

УДК 549.5+553.(470.22)

КВАРЦЕВОЕ СЫРЬЕ КАРЕЛО-КОЛЬСКОГО РЕГИОНА: О ПРИРОДЕ ОБРАЗОВАНИЯ И ГЕНЕТИЧЕСКОМ ЗНАЧЕНИИ СУБМИКРОСКОПИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В КВАРЦЕ

Л. Т. Раков¹, В. В. Щипцов², В. Т. Дубинчук³, Л. С. Скамницкая²

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

² Институт геологии КарНЦ РАН

³ Всероссийский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМС)

На примере кварца из месторождений и проявлений Карело-Кольского региона: Кюрьяла, Фенькина-Лампи, Меломайс, Перчатка и Майское исследованы структурные неоднородности в кварце. Показано, что природа их образования связана с многостадийным процессом очищения кварца от избыточных примесей. Области с наиболее совершенной кристаллической структурой (кристаллиты) характеризуются минимальными содержаниями примесей, а дефектные области (демпферные зоны) – максимальными. Обработка в HF вызывает растворение демпферных зон и оставляет нетронутыми кристаллиты, формирующиеся на отдельных стадиях очистки природного кремнезема. По картине их распределения в образцах исследованного кварца проведена предварительная оценка условий минералообразования. Полученные выводы не противоречат известным представлениям о геологической истории указанных месторождений, что свидетельствует о генетической информативности распределения кристаллитов в кварце. Изучение особенностей перехода нераскристаллизованного кремнезема в кварц показывает, что перед появлением новых кристаллитов кремнезем проходит особую стадию, характеризующуюся низким пределом текучести.

К л ю ч е в ы е с л о в а : кварц Карело-Кольского региона, структурные неоднородности, электронная микроскопия, кристаллиты, генетическая информативность, минералого-технологические исследования.

L. T. Rakov, V. V. Schiptsov, V. T. Dubinchuk, L. S. Skamnitskaya QUARTZ OF THE KARELIA-KOLA REGION AS A RAW MATERIAL: ON THE ORIGINS AND GENETIC IMPLICATIONS OF SUBMICROSCOPIC STRUCTURAL HETEROGENEITIES IN QUARTZ

Quartz from deposits and occurrences in the Karelia-Kola region, such as Kyrjala, Fenkina-Lampi, Melomais, Perchatka and Maiskoye, was taken as an example to study the structural heterogeneity of quartz. The study has shown that it is associated with a multi-stage removal of excessive impurities from quartz. Regions that display the most perfect crystalline structure (crystallites) contain the lowest concentrations of impurities, whereas defective regions (damper zones) feature the highest concentrations. HF-treatment dissolves damper zones, while crystallites, formed at specific stages of natural silica purification, remain intact. Their distribution in the quartz samples analyzed was studied to preliminarily assess the environment in which the minerals had formed. The conclusions

drawn are consistent with our knowledge of the geological evolution of the deposits, proving that crystallite distribution in quartz is genetically informative. The study of non-crystalline silica to quartz transition shows that before new crystallites are formed silica passes a special stage characterized by a low fluidity limit.

Key words: quartz of the Karelia-Kola region, structural heterogeneities, electron microscopy, crystallites, genetic informational value, mineralogical and technological studies.

Введение

Кварц – широко распространенный сквозной минерал и часто используется для решения генетических задач, связанных с изучением месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых [Юргенсон, 1984; Горячев, 1992; Гетманская, Раков, 1998; Надежина и др., 2001; Лютоев, Силаев, 2008; Раков и др., 2013]. Роль носителя геологической информации играют неоднородности его кристаллической структуры, определяемые инструментальными методами. Структурные неоднородности кварца проявляются на различных уровнях и на каждом из них несут определенные сведения о геологической предыстории минерала. Хорошо изучена связь с условиями минералообразования протяженных дефектов – газовой-жидких и минеральных включений, регистрируемых методами оптической микроскопии. Микродефекты, как индикаторы условий образования, нашли широкое применение при изучении месторождений полезных ископаемых [Юргенсон, 1984; Горячев, 1992].

Большой интерес у исследователей вызывают структурные дефекты атомного уровня. Изучение их методом электронного парамагнитного резонанса позволило установить, что распределение многих точечных дефектов в кварце несет важную генетическую информацию [Гетманская, Раков, 1998; Лютоев, Силаев, 2008; Раков и др., 2013].

В настоящей статье рассматриваются дефекты кристаллической структуры кварца субмикроскопического уровня. По своим размерам они занимают промежуточное положение между структурными неоднородностями, отмеченными выше. Если неоднородности микроскопического уровня имеют размеры порядка нескольких десятков *нм*, а дефекты атомного уровня – первых *нм*, то неоднородности субмикроскопического уровня охватывают дефектные образования в диапазоне от сотен до нескольких тысяч *нм* и более. Неоднородности этого класса представляют собой зоны кристаллической структуры различной степени де-

фектности. Они могут иметь общую границу, но существенно различаются по степени совершенства кристаллической решетки.

Существование в кварце зон разной степени упорядоченности – это давно известный факт. Оно обуславливает разную степень кристалличности образцов кварца, выявляемую методами инфракрасной спектроскопии и электронного парамагнитного резонанса [Надежина и др., 2001; Лютоев и др., 2007; Коровкин и др., 2012]. Методом просвечивающей электронной микроскопии было установлено, что по уровню дефектности области кристаллической структуры кварца могут разительно отличаться друг от друга. Встречаются как практически бездефектные области, так и полностью аморфные. В работе [Раков, Дубинчук, 2009] предполагается, что их появление связано с перераспределением в кварце структурных примесей. Показано, что неоднородности субмикроскопического уровня в кварце имеют генетическое значение. В частности, их присутствие в минерале может служить индикатором золотого оруденения [Надежина и др., 2001; Портнов и др., 2010]. В то же время структурные неоднородности снижают качество кварцевого сырья. Дефектные зоны концентрируют в себе атомы примесей, от которых трудно освободиться при обогащении кварца [Раков и др., 1993].

В связи с вышеизложенным, изучение природы образования и генетического значения неоднородностей субмикроскопического уровня в кварце представляется актуальной задачей.

Карело-Кольский регион выбран неслучайно, так как анализ состояния изученности и результаты предшествующих исследований показали, что по многим геологическим факторам данная территория относится к новой кварценозной провинции России с высоким потенциалом [Данилевская и др., 2004; Кузнецов и др., 2012; Shchiptsov et al., 2014]. Исследовались месторождения и проявления различных генетических типов кварцевого сырья неорархейских и палеопротерозойских тектони-

ческих структур Карело-Кольской кварценозной провинции, детально описанные в работах [Данилевская, Гаранжа, 2003; Данилевская, Скамницкая, 2007; Данилевская, Щипцов, 2010 и др.]. Значительную роль в формировании месторождений сыграла коллизионная свекофеннская активизация, в результате которой сформированы различные промышленно-генетические типы разномасштабных кварцевых проявлений: месторождение жильного катаклазированного кварца «Фенькина-Лампи», рекристаллизованный кварц гигантской кварценозной зоны на участке Меломайс, месторождение гранулированного кварца «Перчатка», молочно-белый кварц золоторудного месторождения жильного типа «Майское», гранитных пегматитов месторождения «Кюрьяла». Именно из этих участков были отобраны пробы кварца для исследований.

Материал для исследований

Молочно-белый пегматитовый кварц месторождения Кюрьяла. На обособленном тектоническими разломами Улялегском пегматитовом поле данное пегматитовое тело является наиболее крупным. К основным вмещающим породам относятся амфибол-биотитовые и амфиболовые сланцы, рассланцованные амфиболиты.

Все структурные разновидности пегматита подвергнуты катаклазированию. Отмечено развитие апографических и петельчатых структур, обусловленных влиянием интенсивного кварцевого и натрового метасоматоза.

Жильный молочно-белый кварц месторождения Фенькина-Лампи расположен на правом берегу р. Кумсы. Вмещающими породами служат полевошпат-кварцевые песчаники и карбонатизированные песчано-глинистые сланцы. Месторождение представлено двумя разобщенными кварцевыми телами, по своим структурно-морфологическим особенностям относятся к группе трубообразных залежей и карманов. Кварц в основной массе непрозрачный из-за большого количества газово-жидких включений. Наличие нескольких генераций этих включений и структурные особенности кварца свидетельствуют, что его формирование протекало в условиях изменяющихся термодинамических обстановок [Данилевская, Гаранжа, 2003].

Гранулированный кварц месторождения Перчатка. Месторождение приурочено к тектонической зоне. Формирование кварцевожильной зоны обусловлено региональным метаморфизмом в условиях амфиболитовой и

эпидот-амфиболитовой фаций при высоком давлении и температуре. Вмещающими породами служат биотитовые, двуслюдяные, амфиболсодержащие, гранат-биотитовые и дистен-гранатовые гнейсы. Кристаллизация жильного кварца происходила медленно в спокойной обстановке, в гидродинамически относительно замкнутой системе, а его грануляция протекала при активизации тектонической деятельности [Данилевская, Скамницкая, 2010]. Данные условия способствовали образованию высокотемпературного прозрачного гигантозернистого кварца, часто встречающегося на месторождении.

Жильный кварц проявления Меломайс. Проявление представлено крупной кварцевой жиллой, локализованной в тектонически активной зоне сочленения гнейсо-гранитов основания Вокнаволоцкого блока и вулканогенно-осадочного комплекса пород Костомукшской структуры на территории Карельского кратона. Жила подвергнута интенсивному позднему рассланцеванию, приводящему к чередованию прослоев мелкозернистого кварца и эпидот-слюдисто-полевошпатового материала [Данилевская, Щипцов, 2007].

