0	–
	204	16	2	12,1	2,1	–	–	–	–	0	–
Пугачевка	88	17	10	16,2	2,9	–	–	–	–	0	–

амфиболиты и их метаморфические производные, подчиненную – слюдяные гнейсы, гранитогнейсы и обычно интенсивно гранитизированные слюдяно-кварцевые сланцы и серые грубосланцевые кварциты. Характерная особенность кварцево-жильной минерализации – ее локализация в интенсивно дислоцированных и мигматизированных породах.

Жильный кварц в большей своей части имеет метасоматическую природу и характерную для данной структурно-формационной зоны тонкозернистую структуру, массивную текстуру и относится к егустинскому геолого-промышленному типу [5, 10, 12].

**Слюдяногорско-Теплогорская структурно-формационная зона – II.** Кварцевые жилы, отнесенные к этой структуре, локализованы в верхах уфалейской свиты в пределах зоны интенсивной мигматизации, выраженной в частом переслаивании амфиболовых гнейсов и гранитогнейсов. Эта зона ограничена с востока Слюдяногорским тектоническим нарушением (см. рис. 5). Впервые на интенсивное рассланцевание в пределах этой субмеридиональной зоны обратил внимание П. П. Скабичевский [14]. К этой же зоне приурочены кварцевые тела в мусковитовых пегматитах Слюдяногорского месторождения, которые длительное время принимались за кварцевые ядра пегматитов.

Метасоматический кварц в данной части разреза характеризуется мелкозернистой равномернозернистой массивной текстурой и относится к «уфалейскому» геолого-промышленному типу [5, 7, 9, 12].

**Слюдяногорская шовная зона – III и Кыштымское месторождение гранулированного кварца – IV.** Разрез этих структурно-формационных зон представлен отложениями куртинской свиты среднего рифея (см. рис. 5). Эта зона ограничивается с запада Слюдяногорским тектоническим швом между докембрийскими породами уфалейской и рифейскими породами куртинской свит, и представляет собой мощную зону смятия и дислокационного метаморфизма, образовавшуюся в условиях высокобарического метаморфизма. Эта зона меланжа имеет мощность от 200 до 500 м и характеризуется интенсивным развитием пластических и хрупких деформаций, процессов перекристаллизации, бластеза и проявлением высокобарического метаморфизма и метасоматоза. Жилы структурно-формационной зоны III располагаются в западной части куртинской свиты, наиболее близкой к Слюдяногорскому тектоническому шву. Данные объекты представляют собой жилы метаморфической дифференциации и перекристаллизации, сложенные зернистым кварцем средне-крупнозернистым кварцем слюдяногорского типа. Часть жил представлена палеозойскими жилами выполнения, сложенными молочно-белым кварцем шестоватой структуры с образованием больших участков прозрачного кварца с характерным струйчатым изломом и муаровым отливом.

**Жилы Кыштымского месторождения гранулированного кварца – IV** располагаются в центральной и западной частях куртинской свиты



