

ОСОБО ЧИСТЫЙ КВАРЦ УФАЛЕЙСКОГО КВАРЦЕНОСНОГО РАЙОНА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Виталий Николаевич Огородников,
Юрий Алексеевич Поленов,
Александр Николаевич Савичев

fgg.gl@ursmu.ru

Уральский государственный горный университет
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Актуальность работы обусловлена необходимостью значительного уточнения понятия минерального сырья под термином «особо чистый кварц».

Цель работы: детальное изучение генезиса кварца уфалейского и егустинского типов, представляющих значительный интерес в качестве минерального сырья для получения кварцевых концентратов повышенного качества, что должно учитываться при разработке рациональных систем отработки кварцевых объектов и применении схем обогащения.

Методология исследования: детальное изучение геохимических, геологических и возрастных параметров кварцевых тел, сложенных жильным кварцем уфалейского, егустинского и других типов.

Результаты. Кварцево-жильные образования Уфалейского кварценосного района являются результатом длительных и сложных процессов формирования Уфалейского гнейсово-амфиболитового комплекса. Многоэтапность формирования комплексов и обуславливает совмещение в одной зоне различных типов кварцевых жил, относящихся к разным возрастным семействам. Нами выделены кварцево-жильные образования следующих генетических типов: метаморфической дифференциации, слюдяногорского, уфалейского, егустинского, кыштымского, пугачевского и шербаковского. Кварцево-жильные образования, сложенные метасоматическим мелкозернистым жильным кварцем уфалейского типа с наложенным егустинским, приурочены к Слюдяногорско-Теплогорской шовной зоне и их метасоматический генезис связан с альбититами, редкоземельными карбонатитами и нельсонитами докембрийского возраста.

Выводы. Для жильного кварца уфалейского и егустинского типов нельзя применять термин «гранулированный кварц», к которому относится кварц «кыштымского» типа, так как механизм образования зерен – первоначально метасоматический с последующим метаморфогенно-метасоматическим преобразованием. Высокобарические и высокотемпературные условия образования кварца обусловили высокую степень его прозрачности, низкие значения потерь при прокаливании и содержание структурного алюминия.

Ключевые слова: уфалейский тип; егустинский тип; Уфалейский комплекс; кварцево-жильные образования; генетический тип кварцевых жил.

Уфалейский кварценосный район, включая Кыштымское и Кузнечихинское кварцево-жильные месторождения, по своему минерогенетическому потенциалу является одним из самых крупных, а по качеству кварца – основным кварценосным районом не только на Урале, но и в Российской Федерации.

Кварцево-жильные образования Уфалейского кварценосного района являются результатом длительных и сложных процессов формирования Уфалейского гнейсово-амфиболитового комплекса. Кварцевые тела в значительной степени претерпели преобразования под воздействием одновременных метаморфических, метасоматических и гидротермальных процессов, что привело к существенному усложнению первоначального строения жильного кварца, слагающего кварцевые тела.

«Одной из особенностей упомянутого комплекса, долгое время не находившей удовлетворительного объяснения, является совмещенность в одной зоне кварцевых жил различных генетических семейств. Это обстоятельство затрудняло не только выяснение условий формирования и генезиса кварца того или иного типа, но и поиски, и прогнозную оценку месторождений» [1].

«Многоэтапность формирования гнейсово-мигматитовых комплексов и обуславливает совмещение в одной зоне различных типов кварцевых жил, относящихся к разным возрастным семействам. И только те кварцевые жилы, которые претерпели метаморфические преобразования в определенных геологических и термодинамических условиях, оказываются продуктивными» [2].

Исследования авторов [3–6] подтвердили наличие разномасштабных, разновозрастных разновидностей кварца. Выделены кварцево-жильные образования следующих генетических, минералого-технологических типов (**таблица**): **метаморфической дифференциации, слюдяногорского, уфалейского, егустинского, кыштымского, пугачевского и шербаковского.**

В статье приведено детальное описание кварца уфалейского и егустинского типов, представляющих значительный практический интерес, и рассмотрены вопросы генезиса данных кварцево-жильных тел. Уфалейский промышленно-генетический тип с различным процентным соотношением егустинского внутри него слагает жилы 175, 179, 185, Беркутинская, 2136 Кыштымского месторождения и жилы 191, 192, 194, 414 и ряд других Кузнечихинского месторождения [3–5, 7–9].

В работах почти всех исследователей [1, 8, 10–13] перечисленные кварцевые жилы описываются как тела, сложенные одним типом кварца так называемого уфалейского типа, который все без исключения относят к гранулированному. Детальное изучение этих геологических объектов показало, что в строении этих кварцевых жил принимает участие жильный кварц слюдяногорского, уфалейского и егустинского типов, которые относятся к различным генетическим типам и образованы в результате метаморфогенно-метасоматических преобразований метаморфических пород и никак не относятся к гранулированному [4–6].

Многолетние исследования жильного кварца различными методами позволили исследователям выяснить многие детали строения и причины минеральной загрязненности жильного кварца, но не дали ответов по поводу генезиса различных типов кварца и геологическое время их образования. По глубокому убеждению авторов, эти проблемы могут быть решены только в случае тщательной увязки результатов аналитических исследований с детальным изучением геологической обстановки локализации кварцевых объектов и выяснением онтогенических особенностей всех типов кварца, слагающих кварцевое тело. По этой причине авторы помимо своих данных приводят результаты аналитических работ других исследователей, но интерпретация результатов дана с учетом детальных полевых работ, выполненных авторами.

Распределение выделенных генотипов 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, кото-

Генетическая типизация жильного кварца Уфалейского кварценозного района.

Genetic typing of vein quartz of the Ufaley quartziferous district.

Геодинамический режим, мегацикл	Родоначальный магматический комплекс (возраст)	Генетический формационный тип кварцевых жил	Минерально-технологический тип	Тип кварца по структурным особенностям	Эталонные кварцевые жилы
Метаморфизм карельского мегацикла (2,05–1,75 млрд лет)	Гранито-гнейсы уфалейской свиты (1,85–1,8 млрд лет)	Метаморфогенный, первично-зернистый	Прожилки метаморфической дифференциации	Светло-серый, мелко-, средне-зернистый (1–3 мм)	–
Рифтогенез рифейского мегацикла (1,35–1,0 млрд лет)	Чусовской комплекс субщелочных гранитоидов, «гиганто-мигматиты» (881 млн лет)	Метаморфогенный, вторично-зернистый, перекристаллизованный	Слюдяногорский	Серый, полупрозрачный, средне-, крупнозернистый, грануломорфный (2–10 мм)	Кварцевая жила № 170
Байкальский (кадомский) коллизионный мегацикл (620–500 млн лет)	Битимский комплекс щелочных гранитов, альбититы, карбонатиты (579–533 млн лет)	Гидротермально-метасоматический, первично-зернистый	Уфалейский	Молочно-белый, мелкозернистый (1–2 мм)	Кварцевая жила № 175, Беркутинская
Раннепалеозойская ТМА шовных зон (500–450 млн лет)	Козловгорский комплекс щелочных гранитоидов-сиенитов (476–457 млн лет)	Гидротермально-метасоматический, первично-зернистый	Егустинский	Серый, слабо дымчатый, тонкозернистый, льдистоподобный (0,05–1 мм)	Кварцевые жилы № 191, 192, 414, 2136
Ранняя коллизия палеозойского мегацикла (360–320 млн лет)	Нижнеуфалейский комплекс гранитоидов (316–317 млн лет)	Гидротермальный, первично-зернистый, гигантозернистый	Пугачевский	Молочно-белый, полупрозрачный, крупно-, гигантозернистый	Кварцевые жилы П-3, П-21, П-88
Поздняя коллизия палеозойского мегацикла (310–240 млн лет)	Кизильский комплекс микроклиновых гранитов (267 млн лет)	Метаморфогенный, вторично-зернистый, гранулированный	Кыштымский	Светло-серый, полупрозрачный, гранулированный, среднезернистый (3–5 мм)	Кварцевая жила № 101
Поздняя коллизия палеозойского мегацикла (310–240 млн лет)	Кизильский комплекс микроклиновых гранитов (267 млн лет)	Гидротермальный, первично-зернистый, гигантозернистый	Щербаковский	Бесцветный, дымчатый, стекловидный, гигантозернистый	Кварцевая жила № 3, Щербаковская

рый зафиксирован в пределах Уфалейского метаморфического комплекса в докембрии, в карельскую эпоху тектоно-магматической активизации.