Жильный кварц золоторудного месторождения Майское. Месторождение располагается недалеко от восточного обрамления Куолаярвинской активизированной впадины. Золотое оруденение приурочено к кварцевым жилам, сложенным кварцем двух генераций. Первая – ранняя, безрудная, средне-крупнозернистая. Вторая (поздняя) – обогащена сульфидами и золотом, мелкозернистая. Поздний кварц локально развит, затронут процессами грануляции. Золото отлагалось в две стадии [Порицкий и др., 1993; Сафонов и др., 2003] с одновременным сульфидообразованием (пирит, халькопирит и др.).

Приведенный обзор показывает, что условия образования кварца на этих объектах существенно различались.

Методы исследований

Для распознавания зон с упорядоченной кристаллической структурой использовалось травление кварца в плавиковой кислоте. Оно позволяло растворять наиболее дефектные области кварца и практически не затрагивает зоны с совершенной структурой.

Предшествующими исследователями отмечалось, что скорость травления кристаллов кварца вдоль оси L_3 на несколько порядков выше, чем в перпендикулярных к ней направлениях. Согласно предложенной в работе

[Ernsberger, 1960] модели, процесс образования зародышей травления на поверхности L_3 -среза кварца состоит из нескольких стадий. Первой из них является разрыв связи атома Si с двумя атомами кислорода, находящимися на поверхности травления. Вместо них атом кремния захватывает два иона фтора. В дальнейшем подобный атом кремния из кристаллической структуры кварца переходит в раствор с образованием молекулы SiF_4 .

В рамках указанной модели в работе [Сорока и др., 1977] было получено выражение для относительной скорости травления V кварца, содержащего дефекты типа разорванных Si-O-связей, вдоль оси L_3 :

$$V=(n/c)^{m/2}P, \quad (1)$$

где n – концентрация дефектов типа разорванных Si-O-связей в кварце; c – концентрация ионов H^+ и F^+ в растворе; P – вероятность образования Si-F-связи вместо разорванной Si-O-связи; $m=1,33$ для кристаллического кварца и $m=1,76$ для аморфизованного кварца.

Из рассмотрения уравнения (1) ясно, что дефектные зоны в кварце под воздействием HF будут растворяться в первую очередь, что создает условия для обнаружения зон с наиболее совершенной кристаллической структурой.

Эффективность данного подхода к выявлению зон с разной степенью дефектности обусловлена характером их расположения в объеме кварца. Ранее было показано, что зоны с упорядоченной кристаллической структурой (кристаллиты) и дефектные (демпферные) зоны чередуются между собой, создавая слоистую конструкцию [Раков, Дубинчук, 2009]. Содержание рассеянных примесей Al, Ti, Ga, Fe, Ge и других элементов в них, по данным ПЭМ, различно. Наиболее загрязнены ими демпферные зоны, куда примеси сбрасываются кремнеземом в процессе формирования кристаллитов. Обнаружено, что поверхности указанных зон образуют малые углы с кристаллографической осью третьего порядка L_3 . Можно предположить, что воздействие HF приведет к прецизионному удалению демпферных зон из послойного минерального образования, которым является реальная кристаллическая структура кварца. В результате, кварц после обработки в HF должен представлять собой остов исходной кристаллической структуры, состоящий исключительно из кристаллитов. По расположению пустот в этом остове можно будет судить о картине распределения демпферных зон исследуемом образце кварца.

Перспективность данного подхода к изучению субмикроскопических структурных неод-

нородностей в кварце подтверждается результатами работы [Светова и др., 2011]. В ней были получены достаточно информативные картины поверхностей кварца, обработанных в HF. В настоящей работе эксперименты по травлению кварца проводились с использованием 30-процентной плавиковой кислоты. Обработка выполнялась при комнатной температуре в течение 1 часа. Для удобства наблюдения кристаллитов, сохранившихся после травления, использовались кварцевые пластины площадью 3–5 см² и толщиной около 4 мм.

Существенное место в исследованиях занимало изучение термического воздействия на процессы раскристаллизации природного кремнезема. Для этого часть образцов перед обработкой в HF прогревалась при температуре $T=600$ °C в течение 1 часа. Термообработка осуществлялась в муфельной печи в естественной атмосфере. После травления в HF образцы исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), обеспечивающим получение контрастной картины распределения сохранившихся кристаллитов. С этой целью использовался микроскоп “Tesla” BS-301, укомплектованный энергодисперсионным спектрометром “Inka 2”.

Результаты исследований

Результаты проведенных исследований подтвердили правильность предположений о характере взаимодействия плавиковой кислоты с природным кварцем. Как и ожидалось, травление минерала протекает с неодинаковой скоростью в областях с различной дефектностью. Обработка в HF приводит к растворению в кварце дефектных зон и фактически не затрагивает области совершенного кварца. На рис. 1 и 2 приведены микроснимки изображений участков кварца после воздействия HF при разных увеличениях. Они свидетельствуют о высокой избирательности процессов травления и дают представление о форме кристаллитов в кварце. Для иллюстрации выбраны наиболее типичные микроснимки, иллюстрирующие распределение неоднородностей кристаллической структуры в исследуемых образцах кварца.

Виды кристаллитов в природном кварце.

Рассмотрение микроснимков на рис. 1 и 2 показывает, что в кварце могут существовать кристаллиты различных порядков.

Кристаллиты 1-го порядка. Наиболее крупные из них, которые можно отнести к 1-му порядку, присутствуют в образцах кварца нескольких месторождений.

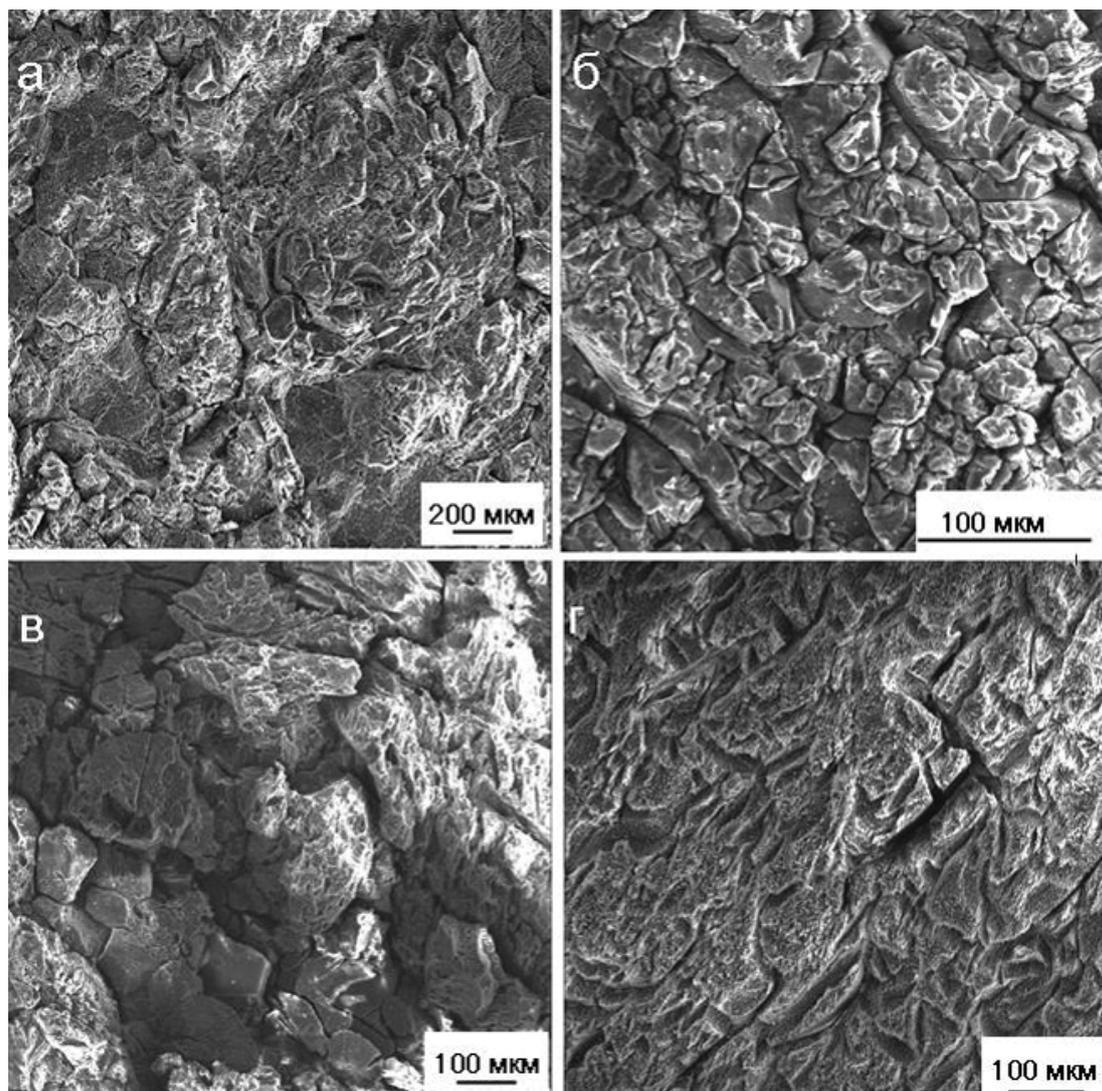


Рис. 1. Электронно-микроскопические (СЭМ) изображения кристаллитов кварца месторождений Кюрьяла (а), Фенькина-Лампи (б), Меломайс (в) и Перчатка (г)

Для месторождения Кюрьяла эти кристаллиты имеют вид первичных зерен, контуры которых с трудом прослеживаются при малых увеличениях. На рис. 1, а представлены два таких зерна, занимающих центральную часть микроснимка и имеющих размеры порядка 800 мкм. Обращает на себя внимание округлость их форм. Внутри первичных зерен видны очертания более мелких зерен. Все зерна кварца подвергнуты интенсивному травлению. В кварце из месторождения Фенькина-Лампи кристаллиты 1-го порядка характеризуются меньшими размерами (рис. 1, б). Многие из них имеют угловатые формы и вообще не содержат каких-либо следов воздействия плавиковой кислоты. Для большого числа кристаллитов характерно наличие граней, преимущественно ориентированных в одном направлении. Кварц из проявления Меломайс содержит

крупные кристаллиты округлой формы, степень травления которых весьма высока, и мелкие угловатые кристаллиты, почти не затронутые травлением (рис. 1, в). По характеру распределения кристаллитов в кварце месторождение имеет сходные черты с месторождениями Кюрьяла и Фенькина-Лампи.