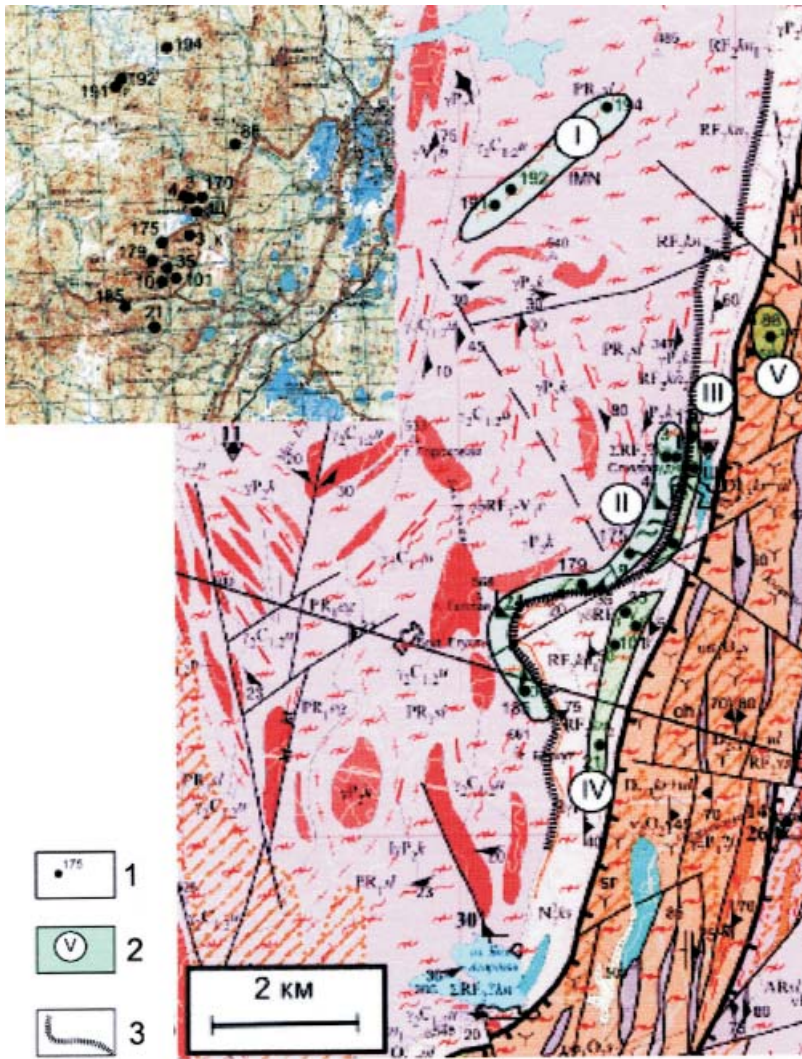


Рис. 5. Схема размещения кварцевых жил, изученных методом ИК-спектроскопии в пределах юго-восточной части Уфалейского метаморфического комплекса (геологическая основа – фрагмент геологической карты N-41–1 [2])

1 – кварцевые жилы и их номера; 2 – структурно-формационные зоны и их номера (названия см. в тексте); 3 – фрагмент западного борта верхне-протерозойского рифта, Слюдяногорско-Теплогорская шовная зона

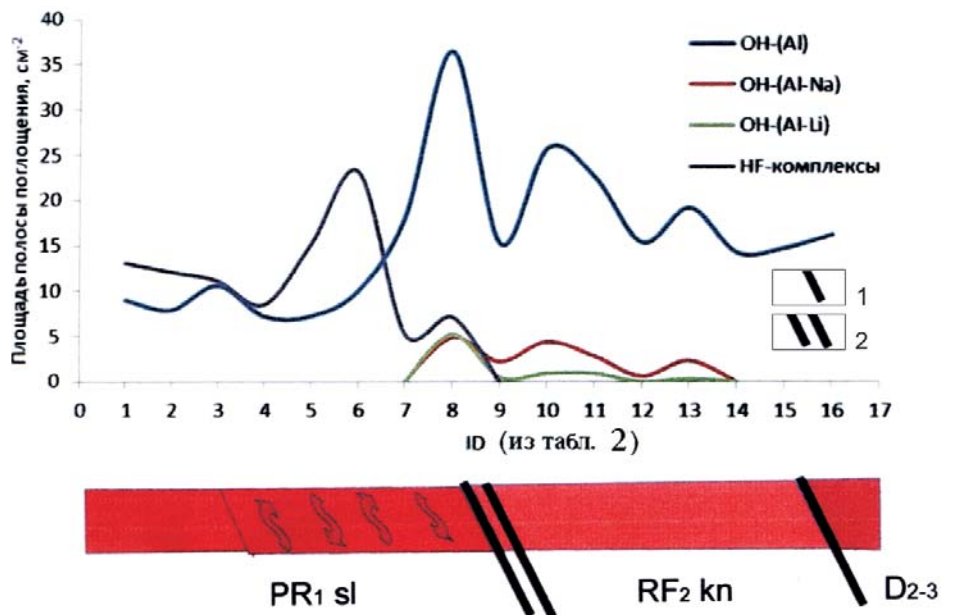


Рис. 6. Изменение количества структурных примесей в кварце кварцевых жил в разрезе юго-восточной части Уфалейского метаморфического комплекса 1 – западный борт верхнепротерозойского (рифейского) рифта (Слюдяногорско-Теплогорская шовная зона); 2 – ГУГР

и сложены однородным среднезернистым гранулированным кварцем. Катакlastические и гранобластовые структуры кварца кыштымского типа образуются по жилам выполнения молочно-белого и стекловидного кварца путем рекристаллизации в высокобарических и высокотемпературных усло-

виях и традиционно относятся к «кыштымскому» типу [3, 4, 6].