Слюдяногорский минералого-технологический тип жильного кварца является результатом собирательной перекристаллизации с укрупнением зерна ранних прожилков метаморфической дифференциации, располагающихся в долгоживущей Слюдяногорской шовной зоне, заложенной в конце среднего рифея в результате процессов рифтогенеза (грэнвилльская эпоха складчатости – 1000 ± 50 млн лет). В результате собирательной перекристаллизации в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации в зонах ультраметаморфизма при температурах 650–800 °С, при относительно высоком давлении (6–10 кбар) образуется кварц гетеробластового, средне-, крупнозернистого строения, который претерпел высокотемпературный отжиг (α-β переход), образование трещин «сотового» кварца (рис. 2).

Кварцево-жильные образования, сложенные метасоматическим мелкозернистым жильным кварцем **уфалейского типа**, приурочены к Слюдяногорско-Теплогорской шовной зоне, и их метасоматический генезис связан с альбититами и ураноносными карбонатитами докембрийского возраста (байкальская эпоха складчатости), которые формировались в абиссальных условиях [14]. 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 во время венд-палеозойских преобразований. Для данного типа вторично-зернистого кварца нельзя применять термин «гранулирован-

ный кварц», так как механизм образования зерен первоначально метасоматический (гранобластовая структура), с последующим метаморфогенным преобразованием. Целесообразно данный тип структур кварца уфалейского типа называть гетерогранобластовой. Высокобарические ($P = 6–9$ кбар) и высокотемпературные ($T = 550–650$ °С) условия (рис. 2) обусловили высокую степень прозрачности кварца ($T\% = 50–75$ %), низкие значения потерь при прокаливании ($П.п.п. = 0,007$ %) и относительно невысокое содержание микропримесей: $Al_{cp} = 56$ ppm.

Микро-, тонкозернистый кварц егустинского типа относится к относительно высокотемпературному ($T = 500–650$ °С) метасоматическому кварцу (рис. 2), который развивается только по ранее образованным разновидностям кварца слюдяногорского и уфалейского типов в условиях высокого давления ($P > 6$ кбар). Жилы с микро-, тонкозернистым кварцем развиты в центральных частях Уфалейского метаморфического комплекса. Этот тип кварца генетически связан с развитием поздних редкометаллических 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 минералого-технологический типы жильного кварца были образованы в докембрии в гнейсово-амфиболитовой толще в абиссальных, низкоградиентных условиях на глубинах более 20 км, что обусловило их высокобарические и высокотемпературные условия образования и преобразования (рис. 2).

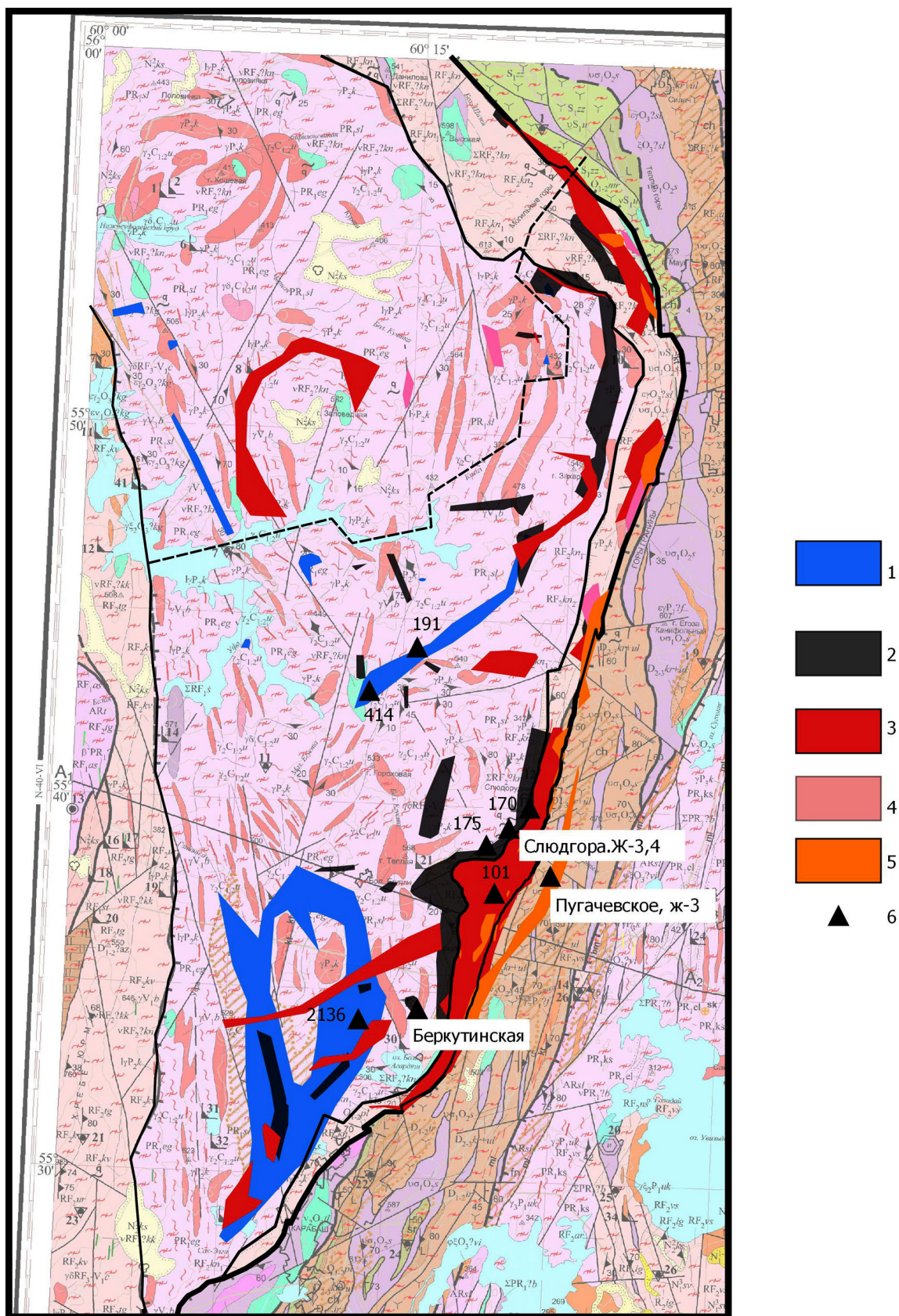


Рисунок 1. Распределение генотипов жильного кварца в пределах Уфалейского кварценозного района по материалам кварце-метрической съемки (Савичев, 2005) [3]. Геологическая основа – фрагмент геологической карты N-41-1 (Кузнецов и др., 2008) [15]. 1 – тонкозернистый егустинский тип; 2 – мелкозернистый уфалейский тип; 3 – гранулированный кыштымский тип; 4 – гетерограно-бластовый, перекристаллизованный слюдногогорский тип; 5 – шестоватый кварц жил выполнения, щербаковский и пугачевский типы; 6 – эталонные кварцевые жилы, их номера и названия.

Figure 1. The genotype distribution of vein quartz within the Ufaley quartziferous district according to the quartz-metric shooting (Savichev, 2005) [3]. The geological base is a fragment of the geological map N-41-1 (Kuznetsov and others, 2008) [15].

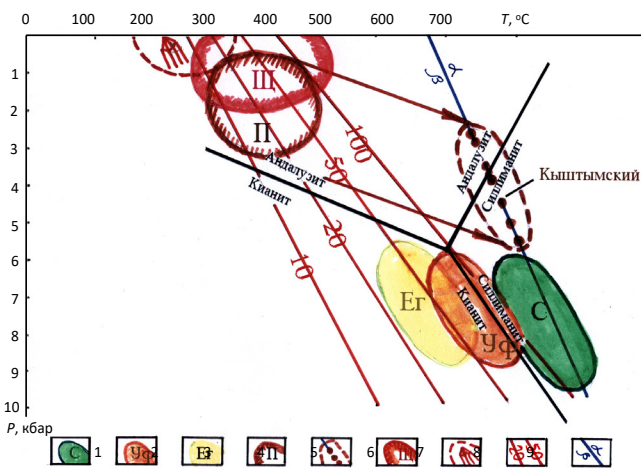


Рисунок 2. РТ-условия формирования природных кварцево-жилных образований различного генезиса. Диаграмма составлена с использованием материалов [3, 12]. 1 – поле развития метаморфогенных кварцевых жил перекристаллизации (сланяногорский тип); 2 – поле образования гидротермально-метасоматических кварцевых жил (уфалейский тип); 3 – поле формирования гидротермально-метасоматических кварцевых жил (егустинский тип); 4 – поле образования жил выполнения раннеколлизионного этапа (пугачевский тип); 5 – поле метаморфогенного, вторичнозернистого, гранулированного кварца (кыштымский тип). Показаны точки измеренных температур газовой-жидких включений в гранулированном кварце; 6 – поле стекловидного кварца позднеколлизионного этапа (щербяковский тип); 7 – поле образования хрусталеносных гнезд; 8 – изолинии предельного насыщения кварца структурным алюминием (pprm); 9 – граница перехода α - β модификаций кварца.

Figure 2. PT-conditions of formation of natural quartz-vein formations of various genesis. The diagram is compiled using materials [3, 12].

Типовым представителем геологических образований, сложенных кварцем уфалейского типа, является кварцевая жила № 175 (рис. 3). Эта жила является уникальной по размерам и запасам жильного кварца. Жила располагается в пределах уфалейской свиты в мигматизированных биотит-амфиболовых гнейсах и не является монолитным кварцевым телом. Залегание с вмещающими породами субсогласное. Азимут простирания жилы 45°, азимут падения – 135°, азимут склонения – 170°, угол падения – 42°. Длина по простиранию 318 м, по склонению 350 м, максимальная мощность 17,5 м (Евстропов, 1995; Савичев, 2005).

Описание кварцевой жилы № 175 и кварца уфалейского типа имеется в работах Г. Н. Вергушкова и др. [1], Л. Е. Серковой [7], А. А. Евстропова и др. [13], А. Н. Савичева [3], В. Н. Огородникова и др. [4, 5], Ю. А. Поленова [6], М. А. Игуминцевой [8], А. И. Белковского [9], Е. Л. Котовой [14] и других исследователей.

В. И. Якшин [16] впервые обратил внимание на особенность жильного кварца жилы № 175, которая заключается в неоднородном строении агрегата, выраженном в наличии двух групп зерен: крупных реликтовых участков, как он считал, исходного индивида и новообразованного тонкозернистого (гранулированного) агрегата. Новообразованный гранулированный агрегат характеризуется размерами гранул 0,05–0,4 мм (в среднем 0,2 мм) и извилистыми (зубчатыми) границами зерен. Такие границы образуются при метасоматозе, не как при грануляции, поэтому отнесение этого типа кварца к гранулированному было ошибочным.

Неравномерную зернистость уфалейского кварца подтвердили и М. А. Игуминцева [8] и Е. Л. Котова [14].

Кварц жилы № 175 представлен до 20–35 % зернами размером 2–5 мм, до 60–80 % зернами размером 0,1–0,4 мм. Следует отметить, что хотя количество крупных зерен невелико, площадь и доля их сечений довольно значительна.

По данным Л. Е. Серковой [7], изучение неупорядоченного строения кварца ИК-спектроскопией в области 400–1500 см^{-1} показало, что наиболее совершенной кристаллической структурой обладает кварц тонко-мелкозернистой структуры. Это подтверждается наиболее высокими значениями индекса раскристаллизации ($K_{\text{ИК}} = 7,5\text{--}9,1$) и общим характером ИК-спектров области 400–1500 см^{-1} . Из этого делается вывод, что тонко-мелкозернистый кварц является первичным кварцем и его решетка находится в относительно стабильном состоянии.

Детальное изучение строения и минерального состава жилы № 175, выполненное авторами, показало, что этот жильный кварц может служить типоморфным кварцем уфалейского типа. Наиболее характерной структурной особенностью данной разновидности кварца является неоднородное строение агрегата, сформированное под влиянием двух тектоно-магматических этапов, выраженное наличием нескольких групп гранул: тонко-мелкозернистых грануломорфных участков исходных индивидов метасоматических тел замещения и новообразованных метаморфогенных, средне- и крупнозернистых гранул, являющихся результатом процессов перекристаллизации нового этапа метаморфогенно-метасоматических преобразований (рис. 4).

Сложность онтогении кварца уфалейского типа объясняется полигенностью и полихронностью генезиса

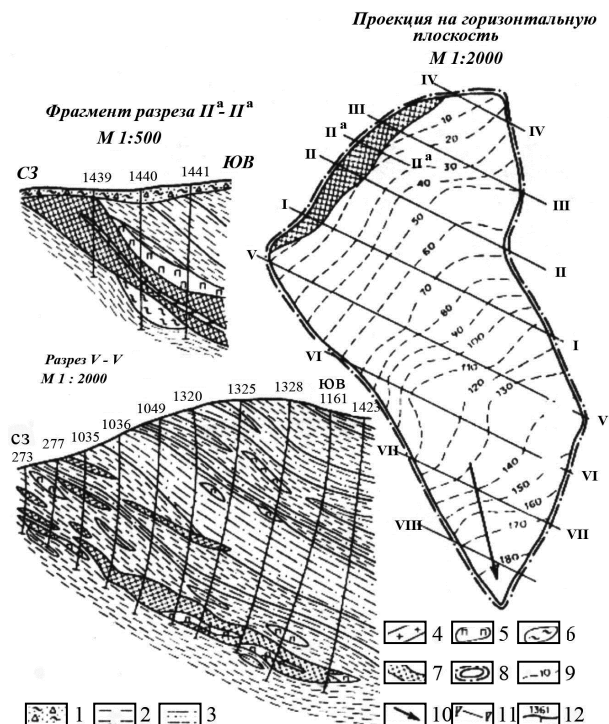


Рисунок 3. Кварцевая жила № 175 Кыштымского месторождения гранулированного кварца [12]. 1 – рыхлые покровные отложения; 2 – гнейсы биотит-амфиболовые; 3 – гранито-гнейсы; 4 – граниты; 5 – пегматит; 6 – слюдит; 7 – гранулированный кварц; 8 – контур проекции жилы; 9 – изогипсы подошвы жильного тела (относительные глубины залегания, м); 10 – направление склонения жилы; 11 – линии разведочного бурения; 12 – скважины.

Figure 3. Quartz vein no. 175 of the Kyshtymsky deposit of granulated quartz [12].

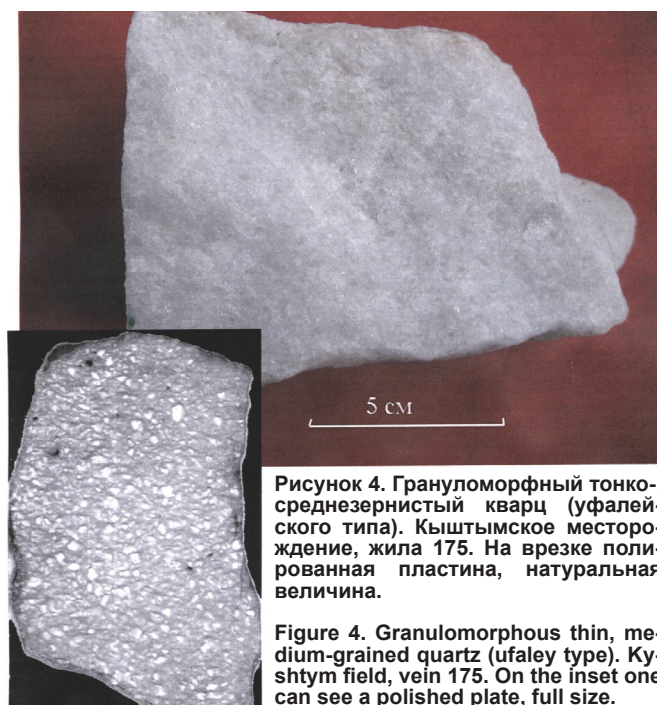


Рисунок 4. Грануломорфный тонко-, среднезернистый кварц (уфалейского типа). Кыштымское месторождение, жила 175. На врезке полированная пластина, натуральная величина.

Figure 4. Granulomorphous thin, medium-grained quartz (ufaley type). Kyshtym field, vein 175. On the inset one can see a polished plate, full size.

жильных тел. По наблюдениям авторов, кварцевая жила № 175 формировалась в долгоживущей Слюдяногорско-Теплогорской шовной зоне, в гнейсах и амфиболитах, насыщенных метаморфогенными кварцевыми жилами и прожилками метаморфической дифференциации, в ряде мест среди кварцевых жил перекристаллизации слюдяногорского типа. Образование самого кварца уфалейского типа, как представляется, генетически связано с обширным силикатным метасоматозом, связанным с альбититами и карбонатитами докембрийского возраста. По времени формирования кварц уфалейского типа, в том числе и кварцевой жилы № 175, относится к кадомскому времени

– 643–525 млн лет. Перекристаллизация кварца связана с коллизионным метаморфизмом среднего палеозоя, становления щелочных гранитоидов и сиенитов Козловогорского комплекса (Огородников и др., 2014, 2016).

Кварц уфалейского типа в образцах молочно-белого цвета, в свежем сколе со светло-серым оттенком, за счет большого количества полупрозрачных перекристаллизованных зерен кварца на общем фоне мелкозернистого кварца белого цвета.

Для данного типа вторично-зернистого кварца нельзя применять термин «гранулированный кварц», так как механизм образования зерен первоначально метасоматический (гранобластовая структура), в последующем метаморфогенный, с образованием отдельных зерен перекристаллизации, порфиробласт на фоне мелкозернистой основной массы. Целесообразно данный тип структур кварца уфалейского типа называть грануломорфным.

Грануломорфный кварц этих жил обладает рядом свойств, положительно выделяющих его среди других субформаций кварца. К таким свойствам относятся высокий коэффициент светопропускания ($T\% = 75-90\%$), низкие значения потерь при прокаливании, отношения *влага-газ*, что связано с незначительным содержанием в нем газово-жидких включений. В то же время кварцевожильные тела уфалейского типа содержат большое количество реликтов карбонатитов, альбититов и секущих даек (рис. 5) палеозойских раннеколлизионных плагиогранитов Нижнеуфалейского комплекса, которые значительно ухудшают качество жильного кварца, требуя более сложных схем обогащения.

В южном выклинивании гранитного тела Козлиных гор выявлены щелочные граниты с эгирином, рибекитом и астрофиллитом [9, 17]. В северо-восточной части Уфалейского блока картируются тела щелочных биотит-магнетитовых гнейсовидных лейкогранитов. Сиенитовый комплекс, представленный граносиенитами, кварцевыми сиенитами, сиенит-пегматитами и лейкократовыми маг-

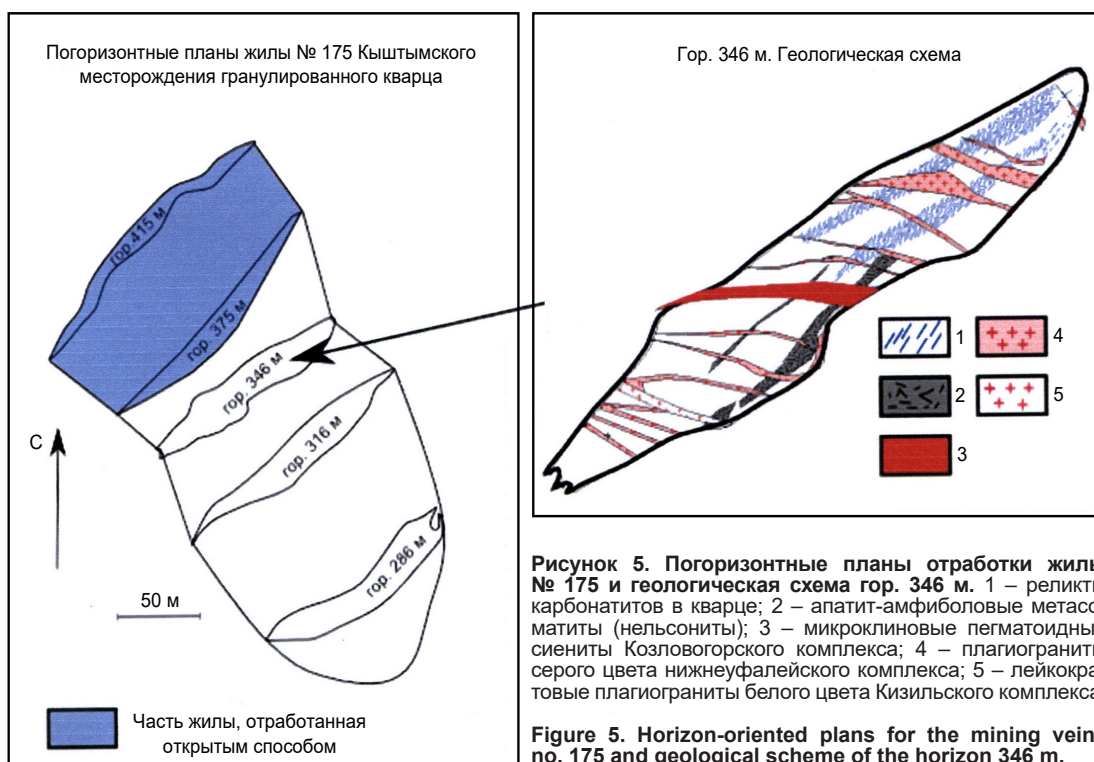


Рисунок 5. Погоризонтные планы отработки жилы № 175 и геологическая схема гор. 346 м. 1 – реликты карбонатитов в кварце; 2 – апатит-амфиболовые метасоматиты (нельсониты); 3 – микроклиновые пегматоидные сиениты Козловогорского комплекса; 4 – плагиограниты серого цвета нижнеуфалейского комплекса; 5 – лейкократовые плагиограниты белого цвета Кизильского комплекса.

Figure 5. Horizon-oriented plans for the mining veins no. 175 and geological scheme of the horizon 346 m.

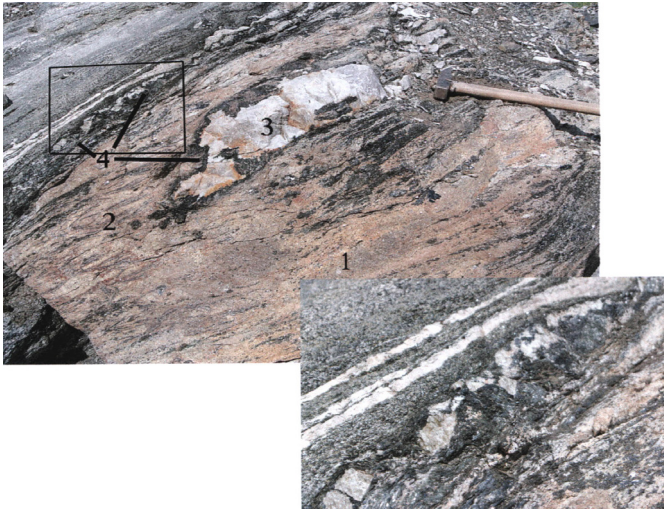


Рисунок 6. Наложение рутил-амфиболовых нельсонитов (4) (на врезке хорошо видны кристаллы апатита и рутила) на ильмено-рутиловые (2), карбонатиты (1) с образованием кварцевых жил егустинского типа (3).

Figure 6. Overlay of the rutilite-amphibole nelsonites (4) (in the inset the crystals of apatite and rutile are clearly visible) on the il'meno-rutile (2) and on the carbonatites (1) with the formation of quartz veins of the yegustinsky type (3).

нетитовыми гранитами в шовных зонах, накладывается на ранние щелочно-гранитные образования среднерифейского возраста. Возраст Козловогорского комплекса, определенный по биотиту из габбро Ag–Ag-методом, составил $457,8 \pm 5,8$ млн лет, определение цирконов из гранитов U–Pb-методом дает результат в узком интервале 449–480 млн лет [18]. Абсолютный возраст лейкогранитов, нефелиновых и известково-щелочных сиенитов, по ранним работам – 450–396 млн лет и связанных с ними метасоматитов – 354–396 млн лет [9, 18–20], свидетельствует о формировании их во время начальной океанической стадии и преобразованиях во время последующих раннеколлизийных процессов.

С сиенитами и нефелиновыми сиенитами связана колумбит-пироклор-цирконовая минерализация. В сиенитах небольшие содержания Nb_2O_5 (0,054 %) и Ta_2O_5 (0,00184 %) фиксируются в альбитизированных и окварцованных разностях. Содержание Zr в них 0,18–0,3 %. Максимальные содержания циркона в биотитовых сиенитах 5,6 кг/т. В нефелиновых сиенитах содержание Nb_2O_5 – 0,028–0,070 %, Ta_2O_5 – 0,00138–0,00359 %, Zr – 0,036 – 0,080 %. Минералы-концентраторы Ta и Nb – колумбит, пироклор, ильменорутил. Содержание Ta_2O_5 в пироклоре 0,5 % и в ильменорутиле 0,3–0,7 %; Nb_2O_5 в ильменорутиле 8–15 %. Кроме танталита, колумбита и циркона в сиенитах и нефелиновых сиенитах находятся торит, ортит, сфен (Золов и др., 2004).

Дальнейшее развитие щелочного процесса сопровождалось перекристаллизацией ранних карбонатитов с образованием кальцит-доломитовых, анкеритовых разностей, сопровождаемых кристаллизацией крупных кристаллов ильменорутила, рутила, титанита, магнетита, апатита и редкоземельных минералов – пироклора, Y-колумбита, радиально-лучистого циркона, ксенотима и новообразованного иттроэпидота, которые локализуются чаще всего уже в кварцевых телах уфалейского типа, реже в карбонатитах (рис. 5).

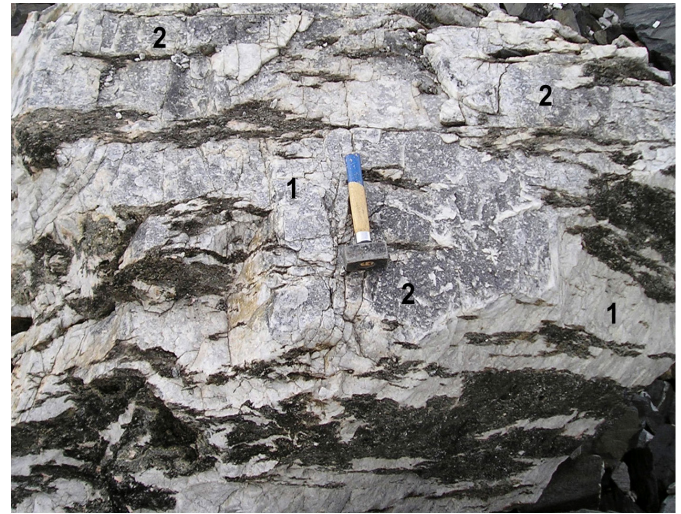


Рисунок 7. Развитие высокопрозрачного, тонкозернистого, льдистоподобного кварца егустинского типа (2) по грануломорфному кварцу уфалейского типа (1). Видны реликты карбонатитов (темные). Карьер по отработке жилы № 175, Кыштимское кварцево-жильное месторождение.

Figure 7. Highly transparent, very fine grained, ice-like quartz of the yegustinsky type (2) after the granular quartz of the ufaley type (1). Visible relics of carbonatites (dark). Open pit mining of a vein no. 175, Kyshtym quartz-vein deposit.

Данный процесс протекает во фторотипной среде, о чем свидетельствует образование своеобразных метасоматитов – нельсонитов, с широким развитием апатита во вмещающих карбонатитах и метасоматитах. Термин «нельсонит» впервые был употреблен Уотсоном в 1907 г. как название своеобразной горной породы из округа Нельсон штата Виргиния, США, состоящей преимущественно из ильменита – 58 %, апатита – 31 %, рутила – 9 %. По минеральному составу выделены следующие разности нельсонитов: ильменит-нельсонит (ильменит, апатит, небольшое количество силикатов); рутил-нельсонит (рутил, апатит); биотит-нельсонит (ильменит, магнетит, биотит, апатит); амфибол-нельсонит (ильменит, амфибол, апатит). Нельсониты встречаются в виде узких жил и линз среди сиенитовых и монзонитовых гнейсов. Распределение минералов в породе неравномерное, гнездообразное. Содержание рутила достигает 16 %, апатит образует крупные кристаллы.

В настоящее время нельсониты встречаются во всех карьерах по отработке наиболее продуктивных кварцевых жил (191, 175, 179, Беркутинская, 2136 и др.). Нельсониты образуются после альбититов и карбонатитов (рис. 6), генетически связанных со щелочными, микроклиновыми гранитоидами и граносиенитами Козловогорского комплекса и отчетливо накладываются и секут кварцевые жилы уфалейского типа.

Фторотипные растворы, промывая кварц уфалейского типа, очищают его от примесей, формируя мелко- и тонкозернистый, «льдистый» метасоматический кварц егустинского типа (жилы 191, 192, 413, 414 и др.). На Кузнечинском месторождении объем кварцевых жил, сложенных егустинским кварцем, составляет более 80 %, что делает эти жилы более привлекательными в практическом отношении. При проработке плавиковой кислотой в кварце уфалейского типа появляется обилие микродефект-каналов [9], значительно реже появляются поноры и трубообразные каналы. Промывка первичного

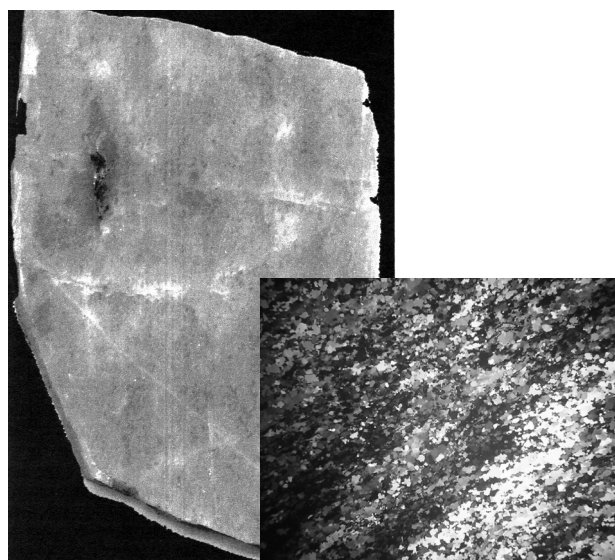


Рисунок 8. Метасоматический тонкозернистый кварц егустинского типа. Жила № 414, полированная пластина, натуральная величина. На врезке шлиф У-23-3 с анализатором, увел. 24X.

Figure 8. Fine-grained metasomatic quartz of the yegustinsky type. Vein no. 414, polished plate. Full size. In the inset one can see a pull-out cone У-23-3 with the analyzer. 24X increase.

кварца приводит к удалению из кварца микропримесей, что значительно увеличивает степень прозрачности кварца (коэффициент светопропускания) с 50–75 % (уфалейский кварц) до 68–91,2 % (егустинский кварц).

Самостоятельные тела, полностью сложенные кварцем егустинского типа, не встречаются. Кварц этого типа образуется метасоматическим путем при процессах кислотного (фтористо-водородного) выщелачивания кварца уфалейского типа (рис. 7).

Такое преобразование приводит к образованию льдистоподобного, особо чистого по содержанию структурных и минеральных примесей егустинского кварца. Егустинский кварц представлен тонкозернистым метасоматическим кварцем с высокой прозрачностью (рис. 8). Значительные объемы кварца уфалейского типа были превращены в кварц егустинского типа. Переход от одного типа кварца в другой проходит без резких границ, но в то же время зона перехода маломощная. Исследование образцов кварца жилы № 175 методами ИК-спектроскопии (Серкова, 1990) показало повышенное вхождение в кварц фтористо-водородных соединений, что можно объяснить влиянием нельсонитов, богатых фторсодержащими минералами.

При замещении кварцем егустинского типа уфалейский кварц приобретает светло-дымчатую окраску. При интенсивном развитии егустинского кварца цвет уфалейского кварца становится дымчатым.

Жилы с микро-, тонкозернистым кварцем егустинского типа развиты в центральных частях Уфалейского метаморфического комплекса (рис. 1). Кварц егустинского типа образуется при относительно высоких температурах ($T = 500\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$) и давлении ($P > 6$ кбар) путем метасоматического замещения кварца слюдяногорского и уфалейского типов, реже образуя небольшие тела собственно егустинского типа. Такие термодинамические условия и высокая фтористость растворов привели к очищению зерен кварца от включений и к образованию особо чистого

кварца, сделали его льдистоподобным. Светопропускание в этом кварце 68–92 %, и он характеризуется более низким содержанием примеси алюминия 15–35 ppm.

Аналогичный льдистоподобный кварц закартирован и изучен в телах жадеитов и альбититов в Западных Саянах, в районе хр. Борус [21, 22] и в жадеитовых породах Итмурундинского месторождения [23]. В центральных частях альбититовых тел встречен своеобразный «гранулированный» (льдистый) и «сахаровидный» кварц, слагающий быстро выклинивающиеся линзы от нескольких сантиметров до 1 м в поперечнике [21]. В крупных глыбах кварц полупрозрачен, голубоватого оттенка, напоминает глыбы льда. Результаты термобарогеохимических исследований показали, что образование данного типа кварца проходило при температуре 450–500 °С и давлении 4,5–8 кбар в условиях снижения температуры и в большей мере давления. Гранулированный кварц ассоциирует с альбититами и альбит-жадеитовыми породами, формирование которых происходило при температуре 600 °С и давлении более 10 кбар [22].

В заключение подчеркнем, что кварцево-жильные образования, сложенные метасоматическим мелкозернистым жильным кварцем уфалейского типа с наложенным егустинским, приурочены к Слюдяногорско-Теплогорской шовной зоне и их метасоматический генезис связан с альбититами, редкоземельными карбонатитами и нельсонитами докембрийского возраста. На определенном этапе метасоматического процесса наблюдается переход от «щелочного, натрового» к кремнекислотному метасоматозу, свойственному заключительным стадиям процесса. При этом под термином «кислотный» подразумевается не столько привнос SiO_2 , сколько резкое понижение потенциала Na_2O и возникновение соответствующих парагенезисов. Одновременно происходит привнос SiO_2 , вплоть до полного замещения альбита метасоматическими телами кварца.

Для данного типа зернистого кварца нельзя применять термин гранулированный кварц, так как механизм образования зерен – первоначально метасоматический (гранобластовая структура) с последующим метаморфогенно-метасоматическим преобразованием. Целесообразно данный тип структур кварца уфалейского типа называть гетеробластовым. Высокобарические ($P = 6\text{--}9$ кбар) и высокотемпературные условия ($T = 550\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$) образования кварца обусловили высокую степень его прозрачности ($T\% = 50\text{--}92\%$), низкие значения потерь при прокаливании (П.п.п. = 0,007 %) и содержание структурного алюминия $\text{Al}_{\text{cp}} = 15\text{--}56$ ppm.

Работа выполнена в рамках Программ фундаментальных исследований по госзаданию ФАНО по теме 0393-2018-0031, руководитель доктор геол.-минерал. наук А. Ю. Кисин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вертушков Г. Н., Дроздов В. П., Кейльман Г. А. и др. Геология метаморфогенных месторождений гранулированного кварца // Геология метаморфических комплексов: междуз. науч. темат. сб. Свердловск: СГИ, 1980. Вып. VIII. С. 3–25.
2. Мельников Е. П., Мельникова Н. И. Закономерности размещения гранулированного кварца в южной части Уфалейского антиклинария // Жильный кварц восточного склона Урала. Свердловск, 1970. С. 41–50.
3. Савичев А. Н. Уфалейский кварцево-жильный район (закономерности размещения кварца различных генетических типов, минералого-технологическое картирование и прогноз): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2005. 24 с.
4. Огородников В. Н., Сазонов В. Н., Поленов Ю. А. Минералогия шовных зон Урала. Ч. 3. Уфалейский гнейсово-амфиболитовый

комплекс (Южный Урал). Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН; УГГУ, 2007. 187 с.

5. Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. и др. Золоторудная, редкометалльная и хрусталеносная минерализация месторождений Урала кварцево-жильного типа. Екатеринбург: УрО РАН; УГГУ, 2014. 312 с.

6. Поленов Ю. А. Эндогенные кварцево-жильные образования Урала. Екатеринбург: УГГГА, 2008. 271 с.

7. Серкова Л. Е. Типоморфные особенности жильного безрудного кварца (по данным ИК- и ЭПР-спектроскопии): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Свердловск, 1990. 206 с.

8. Игуменцева М. А. Кварц Кыштымского и Кузнечихинского месторождений: состав, технологические свойства. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 166 с.

9. Белковский А. И. Геология и минералогия кварцевых жил Кыштымского месторождения (Средний Урал). Миасс: Ин-т минералогии УрО РАН, 2011. 234 с.

10. Вертушков Г. Н., Борисков Ф. Ф., Емлин Э. Ф., Синкевич Г. А., Соколов Ю. А., Суставов О. А., Якшин В. И. Жильный кварц восточного склона Урала // Труды СГИ. Свердловск. 1970. Т. 2. Вып. 66. С. 82–99.

11. Емлин Э. Ф., Синкевич Г. А., Якшин В. И. Жильный кварц Урала в науке и технике. Свердловск, 1988. 272 с.

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

13. Евстропов А. А., Бурьян Ю. И., Кухарь Н. С. и др. Жильный кварц Урала в науке и технике: Геология основных месторождений кварцевого сырья. М.: Недра, 1995. 207 с.

14. Котова Е. Л. Онтогенический анализ жильного кварца Кыштымского района для оценки качества кварцевого сырья: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2014. 120 с.

15. Кузнецов Н. С., Пужаков Б. А., Шох В. Д. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Сер. Южно-Уральская, лист N-41-I (Кыштым). Челябинск, 2008. 320 с.

16. Якшин В. И. Гранулированный кварц – новый вид минерального сырья: дис. д-ра геол.-минерал. наук. Свердловск, 1975. 232 с.

17. Кейльман Г. А. Мигматитовые комплексы подвижных поясов. М.: Недра, 1974. 200 с.

18. Шардакова Г. Ю., Савельев В. П., Пужаков Б. А., Петров В. И. Новые данные о химическом составе и возрасте пород козлинского комплекса // Ежегодник-2014. 2015. Вып. 162. С. 148–154.

19. Левин В. Я. Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург, 1997. 271 с.

20. Ферштатер Г. Б., Шардакова Г. Ю., Краснобаев А. А. и др. Rb–Sr и цирконовый U–Pb возраст Каменского мигматит-плутона (Средний Урал) // Ежегодник-2006. 2007. С. 200–206.

21. Добрецов И. Л. Минералогия, петрография и генезис гипербазитов, жадеитов и альбитов хр. Борус (Западный Саян) // Труды ИГиГ СО АН СССР: материалы по генетической и экспериментальной минералогии. 1963. Вып. 15. Т. 1. С. 242–320.

22. Томилина А. А., Долгов Ю. А. Условия образования «гранулированного кварца хребта Борус (Западные Саяны) // ДАН СССР, 1978. Т. 242, № 5. С. 1173–1176.

23. Бушев А. Г., Поленов Ю. А., Аеров Г. Д. Условия формирования эндогенных месторождений жадеита // Изв. УГИ. Сер. «Геология и геофизика». 1993. Вып. 2. С. 115–123.

Поступила 15 ноября 2017 г.

Extra pure quartz of the Ufaleysky quartziferous district (Southern Urals)

Vitaliy Nikolaevich Ogorodnikov,
Yuriy Alekseevich Polenov,
Aleksandr Nikolaevich Savichev
fgg.gl@ursmu.ru
Ural State Mining University
Ekaterinburg, Russia

The urgency of the problem is conditioned by the necessity for a considerable specification of the notion “extra pure quartz” which is used to mean a sort of mineral raw materials.

The purpose of the work: to study in detail the genesis of the ufaley and yegustin types, which are of great interest as a raw material for obtaining quartz concentrates of a high quality. This should be taken into account while developing the rational systems of working the quartz objects through and the application of the concentration schemes.

Methodology of the research: the detailed study of geochemical, geological and age-specific parameters of the quartz bodies, which are composed with the vein quartz of ufaley type, yegustin type and other types as well.

Results. The quartz-vein formations of the Ufaley quartz-bearing region are the result of long and complex processes of the Ufaley gneiss-amphibolite complex formation. Multistage formation of complexes causes the combination of different types of quartz veins, which belong to different age families, in the same zone. We have identified quartz-vein formation of the following genetic types: metamorphic differentiation, slyudyanogorsky, ufaley, yegustinsky, kyshtym, pugachevsky and shcherbakovsky. The quartz-vein formations, which are made up of fine-grained metasomatic vein quartz of the Ufaley type with the superimposed yegustinsky type are confined to the Slyudyanogorskaya-Teplogorskaya suture zone. Their metasomatic genesis is associated with albitites, rare-earth carbonatites and nelsonite of the Precambrian age.

Summary. For the vein quartz of the ufaley and yegustinsky types, it is impossible to apply the term “granular quartz”. The quartz of the kyshtym type can be called such since the mechanism of the granules formation is initially metasomatic with the subsequent metamorphic and metasomatic transformation. High-pressure and high-temperature conditions of formation of quartz have led to a high degree of transparency. Low values of loss on ignition and the content of structural aluminum have also taken place.

Keywords: ufaley type; yegustinsky type; Ufaley complex; quartz-vein formation; genetic type of quartz veins.

The work was performed within the framework of Programs of fundamental research on the state assignment of FANO (Russia) on the subject 0393-2018-0031, scientific advisor – Doctor of geological and mineralogical sciences A. Yu. Kisin.

REFERENCES

1. Vertushkov G. N., Drozdov V. P., Keilman G. A., and others. 1980, *Geologiya metamorfogennykh mestorozhdeniy granulirovannogo kvartsa* [Geology metamorphic deposits of granulated quartz]. *Geologiya metamorficheskikh kompleksov: mezhvuz. nauch. temat. sb.* [Geology of metamorphic complexes: interuniversity collection], Sverdlovsk, Vol. VIII, pp. 3–25.
2. Mel'nikov E. P., Mel'nikova N. I. 1970, *Zakonovernosti razmeshcheniya granulirovannogo kvartsa v yuzhnoy chasti Ufaleyskogo antiklinoriya* [Distribution patterns of granular quartz in the southern part of the Ufaley anticlinorium]. *Zhilnyy kvarts vostochnogo sklona Urala* [Veined quartz on the eastern slope of the Urals], Sverdlovsk, pp. 41–50.
3. Savichev A. N. 2005, *Ufaleyskiy kvartsevo-zhilnyy rayon (zakonovernosti razmeshcheniya kvartsa razlichnykh geneticheskikh tipov. mineralogo-tekhnologicheskoye kartirovaniye i prognoz): avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral. nauk* [An Ufaley quartz vein district (patterns of quartz of different genetic types, mineralogical-technological mapping and prediction): abstract of the dissertation of the Candidate of geological and mineralogical sciences]. Ekaterinburg, 24 p.
4. Ogorodnikov V. N., Sazonov V. N., Polenov Yu. A. 2007, *Minerageniya shovnykh zon Urala. Ch. 3. Ufaleyskiy gneysovo-amfibolitovyy kompleks (Yuzhnyy Ural)* [Mineralogy of the suture zones of the Urals. Part 3. Ufa gneiss-amphibolite complex (South Ural)]. Ekaterinburg, 187 p.
5. Ogorodnikov V. N., Koroteyev V. A., Polenov Yu. A. and others. 2014, *Zolotorudnaya, redkometalnaya i khrustalenosnaya mineralizatsiya mestorozhdeniy Urala kvartsevo-zhil'nogo tipa* [Gold, rock crystal and rare metal kinds of mineralization the deposits of the Urals quartz-vein type]. Ekaterinburg, 312 p.
6. Polenov Yu. A. 2008, *Endogennyye kvartsevo-zhilnyye obrazovaniya Urala* [Endogenous quartz-vein formations of the Urals]. Ekaterinburg, 271 p.
7. Serkova L. Ye. 1990, *Tipomorfnyye osobennosti zhilnogo bezrudnogo kvartsa (po dannym IR- i EPR-spektroskopii): dis. ... kand. geol.-mineral. nauk* [Typomorphic peculiarities of ore veins of quartz (according to IR- and ESR-spectroscopy): dissertation of candidate of geological and mineralogical sciences]. Sverdlovsk, 206 p.
8. Igumentseva M. A. 2012, *Kvarts Kyshtymskogo i Kuznechikhinskogo mestorozhdeniy: sostav, tekhnologicheskoye svoystva* [Quartz of the Kyshtym and Kuznechikhinskaya fields: composition, technological properties]. Ekaterinburg, 166 p.
9. Belkovsky A. I. 2011, *Geologiya i mineralogiya kvartsevyykh zhil Kyshtymskogo mestorozhdeniya (Sredniy Ural)* [Geology and mineralogy of quartz veins Kyshtymsky deposit (the Middle Urals)]. Miass, 234 p.
10. Vertushkov G. N., Boriskov F. F., Yemlin E. F., Sinkevich G. A., Sokolov Yu. A., Sustavov O. A., Yakshin V. I. 1970, *Zhilnyy kvarts vostochnogo sklona Urala* [Veined quartz on the eastern slope of the Urals]. *Trudy SGI* [Works of the Sverdlovsk Mining Institute]. Sverdlovsk. Vol. 2, Vol. 66, pp. 82–99.
11. Emlin E. F., Sinkevich G. A., Yakshin V. I. 1988, *Zhilnyy kvarts Urala v nauke i tekhnike* [Veined quartz of the Urals in science and technology]. Sverdlovsk, 272 p.
12. Mel'nikov Ye. P. 1988, *Geologiya, genezis i promyshlennyye tipy mestorozhdeniy kvartsa* [Geology, genesis and industrial types of quartz deposits]. Moscow, 216 p.
13. Evstropov A. A., Buryan Yu. I., Kukhar' N. S. and others. 1995, *Zhilnyy kvarts Urala v nauke i tekhnike: Geologiya osnovnykh mestorozhdeniy kvartsevoogo syr'ya* [Vein quartz of the Urals in science and technology: Geology of the main deposits of quartz raw materials]. Moscow, 207 p.
14. Kotova Ye. L. 2014, *Ontogenicheskiy analiz zhilnogo kvartsa Kyshtymskogo rayona dlya otsenki kachestva kvartsevoogo syr'ya: dis. ... kand. geol.-mineral. nauk* [The ontogenic analysis of vein quartz of the Kyshtymsky area for an assessment of quality of quartz raw materials: dissertation of Candidate of geological and mineralogical sciences]. St. Petersburg, 120 p.
15. Kuznetsov N. S., Puzhakov B. A., Shokh V. D. and others. 2008, *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200000. Ser. Yuzhno-Uralskaya. list N-41-I (Kyshtym)* [State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000. Ser. South Ural, sheet N-41-I (Kyshtym)]. Chelyabinsk, 320 p.
16. Yakshin V. I. 1975, *Granulirovannyy kvarts – novyy vid mineral'nogo syr'ya: dis. d-ra geol.-mineral. nauk* [Granular quartz. A new kind of mineral raw materials: dissertation of Doctor of geological and mineralogical sciences]. Sverdlovsk, 232 p.
17. Keilman G. A. 1974, *Migmatitovyye komplekсы podvizhnykh pooyasov* [Migmatite complexes of mobile belts], Moscow, 200 p.
18. Shardakova G. Yu., Savelyev V. P., Puzhakov B. A., Petrov V. I. 2015, *Novyye dannyye o khimicheskoy sostave i vozraste porod Kozlinogorskogo kompleksa* [New data on the chemical composition and age of the Kozlinogorsk complex rocks]. *Ezhegodnik-2014* [Yearbook-2014], vol.162, pp. 148–154.
19. Levin V. Ya. 1997, *Shchelochno-karbonatovyye komplekсы Urala* [Alkaline-carbonatite complexes of the Urals]. Ekaterinburg, 271 p.
20. Fershtater G. B., Shardakova G. Yu., Krasnobayev A.A. and others. 2007, *Rb–Sr i tsirkonovyy U–Pb vozrast Kamenskogo migmatit-plutona (Sredniy Ural)* [Rb–Sr and zirconium U–Pb age of the Kamensky migmatite-Pluto (Middle Ural)]. *Ezhegodnik-2006* [Yearbook 2006], pp. 200–206.
21. Dobretsov I. L. 1963, *Mineralogiya. petrografiya i genezis giperbazitov. zhadeitov i albitov khr. Borus (Zapadnyy Sayan)* [Mineralogy, petrography and Genesis of hyperbasites, jadeites and albitites of the Borus mountain ridge (Western Sayan)]. *Trudy IGIG SO AN SSSR: materialy po geneticheskoy i eksperimentalnoy mineralogii* [Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics of the Academy of Sciences of the USSR: materials on genetic and experimental Mineralogy], vol. 15, no. 1, pp. 242–320.
22. Tomilin A. A., Dolgov Yu. A. 1978, *Usloviya obrazovaniya granu-*

lirovannogo kvartsa khrebt Borus (Zapadnyye Sayany) [Conditions for the formation of granulated quartz of the Borus mountain range (the West Sayan)], vol. 242, no. 5, pp. 1173–1176.

23. Bushev A. G., Polenov Yu. A., Ayerov G. D. 1993, *Usloviya*

formirovaniya endogennykh mestorozhdeniy zhadeita [Conditions of formation of endogenous deposits of jadeite]. *Izv. UGl. Ser. "Geologiya i geofizika"* [News of the Ural State Mining University. Series "Geology and Geophysics"], vol. 2, p. 115–123.

Received 15 November 2017