Совершенно иначе после обработки в HF выглядит кварц из месторождения Перчатка. В нем, при выбранном увеличении, отсутствуют крупные или мелкие кристаллиты и не прослеживаются очертания кварцевых зерен, как для месторождения Кюрьяла. Следы травления имеют вид борозд на поверхности кварца (рис. 1, г). Границы отдельных зерен видны лишь при меньшем увеличении.

Не оказалось четко выраженных кристаллитов 1-го порядка и в кварце из месторождения Майское. Из кварцевых образований рассмат-

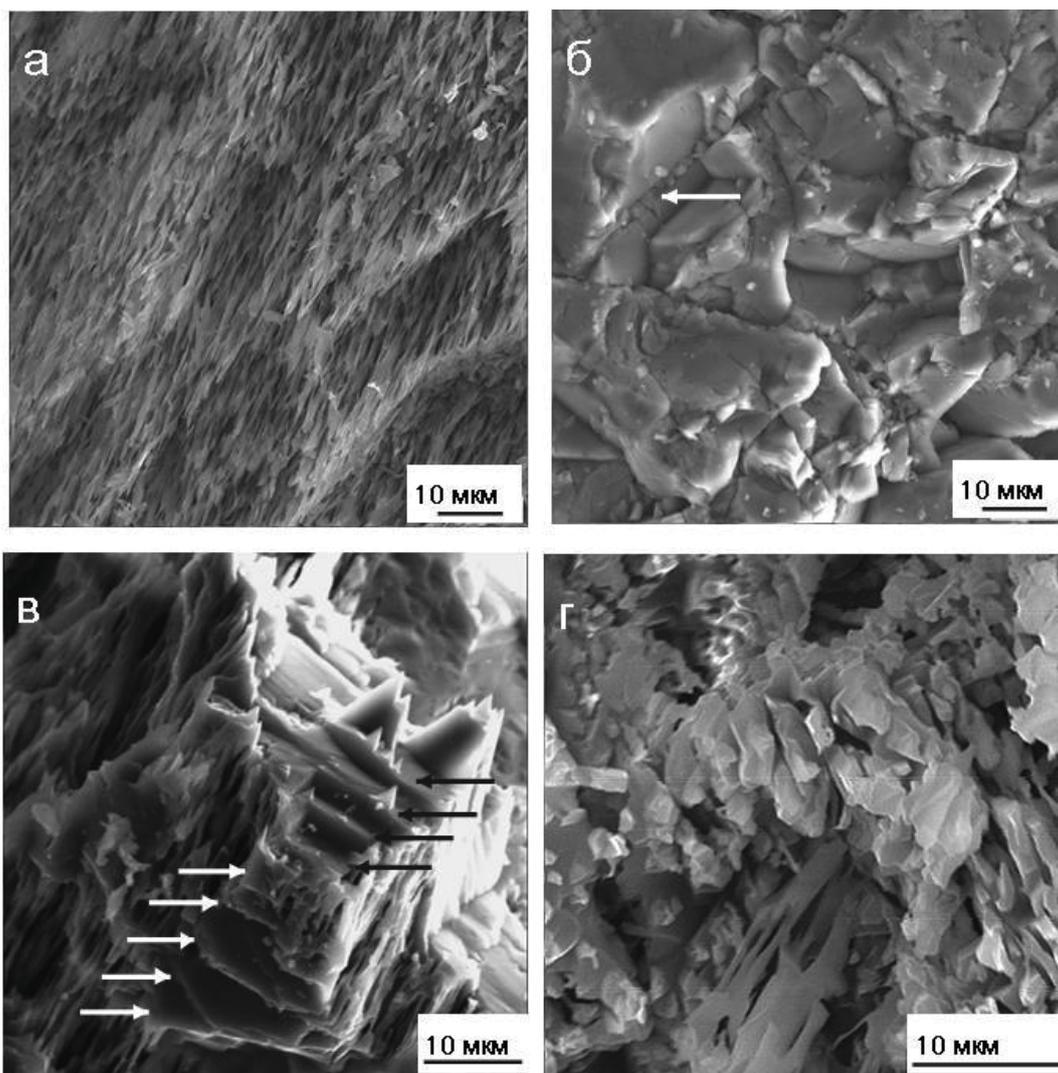


Рис. 2. Электронно-микроскопические (СЭМ) изображения кристаллитов в образцах кварца из месторождений Перчатка (а), Фенькина-Лампи (б), Меломайс (в) и Майское (г)

риваемого размера в нем были обнаружены только тонкие пластины, не похожие на обычные кристаллиты. По-видимому, их возникновение имеет другую природу и должно рассматриваться отдельно.

Кристаллиты 2-го порядка. При десятикратном увеличении в кварце начинают различаться более мелкие кристаллиты – кристаллиты 2-го порядка. В кварцах разных месторождений они могут принимать различную конфигурацию.

Кристаллиты в образцах кварца из месторождения Перчатка имеют вид пластин, связанных между собой и образующих подобие сетки (рис. 2, а). Судя по пустотам между ними, можно сказать, что демпферные зоны в этом кварце также имеют сотовое строение. Их размеры сравнимы с размерами кристаллитов.

Диаметрально противоположная картина распределения кристаллитов и демпферных

зон наблюдается в образцах кварца из месторождения Фенькина-Лампи (рис. 2, б). Здесь практически нет сотовых кристаллитов, но присутствуют массивные микроблоки кварца, размеры которых во много раз больше. Велики и размеры демпферных зон. Следует заметить, что наиболее мелкие кристаллиты часто заполняют трещины между крупными микроблоками кварца (указаны стрелкой). По внешнему облику кристаллиты, регистрируемые в кварце Фенькина-Лампи при десятикратном увеличении, не отличаются от обычных кристаллитов 1-го порядка.

Для месторождений Меломайс и Кюрьяла взаимоотношение кристаллитов и демпферных зон более сложное. Картины их распределения занимают промежуточное положение между рассмотренными выше случаями. В кварцах этих месторождений можно

встретить как сотовые кристаллиты, так и кристаллиты в виде массивных микроблоков кварца. Конфигурация сотовых кристаллитов в них разнообразна. Они могут принимать форму изолированных стержней, плоских или волнистых пластин и т. д. Иногда сотовые и массивные кристаллиты образуют сросшиеся зерна кварца. Микроснимок (рис. 2, в) кварца из месторождения Меломайс иллюстрирует такой случай. Видно, что представленное на снимке зерно состоит из сотового кристаллита (слева) и выросшего на него массивного кристаллита (в центре). Нижняя часть массивного кристаллита представляет собой параллельные пластины (белые стрелки), а верхняя часть имеет вид ступеней (черные стрелки).

Большое количество кристаллитов 2-го порядка установлено в кварце из месторождения Майское. Но, в отличие от кристаллитов в других образцах, они разобщены и редко образуют соты (рис. 2, г).

Кристаллиты более высоких порядков. При детальном рассмотрении структуры кристаллитов 2-го порядка обнаруживаются более мелкие кристаллиты. На их существование указывает ступенчатый характер краев сотовых структур (рис. 3). Видно, что эти края обламываются или растворяются в HF не произвольным образом, а вдоль определенных направлений. Подобная анизотропия свойств кристаллитов 2-го порядка может быть обусловлена мельчайшей сеткой демпферных зон, образованной в результате их дополнительной очистки.

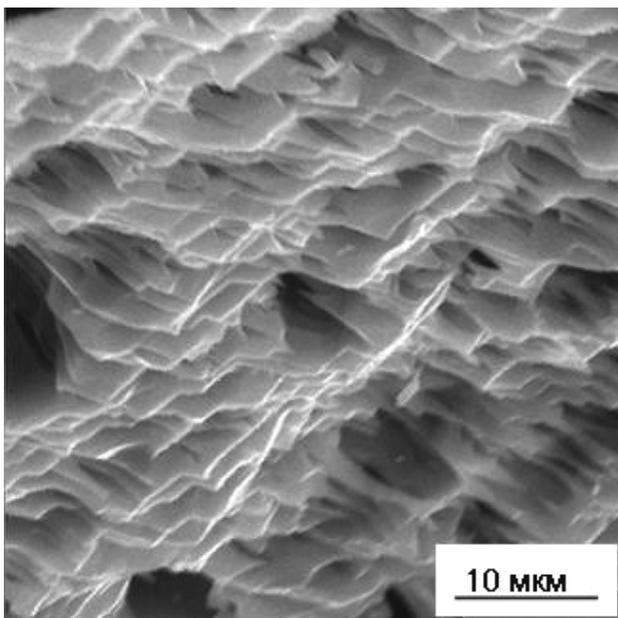


Рис. 3. Кристаллиты 2-го порядка в кварце из месторождения Кюрьяла

Поверхности роста кварца. Наряду с описанными выше встречаются крупные кристаллиты, имеющие протяженные и относительно однородные поверхности, которые связаны, по всей видимости, с фронтом кристаллизации кварца.

