Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 110–120
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 110–120
DOI: 10.17076/geo2451

УДК 549.514.5:552.18

ДЮМОРТЬЕРИТ В РОЗОВОМ КВАРЦЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПИРТОСТРОВ, СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ

Е. Н. Светова[1]*, С. И. Исаенко[2]

[1] *Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *ensvetova@krc.karelia.ru*

[2] *Институт геологии им. академика Н. П. Юшкина, ФИЦ «Коми научный центр УрО РАН» (ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 167982)*

Впервые детально исследован розовый пегматитовый кварц проявления Пиртостров в Лоухском р-не Карелии. В пределах пегматитовах жил глубокометаморфизованного хетоламбинского комплекса, представленного амфиболитами и амфиболовыми гнейсами, розовый кварц наряду с белыми и дымчатыми разностями слагает крупные блоки. Кварц образует в жилах плотные зернистые агрегаты, имеет полупрозрачную структуру с обилием тонких трещин. Для выявления петрографических и структурных особенностей, определения микроэлементного состава кварца использованы оптическая и электронная сканирующая микроскопия, порошковая рентгеновская дифрактометрия, КР-спектроскопия, атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой. Микроскопическими методами в кварце установлены микроминеральные включения полевых шпатов, мусковита и кальцита, а также многочисленные, хаотично ориентированные игольчатые включения толщиной около 0,5 мкм, идентифицированные методом КР-спектроскопии как боросиликатный минерал дюмортьерит $Al_7(BO_3)(SiO_4)_3(O,OH)_3$. Субмикроскопические включения дюмортьерита, выявляемые в розовом массивном кварце гранитных пегматитов различных регионов мира, как показывают исследования, определяют розовую окраску кварца. Результаты микроэлементного ICP-AES анализа кварца проявления Пиртостров свидетельствуют о повышенном содержании бора и алюминия, что косвенно указывает на возможное присутствие включений боросиликата алюминия в матрице кварца. Предположительно, образование дюмортьерита в пегматитовом кварце происходило на завершающих стадиях эволюции кислых магм, когда остаточные гидротермальные флюиды, обогащенные кремнием, алюминием и бором кристаллизуются в режиме снижения температуры и давления. В условиях высоких температур кристаллическая решетка кварца захватывает примесные элементы, а в ходе остывания пегматитового тела происходит ее сжатие и вынос инородных химических элементов в межкристаллическое пространство, где происходит зарождение центров кристаллизации новой микроскопической фазы. Условия дефицита железа и магния препятствовали росту турмалина (шерла) и благоприятствовали синтезу дюмортьерита.

Ключевые слова: дюмортьерит; розовый кварц; Северная Карелия; Пиртостров; КР-спектроскопия, СЭМ-ЭДС анализ

Для цитирования: Светова Е. Н., Исаенко С. И. Дюмортьерит в розовом кварце проявления Пиртостров, Северная Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 110–120. doi: 10.17076/geo2451

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственных заданий ИГ КарНЦ РАН (№ 1022040400124-6-1.5.5) и ИГ Коми НЦ УрО РАН (№ 122040600009-2).

E. N. Svetova[1]*, S. I. Isaenko[2]. DUMORTIERITE IN ROSE QUARTZ FROM THE PIRTOSTROV OCCURRENCE IN NORTHERN KARELIA

[1] *Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *ensvetova@krc.kerelia.ru*

[2] *Institute of Geology, Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (54 Pervomaiskaya St., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia)*

The article reports the first ever detailed study of rose pegmatite quartz from the Pirtostrov occurrence in the Loukhsky District of Karelia. Rose quartz, together with white and smoky quartz varieties, forms large blocks within the pegmatite veins of the deeply metamorphosed Khetolamba complex, which consists of amphibolites and amphibole gneisses. The quartz forms dense granular aggregates in the veins and has a translucent structure with numerous fine cracks. Optical and scanning electron microscopy, powder X-ray diffraction, Raman spectroscopy, and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry were used to identify the quartz petrographic and structural features and determine its trace element composition. Microscopic methods revealed micromineral inclusions of feldspar, muscovite, and calcite, as well as numerous, randomly oriented acicular inclusions approximately 0.5 μm thick, identified by Raman spectroscopy as the borosilicate mineral dumortierite $Al_7(BO_3)(SiO_4)_3(O,OH)_3$. According to research, submicroscopic dumortierite inclusions in massive rose quartz from granite pegmatites in various regions of the world are responsible for the rose coloration. The results of ICP-AES trace-element analysis of quartz from the Pirtostrov occurrence indicate elevated boron and aluminum levels, suggesting a possible presence of aluminum borosilicate inclusions in the quartz matrix. Dumortierite is supposed to have formed in pegmatitic quartz during the final stages of acid magma evolution, when residual hydrothermal fluids enriched in silicon, aluminum, and boron crystallized under decreasing temperature and pressure. Under high temperature conditions, the quartz crystal lattice captures trace elements, and as the pegmatite body cools, it contracts, forcing these elements into the intercrystalline space, where crystallization centers for a new microscopic phase nucleate. Iron- and magnesium-deficient conditions inhibited the growth of tourmaline (schorl) and favored the synthesis of dumortierite.

Keywords: rose quartz; Northern Karelia; Pirtostrov; Raman spectroscopy; SEM-EDS analysis

For citation: Svetova E. N., Isaenko S. I. Dumortierite in rose quartz from the Pirtostrov occurrence in Northern Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 10. P. 110–120. doi: 10.17076/geo2451

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to IG KarRC RAS. (No. 1022040400124-6-1.5.5) and the IG Komi SC UB RAS (No. 122040600009-2).

Введение

Розовый кварц является относительно редкой цветной разновидностью кварца и в природе представлен двумя основными типами. К первому типу относится массивный полупрозрачный кварц, часто встречающийся в ядерных зонах гранитных пегматитов, где он формирует отдельные, иногда до нескольких кубических метров участки в белом кварце или связывает калиевые полевые шпаты в блоковых зонах пегматитов [Лабунцов, 1939; Cassedanne, Roditi, 1991]. Цвет массивного розового кварца может варьировать от бледно-розового до ярко-малинового. Сопутствующими минералами обычно являются микроклин, альбит,

мусковит, шерл, берилл. На полированной поверхности шаров или кабошонов из такого кварца нередко проявляется эффект астеризма – отражение света в виде шестилучевой звезды [Schmetzer, Krzemnicki, 2006]. Месторождения розового пегматитового кварца известны в Бразилии, США, Африке, Мадагаскаре, Казахстане, России (Карелия, Забайкалье) и других странах. Согласно анализа газово-жидких и расплавных включений его кристаллизация происходила при температуре 600–700 °С и давлении до 3 кбар [Долгов, 1969]. Второй тип розового кварца представлен друзовыми скоплениями хорошо ограненных прозрачных кристаллов размером до первых сантиметров. В природе они встречаются достаточно редко. Температура образования кристаллов друзовидного розового кварца не превышает 300 °С, а давление – первых сотен атмосфер [Балицкий и др., 1996].

Многочисленными исследованиями, проводимыми в последнее столетие, предложено множество возможных механизмов окраски как массивного, так и друзовидного розового кварца, но единого мнения по этому поводу не достигнуто [Watson, Beard, 1917; Holden, 1924; Rossman, 1994; Goreva et al., 2001; Kibar et al., 2007]. Основываясь на результатах химического анализа, Е. Холден [1924] полагал, что розовый цвет массивного кварца обусловлен пигментацией Mn^{3+}. Позднее, исследователи этой разновидности кварца приписывали розовый цвет присутствию ионов Ti^{3+} в кристаллической структуре кварца [Wright et al., 1963; Smith et al., 1978; Cohen, Makar, 1984]. Окраска друзовидного кварца объяснялась радиационными электронно-дырочными центрами, возникающими при парном замещении соседних ионов Si^{4+} в тетраэдрах решетки кварца разновалентными ионами – Al^{3+} и P^{5+} [Maschmeyer, Lehmann, 1983]. Последняя модель дополнительно была поддержана экспериментами В. С. Балицкого с соавторами [1996], которые синтезировали монокристаллический розовый кварц, содержащий эти типы электронно-дырочных центров.

Вместе с тем, во многих исследованиях розового кварца из ядерных зон пегматитов отмечается наличие в нем мельчайших волокнистых включений. Первоначально ошибочно считалось, что это рутиловые иглы, обусловливающие слабую прозрачность, характерную для большинства образцов и астеризм [например, Holden, 1924; Wright et al., 1963]. К. Эпплин и Б. Хикс [1987], выделив субмикроскопические волокна из образцов розового кварца из горного хребта Руби-Рэндж (штат Монтана, США), идентифицировали их по рентгенограммам как дюмортьерит – сложный боросиликат алюминия $Al_7(BO_3)(SiO_4)_3(O,OH)_3$ [Alexander et al., 2026]. Чтобы проверить, является ли это частным случаем или общим правилом, группа ученых из Калифорнийского университета [Goreva et al., 2001] изучила образцы розового пегматитового и гидротермального жильного кварца из 29-ти различных месторождений мира, включая Бразилию, Аргентину, Мадагаскар, Намибию, США, Норвегию, Россию (Урал). Во всех 29-ти локациях внутри кварца (за исключением образца ограненного розового кристалла) были найдены идентичные волокна дюмортьерита толщиной 0,1–0,5 мкм. Дальнейшие исследования авторов показали, что кристаллическая структура этого «розово-кварцевого» дюмортьерита немного отличается от стандартного синего дюмортьерита, поскольку он имеет «сверхрешетку» с увеличенными в два раза параметрами осей *a* и *b* [Ma et al., 2002]. В связи с этим ученые назвали эти волокна «dumortierite-related fibers», т. е. «родственные дюмортьериту», а розовый цвет волокон объяснили наличием межвалентного переноса заряда между Fe^{2+} и Ti^{4+}, происходящего в позиции M1 структуры дюмортьерита.

Месторождения и проявления розового кварца хорошо известны на территории Республики Карелия и связаны преимущественно с пегматитовыми жилами и докембрийскими метаморфическими комплексами Беломорской провинции [Минерально-сырьевая..., 2006]. Розовый кварц встречается в жилах месторождений Тэдино, Хетоламбина, Черная Салма, Никонова Варакка, Малиновая Варакка, Блинковые Варакки, проявлениях Лисий Бор-1, Пиртостров, жиле Панфилова Варакка (Лоухский р-н), а также замечен в кварцевых жилах проявлений Шуерецкий участок и Шуйостров (Беломорский р-н).

В данной работе впервые проведено детальное минералогическое изучение розового кварца из пегматитовой жилы проявления Пиртостров. Историческая копь, заложенная по данной пегматитовой жиле на берегу оз. Сонозеро, была описана советским минералогом А. Н. Лабунцовым [1939]. Именно здесь, по его оценке, были найдены образцы кварца с наиболее интенсивной розовой окраской. В результате настоящего исследования в изучаемом кварце были выявлены тонкоигольчатые включения дюмортьерита, по-видимому, подтверждающие связь с ними розовой окраски кварца.

Геологическая характеристика проявления Пиртостров

Проявление Пиртостров находится приблизительно в 20 км к северо-востоку от железнодорожной станции и п. Амбарный в месте соединения протокой оз. Юлозеро и оз. Сонозеро на одноименном острове. Четыре сближенные силекситовые кварцевые жилы ветвящейся формы залегают в пределах интрузии габброноритов, прорывающих породы глубокометаморфизованного хетоламбинского комплекса мезоархейского (2,9–2,8 млрд лет) возраста [Гродницкий, 1982; Данилевская и др., 2004]. Породы комплекса представлены амфиболитами и амфиболовыми гнейсами. Формирование пегматитовых жил связано со свекофеннской эпохой тектоно-термальной активизации (1,85–1,7 млрд лет). В пределах жил выделяются блоки, сложенные белым, дымчатым и розовым кварцем, достигающие в размере 5 × 12 м. К наиболее эффектной разновидности относится розовый полупрозрачный кварц, образующий плотные зернистые агрегаты.

Объект и методы исследования

Исследован образец розового кварца из фондов музея Геологии докембрия Института геологии КарНЦ РАН (коллекция В. В. Щипцова). Образец представлен массивным агрегатом нежно-розового цвета без видимых отдельно оформленных кристаллов, имеет полупрозрачную структуру с обилием тонких трещин (рис. 1).

Минералого-петрографическое изучение кварца проведено с использованием оптического микроскопа ПОЛАМ Р-211 и сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH (Tescan) с энерго-дисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments) в ЦКП ФИЦ «КарНЦ РАН», Петрозаводск. Порошковая рентгенограмма кварца получена на рентгеновском дифрактометре Thermo Scientific ARL X'TRA при следующих параметрах: излучение CuKα, напряжение 40 кВ, ток 30 мА, диапазон записи 5–75 °2θ с шагом 0,4 °2θ/мин. Для прецизионного измерения параметров элементарной ячейки рентгенограмма дополнительно записывалась в интервале углов отражения 136–156 °2θ с шагом 0,01 °2θ/мин. Параметры элементарной ячейки *a* и *c* определены с точностью ± 0,0001 Å, объем *V* – с точностью ± 0,01 Å^3. Определение концентрации элементов-примесей в кварце выполнено методом ICP-AES на спектрометре JY 38 (Jobin Yvon, Франция) в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва). Предварительно измельченный кварц навеской 2 г разлагался в автоклаве в смеси (8 мл конц. HF + 0,2 мл HNO_3 + 0,2 мл маннита 2 %) с последующим упариванием в стеклоуглеродных тиглях в открытой системе. Анализировался полученный осадок, растворенный в 1,2 мл 1 М HCl. Идентификация дюмортьерита методом КР-спектроскопии проводилась в ЦКП «Геонаука» (ИГ ФИЦ «КомиНЦ УрО РАН», Сыктывкар) на высокоразрешающем спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon). Параметры регистрации спектров: He-Ne лазер (выходная мощность 2–20 мВт, λ = 632,8 нм), решетка спектрометра 600 ш/мм, размер конфокального отверстия – 300 мкм, щели – 100 мкм, объектив × 100, время накопления сигнала – 5 сек., количество измерений на одном участке спектрального диапазона – 10–20. Спектры регистрировались при комнатной температуре в диапазоне 100–2000 см$^{-1}$.



Рис. 1. Розовый кварц из пегматитов проявления Пиртостров (Лоухский р-н, Карелия). Выставочный образец музея Геологии докембрия (из коллекции В. В. Щипцова). Размер образца: 10 × 13 × 6 см

Fig. 1. Rose quartz from the pegmatite of the Pirtostrov occurrence (Loukhi District, Karelia). Exhibition specimen at the Precambrian Geology Museum (from the collection of V. V. Shchiptsov). Sample size: 10 × 13 × 6 cm

Результаты и обсуждение

По данным изучения шлифов в проходящем свете кварц имеет крупно-гигантозернистую структуру, представлен зернами различной формы размерами от 1 × 2 до 5 × 10 мм (рис. 2, А, Б). В большинстве крупных зерен наблюдается параллельно-линейное блокование. Границы зерен извилистые, бухтообразные.

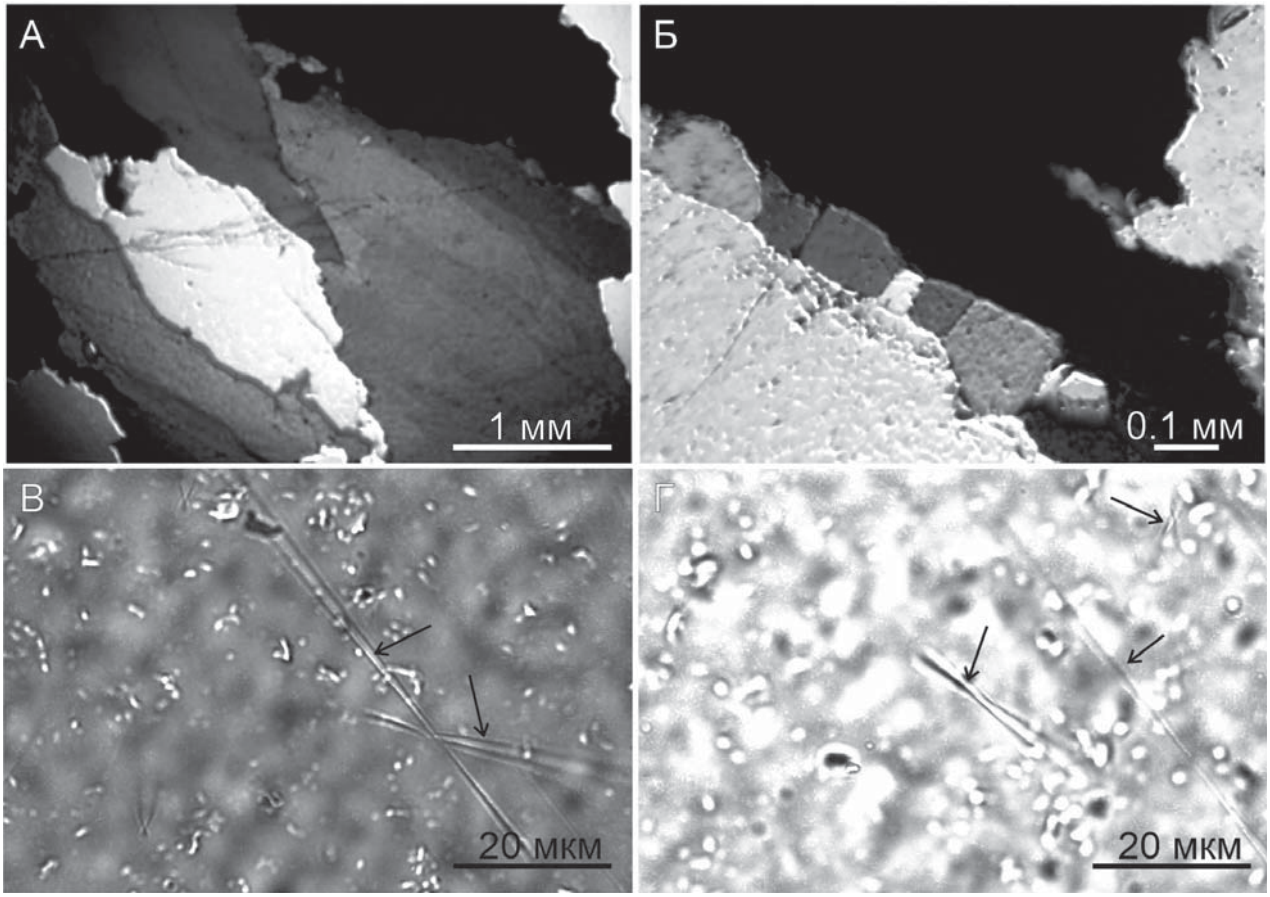


Рис. 2. Фотографии шлифов розового кварца в проходящем свете: А – параллельно-линейное блокование в крупных зернах кварца; Б – зерна новообразованного кварца по границе первичного зерна кварца; В, Г – тонкоигольчатые включения в кварце отмечены стрелками. Фото (А, Б) – с поляризатором, (В, Г) – без поляризатора

Fig. 2. Transmitted-light photomicrographs of the thin sections of rose quartz: А – parallel-linear blocking in large quartz grains; Б – grains of newly formed quartz along the boundary of a primary quartz grain; В, Г – fine-needle inclusions in quartz are indicated by arrows. А, Б – under crossed polars, В, Г – under plane-polarized light

Присутствуют поздние разнонаправленные трещины, пересекающие по несколько зерен. По границам крупных зерен, а также внутри блокованных зерен кварца наблюдаются микрозерна новообразованного кварца округлой, овальной, пластинчатой формы с ровными и извилистыми краями и ровным погасанием (рис. 2, А, Б). Размер таких зерен от 0,02 × 0,03 до 0,3 × 1,3 мм. В зернах кварца вдоль поздних трещин и на участках блокования развиты многочисленные газово-жидкие включения размером менее 10 мкм. Выявлены редкие микровключения тонкопластинчатой слюды, полевых шпатов и кальцита. При большом увеличении (× 100) в кварце визуализируются множественные тонкоигольчатые включения, приблизительно одинаковой формы, напоминающей песочные часы – широкие на концах и узкие посередине (рис. 2, В, Г). В небольшом поле зрения распределение коротких иголок беспорядочное и редкое, без явной симметрии. Толщина иголок составляет около 0,5 мкм, а длина различна. Следует заметить, что подобные включения отмечались нами ранее при технологическом изучении обломков розового кварца из отвалов пегматитовых месторождений Чупинского ГОКа (Лоухский р-н, Карелия) и не встречались в молочно-белых, дымчатых и бесцветных разностях того же кварца [Светова и др., 2025].

На СЭМ-изображениях тонкоигольчатые включения также хорошо выявляются (рис. 3, А, Б). ЭДС анализ иголок показал, что они имеют в химическом составе Al, Si, O, и, по-видимому, содержат другие, не определяемые детектором элементы, поскольку общая сумма анализа имеет небольшой дефицит. Ввиду малой толщины иголок, возможность точного определения их состава также технически ограничена диаметром электронного пучка.

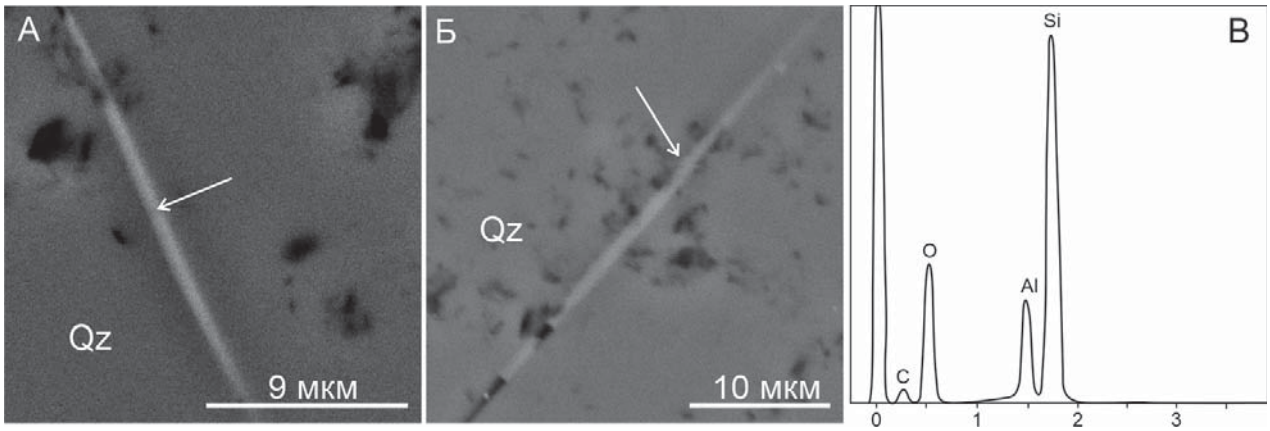


Рис. 3. BSE-изображения тонкоигольчатых включений в розовом кварце (А, Б) и соответствующий им энергодисперсионный рентгеновский спектр (В)

Fig. 3. BSE-images of fine-needle inclusions in the rose quartz (А, Б) and the corresponding energy-dispersive X-ray spectrum (В)

На порошковой дифрактограмме розового кварца фиксируются исключительно отражения α-кварца. Рассчитанные параметры элементарной ячейки (*a* – 4,9136 Å; *c* – от 5,4052 Å; *V* – 113,02 Å^3) в пределах погрешности измерений идентичны параметрам ячейки бесцветного кристаллического кварца.

В результате локального анализа методом КР-спектроскопии получены спектры игольчатых включений и вмещающего их кварца (рис. 4). На КР-спектре минерала хозяина фиксируются характеристические линии кварца с пиками 128, 205, 355, 465, 695, 807, 1082, 1158 см$^{-1}$. Значимых различий между спектром изучаемого розового кварца и стандартным спектром кристаллического бесцветного кварца не обнаружено.

Согласно опубликованным данным [Goreva et al., 2001; Hu, Guo, 2018], положения максимумов линий в КР-спектрах дюмортьерита в основном находятся вблизи 205–209, 265–280, 403–405, 508, 950 и 1000 см$^{-1}$, из которых два последних пика являются наиболее интенсивными. Предполагается, что эти пики относятся к различным колебательным модам Al-O и B-O [Li et al., 2015; Atuchin et al., 2017]. