

УДК 553.87

ТИПОМОРФНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАРЦА СЛЮДЯНО-ПЕГМАТИТОВОЙ ФОРМАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ЖИЛЫ БЕРКУТИНСКАЯ (Южный Урал)

М.А. Корекина¹, А.Н. Савичев¹, Н.Н. Анкушева^{1,2}, Е.А. Панкрушина³, Д.А. Артемьев^{1,2}

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
456317, Миасс, Ильменский заповедник, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, 456304, Миасс, ул. 8 июля, 10, Россия

³ Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН,
620110, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

Понимание механизма формирования кварцевых жил слюдяно-пегматитовой формации имеет большое значение для расшифровки условий образования промышленно пригодных кварцевых объектов. На примере жилы Беркутинская, являющейся генотипом месторождений метаморфогенного кварца слюдяно-пегматитовой формации Южного Урала, изучены источник и происхождение минералообразующего флюида, температуры кварцеобразования, структура межзерновых границ, их морфометрическая особенность, фрактальная размерность зерен кварца и промышленные характеристики кварцевой крупки. Комплексный подход к изучению типоморфных особенностей кварца позволил оценить их влияние на технологические характеристики кварцевых концентратов. Сопоставление данных по содержанию элементов-примесей в кварце жилы Беркутинская с кварцем жилы № 175 ООО «Русский кварц» и IOTA-std (Sibelco) показало перспективность промышленного использования кварца жилы Беркутинская.

Кварц, элементы-примеси, обогащение, флюидные включения, Южный Урал

TYPOMORPHIC AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF QUARTZ OF THE MICA-PEGMATITE FORMATION ON THE EXAMPLE OF THE BERKUTINSKAYA VEIN (South Urals)

M.A. Korekina, A.N. Savichev, N.N. Ankusheva, E.A. Pankrushina, D.A. Artemyev

Understanding the origin of quartz veins of the mica-pegmatite formation is of great importance for deciphering the emplacement conditions for the of commercially prospective quartz targets. On the example of the Berkutinskaya vein, which is the typical metamorphogenic quartz deposit of the mica-pegmatite formation of the South Urals, we study the source and origin of the mineral-forming fluid, temperatures of quartz formation, the structure of intergranular boundaries, their morphometric feature, the fractal dimension of quartz grains and commercial characteristics of quartz grit. An integrated approach to the study of the typomorphic features of quartz allowed us to assess their impact on the technological characteristics of quartz concentrates. Comparison of data on the content of impurity elements in the Berkutinskaya quartz vein with quartz of the vein No. 175 of ООО Russian Quartz and IOTA-std (Sibelco) showed that the Berkutinskaya quartz vein is promising for commercial development.

Quartz, impurity-elements, enrichment, fluid inclusions, South Urals

ВВЕДЕНИЕ

В результате разведочно-эксплуатационных работ на Южном Урале были выявлены и разведаны кварц-пегматоидные объекты, кварц которых по своим качественным характеристикам пригоден для выплавки прозрачного кварцевого стекла. Часть этих объектов к настоящему времени отработана, другая часть находится в нераспределенном фонде недр и может служить объектами-аналогами для характеристики данного типа кварца. К таким объектам относится жила Беркутинская, имеющая длительную историю изучения сначала на мусковит, а позднее на кварц.

Жила входит в состав Кыштымского месторождения гранулированного кварца, являющегося частью Южно-Уральской кварценозной провинции, хорошо известной в России своими запасами высококачественного кварцевого сырья [Белковский, 2011; Поленов и др., 2017]. Для жил слюдяно-пегматитовой формации характерно обособление чистых фаз в процессе интенсивной грануляции кварца [Геология..., 1988]. Интенсивная грануляция связана с многократным воздействием процессов метаморфизма и метасоматоза, что свойственно Слюдяно-Теплогорской тектонической зоне Южного Урала [Мельникова, Мельников, 1974; Савичев, 1990; Пучков, 2010; Огородников и др., 2016].

© Корекина М.А., Савичев А.Н., Анкушева Н.Н., Панкрушина Е.А., Артемьев Д.А., 2024

✉ e-mail: maria@mineralogy.ru

Кварцевые жилы слюдяно-пегматитовой формации являются полигенными и полихронными объектами. Их отличия от промышленно непригодных разновидностей заключаются в геодинамических условиях формирования, локальной структуре, минеральном парагенезисе, *PT*-параметрах, микроэлементном составе и т. д. Степень промышленной значимости кварцевых жил в пределах одного месторождения разнится вследствие отличий в интенсивности деформационных и метасоматических изменений, влияющих на минеральный и микроэлементный состав кварца в жилах [Корекина, 2021].

В данной работе авторами использован конкретный пример для обсуждения влияния метаморфогенных изменений на текстурно-структурные особенности кварца, происходящих в процессе развития кварц-пегматоидной системы, на природные качественные параметры кварца и его технологическое соответствие в качестве сырья для синтеза плавленого кремнезема. Основными задачами исследования являются: анализ микроэлементного и минерального состава жилы, гранулометрических характеристик зерен кварца, состава и температур минералообразующего флюида и оценка их влияния на технологические параметры кварцевой крупки на основе использования детального парагенетического и микроэлементного изучения кварца, комбинации петрографических методов и анализа *in situ* LA-ICP-MS. Результаты, полученные с использованием нескольких многомерных статистических методов, позволили установить факторы, влияющие на вхождение микроэлементов в кристаллическую структуру кварца, особенности состава минералообразующего флюида, влияющего на химический состав кварца, а также оценить степень воздействия вторичных процессов на обособление чистых фаз кварца при формировании жилы. Проведенные исследования могут иметь большое значение для поиска и разведки новых перспективных объектов кварцевого сырья высокого качества.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы кварца отобраны по простиранию жилы Беркутинская из забоя, вскрытого опытно-промышленным карьером.

Структурно-текстурные особенности кварца изучены под оптическим микроскопом Olympus BX-51 с фотокамерой в проходящем свете в ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс). Анализ гранулометрических характеристик кварца выполнен с помощью плоскополированных кварцевых пластин на базе компьютерных программ анализа изображения Fiji [Schindelin et al., 2012] и ImageJ. Контурные границы зерен были отрисованы и оцифрованы на основе оптически видимых границ зерен. Фотографии пластин были переведены в бинарное изображение для усреднения линии границы зерен с дальнейшей сегментацией по их границам. Сегментация и определение числовых характеристик зерен проведено с использованием плагина MorphoLibJ, включающего в себя методы математической морфологии для ImageJ [Legland et al., 2016]. С помощью градуировки изображения были переведены значения показателей из пикселей в миллиметры, что позволило сопоставить и уточнить гранулометрические значения.

Оценка фрактальной размерности (D) бинарного изображения проведена с применением плагина FracLac для ImageJ [Гульбини др., 1997; Karperien, 2003; Иванюк и др., 2009]. Параметр D может быть использован как мера сложности рисунка (текстуры и т. д.), и это особенно важно в тех случаях, когда стандартные измерения, такие как диаметр или длина, не могут оценить степень сложности объекта. В качестве типоморфных применены следующие атрибуты, характеризующие основные морфометрические признаки (размер, форму и пространственную организацию зерен во вскрытых плоским произвольным срезом кварцевых агрегатах в виде пластин): площадь и периметр. Для описания формы частиц использован индекс, независимый от размера частиц — округлость. Значение округлости должно находиться в диапазоне от 0 (очень вытянутый) до 1 (близкий к круглому).

Содержания элементов-примесей в кварце определены методом LA-ICP-MS на базе масс-спектрометра Agilent 7700x с программным комплексом MassHunter и лазерным пробоотборником NewWave-Research UP-213 (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, аналитик Д.А. Артемьев). В работе использовался УФ Nd:YAG-лазер с длиной волны 213 нм и настройками плотности потока 17—19 Дж/см², частотой повторений 20 Гц, газ-носитель в ячейке He, скорость потока 0.65 л/мин. Настройки масс-спектрометра: мощность высокочастотного сигнала 1500 Вт; газ-носитель Ar; скорость потока 0.9—0.95 л/мин; расход плазмообразующего газа (Ar) 15 л/мин; расход вспомогательного газа (Ar) 0.9 л/мин, диаметр пучка 80 мкм. Калибровка масс-спектрометра осуществлялась по эталонному международному стандартному образцу NISTSRM-612. При этом количество молекулярных оксидных ионов ($^{232}\text{Th}^{16}\text{O}/^{232}\text{Th}$) не превышало 0.2 %. Соотношение $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ близко 1. Для расчета использовался международный стандарт стекла SRM NIST-612. Для учета инструментального дрейфа лазера и масс-спектрометра стандартный образец анализировался через каждые 15 точек. Расчет химического анализа проводился в программном комплексе Iolite [Paton et al., 2011] с применением стандартных подходов, описанных в [Longerich et al., 1996], и использованием в качестве внутреннего стандарта $^{29}\text{Si} = 46.7$ мас. %. Погрешность анализов для большинства элементов с концентрациями в пределах 1—1000 г/т не превышает 5 отн. %.

Результаты LA-ICP-MS кварца сопоставлены с данными оценки бороздовых и керновых проб кварца, отобранных в период разведки жилы Беркутинская в качестве сырьевого источника для выплавки прозрачного кварцевого стекла. В мономинеральные фракции отбирали крупинки кварца 0.1—0.4 мм без видимых минеральных и флюидных включений. В процессе геолого-разведочных работ массовая доля основных элементов-примесей в кварце определялась количественным химико-спектральным анализом. Содержания щелочных элементов (Na, K и Li) оценены методом фотометрии пламени. Степень прозрачности кварца, зависящая от количественного содержания флюидных включений, контролировалась методом определения коэффициента светопропускания кварцевой крупки в видимой области спектра. Пробоподготовка геолого-разведочных проб включала в себя следующие операции: дробление, измельчение до фракции 0.1—0.4 мм, магнитную сепарацию кварцевой крупки, кислотную обработку крупки, ее промывку, сушку и отбор проб на анализ. Более подробно технология обогащения приведена в работе [Korekina, Savichev, 2023]. Технические требования, регламентирующие качество кварцевых концентратов — массовой доли химических примесей и коэффициента светопропускания в кварцевой крупке, изложены в технических условиях [ТУ..., 1997].

Анализ флюидных включений в кварце проведен в термокамере TMS-600 (Linkam) с программным обеспечением LinkSystem V-2.39, позволяющей производить измерения температур фазовых переходов в интервале $-196...+600$ °C, с микроскопом для проходящего и отраженного света Olympus BX-51 (ЮУрГУ, г. Миасс, аналитик Н.Н. Анкушева). Точность измерений ± 0.1 °C в интервале температур $-20...+80$ °C и ± 1 °C вне этого интервала. Солевой состав флюида во включениях оценен по температурам эвтектики раствора [Davis et al., 1990; Spenser et al., 1990]. Температуры гомогенизации фиксировались в момент исчезновения газового пузырька при нагревании препарата в термокамере и приняты за минимальные температуры минералообразования [Реддер, 1987]. Концентрации солей в растворах рассчитывались по температурам плавления последних кристаллических фаз [Bodnar, Vityk, 1994]. Обработка результатов измерений выполнена в программе Statistica.

Изучение газового состава флюидов выполнено с использованием рамановского спектрометра HoribaLabRam HR800 Evolution (дифракционная решетка 600 шт/мм), оборудованного микроскопом Olympus BX-FM и He-Ne-лазером (длина волны излучения 633 нм) в режиме конфокальной съемки с пространственным латеральным разрешением 1 мкм и по глубине ~ 5 мкм (ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитик Е.А. Панкрушина). Величина конфокального отверстия 100 мкм. Калибровка спектрометра и оценка его спектрального разрешения выполнена с помощью линий рэлеевского рассеяния от возбуждающего лазера и спектральных линий неоновой лампы, значение спектрального разрешения оптического тракта спектрометра в диапазоне $0—3500$ см⁻¹ оценено величиной ~ 2 см⁻¹. Время накопления сигнала составило 80 с при четырех параллельных определениях.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ И ЖИЛЫ БЕРКУТИНСКАЯ

Жила Беркутинская расположена в юго-восточной части уфалейского гнейсово-метаморфического комплекса, являющегося частью Центрально-Уральского поднятия на Урале, в пределах Слюдяно-Теплогорской тектонической зоны. Положение изучаемой площади в структуре комплекса отражено на рис. 1, а, геологическая позиция жилы — на рис. 1, б.

Жила пространственно приурочена к уфалейской свите (PR₁uf). В восточной части комплекса уфалейская свита сложена амфиболитами, частью рutilсодержащими, биотитовыми и биотит-амфиболовыми гнейсами с прослоями кварцитов и слюдяно-кварцевых сланцев, гранитогнейсами, плаггиоклазовыми и двуполевошпатовыми мигматитами.

Особенностью пород юго-восточной части уфалейского гнейсово-метаморфического комплекса является идентичная для всего района ориентировка различных типов линейности (минеральная, шарниров складок малого и среднего масштабов, осевых линий склонения преобладающей части пегматоидных тел и кварцевых жил). Линейность выражается следующими цифрами: азимут погружения $130—160^\circ$, угол погружения $15—40^\circ$. Масштабное проявление процессов, приводящих к развитию линейности различных структурных элементов пород, свидетельствует о преобладании стрессовой составляющей, сопутствующей региональному метаморфизму горных пород этой части уфалейского комплекса. Коллизийные процессы отразились в перестройке структурного плана горных пород и привели к изменению их элементов залегания: большая часть разреза имеет субмеридиональное простирание с варьирующим восточным падением в интервале $30—60^\circ$.

Протолит уфалейского комплекса, по данным Г.А. Кейльмана [1974], представлен вулканитами базальт-риолитовой формации, причем нижняя часть разреза складывается метариолитами, а верхняя — чередованием метабазальтов, метариолитов и апотерригенных пород (кварцитов и метапелитов). Подоб-

ный эволюционный ряд характерен для магматических формаций рифтовых структур, развивающихся на континентальной коре [Магматические..., 1987].

Максимальные цифры абсолютных возрастов, полученные по цирконам из гнейсов, составляют 990—1180 млн лет [Краснобаев, 1986], по пороодообразующим минералам из прорывающих биотитовых гранитов — 1100—1215 млн лет [Овчинников, 1963], по Y-содержащему эпидоту из анортоклазитовых пегматитов — 1100—1200 млн лет [Минеев, 1959]. Учитывая эти данные, можно предположить формирование протолита уфалейского комплекса в пределах среднерифейской рифтовой структуры, развивавшейся на континентальной коре. Эрохрона по метасоматическим минералам из слюдоносных анортоклазовых пегматоидов — альбиту по анортоклазу, флогопиту, ильменорутилу и Y-содержащему эпидоту — дает возраст 525 ± 11 млн лет [Государственная..., 2011]. Ag-Ag датирование белых слюд из гнейсов восточной части уфалейского комплекса, проведенное в рамках программы «Европроба», дало значения 305 ± 6 и 296 ± 6 млн лет [Иванов, 1998]. Судя по датировкам абсолютных возрастов этих метаморфических минералов, деформации и метаморфизм в них протекали в течение длительного периода, а структуры, контролирующие жильные слюдоносные анортоклазиты и кварцево-жильные поля, являются полихронными тектоническими зонами глубинного залегания, трассирующимися аллохтонными интрузивами и дайковыми комплексами.

В качестве самостоятельного структурно-геологического элемента в уфалейском комплексе выделена Слюдяно-Теплогорская тектоническая зона, осевая часть которой совпадает с поверхностью стратиграфического несогласия между уфалейской и куртинской свитами (штриховая линия, см. рис. 1, б). Считается, что эта линейная шовная зона заложена в среднем рифее на докембрийском фундаменте Восточно-Европейской платформы [Кейльман, 1974; Тектоника..., 1977]. Для внутренней структуры Слюдяно-Теплогорской тектонической зоны характерна линейная шовная изоклиная складчатость, расщепление, многочисленные зоны дробления, тектонической трещиноватости и катаклаза. Породы осложнены интенсивным развитием в них процессов мигматизации, метасоматоза и диафтореза. Со стороны уфалейской свиты шовная зона имеет мощность до 2.5 км (в среднем 1.0 км) и сложена плагиоклазовыми амфиболитами и развитыми по ним биотит-амфиболовыми и амфиболовыми гнейсами. С этими породами перемежаются гранитогнейсы, очковые гнейсы и мигматиты с прослоями мигматизированных гранат-слюдяно-кварцевых тектоносланцев и кварцитов.

Самые ранние жильные образования внутренней части Слюдяно-Теплогорской зоны — анортоклазовые пегматоиды — часто имеют западное падение, фиксация которого возможна только в результате горно-буровых работ. Считается, что эти жильные анортоклазиты представляют дорифейский этап тектономагматической активизации района [Минеев, 1959]. Все перечисленные породы рассечены более поздними альбититами, карбонатитами, ранне- и позднеколлизионными дайками плагиогранитного состава и кварцевыми жилами. В виде линейных зон широкое развитие получили бластомилониты и бластокатаклазиты по этим породам.

Тела анортоклазитов рассечены жильными магматическими карбонатитами и несколькими фазами жильных магматитов кислого состава [Огородников и др., 2016]. В разной степени интенсивности проявлены сопровождающие жильные магматиты метасоматические процессы: альбитизация, фенитизация, окварцевание и грейзенизация. В большинстве случаев анортоклазитовая и кварцевая части пространственно совмещены и парагенетически связаны в пределах общих сложнопостроенных жильных зон, т. е. образуют кварц-пегматоидную систему. Эти объекты группируются с западной стороны от осевой части Слюдяно-Теплогорской тектонической зоны и являются ее составной частью. На всех объектах кварц-пегматоидной системы района (в том числе и на жиле Беркутинская) широко проявлены динамометаморфические процессы коллизионного этапа развития региона, выраженные в развитии интенсивного внутрижильного блокования, катаклаза, трещиноватости и расщепления. Секущие и смятые в складки дайки гранитов и более поздних пегматитов в кварц-анортоклазовых жилах являются типичными для сложнопостроенных жильных зон.

Со стороны куртинской свиты Слюдяно-Теплогорская зона имеет мощность не более 100 м и сложена гранат-слюдяно-кварцевыми тектоносланцами, будижаж-структурами интенсивно метаморфизованных основных и ультраосновных пород и пронизана дайками лейкократовых гранитов.

Жила Беркутинская состоит из трех кварцевых блоков, разделенных между собой пережимами. Блоки слагают линейно-сетчатую структуру, секущую под острым углом анортоклазитовые пегматоиды основного тела (рис. 2). Широко представлены апофизы из жильного кварца, оперяющие основные кварцевые тела. Мощность кварцевых тел достигает 3—5 м. В стенке карьера, пройденного вдоль жилы, вскрыты контуры кварцевых тел, которые имеют складчато-блоковый облик. В кварцевых телах часто наблюдаются обломки пегматоидов разного размера и формы. Границы между кварцем и анортоклазовой частью пегматоидов зубчатые и бухтоподобные, что указывает на деятельность процессов замещения анортоклазитов более поздним кварцем. Явления, связанные с давлением, приводят к срыву метасо-

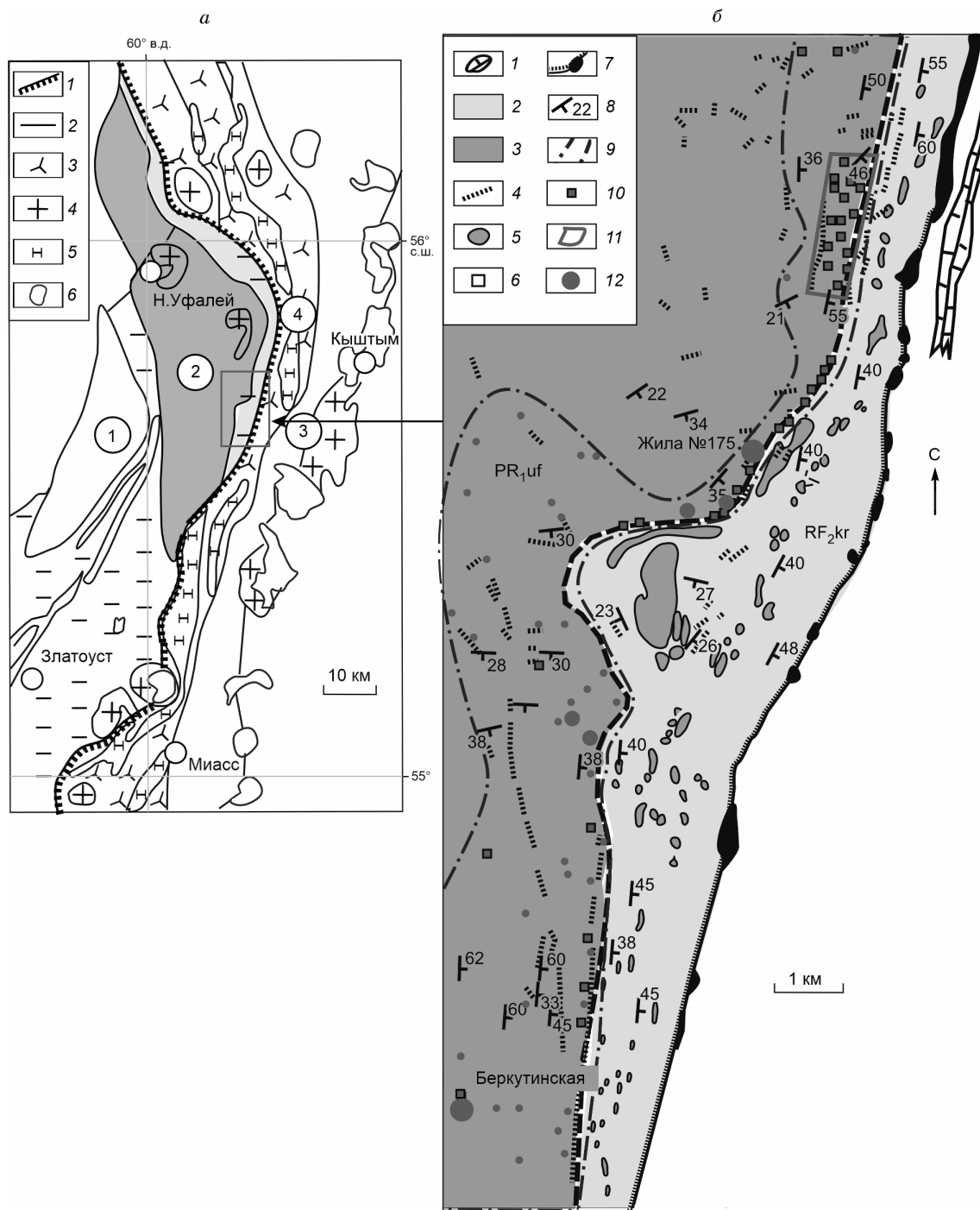


Рис. 1. Геологическая позиция кварц-пегматоидных жил в юго-восточной части уфалейского гнейсово-метаморфического комплекса.

a — схема геологического строения района уфалейского гнейсово-метаморфического комплекса: 1 — Главный Уральский разлом; 2 — рифейские отложения; 3 — вулканогенно-осадочные отложения; 4 — гранитные интрузии; 5 — ультраосновные массивы; 6 — озера. Цифры в кружках: 1 — тараташский комплекс; 2 — уфалейский комплекс; 3 — сыертско-ильменогорский комплекс; 4 — Тагило-Магнитогорский прогиб.

б — схема размещения проявлений и разведанных кварц-пегматоидных жил, слюдоносных пегматоидов в юго-восточной части уфалейского комплекса, по неопубликованным данным Е.П. Мельникова [1964] с изменениями авторов: 1 — мраморизованные известняки Тагило-Магнитогорского прогиба; 2 — куртинская свита (RF_2kr); 3 — уфалейская свита (PR_{1uf}); 4 — дайки гранитов (PZ); 5 — амфиболитовые массивы в куртинской свите; 6 — слюдяные (мусковитовые) пегматоиды; 7 — зона серпентинитового меланжа Главного Уральского разлома; 8 — элементы залегания пород; 9 — Слюдяно-Теплогорская тектоническая зона; точки минерализации: 10 — слюдоносные пегматоидные анортоклазиты; 11 — контуры Слюдяногорского месторождения мусковита; 12 — кварц-пегматоидные жилы в пределах Слюдяно-Теплогорской тектонической зоны (промышленные объекты Кыштымского месторождения гранулированного кварца — с большим диаметром значка; проявления кварца — с меньшим диаметром значка).

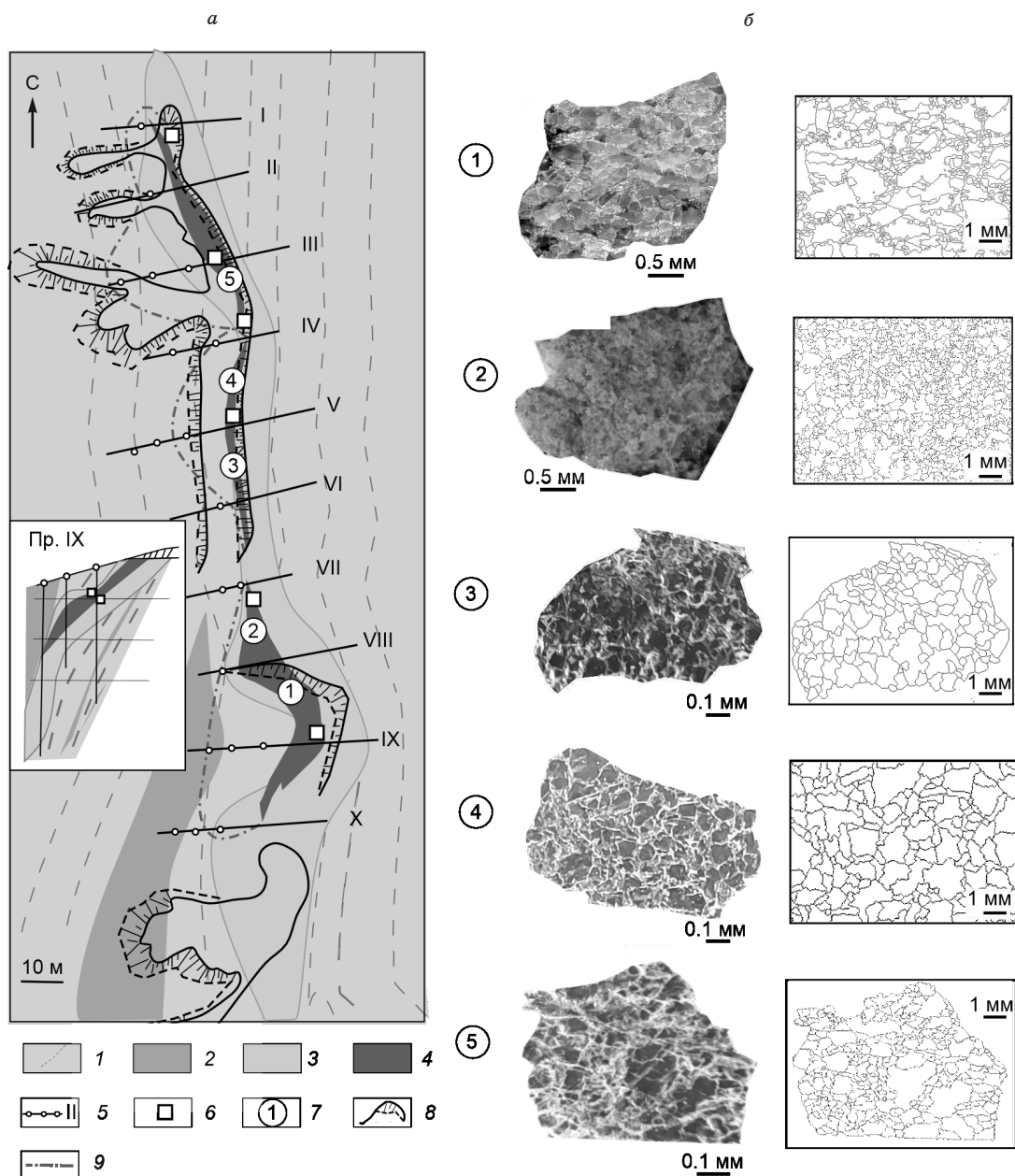


Рис. 2. Схема геологического строения и разрез (на врезке) жилы Беркутинская (а), сегментированные пластины кварца, отобранные вдоль линии простираия из разных частей кварцевых тел с севера на юг (номера на схеме геологического строения (в кружках) и номера рисунков пластин совпадают) (б).

1 — гранитогнейсы; 2 — амфиболовые, биотит-амфиболовые гнейсы; 3 — гигантозернистые анортоклазиты с биотитом и мусковитом; 4 — кварцевые метасоматиты; 5 — разведочные профили; 6 — места отбора геолого-разведочных проб; 7 — места отбора штуфов для исследований и изучения структурно-текстурных особенностей кварца; 8 — контуры карьеров и отвалов опытно-промышленной добычи; 9 — отображение горизонтальной проекции жильного тела (блока) на поверхность.

матических границ по породам с различными физико-механическими свойствами и создают впечатление о «секущем» характере кварцевых тел.

По изменению морфологии кристаллов минералов-примесей (мусковита, биотита, цепочечных выделений полевых шпатов), находящихся в кварце, по искривлению и смещению слоев слюдистых минералов, смятию в складки цепочек минералов наблюдаются внешние признаки пластической деформации кварцевого тела.

СТРУКТУРНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАРЦА

Блок I локализован в северной части жилы Беркутинская на контакте с пегматоидом. В этом блоке преобладает льдистый и светло-серый полупрозрачный кварц — неравномерно-зернистый, с отдельными прозрачными хрусталивидными зернами и включениями кристаллов полевого шпата размером до 1.5—2.0 см. Границы зерен зубчатые. В шлифе структура кварца гранобластовая, мелкосреднезернистая, текстура массивная. В шлифе диагностируются реликтовые зерна удлиненной, местами изометричной или близкой к ней формы, размером до 2—3 мм, редко до 5 мм, интенсивно деформированные с внутризерновыми залеченными трещинами, к которым приурочены ленточные поля и отдельные цепочки флюидных включений размером 1—2 мкм, редко до 5.0—7.5 мкм. Погасание волнистое. Некоторые зерна разбиты на блоки. Новообразованные зерна, расположенные по трещинам, более мелкие размером 0.1—0.5 мм, с однородным погасанием, без следов деформации, минеральных и флюидных включений. В кварцевом агрегате встречаются деформированные зерна плагиоклаза, ортоклаза, микроклина, местами цоизит-кварцевые симплектиты, игольчатые включения рутила, граната, магнетита и гематита.

Блок II находится в центральной части жилы и представлен кварцем молочно-белого цвета. На контакте с гранитной жилой кварцевый агрегат «пронизан» новообразованными зернами плагиоклаза, микроклина и позднего кварца. В гранитной жиле повсеместно отмечены кварц-мусковитовые и кварц-цоизитовые симплектиты и келифитовая кайма. Кварц сложен мелкосреднезернистым агрегатом кварцевых зерен изометричной формы с прямолинейными ступенчато-зубчатыми границами размером 0.1—2.0 мм. Кварц блокованный, погасание волнистое, местами мозаичное. В кварце встречаются отдельные скопления пластинок биотита длиной до 2—3 мм, окрашенных в резко плеохроирующие бурокоричневые тона. Из минеральных включений диагностируются полевые шпаты, единичные включения игольчатого рутила, слюда (биотит, лепидолит), гранат, титан-магнетитовые минералы, гидроксиды железа и марганца.

Участками в интенсивно деформированной кварцевой жиле, разбитой трещинами на отдельные блоки разного размера, между прослоями гранулированного кварца светло-серого и молочно-белого цвета встречаются линзовидные обособления, напоминающие слюдиты. Среди скоплений темной слюды (биотита) видны тонкие линзовидные слои, быстро выклинивающиеся, состоящие из пластинчатых и чешуйчатых выделений мусковита, цоизита и полевого шпата. В шлифе такие обособления характеризуются лепидогранобластовой структурой и линзовидной текстурой.

Блок III находится в южной части жилы и макроскопически представлен агрегатом кварцевых зерен светло-серого цвета, сложенным зернами полупрозрачного и прозрачного кварца размером 0.05—2.00 мм. В шлифе структура гранобластовая. Границы зерен зубчатые. Зерна полупрозрачного кварца интенсивно деформированы, содержат следы хрупкой и пластической деформации. Хрупкая деформация представляет собой внутризерновые залеченные трещины, к которым приурочены флюидные включения размером до 10 мкм, в виде длинных цепочек. Пластическая деформация представлена волнистым погасанием и блокованием. Блоки нечеткие с размытыми границами размером от 2—3 до 4—5 мм. Новообразованный кварц — полигональные зерна с прямолинейными границами, однородным погасанием, без флюидных включений и следов деформации. Среди минеральных включений диагностируются плагиоклаз (альбит), крупные кристаллы апатита до 13 см, гетит, гематит, прослои и гнездовидные обособления слюды (мусковит, биотит).

Таблица 1. Изменение морфометрических показателей зерен в кварцевых агрегатах жилы Беркутинская (с севера на юг)

№ п/п	<i>n</i>	Показатели, характеризующие основные морфометрические признаки кварцевых зерен (средние значения параметров)				<i>D</i>
		<i>S</i> , мм ²	<i>V</i> , %	<i>P</i> , мм	<i>O</i> , отн. ед.	
1	2113	0.27	298	1.79	0.71	1.7209
2	1348	0.34	166	2.23	0.68	1.7984
3	217	0.34	168	2.30	0.66	1.6618
4	172	0.27	110	2.15	0.61	1.6884
5	352	0.25	187	1.85	0.71	1.6718
<i>m</i>		0.29	186	2.06	0.67	1.7083

Примечание. Номера образцов в таблице соответствуют номерам пластин на рис. 2. *n* — количество зерен в выборке, *S* — площадь зерна, *V* — коэффициент вариации площади зерна, *P* — периметр зерна, *O* — округлость зерна; *D* — фрактальная размерность; *m* — среднее по жиле.

В таблице 1 приведены средние значения основных морфометрических показателей кварцевых зерен в кварце жилы Беркутинская.

Полученные значения коэффициентов вариации площадей кварцевых зерен свидетельствуют об их крайне неравномерном распределении в агрегатах гранулированного кварца, что, с нашей точки зрения, свидетельствует о синектонической деструкции первичного кварца, восстановлении и перекристаллизации зерен кварца.

Фрактальная размерность метагенетических структур гранулированного кварца отражает структурные особенности вторичного изменения кварцевых жил, приводящих к формированию сложных структур с несколькими генерациями кварцевых зерен (катаклаз + перекристаллизация в разных соотношениях).

МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ КВАРЦА

Особенностью кварца жилы Беркутинская является высокая природная химическая чистота [Геология..., 1988]. Большое влияние на микроэлементный состав кварца оказывают такие факторы, как химический состав минералообразующего флюида, температура минералообразования, давление, скорость роста, воздействие процессов метаморфизма и метасоматоза и т. д. [Dennen, 1964; Götze et al., 2001; Landtwing, Pettke, 2005; Rusk et al., 2006]. Основными элементами-примесями в кварце жилы Беркутинская являются Li, Na, Al, K, Ti, Fe, Mg и Mn. Результаты микроэлементного состава кварца, полученные методом LA-ICP-MS, приведены в табл. 2 и на рис. 3. Для сравнения на рис. 3 показаны данные по кварцевой крупке марки RQ-3K обогащительного предприятия ООО «Русский кварц» и кварцу марки IOTA-std (Sibelco). Следует отметить близкие значения по содержанию ряда элементов (Li, Al, Na, Mg, K, Fe) в кварце жилы Беркутинская с микроэлементным составом промышленно используемых кварцевых концентратов ООО «Русский кварц» и кварцу марки IOTA-std (Sibelco), что показывает промышленную перспективность по обогащению кварца жилы Беркутинская.

Большое влияние на микроэлементный состав кварца жилы Беркутинская оказывают минеральные включения, локализующиеся по трещинам и в межзерновом пространстве, способные образовывать сростки с кварцем. Анализ микроэлементного состава кварца локальным методом LA-ICP-MS позволил получить результаты с визуально-чистых кварцевых зерен. Однако в область абляции могут попасть микроминеральные и флюидные включения, что отражается в повышенных значениях элементов-примесей. Так, из рис. 3 мы видим высокие значения по натрию, магнию и титану. Это может быть обусловлено наличием в кварце микровключений полевых шпатов, слюды и рутила, что подтверждается данными оптической микроскопии. Источником повышенных содержаний натрия также могут быть флюидные включения, но их количество в объеме зерна незначительно, так как большая их часть расположена в межзерновом пространстве.

Одним из доминирующих элементов-примесей является алюминий Al^{3+} . Его количественное содержание важно, так как, кроме вхождения в состав минеральных включений, он может замещать Si^{4+} в структуре кварца, что не позволит удалить его в процессе обогащения [Weil, 1984; Heaney et al., 1994;

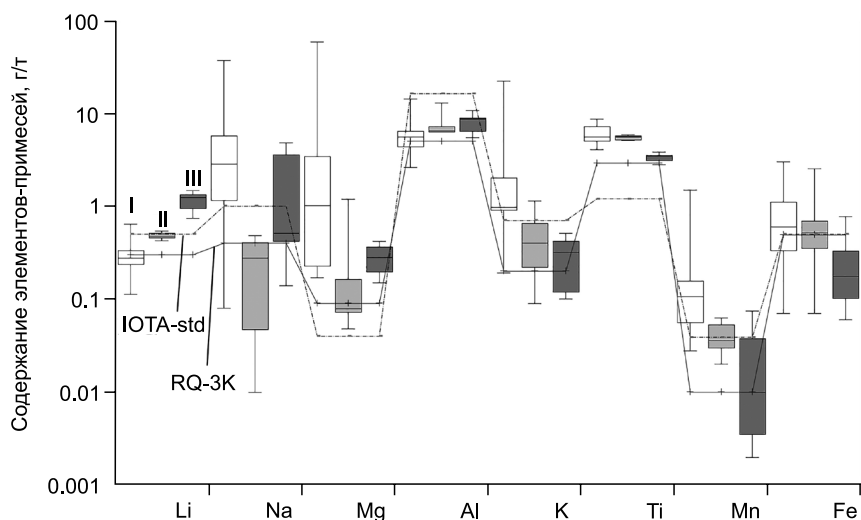


Рис. 3. Микроэлементный состав кварца по результатам LA-ICP-MS.

I—III — блоки кварца жилы Беркутинская.

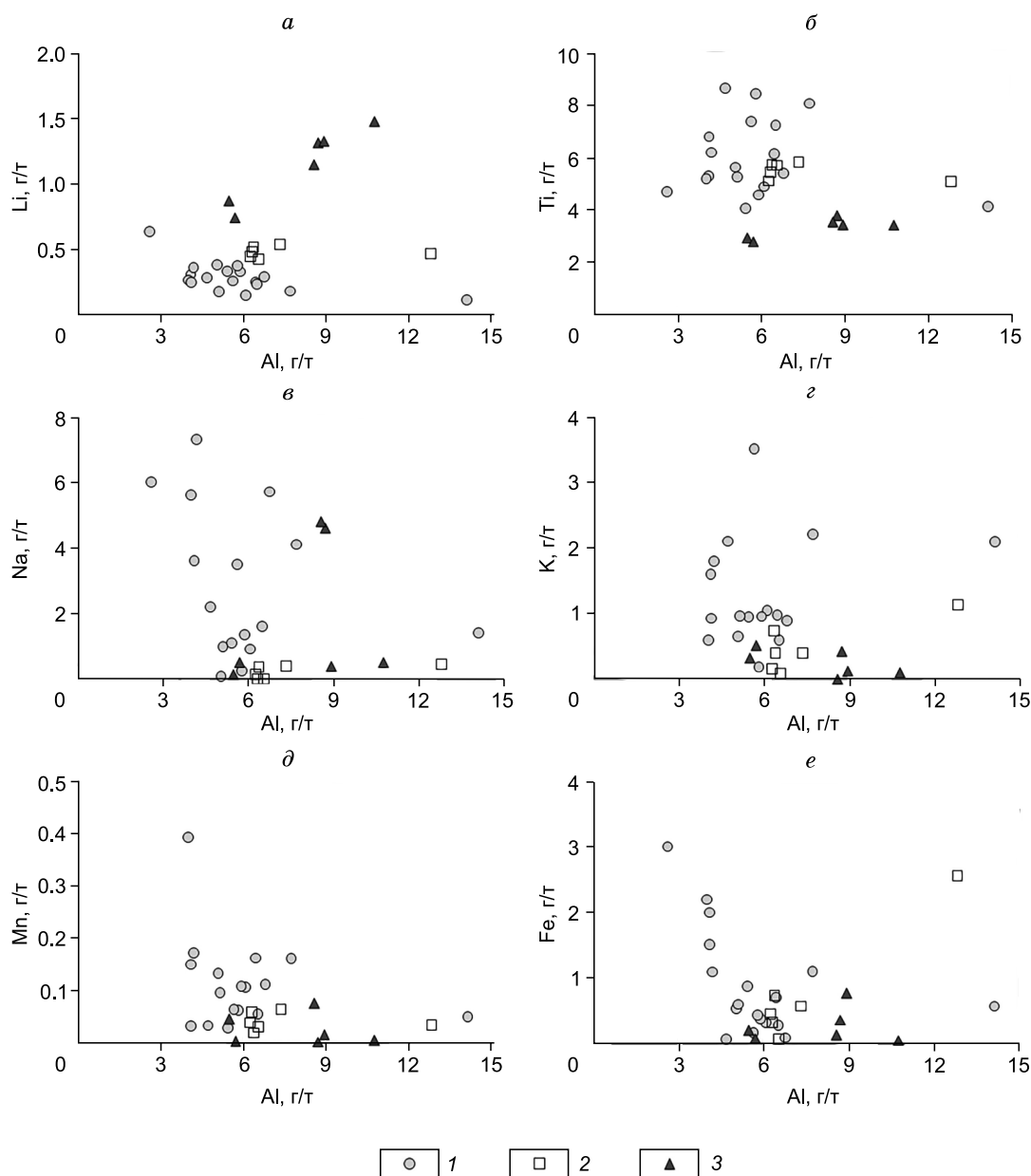


Рис. 4. Соотношения элементов-примесей в кварце (LA-ICP-MS):

Al—Li (a), Al—Ti (б), Al—Na (в), Al—K (г), Al—Mn (д), Al—Fe (е). 1—3 — блоки I и III соответственно.

Götze et al., 2004]. Содержания Al (LA-ICP-MS) варьируют по блокам в интервалах (г/т): I — 2.6—14.1; II — 6.25—12.8; III — 5.47—10.74 и входят в диапазон кварца марки IOTA-std.

Еще одним доводом, свидетельствующим о возможном преобладании в составе минеральных и флюидных включений одновалентных катионов Li, Na и K, является их слабая корреляция с Al (рис. 4). Следует отметить, что в структурной форме наличие одновалентных ионов (Li, Na) возможно для компенсации заряда дефектов Al^{3+} , кроме того, они могут присутствовать в структурных каналах кварца [Bambauer, 1961; Weil, 1984; Perny et al., 1992; Исаев, 2006]. Это важно учитывать, так как содержание структурных примесей в кварце является маркером предела обогатимости сырьевых материалов.

Среди структурно замещающих кремний элементов в кварце также могут присутствовать Fe^{3+} и Ti^{4+} . Следует отметить, что в кварце жилы Беркутинская, по данным оптической микроскопии, диагностированы содержащие Fe и Ti минеральные включения (магнетит, гетит, гематит, рутил) [Götze et al., 2001]. На диаграммах (см. рис. 4, б, е) также видна слабая корреляционная зависимость алюминия—титана и алюминия—железа.

Таблица 2.

Элементы-примеси в кварце жилы Беркутинская, г/т

Анализ	n	Al	Fe	Ti	Mg	Mn	Na	K	Li
LA-ICP-MS	24	$\frac{2.6-14.1}{6.6}$	$\frac{0.06-3}{0.74}$	$\frac{2.79-8.65}{5.37}$	$\frac{0.05-8.4}{1.27}$	$\frac{0.01-1.5}{0.14}$	$\frac{0.01-7.3}{2.1}$	$\frac{0.09-3.5}{0.95}$	$\frac{0.11-1.48}{0.5}$
КСА + ПФ	10	$\frac{4.5-11}{8.3}$	$\frac{0.4-4.5}{2.4}$	$\frac{2-6}{3.3}$	$\frac{0.28-45.5}{13.5}$	$\frac{0.02-1.0}{0.4}$	$\frac{1.8-13.0}{5.0}$	$\frac{1-21}{8.0}$	$\frac{0.48-0.75}{0.5}$
МФ (КСА + ПФ)	1	5	0.6	3.8	0.44	0.06	1.8	1.3	0.48

Примечание. LA-ICP-MS – позерновая лазерная абляция в кварцевой плоскополированной пластине; КСА + ПФ — количественный спектральный анализ + фотометрия пламени (Na, K, Li) обогащенной кварцевой крупки; МФ – монофракция из кварцевой крупки. Над чертой — интервал содержания, под чертой — среднее значение.

Сравнение количественных анализов массовой доли химических примесей в кварце жилы Беркутинская, полученных разными методами из проб с разной пробоподготовкой, показывает, с учетом погрешностей методов, высокую сходимость результатов исследования (см. табл. 2).

ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КВАРЦЕ

Количественное содержание флюидных включений в кварце оказывает непосредственное влияние на значение коэффициента светопропускания кварцевой крупки. Так, значение светопропускания по результатам геолого-разведочных работ (места отбора проб см. на рис. 2) варьирует в интервале 84—92 % (среднее значение 85.8 %, количество проб 13). Значение коэффициента вариации равно 2.9 %, что говорит об однородности показателя светопропускания как по простиранию, так и по падению кварцевой жилы. Полученные результаты свидетельствуют о наличии флюидных включений не более чем в 2—4 % зерен.

Результаты термометрических исследований флюидных включений показаны на рис. 5.

В кварце жилы Беркутинская классифицируются [Реддер, 1987] двухфазные ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \Gamma$) первичные и первично-вторичные флюидные включения (рис. 5, а). Первичные включения имеют размеры 8—10 мкм, одиночные, удлиненной, угловатой формы, а также в форме «отрицательного кристалла», расположенные хаотично в объеме образца. Первично-вторичные (псевдовторичные) включения размером до 5—10 мкм имеют округлую, овальную форму, образуют линейно вытянутые цепочки либо поля. Газовые вакуоли занимают от 5 до 40 % объема включений (см. рис. 5, а).

Для первичных и псевдовторичных включений в кварце блока I температуры гомогенизации в жидкую фазу составляют 300—187 °С. Температуры эвтектики (–21...–28 °С) и плавления последней кристаллической фазы (–3.2...–8.2 °С) указывают на Na-, K-Na хлоридный состав флюида с разбросом значений концентраций солей в интервале 5.3—11.9 мас. % NaCl-экв.

Температуры гомогенизации включений в кварце блока II равны 220—170 °С с модой 210—220 °С. Температуры эвтектики (–21...–22 °С) свидетельствуют о содержании во флюиде хлоридов Na. Концентрации солей, согласно данным по температурам плавления последней кристаллической фазы (–3...–6.1 °С), варьируют в пределах 4.9—9.3 мас. % NaCl-экв. с асимметричным распределением значений на гистограмме (см. рис. 5, б).

Двухфазные флюидные включения в кварце блока III имеют температуры эвтектики от –21 до –27 °С, следовательно, содержат NaCl-KCl-H₂O флюид. Гомогенизация включений в жидкую фазу происходила от 240 до 160 °С. Значения солёности варьируют от 6.7 до 12.8 мас. % NaCl-экв. Распределение значений температур гомогенизации и солёности асимметричное, с обрывом и изолированным пиком (см. рис. 5, б).

Спектр рамановского рассеяния, полученный в газовой фазе флюидного включения пробы II блока, представлен на рисунке 6.

На спектре видны узкие моды в спектральном диапазоне 1082—1160 см^{–1}, связанные с матричным кварцем, а также с растворенным газом CO₂ при ~1281—1386 см^{–1}. В рамановском спектре молекулы CO₂ наблюдаются две интенсивные колебательные моды около 1281 см^{–1} (ν_1) и 1386 см^{–1} ($2\nu_2$); а также мода в области 1370 см^{–1}, которая относится к колебаниям ¹³CO₂ ($2\nu_2$) и двух малоинтенсивных линий в областях 1285 и 1388 см^{–1} (так называемых «hotbands»), связанных с переходами из более высоких по энергии (возбужденных) колебательных состояний, обусловленных тепловой энергией молекул ¹²CO₂ [Hurai et al., 2015]. Наличие двух ярких максимумов (~1285.5 и 1388.3 см^{–1}) вместо одного является результатом резонанса Ферми.

Флюидные включения в кварце блока I несколько отличаются по морфологии от блока II. Так, рамановский спектр, полученный из газовой фазы флюидных включений в кварце блока II, представлен

Рис. 5. Флюидные включения (а) и гistogramмы (б) температур гомогенизации ($T_{\text{гом.}}$) и солености (С) в кварце жилы Беркутинская.

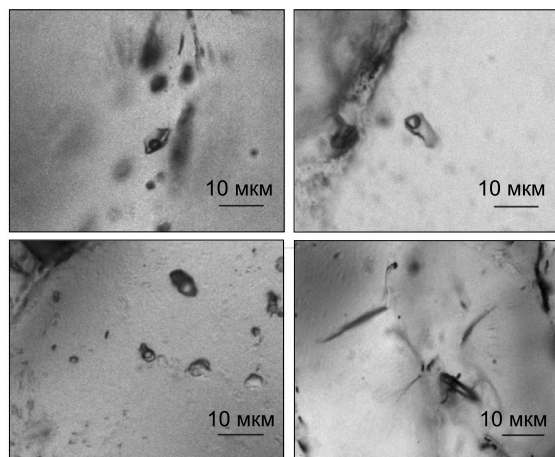
углеводородными соединениями, в частности, преимущественно идентифицированы колебания CH_2 -радикала [Dhamelincoourt et al., 1979]. Из-за малого отношения сигнала к шуму непросто разделить колебания в спектральном диапазоне $2800\text{—}3100\text{ см}^{-1}$. В этом диапазоне предполагается несколько колебательных мод. В частности, при $\sim 2915\text{ см}^{-1}$ (ν_1 C-H), около $\sim 3015\text{ см}^{-1}$ (ν_3 C-H) и 3066 см^{-1} ($2\nu_2$ δ CH_2) и более слабые между 2850 и 2885 см^{-1} . Эти моды могут быть отнесены к метану или более тяжелым алканам, таким как, например, пропан [Weber, 1973; Demir et al., 2017; Mangenot et al., 2021]. На присутствие алканов, отличных от метана, указывает также широкая полоса от 1440 до 1470 см^{-1} , соответствующая области деформационных колебаний групп CH_3 , CH_2 [Dhamelincoourt et al., 1979]. Из-за малого размера включения проб блока III охарактеризовать не удалось.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КВАРЦА

Степень изменчивости размера и формы индивидов кварца в агрегате влияет на обогатимость сырья, так как в результате измельчения и сепарации в класс крупности $0.1\text{—}0.3\text{ мм}$ попадают зерна определенных размеров. Известно, что при дроблении кварцевых агрегатов раскол может осуществляться двояко: по границе или зерну. В последнем случае некоторые крупинки кварца включают две или несколько частей смежных индивидов и, следовательно, содержат нескрытое межзерновое пространство, являющееся потенциальным носителем вредных примесей [Минералургия..., 1990].

В таблице 3 приведены значения фракционного состава кварца жилы Беркутинская по распределению зерен по размерам, согласно промышленно используемой классификации для марки RQ (<https://>

а



б

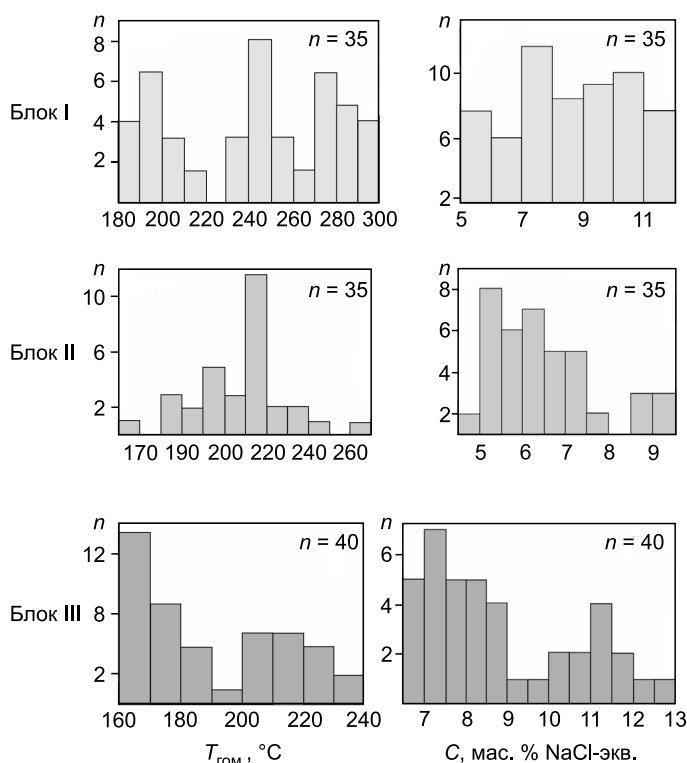


Таблица 3. Гранулометрический состав кварца жилы Беркутинская

Блок	n	Класс крупности, мм		
		< 0.1	0.1—0.3	> 0.3
I	2113	1288 (61 %)	482 (23 %)	343 (16 %)
II	1665	609 (39 %)	495 (32 %)	461 (29 %)
III	524	208 (37 %)	216 (38 %)	120 (24 %)
m, %		42	33	25

Примечание. n — общее количество зерен в препарате по блокам: в штуках и в процентах (по классам крупности); m — среднее по жиле.

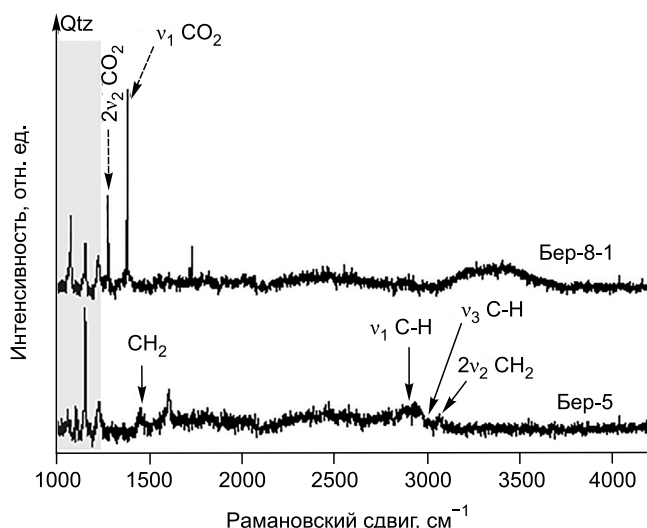


Рис. 6. Рамановские спектры, полученные в газовом пузырьке флюидных включений в кварце I (Бер-5) и II блоков (Бер-8-1).

Серое поле — колебания матричного кварца.

russianquartz.com/produktsiya/) (< 0.1 мм, $0.1—0.3$ мм, > 0.3 мм).

Учитывая, что кварцевая крупка с классом крупности $0.1—0.3$ мм является основным товарным продуктом обогащения исходного кварцевого сырья, результаты этого прогноза можно использовать для предварительной оценки технологических и экономических параметров обогащения кварцевого сырья. Зерна размером > 0.3 мм при дроблении способны образовывать бездефектные крупинки кварца. Зерна кварца

размером < 0.1 мм в результате дробления и сепарации будут выведены из требуемого класса крупности, в то время как зерна кварца размером $0.1—0.3$ мм могут образовывать срастания типа «кварц-кварц» с границами раздела двух и более индивидов кварца с нескрытым межзерновым пространством, что может привести к увеличению массовой доли химических примесей в обогащенной кварцевой крупке за счет микроминералов и флюидных включений по сравнению с общим количеством структурных примесей.

По данным изучения минерального состава кварца (12 проб), среднее количество минеральных примесей в жиле составляет 1.05 мас. %, из них: полевые шпаты — 0.89 мас. % (при колебаниях $0.01—4.4$ мас. %), минералы электромагнитной фракции 0.16 мас. % (при колебаниях $0.01—0.44$ мас. %). Минералы электромагнитной фракции представлены биотитом, роговой обманкой, эпидотом, мусковитом, гранатом, рутилом, актинолитом, лимонитом, карбонатами, а также срастания этих минералов с кварцем и друг с другом. Преимущественным развитием пользуются полевой шпат, биотит, мусковит, апатит и рутил.

По условиям локализации выделено два вида минеральных включений, которые могут наследоваться обогащенной кварцевой крупкой:

1. Группа минералов-спутников с размером зерен до десятых долей миллиметра, соизмеримых с величиной кварцевых зерен в агрегате или значительно превышающей их. В кварцевой жиле распределение этой группы минералов весьма неравномерное, а их локализация связана с трещиноватостью последней, в том числе и залеченной. Состав минералов этой группы специфичен как в количественном, так и в качественном отношении для разных блоков жилы Беркутинская. Следует отметить, что при обогащении кварцевой крупки данная группа минералов-примесей удаляется практически полностью.

2. Группа минералов-включений с размером зерен $n \cdot 10^{-2}—n \cdot 10^{-4}$ мм на 1—2 порядка меньше размеров зерен кварца. Наблюдаются в межзерновом пространстве и (или) законсервированы внутри зерен. Их присутствие фиксируется «повышенным» содержанием массовой доли химических примесей Mg, Na и K в обогащенной крупке жилы Беркутинская (см. табл. 2). Минеральные включения такого размера трудно поддаются даже глубокому обогащению и для их удаления требуются специальные методы обогащения, например, высокотемпературное хлорирование.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Кварцевая жила Беркутинская представляет сложнопостроенную жильную зону, состоящую из трех кварцевых блоков, разделенных пережимами и отличающихся по структурно-текстурным особенностям, гранулометрическим параметрам и содержаниям микроэлементов при близких температурах минералообразования. О метасоматическом преобразовании кварцевой жилы свидетельствует характер взаимоотношений кварцевых агрегатов и новообразованных минералов. Кварц реликтовый, характеризуется волнистым погасанием, содержит залеченные внутризерновые трещины и флюидные включения, беспорядочно расположенные в зернах. На реликтовый кварц в процессе метасоматоза наложен мелкозернистый новообразованный кварц в виде зерен изометричной или близкой к ней формы, с прямолинейными границами, однородным погасанием, без флюидных включений. Обычно с новообразованным кварцем ассоциирует мусковит и (или) мусковит и цоизит, которые образуют срастания с кварцем. Местами вместе с кварцем встречается альбит. На контакте с кварцевой жилой наблюдается неравномер-

но-зернистый агрегат кварц-полевошпатового состава с преобладанием кварцевой составляющей и примесью мусковита с плагиоклазом (альбит-олигоклазом и реже ортоклазом).

Трещины залечены, содержат линзовидные прослои и гнезвидные обособления слюды, часто в ассоциации с калиевым полевым шпатом. Кварц-полевошпатовые агрегаты имеют переменный состав, неравномерно-зернистую структуру и варьирующие содержания главных минералов. Местами преобладает кварц, иногда плагиоклаз, часто встречаются кварц-мусковитовые и кварц-цоизитовые симплектиты. Образование последних свидетельствует о метасоматическом преобразовании полевошпатовых агрегатов и одновременном образовании позднего кварца, мусковита и цоизита. Местами в кварцевой жиле встречаются порфиробласты плагиоклаза с составом An_{22-24} , размером до 0.8—1.0 см, представленные таблитчатыми полисинтетически сдвойникованными зернами, и зерна плагиоклаза с включениями кварца и плагиоклаза.

Кварц жилы Беркутинская мелко-, среднезернистый, массивной текстуры. При детальном рассмотрении следует отметить, что агрегаты кварца обладают разномасштабной катекластической структурой. Наблюдаются три генерации кварцевых зерен: I — аллотриоморфный кварц замещения; II — перекристаллизованный кварц с гипидиоморфными изометричными зернами с прямыми очертаниями и случайными идиоморфными сечениями; III — новообразованные зерна кварца, встречаются вдоль контактов раздробленных зерен и линейных зон, образуя «цементную» структуру, при которой мелкие кварцевые зерна, образовавшиеся в результате катеклаза, заполняют трещины и промежутки между более крупными реликтовыми индивидами кварца. Взаимоотношение между генерациями и их количественное соотношение в кварце разное, что можно обосновать неравномерным тектоническим воздействием на кварцевые тела и/или неравномерной реакцией кварцевых тел на тектоническое воздействие.

Наложение на метасоматический кварц более поздних тектонических процессов с катеклазом, милонитизацией и перекристаллизацией кварцевой матрицы приводит к изменению кварцевого агрегата и формированию его современного структурного облика. По мнению ряда авторов, гранулированный кварц этого типа можно классифицировать как кварцевый метаморфический тектонит [Геология..., 1988; Савичев, 1990] со сложными метагенетическими структурами (по классификации [Кораго, Козлов, 1988]).

Широкие вариации средних значений морфометрических признаков кварцевых зерен, таких как площадь, периметр и округлость зерна, фрактальная размерность, также свидетельствуют об изменении структурных особенностей при вторичных преобразованиях кварцевых жил (катеклаз + перекристаллизация в разных соотношениях). Формирование сложных метагенетических структур в гранулированном кварце является результатом влияния тектонических и сопутствующих им процессов на этапе коллизионного развития уральского складчатого комплекса на кварц-пегматоидную систему жилы Беркутинская в целом.

Изменения значений гранулометрического состава, приведенные в табл. 3, показывают неоднородность структурных особенностей кварцевых агрегатов. Полученные значения коэффициентов вариации площадей кварцевых зерен свидетельствуют об их неравномерном распределении в агрегатах кварца, что, с нашей точки зрения, говорит о синтетектонической деструкции первичного кварца, восстановлении и перекристаллизации зерен кварца. Основанные на фрактальной геометрии изображений изучаемые особенности текстур кварцевых агрегатов жилы Беркутинская находятся в полном соответствии с исследованными авторами структурами кварцевых объектов центральной части уфалейского комплекса, имеющих фрактальную размерность 1.6401 ± 0.0572 [Савичев, 2020].

Полимодальные распределения значений температур гомогенизации и солёности (см. рис. 5) с выраженными пиками свидетельствуют, что в процессе гидротермальной проработки кварцевой жилы происходили последовательные, но разделённые во времени геологические события, с общей регрессивной температурной направленностью, приводящие к консервации в кварце флюидных включений разных генераций.

Если принять, что давление при метаморфизме эпидот-амфиболитовой фации, согласно данным по Кыштымскому месторождению гранулированного кварца [Юсупов и др., 1979], составляет 2.1 кбар, то, с учетом поправки к температурам гомогенизации флюидных включений в кварце [Steele-MacInnis et al., 2012], температуры захвата газово-жидких включений в кварце жилы Беркутинская составили: 300—480 °C (блок I), 360—425 °C (блок II), 270—375 °C (блок III) (рис. 7).

В настоящее время основным товарным продуктом обогащательных предприятий является кварцевая крупка с классом крупности 0.1—0.3 мм (<https://russianquartz.com/produktsiya/>). Содержания примесей в кварце определяются их наличием в растворе, термодинамическими параметрами минералообразования, минеральным парагенезисом жил и т. д. Нужно отметить, что содержания элементов-примесей в кварце Беркутинской жилы, полученные разными методами исследования (см. табл. 2), сопоставимы с содержаниями таковых в кварце, находящейся в промышленной эксплуатации жилы № 175 Кыштымского месторождения и целого ряда жил Кузнечихинского месторождения гранулированного кварца [Корекина и др., 2020], локализованных в сходной геологической обстановке, что дела-

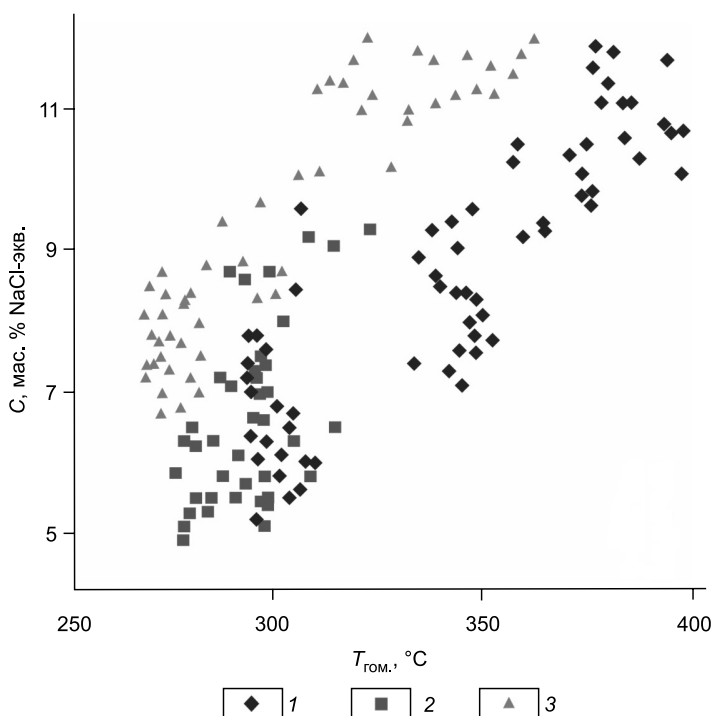


Рис. 7. Температуры захвата и соленость флюида в кварце жилы Беркутинская.

1—3 — номера блоков I—III соответственно.

ет этот тип кварца пригодным для плавки прозрачного кварцевого стекла.

По результатам анализа микроэлементного состава кварца возможно преобладание элементов-примесей в кварце жилы Беркутинская в составе минеральных и флюидных включений. Процессы дробления (измельчения) с различной степенью эффективности вскрывают и отделяют от кварцевых сростаний сопутствующие минералы и флюидные включения, расположенные в трещинах и на границах зерен агрегата. Законсервированные внутри зерен минералы-включения и флюидные включения частично сохраняются после дробления внутри полученных кварцевых осколков и практически не извлекаются даже в процессе глубокого обогащения.

ВЫВОДЫ

1. Жила Беркутинская — уникальный объект, отражающий условия формирования кварцево-жильных образований слюдяно-пегматитовой формации и их промышленную перспективность.

2. По данным компьютерного анализа изображения кварцевых пластин, кварц жилы интенсивно деформирован, в связи с чем диагностируется широкий разброс размеров зерен. Современный структурный облик кварца жилы дает возможность классифицировать его как кварцевый метаморфический тектонит. Гранулометрические особенности кварцевых агрегатов позволяют прогнозировать выход конечного продукта — кварцевой крупки. Так, в результате измельчения и сепарации жильной массы при обогащении в класс крупности 0.1—0.3 мм можно прогнозировать потерю сырья с размерами зерна < 0.1 мм в количестве 42 % от общей кварцево-жильной массы. Зерна фракции > 0.1 мм, составляющие большую часть кварцево-жильной массы, могут образовывать сростания типа «кварц-кварц» с границами раздела двух и более индивидов кварца. Это приводит к увеличению массовой доли химических примесей в обогащенной кварцевой крупке за счет микроминералов и флюидных включений и требует применения глубоких и специальных методов обогащения.

3. По данным термобарогеохимии флюидных включений, жила отлагалась при понижении температур в интервале 480—270 °C из единого существенно K-Na водно-углекислотно-солевого флюида с низкой и умеренной соленью 0.9—9.3 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации флюидных включений показывают, что процессы метаморфизма в кварце жилы Беркутинская имеют регрессивную направленность — последовательное снижение температуры в процессе гидротермальной проработки. Температуры и солевой состав флюида во включениях существенно не отличаются в разных блоках жилы, что косвенно подтверждает данные об однородности жильной массы.

4. Фрактальная размерность метагенетических структур гранулированного кварца отражает структурные особенности вторичного изменения кварцевых жил, приводящих к формированию сложных метагенетических структур с несколькими генерациями кварцевых зерен (катаклаз + перекристаллизация в разных соотношениях), которые классифицируются нами как кварцевый метаморфический тектонит.

5. Содержание элементов-примесей (LA-ICP-MS) в кварце жилы Беркутинская близки к значениям элементного состава в кварцевых концентратах из жилы № 175 ООО «Русский кварц» и кварцу марки IOTA-std (Sibelco), что показывает промышленную перспективность использования кварца жилы Беркутинская. Подбор эффективной схемы обогащения, состоящей из этапов оптической и электромагнитной сепарации, флотации, кислотной обработки, направленной на максимально эффективное удаление минеральных включений из кварца, позволит получать концентраты, соответствующие требованиям [ТУ..., 1997].

Работа выполнена в рамках госзадания № 12301100012-9 (ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН) и № 123011800012-9 (ИГГ УрО РАН).

ЛИТЕРАТУРА

Белковский А.И. Геология и минералогия кварцевых жил Кыштымского месторождения (Средний Урал). Миасс, УрО РАН, 2011, 237 с.

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

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист О-41 (Екатеринбург). СПб, ВСЕГЕИ, 2011, 349 с.

Гульбин Ю.Л., Евангулова Е.Б., Бурлаков К.В. Опыт количественного генетического анализа структур жильного кварца на основе фрактального приближения // Зап. ВМО, 1997, ч. СХХVI, № 6, с. 103—116.

Иванов К.С. Основные черты геологической истории (1.6—0.2 млрд лет) и строения Урала: дис.... д.г.-м.н. в форме научного доклада. Екатеринбург, ИГиГУрО РАН, 1998, 252 с.

Иванюк Г.Ю., Горяинов П.М., Пахомовский Я.А., Коноплева Н.Г., Яковенчук В.Н., Базай А.В., Калашников А.О. Самоорганизация рудных комплексов. Синергетические принципы прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых. М., ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2009, 392 с.

Исаев В.А. Структурные примеси в кварце. Ч. I. Обзор и анализ традиционных способов очистки кварца от структурных примесей // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2006, № 9, с. 11—23.

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

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

Корекина М.А. Оценка возможности использования молочно-белого кварца Новотроицкого месторождения для получения высокочистого кварца, Южный Урал // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов, 2021, т. 332, № 8, с. 99—108.

Корекина М.А., Лютоев В.П., Шанина С.Н., Штенберг М.В. Микроэлементный состав жильного кварца Кузнечихинского месторождения (Южный Урал) // Обогащение руд, 2020, № 5, с. 23—29.

Краснобаев А.А. Циркон как индикатор геологических процессов. М., Наука, 1986, 186 с.

Магматические горные породы. Т. 6. Эволюция магматизма в истории Земли / Ред. О.А. Богатиков. М., Наука, 1987, 438 с.

Мельникова Н.И., Мельников Е.П. Формации жильного безрудного кварца метаморфических комплексов Среднего и Южного Урала // Докл. АН СССР, 1974, т. 214, № 6, с. 1423—1426.

Минеев Д.А. О возрасте и генезисе пегматитов горы Слюдяной (Средний Урал) // Докл. АН СССР, 1959, т. 127, № 4, с. 865—868.

Минералургия жильного кварца / Под ред. В.Г. Кузьмина, Б.Н. Кравца. М., Недра, 1990, 294 с.

Овчинников Л.Н. Обзор данных по абсолютному возрасту геологических образований Урала // Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала. Труды первого Уральского петрографического совещания. Т. 1. Свердловск, УрО АН СССР, 1963, с. 57—83.

Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Недосекова И.Л., Савичев А.Н. Гранитные пегматиты, карбонатиты и гидротермалиты уфалейского гнейсово-мigmatитового комплекса. Екатеринбург, ИГГ РАН, УГГУ, 2016, 273 с.

Поленов Ю.А., Огородников В.Н., Савичев А.Н. Жильный кварц кыштымского типа // Вестник УрО РМО, 2017, № 14, с. 100—106.

Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа, Дизайн Полиграф Сервис, 2010, 280 с.

Реддер Э. Флюидные включения в минералах. Т. 1, М., Мир, 1987, 360 с.

Русский кварц. [Электронный ресурс]. URL: <http://russianquartz.com/produktsiya/> (дата обращения: 05.06.2023).

Савичев А.Н. Гранулированный кварц — метаморфический тектонит // Тезисы докладов 2-го регионального совещания «Минералогия Урала». Т. 2, Свердловск, УрО АН СССР, 1990, с. 133.

Савичев А.Н. Фрактальная размерность гранулированного кварца Уфалейского кварцево-жильного района (Южный Урал) // Металлогения древних и современных океанов, 2020, № 1, с. 171—175.

Тектоника Урала (объяснительная записка к тектонической карте Урала м-ба 1:1 000 000). М., Наука, 1977, 124 с.

ТУ 5726-002-11496665-97. Кварцевые концентраты из природного кварцевого сырья для наплава кварцевых стекол. М., 1997, 24 с.

Юргенсон Г.А. Типоморфизм и рудные формации. Новосибирск, Наука, 2003, 369 с.

- Юсупов С.Ш., Мельников Е.П., Фаттахутдинов С.Г.** *PT-условия грануляции жильного кварца Урала*. Уфа, ИГ БФ АН СССР, 1979, 47 с.
- Bambauer H.U.** Spurenelementgehalte und γ -Farbzentren in Quarzen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen // *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 1961, v. 41, p. 335—369.
- Bodnar R.J., Vityk M.O.** Interpretation of microthermometric data for H_2O -NaCl fluid inclusions // *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignano — Siena, 1994, p. 117—130.
- Davis D.W., Lowenstein T.K., Spencer R.J.** Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl- H_2O , NaCl-KCl- H_2O , NaCl-MgCl₂- H_2O , and NaCl-CaCl₂- H_2O // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, v. 54 (3), p. 591—601.
- Demir Y., Uysal İ., Kandemir R., Jauss A.** Geochemistry, fluid inclusion and stable isotope constraints (C and O) of the Sivrikaya Fe-skarn mineralization (Rize, NE Turkey) // *Ore Geol. Rev.*, 2017, v. 91, p. 153—172.
- Dennen W.H.** Impurities in quartz // *GSA Bull.*, 1964, v. 75, p. 241—246.
- Dhamelincourt P., Beny J.M., Dubessy J., Poty B.** Analyse d'inclusions fluides à la microsonde MOLE à effet Raman // *Bull. Mineral.*, 1979, v. 102, p. 600—610.
- Götze J., Plötze M., Habermann D.** Origin, spectral characteristics and practical applications of the cathodoluminescence (CL) of quartz — a review // *Mineral. Petrol.*, 2001, v. 71, p. 225—250.
- Götze J., Plötze M., Graupner T., Hallbauer D.K., Bray C.** Trace element incorporation into quartz: A combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis, and gas chromatography // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2004, v. 68, p. 3741—3759, doi: 10.1016/j.gca.2004.01.003.
- Heaney P.J., Veblen D.R., Post J.E.** Structural disparities between chalcedony and macrocrystalline quartz // *Am. Mineral.*, 1994, v. 79, p. 452—460.
- Hurai V., Huraiová M., Slobodník M., Thomas R.** *Geofluids. Developments in microthermometry, spectroscopy, thermodynamics, and stable isotopes*. Elsevier, 2015, 489 p.
- Karperien A.** FracLac for ImageJ. Charles Sturt University, Albury–Wodonga, 2013, <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/fracLac/FLHelp/>.
- Korekina M.A., Savichev A.N.** Potential of milky quartz from the Larino deposit in the Southern Urals in production of high-purity quartz concentrates // *J. Min. Sci.*, 2023, v. 59, p. 157—166, doi: 10.1134/S1062739123010179.
- Landtwing M., Pettke T.** Relationships between SEM-cathodoluminescence response and trace element composition of hydrothermal vein quartz // *Am. Mineral.*, 2005, v. 90, p. 122—131.
- Legland D., Arganda-Carreras I., Andrey P.** Morpho Lib J: integrated library and plugins for mathematical morphology with ImageJ // *Bioinformatics*, 2016, v. 32 (22), p. 3532—3534, doi: 10.1093/bioinformatics/btw413.
- Longerich H., Günther D., Jackson S.** Elemental fractionation in laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry // *Fresenius J. Anal. Chem.*, 1996, v. 355 (5), p. 538—542.
- Mangenot X., Tarantola A., Mullis J., Girard J.-P., Le V.H., Eiler J.M.** Geochemistry of clumped isotopologues of CH_4 within fluid inclusions in Alpine tectonic quartz fissures // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2021, v. 561, 116792.
- Paton C., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J., Hergt J.** Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data // *J. Anal. At. Spectrom.*, 2011, v. 26, p. 2508—2518.
- Perny B., Eberhardt P., Ramseyer K., Mullis J., Pankrath R.** Microdistribution of Al, Li, and Na in α quartz: Possible causes and correlation with short-lived cathodoluminescence // *Am. Mineral.*, 1992, v. 77, p. 534—544.
- Rusk B.G., Reed M.H., Dilles J.H., Kent A.J.R.** Intensity of quartz cathodoluminescence and trace-element content in quartz from the porphyry copper deposit at Butte, Montana // *Am. Mineral.*, 2006, v. 91, p. 1300—1312.
- Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., Kaynig V., Longair M., Pietzsch T., Preibisch S., Rueden C., Saalfeld S., Schmid B., Tinevez J.-Y., White D.J., Hartenstein V., Eliceiri K., Tomancak P., Cardona A.** Fiji: an open-source platform for biological-image analysis // *Nat. Methods*, 2012, v. 9 (7), p. 676—682, doi: 10.1038/nmeth.2019.
- Spenser R.J., Moller N., Weare J.N.** The prediction of mineral solubilities in mineral waters: a chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄ system at temperatures below 25°C // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, v. 54 (3), p. 575—590.
- Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J.** HokieFlincs_ H_2O -NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the *PVTX* properties of H_2O -NaCl // *Comput. Geosci.*, 2012, v. 49, p. 334—337.
- Weber A.** High resolution Raman studies of gases // *The Raman effect* / Ed. A. Anderson. Marcel Dekker, New York, 1973, v. 2, p. 543—757.
- Weil J.A.** A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz // *Phys. Chem. Miner.*, 1984, v. 10, p. 149—165.