**Структурно-формационная зона ГУГРа (Пугачевское месторождение молочно-белого кварца) – V.** Кварцевые жилы этой зоны составляют основную часть Пугачевского месторождения мо-



лочно-белого и прозрачного жильного кварца, приурочены к локальной зоне скалывания и находятся в генетической связи с ГУГРом [1, 12].

Выделение структурно-формационных зон (пространственных сгущений кварцевых жил) как элементов геологического разреза позволяет создать геологический разрез юго-восточной части Уфалейского метаморфического комплекса, на фоне которого представлены результаты ИК-спектроскопии жильного кварца (рис. 6). Максимумы примесных микроэлементов, образующих дефекты типа OH-(Al), OH-(Al-Na) и OH-(Al-Li) в кристаллической решетке кварца показывают, что внедрение этих дефектов в кварц кварцевых жил происходило в зоне Слюдяногорского тектонического шва (см. рис. 6).

Максимумы OH-(Al-Na)- и OH-(Al-Li)-дефектов связаны с проявлением редкометалльных элементов и связаны с щелочными процессами в пегматитах Слюдяногорского месторождения и развитием карбонатитов вдоль Слюдяногорско-Теплогорской шовной зоны. ореол этих дефектов охватывает кварцевые жилы западной и центральной частей разреза куртинской свиты и сходит на нет в восточной части. Микроэлементный состав включений позволяет сделать вывод о том, что данные дефекты были внедрены в кристаллическую решетку кварца в процессе метасоматоза щелочной стадии с проявлением альбитизации, их индикаторами являются OH-(Al-Na) и OH-(Al-Li)-дефекты.

Примесные HF-комплексы фиксируются в кварце кварцевых жил, локализованных в уфалейской свите, и не переходят в ореол, сопряженный с куртинской. Фторотипный характер дефектов (HF-комплексы) в кварце кварцевых жил в пределах уфалейской свиты связан с воздействием на кварцевые жилы кислых фторидных растворов, пространственно совмещенных с кварц-локализирующими структурами [5].

Таким образом, кварцевые жилы, трассирующие Слюдяногорский тектонический шов, находятся в зоне длительного воздействия и теплофлюидопроводников с широко проявленными процессами дислокационного метаморфизма, магматизма и сопровождающего их метасоматоза. Здесь происходит формирование фильтрующей колонны со сложным по физической природе режимом стягивания рассеянных газов и жидкостей в более или менее концентрированный поток «стволовой зоны» [11], действия которого приводят к внедрению в кристаллическую решетку кварца структурных микропримесей определенной геохимической направленности.

В заключении подчеркнем, что исследование кварца различных генетических типов показало, что любой кварц с учетом содержания в нем элементов-примесей имеет свою нишу применения в той или иной отрасли хозяйствования. Требованиям к особому чистому кварцу среди кварцево-жильных образований Уфалейского кварценозного района в большей

степени отвечают гранулированный кварц кыштымского типа, метасоматический кварц егустинского и уфалейского типов, бесцветный стекловидный кварц щербачковского типа.

*Работа выполнена при поддержке темы НИР ФАНО № 0393–2018–0031, руководитель д. г.-м. н. А. Ю. Кисин.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев Б. И., Бурьян Ю. И., Захарченко И. И. Геолого-структурное положение Пугачевского месторождения стекловидного кварца // Геология метаморфических комплексов. – Свердловск: СГИ, 1985. – С. 99–106.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Сер. Южно-Уральская, лист N-41-I (Кыштым) / Н. С. Кузнецов, Б. А. Пужаков, В. Д. Шох и др. – Челябинск, 2008. – 320 с.
3. Емлин Э. Ф., Синкевич Г. А., Якшин В. И. Жильный кварц Урала в науке и технике. – Свердловск, 1988. – 272 с.
4. Жильный кварц восточного склона Урала / Г. Н. Вертушков, Ф. Ф. Борисков, Э. Ф. Емлин и др. // Тр. СГИ. – 1970. – Т. 2, вып. 66. – С. 82–99.
5. Золоторудная, редкометалльная и хрусталеносная минерализация месторождений Урала кварцево-жильного типа / В. Н. Огородников, В. А. Коротеев, Ю. А. Поленов и др. – Екатеринбург: УрО РАН-УГГУ, 2014. 312 с.
6. Кейльман Г. А. Мигматитовые комплексы подвижных поясов. – М.: Недра, 1974. – 200 с.
7. Мельников Е. П. Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца. – М.: Недра, 1988. – 216 с.
8. Огородников В. Н. Закономерности размещения и условия образования кварцево-жильных хрусталеносных и золоторудных месторождений Урала: автореф. дис. ... д. г.-м. н. – Свердловск, 1993. – 28 с.
9. Огородников В. Н., Сазонов В. Н., Поленов Ю. А. Минерагения шовных зон Урала. Уфалейский гнейсово-амфиболитовый комплекс (Южный Урал). – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН-УГГУ, 2007. – 187 с.
10. Поленов Ю. А. Эндогенные кварцево-жильные образования Урала. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. – 269 с.
11. Поспелов Г. Л. Геологические предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников // Геология и геофизика. – 1963. – № 3. – С. 18–38; № 4. – С. 24–41.
12. Савичев А. Н. Уфалейский кварцево-жильный район (закономерности размещения кварца различных генетических типов, минералого-технологическое картирование и прогноз): автореф. дис. ... д. г.-м. н. – Екатеринбург: УГГУ, 2005. – 24 с.
13. Серкова Л. Е. Типоморфные особенности жильного безрудного кварца: автореф. дис. ... к. г.-м. н. – Свердловск, 1990. – 20 с.



14. Скабичевский П. П. О Нижнеуфалейском гранитном массиве // Сов. геология. – 1940. – № 10. – С. 106–108.

15. Страшненко Г. И. Геохимические особенности распределения элементов примесей в кварце // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 312, № 6. – С. 1450–1453.

16. Страшненко Г. И., Мельников Е. П. Метаморфогенные месторождения химически чистого жильного кварца // Разведка и охрана недр. – 1989. – № 6. – С. 2–12.

17. Юсупов С. Ш., Мельников Е. П., Фаттахудинов С. Г. РТ-условия грануляции жильного кварца Урала. – Уфа: Баш ФАН СССР, 1979. – 48 с.

## REFERENCES

1. Ageev B.I., Buryan Yu.I., Zakharchenko I.I. [Geological-structural position of the Pugachevskoye deposit of vitreous quartz]. *Trudy SGI "Geologiya metamorficheskikh kompleksov"* [Geology of metamorphic complexes. Proc. of SMI]. Sverdlovsk, SGI Publ., 1985, pp. 99–106. (In Russ.).

2. Kuznetsov N.S., Puzhakov B.A., Shokh V.D., et al. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoi Federatsii masshtaba 1:200 000. Ser. Yuzhno-Ural'skaya, list N-41-I (Kyshtym)* [State geological map of the Russian Federation, scale 1:200.000, Ser. Yuzhno-Uralskaya, sheet no. N-41-I (Kyshtym)]. Chelyabinsk, 2008. 320 p. (In Russ.).

3. Emlin E.F., Sinkevich G.A., Yakshin V.I. *Zhil'nyi kvarts Urala v nauke i tekhnike* [Vein quartz in science and technology]. Sverdlovsk, 1988. 272 p. (In Russ.).

4. Vertushkov G.N., Boriskov F.F., Emlin E.F., Sinkevich G.A., Sokolov Yu.A., Sustavov O.A., Yakshin V.I. [Vein quartz of the eastern Urals slope]. *Trudy SGI* [Proc. of SMI]. Sverdlovsk, 1970, vol. 2, issue 66, pp. 82–89. (In Russ.).

5. Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A., Babenko V.V., Savichev A.N. *Zolotorudnaya, redkometall'naya i khrustalenosnaya mineralizatsiya mestorozhdeniy Urala kvartsevo-zhil'nogo tipa*. [Gold ore, rare-earth and crystal-bearing mineralization of quartz-vein type deposits of the Urals.] Ekaterinburg, UrO RAS-UGGU Publ., 2014. 312 p. (In Russ.).

6. Kel'man G.A. *Migmatitovye komplekсы podvizhnykh pojasov* [Migmatic complexes of mobile belts]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 200 p. (In Russ.).

7. Melnikov E.P. *Geologiya, genesis i promyshlennyye tipy mestorozhdeniy kvartsa* [Geology, genesis and industrial types of quartz deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 216 p. (In Russ.).

8. Ogorodnikov V.N. *Zakonomernosti razmeshcheniya i usloviya obrazovaniya kvartsevo-zhil'nykh khrustalenosnykh i zolotorudnykh mestorozhdeniy Urala*. [Regularities of allocation and formation conditions of quartz-vein crystalline and gold ore fields of the Urals. Author's abstract of DSc thesis]. Sverdlovsk, 1993. 28 p. (In Russ.).

9. Ogorodnikov V.N., Sazonov V.N., Polenov Yu.A. *Minerageniya shovnykh zon Urala. Ufaleyskiy gneysovo-amfibolitovyy kompleks (Yuzhnyy Ural)* [Minerageny of sature zones of the Urals. The Ufaley gneiss-amphibolite complex (the Southern Urals)]. Ekaterinburg, IGG UrO RAS-UGGU Publ., 2007. 187 p. (In Russ.).

10. Polenov Yu.A. *Endogennyye kvartsevo-zhil'nye obrazovaniya Urala* [Endogenous quartz-vein bodies of the Urals]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 2008. 269 p. (In Russ.).

11. Pospelov G.L. [Geological prerequisites for ore control capping]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 1963, no. 3, pp.18–38; no. 4, pp. 24–41. (In Russ.).

12. Savichev A.N. *Ufaleyskiy kvartsevo-zhil'nyy rayon (zakonomernosti razmeshcheniya kvartsa razlichnykh geneticheskikh tipov, mineralo-tekhnologicheskoye kartirovaniye i prognoz)*, *Avtoref. Diss. kand. geol.-min.nauk* [The Ufaley quartz-vein region (Allocation regularities of various genetic types of quartz, mineral-metallurgical sampling and potential assessment). Author's abstract of PhD thesis]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 2005. 24 p. (In Russ.).

13. Serkova L.E. *Tipomorfnyye osobennosti zhil'nogo bezrudnogo kvartsa*, *Diss.kand. geol.-min.nauk* [Typomorphic features of barren vein quartz. Author's abstract of PhD thesis]. Sverdlovsk, 1990. 120 p. (In Russ.).

14. Skabichevskiy P.P. [About the Nizhniy Ufaley granite massif]. *Sovetskaya Geologiya – Soviet Geology*, 1940. no. 10, pp. 106–108. (In Russ.).

15. Strashnenko G.I. [Geochemical features of impurities distribution in quartz]. *Doklady Ak. Nauk SSSR – Proc. of AS USSR*, 1990, vol. 312, no. 6, pp. 1450–1453. (In Russ.).

16. Strashnenko G.I., Melnikov E. P. [Metamorphogene deposits of chemically clean vein quartz]. *Razvedka i okhrana nedr – Prospect and protection of mineral resources*, 1989, no. 6, pp. 2–12. (In Russ.).

17. Yusupov S. Sh., Melnikov E. P., Fattakhudinov S. G. *PT usloviya granulyatsii zhil'nogo kvartsa Urala* [PT-conditions of the vein quartz granulation in the Urals]. Ufa, Bash. Branch of the AS USSR Publ., 1979. 48 p. (In Russ.).

© В. Н. Огородников, Ю. А. Поленов,  
А. Н. Савичев, В. В. Бабенко, 2018