На микроснимке рис. 4 представлена одна из таких поверхностей, наиболее характерная для минерала. Обращает на себя внимание ее сложный вид, обусловленный множеством изломов и большим количеством ступенек.

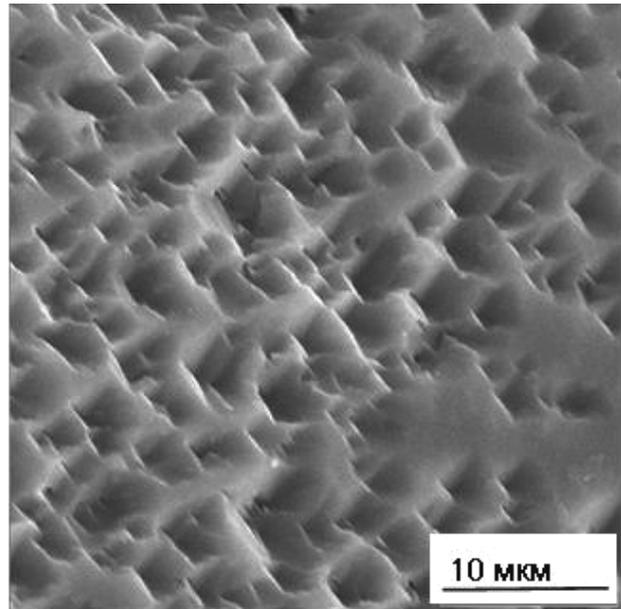


Рис. 4. Структура поверхности роста кварца из месторождения Кюрьяла

Виды демпферных зон. Демпферные зоны, как правило, не содержат кристаллитов и полностью растворяются в плавиковой кислоте. Поэтому по тем пустотам, которые образуются в кварце после обработки в HF, можно судить об их форме и размерах.

Среди демпферных зон, как и среди кристаллитов, можно выделить зоны 1-го, 2-го и более высоких порядков. Порядок демпферной зоны определяется порядком кристаллитов, совместно с которыми они образуются.

Зарождение кристаллитов в демпферных зонах. Но иногда в демпферных зонах встречаются кристаллиты, сохраняющиеся при растворении. Изучение таких кристаллитов представляет особый интерес, поскольку позволяет выяснить динамику перехода нераскристаллизованного кремнезема в кварц.

На рис. 5 представлены микроснимки кристаллитов, расположенных в демпферных зонах и сохранившихся после обработки кварца в HF. Масштаб и формы растворенных демпферных зон различны. В одном случае они

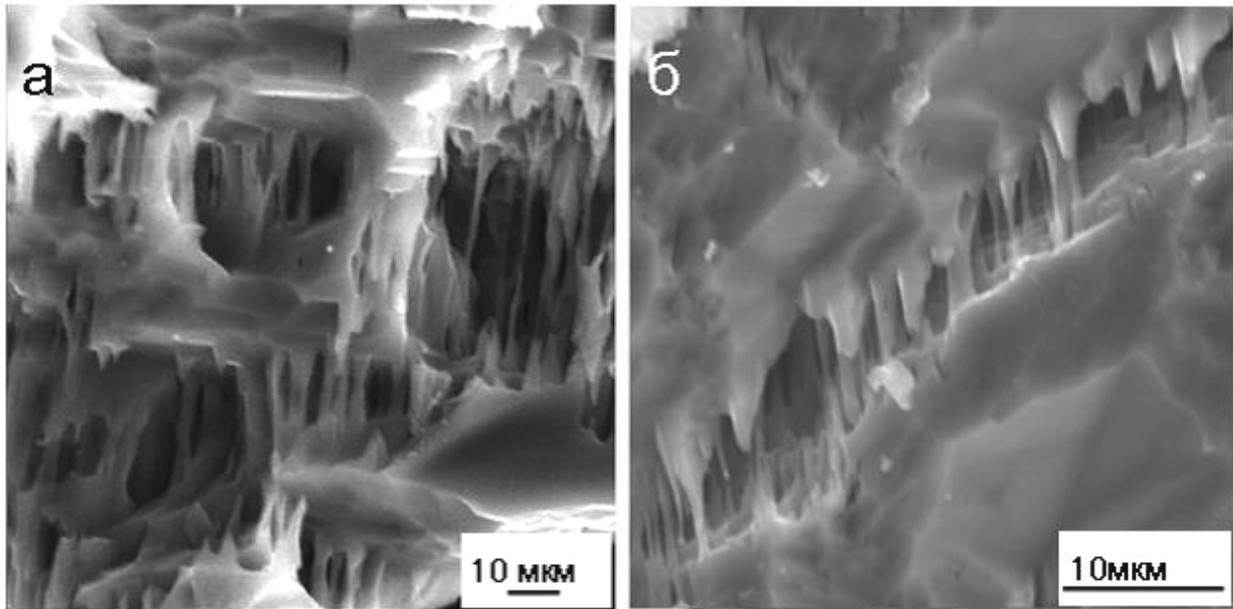


Рис. 5. Одиночные кристаллиты, образованные в крупной демпферной зоне (а) и мелкой трещине (б) кварца из месторождения Майское

занимают значительную часть объема кварца и представляют собой сложную разветвленную структуру (рис. 5, а). В другом случае одиночная демпферная зона локализована в небольшой трещине залечивания между двумя микроблоками кварца (рис. 5, б). Из них нижний, как можно заметить, является сотовым микроблоком. Несмотря на различия между демпферными зонами, форма и общий характер расположения в них кристаллитов одинаковы. Везде кристаллиты имеют вид вытянутых нитей, расположенных параллельно друг другу.

Термостимулированные процессы раскристаллизации кремнезема в кварце. При прогреве кварца при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит возникновение в нем новых кристаллитов, по своему виду отличающихся от первоначальных.

Как правило, они имеют вид кварцевой корки на поверхности исследуемых пластин. Для кварца из месторождения Кюрьяла эта корка полностью укрывает кристаллиты 1-го порядка (рис. 6, а). Ее кристаллическая структура достаточно совершенна и не подвергается воздействию плавиковой кислоты. Следы растворения в HF наблюдаются только на границах крупных и мелких кристаллитов 1-го порядка.

Характер взаимоотношения первичных и новообразованных кристаллитов в кварце месторождения Кюрьяла иллюстрирует микроснимок (рис. 6, б). Новообразованный кварц располагается на поверхности сотовых кристаллитов 2-го порядка в виде специфических “шапок”. В некоторых местах он принимает форму ступенек или параллельных пластин (пунктирная стрелка),

ранее замеченных в образцах кварцевого проявления Меломайс (см. рис. 2, в). Иногда в его очертаниях угадываются зарождающиеся монокристаллы кварца (сплошная стрелка).

Если поверхность первичного кварца ровная, то новообразованный кварц может иметь вид льдистого покрытия. Такой случай, на примере образца из месторождения Майское, иллюстрируется микроснимком (рис. 6, в). Через брешь в этом покрытии просматриваются первичные кристаллиты 2-го порядка.

В отдельных местах кварцевая корка может не образовывать сплошного покрытия. Тогда кристаллиты 2-го порядка легко различить через незакрытые плешины. Микроснимок (рис. 6, г), выполненный при большом увеличении, демонстрирует подобную картину для кварца месторождения Перчатка. Он дает представление о том, как начинает формироваться кварцевое покрытие. Его начальной стадией является обволакивание кремнеземом внешней части каркаса сотовых кристаллитов.

В образцах кварца месторождения Фенькина-Лампи, где содержание сотовых кристаллитов мало, образование кварцевой корки протекает не столь интенсивно. Она возникает не повсеместно, а ее толщина незначительна. Картины распределения кристаллитов в этих кварцах до и после прогрева приблизительно одинаковы.

Сброс примесей при термостимулированной раскристаллизации. Образование новых кристаллитов при термической обработке кварца сопровождается очисткой рас-

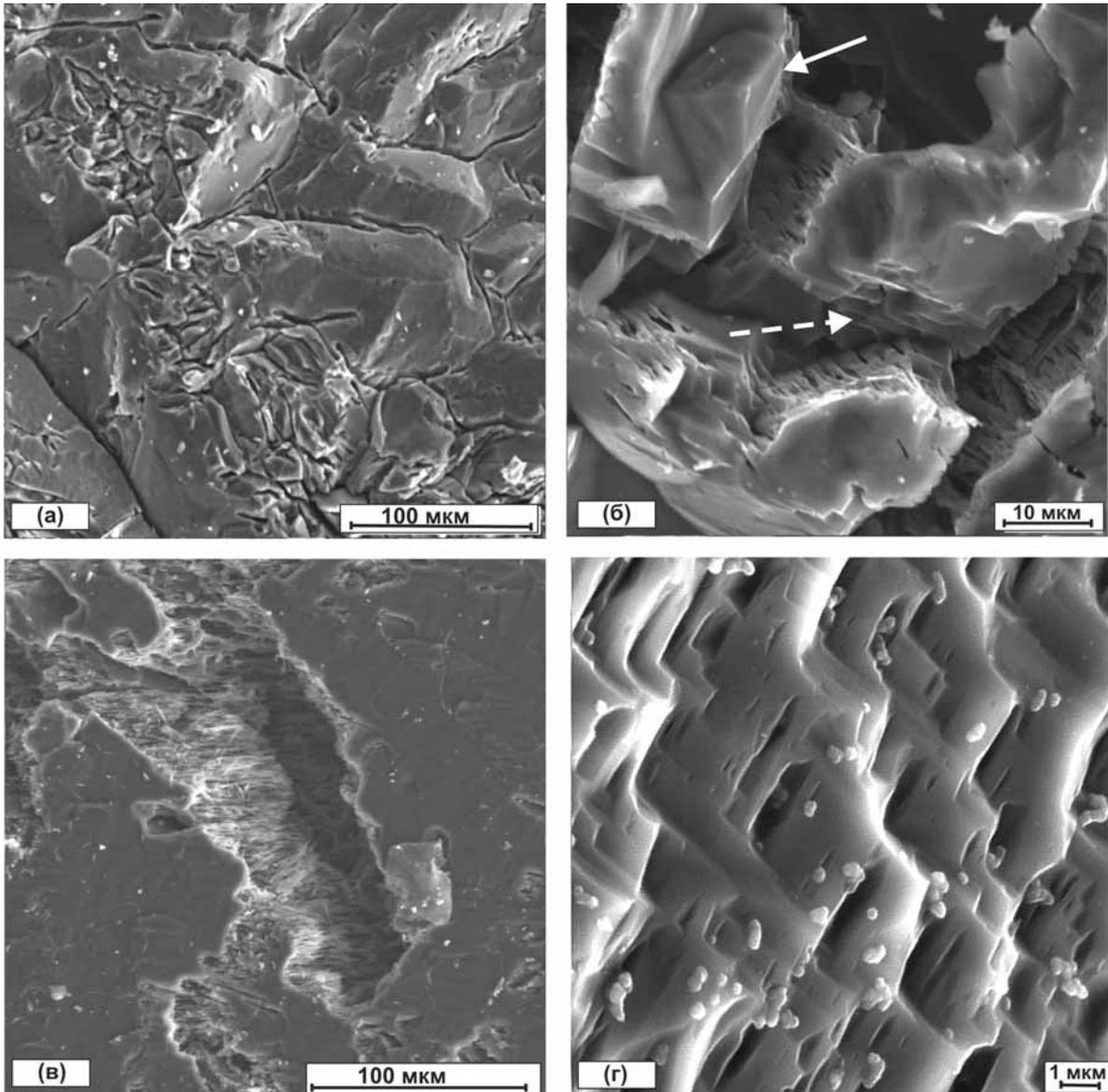


Рис. 6. Кристаллиты, образованные при термической обработке кварца из месторождений Кюрьяла (а и б), Майское (в) и Перчатка (г)

кристаллизованного кремнезема от избыточных примесей. Наблюдение этих примесей в виде самостоятельных фаз не всегда возможно, поскольку последующая обработка в HF приводит к их растворению. Тем не менее, в некоторых случаях эти примеси удается фиксировать.

Один из таких случаев для кварца из месторождения Перчатка иллюстрируется микроснимком на рис. 6, г. На нем отчетливо видны частицы, разбросанные на поверхности новообразованной кварцевой корки. Результаты изучения их состава, полученные с помощью энергодисперсионного спектрометра "Inka 2", следующие, %: SiO_2 – 86,05; Al_2O_3 – 11,75; CaO – 1,55; K_2O – 0,65.

Измеренное содержание SiO_2 в частицах несколько завышено, поскольку в состав анализируемого вещества неизбежно входит близлежащий кварц. Можно полагать, что данные частицы образованы рассеянными примесями, сброшенными кремнеземом в процессе раскристаллизации и претерпевшими коагуляцию.

О многообразии форм кристаллитов 2-го порядка. Представленные выше данные отражают основные тенденции в поведении кристаллитов 2-го порядка. Их выявление оказалось возможным благодаря изучению большого объема экспериментального материала, полученного методом РЭМ.

В действительности же поведение кристаллитов настолько сложное, что по отдельным

микроснимкам бывает трудно вынести какое-либо суждение. Общие закономерности часто тонут в деталях, обусловленных локальными причинами. Форма кристаллитов 2-го порядка чрезвычайно многообразна. Поэтому из всех полученных снимков были выбраны те, которые встречаются наиболее часто и являются типичными. По всей видимости, многообразие форм кристаллитов 2-го порядка обусловлено процессами их пластической деформации.

Обсуждение полученных результатов

Анализ полученных данных позволяет сделать ряд выводов о поведении кремнезема в природных условиях.

Очищение от примесей – главная тенденция в эволюции природного кремнезема. Изучение взаимоотношения кристаллитов и демпферных зон показывает, что их распределение в кварце подчиняется определенному закону. Появление кристаллитов всегда сопровождается образованием демпферных зон, которые располагаются в непосредственной близости от них. Причем, чем мельче кристаллиты, тем меньшие размеры имеют демпферные зоны.

Подобная корреляция свидетельствует, что очистка кремнезема в природных условиях, по всей видимости, протекает в несколько стадий. При этом, по мере очищения кремнезема образуются все более мелкие кристаллиты и демпферные зоны. Поэтому можно считать, что кристаллиты 1-го порядка образованы на первой стадии очистки кремнезема, кристаллиты 2-го порядка – на второй, а более мелкие кристаллиты – на более поздних стадиях. В целом же, стремление кварца освободиться от излишних примесей, во многих случаях является движущей силой его перекристаллизации.

Поэтому формулировку “нераскристаллизованный кремнезем” следует считать условной. Природный кремнезем в любом состоянии достаточно нестабилен и может претерпевать перекристаллизацию, способствующую освобождению его от избыточных примесей.

Тенденция к самоочищению проявляется в раскристаллизации аморфного кремнезема и последующей многостадийной динамической рекристаллизации кристаллитов кварца. Наложение этих процессов друг на друга обуславливает необыкновенно сложную картину формирования и преобразования кристаллитов кварца в природных условиях.

Для реализации цепочки процессов очищения необходимы соответствующие физико-химические условия. В полной мере эти условия выполнялись на месторождении Перчатка,

в образцах кварца которого содержится наибольшее количество сотовых кристаллитов (см. рис. 1, г). Вероятно, высокие давление и температура амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций, при которых формировалась кварцево-жильная зона, являются благоприятными факторами для развития процесса очистки природного кремнезема.

В недостаточной мере указанные условия реализовывались на месторождении Фенькина-Лампи. Здесь кремнезем, по существу, прошел лишь одну стадию природной очистки. Образованные в результате ее кварцевые зерна сохранили свой первоначальный вид, а кристаллиты 2-го порядка практически отсутствуют (см. рис. 2, б).

Следовательно, облик кристаллитов в кварце отражает обстановку, в которой проходило формирование минерала.

Генетическое значение кристаллитов в кварце. В этой связи есть основание полагать, что размеры и форма кристаллитов способны служить индикаторами условий минералообразования. Анализ картины распределения кристаллитов создает принципиальную возможность оценки особенностей кристаллизации кварца и изучения влияния вторичных процессов.

Условия кристаллизации. Начальную информацию об условиях кристаллизации кварца несут кристаллиты 1-го порядка. Их конфигурация и даже отсутствие таких кристаллитов позволяют судить об обстановке, в которой формировались первые микроблоки кварца.

Рассмотрение микроснимка (см. рис. 1, а) показывает, что кварц из месторождения Кюрьяла, скорее всего, сформировался из жидкообразного кремнезема. Известно, что кристаллы округлой формы могут образоваться из расплавов в процессе нормального роста их поверхностей. Такой процесс имеет место при атомно-шероховатости этих поверхностей, обеспечивающей одинаковую скорость роста во всех направлениях [Физическая энциклопедия, 1988]. О том, что данный механизм может реализовываться в кварце, свидетельствует сложный ступенчатый вид поверхности его роста (см. рис. 4).

Приблизительно таким же образом проходила кристаллизация кварца на месторождениях Фенькина-Лампи и Меломайс. Отобранные из них образцы содержат кристаллиты 1-го порядка без огранки, но меньших размеров и более угловатые (см. рис. 1, б, в). Возможно, их формирование протекало при больших отклонениях от термодинамического равновесия, при высокой плотности зародышей кристаллизации.

Термодинамическая обстановка. Наличие кристаллитов 2-го порядка – признак высокотемпературных и стабильных условий рекристаллизации кварца, обеспечивающих интенсивную дифференциацию примесей и возникновение новых демпферных зон и кристаллитов.

Если такие условия созданы, то эволюционный процесс очистки кварца приводит к постепенному сглаживанию контуров кристаллитов 1-го порядка и накоплению кристаллитов 2-го порядка. Начальный этап таких событий мы наблюдаем в кварце Кюрьяла, приуроченном к крупному пегматовому телу (см. рис. 1, а), а конечный – в кварце месторождения Перчатка, связанного с региональным метаморфизмом (см. рис. 2, а).

Внешнее воздействие на кварц. Признаками, указывающими на термическое или механическое воздействие на кварц, являются присутствие кристаллитов с характерными для этих процессов свойствами.

Необычные кристаллиты обнаружены в кварце Меломайса. Один из них, выросший на сотовой кристаллит, и, по всей видимости, вторичный по своей природе, представлен на рис. 2, в. Анализ формы новообразованного кварца позволяет предположить причину его возникновения. Очевидно, его появление обусловлено термическим воздействием, которое испытала кварцевая жила в относительно открытых условиях. Именно такие же формы – параллельные пластины и ступени наблюдаются в кварце после термической обработки в муфельной печи (см. рис. 6, б).

Следы природного теплового воздействия обнаружены и в кварце из месторождения Майское. В нем, хотя и в малых количествах, но присутствуют кристаллиты в виде тонких плоских пластин. Аналогичные кварцевые образования возникают при искусственном прогреве кварца (см. рис. 6).

Вызывает интерес образование линейных ориентированных границ между кристаллитами в кварце Фенькина-Лампи, например, вверх и налево (см. рис. 1, б). Особенности конфигурации и расположения таких границ свидетельствуют об их связи с процессами трещинообразования. Появление трещин может быть вызвано механическими напряжениями, возникающими в кварце вследствие термического воздействия или резких изменений *PT*-условий. Присутствие мелких кристаллитов между микроблоками кварца (стрелка на рис. 2, б) указывает на динамическую рекристаллизацию минерала, протекавшую при $T < 400$ °С [Passchier, Trouw, 1996]. Многообразие изменений, наблюдаемое в распределении кри-

сталлитов, согласуется с геологическими выводами об изменчивости термодинамической обстановки при формировании кварца Фенькина-Лампи [Данилевская, Гаранжа, 2003].

Наименьшее влияние внешней среды испытывал кварц из месторождения Перчатка. В нем отсутствуют кристаллиты, обусловленные вторичными процессами, что свидетельствует о закрытости минералообразующей системы. Микроблоки кварца этого месторождения состоят из строго ориентированных кристаллитов 2-го порядка и достигают размеров в несколько мм. Однородность и значительные размеры зерен кварца являются признаком динамической рекристаллизации минерала в стабильной обстановке при температурах выше 500 °С [Passchier, Trouw, 1996]. Ее реализация могла быть возможной вследствие длительного остывания кварца после кристаллизации в условиях закрытой системы.

Появление кристаллитов необычной формы может быть вызвано рядом причин, в том числе пластической деформацией микроблоков кварца под воздействием локальных температур и механических напряжений. Поэтому использовать такие кристаллиты в качестве генетических признаков надо с особой осторожностью.

В целом же, выводы, вытекающие из анализа распределения кристаллитов, не противоречат известным представлениям о геологической истории рассмотренных месторождений. Возникшие неясности связаны с недостаточной изученностью процесса образования кристаллитов в кварце. Дальнейшие исследования позволят познать его закономерности и давать более обоснованные оценки условий минералообразования.

Высокая чувствительность демпферных зон к воздействию HF. Вызывает удивление способность демпферных зон так хорошо растворяться в плавиковой кислоте. Ни на одном микроснимке кварца, обработанного в HF, мы не увидели даже их следов. Между тем, во многих случаях демпферные зоны составляют основную часть объема кварца, и, по результатам микродифракционных исследований, имеют кристаллическое строение.

Высокая скорость травления этих зон в HF может быть объяснена наличием в них “дефектных каналов”, ориентированных, как и структурные каналы, вдоль оси L_3 . Они были обнаружены в кварце сравнительно недавно, и даже разработаны технологии их искусственного получения [Брызгалов, 1991; Мусатов, 2007]. Образование “дефектных каналов” связывают с захватом кристаллической структурой активных примесей при кристаллизации

кварца. Поэтому в демпферных зонах плотность указанных дефектов должна быть особенно высокой.

Установлено, что “дефектные каналы” хорошо растравливаются в плавиковой кислоте, что, вероятно, и является причиной высокой чувствительности демпферных зон к ее воздействию. Эксперимент показывает, что реальная скорость растворения кварца в большей степени зависит от его дефектности, чем предсказывает выражение (1).

Влияние демпферных зон на механическую прочность кварца. Интересно заметить, что в кварце только одного из пяти рассмотренных месторождений было обнаружено большое количество трещин. Этим месторождением является Фенькина-Лампи. В кварце этого же месторождения практически отсутствуют кристаллиты и демпферные зоны 2-го порядка.

Данный факт подтверждает справедливость высказанного ранее предположения, что разветвленная сеть демпферных зон способствует гашению механических напряжений в кварце и повышает его прочность [Раков, Дубинчук, 2009]. Собственно, благодаря этому предположению демпферные зоны и получили свое название.

Необычное поведение природного кремнезема при нагревании. Появление кварцевой корки на поверхности кварцевых пластин при термической обработке требует специального рассмотрения. Ее вид порой напоминает жидкообразную массу, растекающуюся на поверхности, а затем застывшую (см. рис. 5, в). Откуда мог взяться новообразованный кварц столь необычного вида?

Действительно, прогрев при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ не способен перевести кристаллический кварц в состояние высокой текучести, т.к. температура его плавления близка к $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Единственной причиной образования кварцевой корки может быть раскристаллизация природного кремнезема, появившегося на поверхности кварцевых пластин.

Рассматривая микроснимки на рис. 5, можно предположить, что источником этого кремнезема являются демпферные зоны сотовых кристаллитов. По всей видимости, вещество, которое в них находится, при нагреве расширяется и частично выходит на поверхность. Попадая в свободное пространство, кремнезем получает возможность сбросить избыточные примеси и превратиться в кварц. Доказательством тому служит появление частиц примеси на поверхности сотового кристаллита после образования кварцевой корки (см. рис. 5, г).

Однако реализация этого механизма должна приводить к возникновению микроскопических кварцевых сгустков на поверхности сотового кристаллита. Мы же видим сплошное кварцевое покрытие, обволакивающее его внешний каркас. Данный факт позволяет предполагать, что появившийся на поверхности кристаллита кремнезем обладал вязкотекучим свойством. Только тогда вместо сгустков, выделявшихся из отдельных сот, может образоваться единое гладкое покрытие, а элементы каркаса сотового кристаллита покрыться равномерным слоем кварца (см. рис. 5, в, г).

Вязкотекучее состояние кремнезема невозможно объяснить процессами химического превращения его в жидкие кремнийсодержащие соединения. Анализ элементного состава кремнезема, проведенный с помощью просвечивающего электронного микроскопа “Technai-12 TWIN” в отделе минералогии ВИМСа, показал, что концентрации примесей в демпферных зонах недостаточны для образования таких соединений. Например, содержание Na или K в них составляет доли процента и не способно обеспечить формирование заметного количества силикатов натрия $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ или калия $\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ (растворимого стекла). Концентрация C в кремнеземе также не превышает 1–2 % и не может привести к активному образованию жидких кремнийорганических соединений.

По всей видимости, появление вязкотекучего состояния кремнезема связано с другими причинами. Тем не менее, роль примесей в этом процессе исключать нельзя. Вполне возможно, что особые свойства кремнезем приобретает при их определенном содержании и составе. На поверхности сотовых кристаллитов кремнезем освобождается от этих примесей, теряет высокую текучесть и кристаллизуется в обычный кварц.

Раскристаллизация кремнезема в демпферных зонах. Некоторые предположения о природе возникновения вязкотекучего состояния кремнезема появляются при рассмотрении особенностей его раскристаллизации в демпферных зонах.

В них кремнезем находится в замкнутом пространстве и не может сбрасывать избыточные примеси в окружающую среду. Поэтому его раскристаллизация возможна только за счет перераспределения примесей внутри самих зон. Области, освободившиеся от них, раскристаллизовываются, а области, захватившие примеси, остаются нераскристаллизованными.

Нам не известны закономерности перераспределения примесей между этими областями. Но мы располагаем экспериментальными

фактами, позволяющими судить о форме и взаимном расположении указанных областей. Микроснимки на рис. 4 показывают, что области, претерпевающие раскristаллизацию, вытянуты в одном направлении и параллельны друг другу. По всей видимости, в момент кристаллизации кварца молекулы кремнезема образовывали ассоциации, ориентированные в том же направлении.

Подобные ассоциации могут быть образованы цепочками кремнекислородных тетраэдров, обладающими высокой прочностью. Если цепочки окружены атомами примесей, то они не соединяются друг с другом и не формируют пространственную кристаллическую решетку. Существование таких полимерных цепочек в кремнеземе доказано экспериментально [Айлер, 1982]. Каждая из них ведет себя независимо от других цепей и, в принципе, может принять любую пространственную ориентацию. Но, если все цепочки выстраиваются в одном направлении, то такое состояние кремнезема адекватно жидкокристаллическому [П. де Жен, 1977; Чандрасекар, 1980].

Весьма показательно, что направление кристаллитов на рис. 4, б совпадает с осью сотовой структуры нижнего кристаллита. Это направление наиболее предпочтительно для ориентации кремнекислородных цепочек кремнезема в сотовых демпферных зонах.

Замечено, что если демпферная зона располагается между параллельными стенками массивных кристаллитов, то новообразованные кристаллиты всегда перпендикулярны им. Здесь, вероятно, определяющим фактором является направление электрического поля, возникающего между кристаллитами и имеющего пьезоэлектрическую природу. Известно, что в электрическом поле ассоциации молекул жидких кристаллов принимают положение, параллельное его направлению [П. де Жен, 1977].

Когда примеси, локализованные между кремнекислородными цепочками, уходят, то создаются условия для слияния этих цепей и образования пространственной кристаллической структуры кварца.

Таким образом, необычный вид кристаллитов, образующихся при нагревании, может объясняться тем, что кремнезем, находящийся в сотах кристаллитов 2-го порядка, обладает свойствами, напоминающими свойства термотропных жидких кристаллов. Известно, что этот класс веществ переходит в состояние жидких кристаллов при нагревании [Чандрасекар, 1980]. Видимо, поэтому при высокой температуре кремнезем может свободно выделяться

из демпферных зон и растекаться по поверхности кристаллитов. При низких температурах он находится в конденсированном состоянии и никак себя не проявляет.

Выводы

1. Природный кремнезем имеет устойчивую тенденцию к самоочищению от посторонних примесей. Эта тенденция сохраняется и при переходе кремнезема в кварц. В результате в кварце образуются субмикроскопические структурные неоднородности – кристаллиты, представляющие собой зоны очищенного кремнезема, и демпферные зоны, обогащенные рассеянными примесями.

2. Дефектность образованных структурных неоднородностей различна, поэтому скорость их растворения в плавиковой кислоте неодинакова. Эти свойства неоднородностей позволяют исследовать их строение путем обработки кварца в HF, что приводит к удалению из кварца демпферных зон и сохранению кристаллитов.

3. Форма, размеры кристаллитов в кварце отражают условия минералообразования. Их изучение дает возможность судить об особенностях кристаллизации кварца и последующем влиянии на минерал вторичных процессов.

Результаты анализа распределения кристаллитов в кварце имеют и важное технологическое значение. Известно, что поведение элементов-примесей в областях упорядоченной кристаллической структуры и демпферных зонах разное [Раков, Дубинчук, 2009], поэтому при оценке качества кварцевого сырья и разработке оптимальных схем его обогащения необходимо иметь информацию о характере распределения и взаимоотношения этих зон в кварце.

4. Термическое воздействие на кварц может приводить к образованию новых кристаллитов. Их формирование осуществляется благодаря раскristаллизации кремнезема демпферных зон, освободившегося от избыточного количества примесей. Результаты исследований свидетельствуют, что перед появлением очищенного кварца кремнезем проходит стадию вязкотекучего состояния.

5. Прогрев кварца в естественных условиях вызывает динамическую рекристаллизацию кристаллитов. Ее характер может определяться температурой прогрева, давлением флюида, степенью закрытости системы, видом кристаллитов, скоростью их деформации и другими причинами. Вариации этих параметров приводят к многообразию форм кристаллитов в природном кварце.

В заключение надо сказать, что качество кварцевого сырья определяется не только процессом самоочищения кремнезема. Важную роль играют исходное содержание примесей в минералообразующем флюиде и закономерности их природной сепарации в кварце. Поэтому прогнозная оценка перспективности кварцевого сырья должна учитывать результаты изучения в нем субмикроскопических структурных неоднородностей.

Литература

- Айлер Р.* Химия кремнезема. М.: Мир, 1982. 416 с.
- Брызгалов А. Н.* Формирование кристаллов кварца с микроканальной структурой // Получение, свойства и применение дисперсных материалов в современной науке и технике. Челябинск, 1991. С. 50–57.
- Гетманская Т. И., Раков Л. Т.* Закономерности распределения парамагнитных центров в кварце вольфрамовых месторождений грейзеновой формации // Геохимия. 1998. № 5. С. 539–542.
- Горячев Н. А.* Жильный кварц золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса. Владивосток: ДВО РАН, 1992. 136 с.
- Данилевская Л. А., Гаранжа А. В.* Месторождение жильного кварца Фенькина Лампи: геолого-минералогические аспекты формирования, типоморфные свойства и оценка качества // Геолого-технологические исследования промышленных минералов Фенноскандии: сб. статей. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 29–38.
- Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С.* Месторождение жильного кварца Перчатка: история освоения, геолого-минералогические особенности, новые подходы к оценке сырья // Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова: Тр. VII Всерос. Ферсмановской науч. сессии, посвящ. 80-летию Кольского НЦ РАН (Апатиты, 2–5 мая 2010 г.). Апатиты: ООО К & М, 2010. С. 39–44.
- Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В.* Кварцевое сырье Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 226 с.
- Данилевская Л. А., Щипцов В. В.* Прогноз перспективности нового кварценосного объекта Меломайс в Карелии // Разведка и охрана недр. 2007. № 10. С. 33–36.
- де Жен П.* Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 400 с.
- Коровкин М. В., Ананьева Л. Г., Анциферова А. А.* Оценка степени преобразования кварцитов методом инфракрасной спектроскопии // Изв. Томского политехнического университета. 2012. Т. 320, № 1. С. 16–18.
- Кузнецов С. К., Светова Е. Н., Шанина С. Н., Филиппов В. Н.* Элементы-примеси в кварце гидротермально-метаморфогенных жил Приполярно-уральской провинции // Геохимия. 2012. № 11. С. 1016–1031.
- Лютоев В. П., Глухов Ю. В., Суетин В. П., Лысюк А. Ю., Остащенко Б. А., Самотолкова М. Ф.* Спектроскопия примесных дефектов в минералах из эндогенных и экзогенных объектов: структурные примеси и адсорбированные молекулы как маркеры геологических процессов. Сыктывкар: Геопринт, 2007. 44 с. (Отчетная серия № 5 (54)).
- Лютоев В. П., Силаев В. И.* Типоморфизм парамагнитных центров в структуре кварца из уральского редкометального месторождения // Минералогический журн. 2008. Т. 30, № 2. С. 64–74.
- Мусатов В. В.* Направленное дефектообразование в кристаллах кварца: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Челябинск, 2007.
- Надежина Т. Н., Куражковская В. С., Воинков Д. М.* Степень кристалличности кварца из золоторудных месторождений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2001. № 1. С. 30–34.
- Порицкий М. С., Буйко А. К., Котов Н. В., Порицкая Л. Г.* Геологическая позиция и условия формирования золоторудных метасоматитов месторождения «Майское» (Северная Карелия) // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 1993. Вып 1, № 7. С. 15–21.
- Портнов А. М., Раков Л. Т., Дубинчук В. Т.* Неупорядоченность структуры кварца как индикатор оруденения // Современная минералогия: от теории к практике: материалы XI съезда Российского минералогического общества. СПб., 2010. С. 245–247.
- Раков Л. Т., Дубинчук В. Т.* Новые подходы к проведению оценки качества кварцевого сырья // Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов: сб. науч. статей по материалам Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 78–82.
- Раков Л. Т., Миловидова Н. Д., Моисеев Б. М., Огурцов В. Г.* Новый метод оценки качества кварцевого сырья // Разведка и охрана недр. 1993. № 7. С. 36–38.
- Раков Л. Т., Ткачев А. В., Сахнов А. А.* Генетический анализ кварца пегматитов Мамско-Чуйского слюдоносного района на основе использования распределения изоморфных примесей // Геол. руд. месторождений. 2013. Т. 55, № 1. С. 48–67.
- Сафонов Ю. Г., Волков А. В., Вольфсон А. А., Генкин А. Д., Крылова Т. Л., Чугаев А. В.* Золото-кварцевое месторождение Майское (Северная Карелия): геологические и минералого-геохимические особенности, вопросы генезиса // ГРМ. 2003. Т. 45, № 5. С. 429–451.
- Светова Е. Н., Кузнецов С. К., Шанина С. Н., Филиппов В. Н.* Элементы-примеси в кварце и особо чистое кварцевое сырье // Сб. научных статей по материалам V Российского семинара по технологической минералогии «Минералого-технологическая оценка месторождений полезных ископаемых и проблемы раскрытия минералов». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 140–146.
- Сорока В. В., Лазорина Е. И., Степанчук В. Н.* К теории травления кварца в плавиковой кислоте // Кристаллография. 1977. Т. 22, вып. 3. С. 619–621.
- Физическая энциклопедия.* Том 2. М.: Советская энциклопедия, 1988.
- Чандрасекар С.* Жидкие кристаллы / Под ред. А. А. Ведерникова, И. Г. Чистякова. М.: Мир, 1980. 343 с.

Юргенсон Г. А. Типоморфизм и рудоносность жильного кварца. М.: Недра, 1984. 149 с.

Ernsberger F. M. J. Phys. and Chem. Solids. 1960. Vol. 13. P. 347.

Passchier C. W., Trouw R. A. J. Microtectonics. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1996. P. 289.

Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S., Voytekhovskiy Yu. L., Bubnova T. P., Dubinchuk V. T., Rakov L. T.

Geological and mineralogical-technological appraisal of quartz as a raw material from the Karelia-Kola quartz-bearing province, a new promising region of Russia // Abstracts and Proceedings of the Geological Society of Norway. The Arctic Days 2014. Norsk Geologisk Forening c/o Norges geologiske undersøkelse N-7491 Trondheim. P. 80–81.

Поступила в редакцию 03.04.2015

References

Ailer R. Khimiya kremnezema [The chemistry of silica]. Moscow: Mir, 1982. 416 p.

Bryzgalov A. N. Formirovanie kristallov kvartsa s mikrokanal'noi strukturoi [The formation of quartz crystals with microchannel structure]. Poluchenie, svoystva i primeneniye dispersnykh materialov v sovremennoi nauke i tekhnike [Production, properties and application of dispersed materials in modern science and technology]. Chelyabinsk, 1991. P. 50–57.

Getmanskaya T. I., Rakov L. T. Zakonomernosti raspredeleniya paramagnitnykh tseftrov v kvartse vol'framovykh mestorozhdenii greizenovoi formatsii [Regularities in the distribution of paramagnetic centers in quartz-tungsten deposits of greisen formation]. Geokhimiya [Geochemistry]. 1998. No 5. P. 539–542.

Goryachev N. A. Zhil'nyi kvarts zolotorudnykh mestorozhdenii Yano-Kolym'skogo poyasa [Vein quartz in gold deposits in the Yana-Kolyma belt]. Vladivostok: DVO RAN, 1992. 136 p.

Danilevskaya L. A., Garanzha A. V. Mestorozhdeniye zhil'nogo kvartsa Fen'kina Lampi: geologo-mineralogicheskie aspekty formirovaniya, tipomorfnye svoystva i otsenka kachestva [The Fen'kina-Lampi vein quartz deposit: geological and mineralogical aspects of formation, typomorphic properties and quality assessment]. Geologo-tekhnologicheskie issledovaniya industrial'nykh mineralov Fennoskandii: sb. Statei [Geological and technological surveys of industrial minerals of Fennoscandia]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2003. P. 29–38.

Danilevskaya L. A., Skamnitskaya L. S. Mestorozhdeniye zhil'nogo kvartsa Perchatka: istoriya osvoeniya, geologo-mineralogicheskie osobennosti, novye podkhody k otsenke syr'ya [The Perchatka vein quartz deposit: the history of development, geological and mineralogical peculiarities, new approaches to the raw materials estimation]. Geologiya i poleznye iskopaemye Kol'skogo poluostrava: Tr. VII Vseros. Fersmanovskoi nauch. sessii, posvyashch. 80-letiyu Kol'skogo NTS RAN (Apatity, 2–5 maya 2010 g.) [Geology and mineral resources of the Kola Peninsula. Proceedings of VII All-Russian Fersman scientific session dedicated to the 80th anniversary of the Kola SC RAS (Apatity 2–5 May 2010)]. Apatity: OOO K & M, 2010. P. 39–44.

Danilevskaya L. A., Skamnitskaya L. S., Shchiptsov V. V. Kwartsevoe syr'e Karelii [Quartz raw material in Karelia]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2004. 226 s.

Danilevskaya L. A., Shchiptsov V. V. Prognoz perspektivnosti novogo kvartsenosnogo ob'ekta Melomais v Karelii [Prospect evaluation of the new quartz Melomais locality in Karelia]. Razvedka i okhrana nedr [Use and conservation of mineral resources]. 2007. No 10. P. 33–36.

Korovkin M. V., Anan'eva L. G., Antsiferova A. A. Otsenka stepeni preobrazovaniya kvartsitov metodom infrakrasnoi spektroskopii [The assessment of quartzite transformation using infrared spectroscopy]. Izv. Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Tomsk Polytechnic University]. 2012. Vol. 320, No 1. P. 16–18.

Kuznetsov S. K., Svetova E. N., Shanina S. N., Filippov V. N. Elementy-primesi v kvartse gidrotermal'no-metamorfogennykh zhil' Pripolyarnoural'skoi provintsii [Minor elements in quartz from the hydrothermal-metamorphic veins in the Nether Polar Ural Province]. Geokhimiya [Geochemistry]. 2012. No 11. P. 1016–1031.

Lyutoev V. P., Glukhov Yu. V., Suetin V. P., Lysyuk A. Yu., Ostashchenko B. A., Samotolkova M. F. Spektroskopiya primesnykh defektov v mineralakh iz endogennykh i ekzogennykh ob'ektov: strukturnye primesi i adsorbiruyemye molekuly kak markery geologicheskikh protsessov [Spectroscopy of structural defects in minerals from endogenous and exogenous formations. Structural impurities and absorbed molecules as geological markers]. Syktyvkar: Geoprint, 2007. 44 p.

Lyutoev V. P., Silaev V. I. Tipomorfizm paramagnitnykh tseftrov v strukture kvartsa iz ural'skogo redkometal'nogo mestorozhdeniya [Typomorphism of paramagnetic centers in the structure of quartz from the Urals rare-metal deposit]. Mineralogicheskii zhurn [Mineralogical Journal]. 2008. Vol. 30, No 2. P. 64–74.

Musatov V. V. Napravlennoe defektoobrazovanie v kristallakh kvartsa: avtoref. dis. kand. fiz.-mat. Nauk [Artificial defect formation in quartz crystals: abstract of the DSc thesis, Phys.-math.]. Chelyabinsk, 2007.

Nadezhina T. N., Kurazhkovskaya V. S., Voinkov D. M. Stepen' kristallichnosti kvartsa iz zolotorudnykh mestorozhdenii [The degree of quartz crystallinity from gold deposits]. Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 4. Geologiya [The Moscow University Herald. Ser. 4. Geology]. 2001. No 1. P. 30–34.

Poritskii M. S., Buiko A. K., Kotov N. V., Poritskaya L. G. Geologicheskaya pozitsiya i usloviya

formirovaniya zolotorudnykh metasomatitov mestorozhdeniya «Mayskoe» (Severnaya Kareliya) [Geological position and conditions of formation of metasomatites of the Mayskoe gold deposit (Northern Karelia)]. Vestnik SPbGU. Ser. 7 [The Herald of St. Petersburg University]. 1993. Iss 1, No 7. P. 15–21.

Portnov A. M., Rakov L. T., Dubinchuk V. T. Neuporyadochennost' struktury kvartsa kak indikator orudneniya [Structural disorder in quartz as an indicator of mineralization]. Sovremennaya mineralogiya: ot teorii k praktike: materialy XI S"ezda Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva [Modern mineralogy: from theory to practice: proceedings of the XI Congress of the Russian Mineralogical Society]. St. Petersburg, 2010. P. 245–247.

Rakov L. T., Dubinchuk V. T. Novye podkhody k provedeniyu otsenki kachestva kvartsevoogo syr'ya [New approach to quality evaluation of quartz resources]. Novye metody tekhnologicheskoi mineralogii pri otsenke rud metallov i promyshlennykh mineralov: sb. nauch. statei po materialam Rossiiskogo seminaru po tekhnologicheskoi mineralogii [New technological mineralogy methods for evaluation of metallic and industrial mineral ores: collected scientific papers of Russian seminar on technological mineralogy]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2009. P. 78–82.

Rakov L. T., Milovidova N. D., Moiseev B. M., Ogurtsov V. G. Novyi metod otsenki kachestva kvartsevoogo syr'ya [New method of quality evaluation of quartz resources]. Razvedka i okhrana nedr [Use and conservation of mineral resources]. 1993. No 7. P. 36–38.

Rakov L. T., Tkachev A. V., Sakhnov A. A. Geneticheskii analiz kvartsa pegmatitov Mamsko-Chuiskogo slyudonosnogo raiona na osnove ispol'zovaniya raspredeleniya izomorfnykh primesei [Genetic analysis of quartz from pegmatites of the Mama-Chuya mica belt based on distribution of isomorphic impurities]. Geol. rud. Mestorozhdenii [Geology of ore deposits]. 2013. Vol. 55, No 1. P. 48–67.

Safonov Yu. G., Volkov A. V., Vol'fon A. A., Genkin A. D., Krylova T. L., Chugaev A. V. Zoloto-kvartsevoe mestorozhdenie Mayskoe (Severnaya Kareliya): geologicheskie i mineralogo-geokhimicheskie osobennosti, voprosy genezisa [Mayskoe gold-quartz

deposit (Northern Karelia). Geological and mineralogical-geochemical peculiar features, genesis issues]. GRM. 2003. Vol. 45, No 5. P. 429–451.

Svetova E. N., Kuznetsov S. K., Shanina S. N., Filippov V. N. Elementy-primesi v kvartse i osobo chistoe kvartsevoe syr'e [Trace elements in quartz and high-purity raw quartz]. Sb. nauchnykh statei po materialam V Rossiiskogo seminaru po tekhnologicheskoi mineralogii «Mineralogo-tekhnologicheskaya otsenka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh i problemy raskrytiya mineralov» [Collected scientific papers of the V Russian seminar on technological mineralogy "Mineralogical and technological evaluation of mineral deposits and problems of mineral extraction"]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2011. P. 140–146.

Soroka V. V., Lazorina E. I., Stepanchuk V. N. K teorii travleniya kvartsa v plavikovoii kislyote [On the theory of quartz etching with hydrofluoric acid]. Kristallografiya [Crystallography]. 1977. Vol. 22, iss. 3. P. 619–621.

Fizicheskaya entsiklopediya [Physical encyclopedia]. Vol. 2. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1988.

Chandrasekar S. Zhidkie kristally [Liquid crystals]. Eds. A. A. Vedernikov, I. G. Chistyakov. Moscow: Mir, 1980. 343 p.

Yurgenson G. A. Tipomorfizm i rudonosnost' zhil'nogo kvartsa [Typomorphism and mineralization of vein quartz]. Moscow: Nedra, 1984. 149 p.

de Zhen P. Fizika zhidkikh kristallov [The physics of liquid crystals]. Moscow: Mir, 1977.

Ernsberger F. M. J. Phys. and Chem. Solids. 1960. Vol. 13. P. 347.

Passchier C. W., Trouw R. A. J. Microtectonics. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1996. P. 289.

Shchiptsov V. V., Scamnitskaya L. S., Voytekhovskiy Yu. L., Bubnova T. P., Dubinchuk V. T., Rakov L. T. Geological and mineralogical-technological appraisal of quartz as a raw material from the Karelia-Kola quartz-bearing province, a new promising region of Russia. Abstracts and Proceedings of the Geological Society of Norway. The Arctic Days 2014. Norsk Geologisk Forening c/o Norges geologiske undersokelse N-7491 Trondheim. P. 80–81.

Received April 03, 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Раков Леонид Тихонович

д. г.-м. н.
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ)
Старомонетный пер., 35, Москва, Россия, 119017
эл. почта: rakovlt@mail.ru

Щипцов Владимир Владимирович

директор, д. г.-м. н.
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: shchipts@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Rakov, Leonid

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences (IGEM RAS)
35 Staromonetnyi per., 119017 Moscow, Russia
e-mail: rakovlt@mail.ru

Shchiptsov, Vladimir

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: shchipts@krc.karelia.ru

Дубинчук Виктор Тимофеевич

д. г.-м. н.

Всероссийский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМС)

Старомонетный пер., 31, Москва, Россия, 119017

эл. почта: Vic_dubinchuk@mail.ru

Скамницкая Любовь Степановна

старший научный сотрудник

Институт геологии Карельского научного центра РАН

ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910

эл. почта: skamnits@krc.karelia.ru

Dubinchuk, Viktor

All-Russian Research Institute of Mineral Resources (VIMS)

31 Staromonetnyi per., 119017 Moscow, Russia

e-mail: Vic_dubinchuk@mail.ru

Skamnitskaya, Lyubov'

Institute of Geology, Karelian Research Centre,

Russian Academy of Sciences

11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia

e-mail: skamnits@krc.karelia.ru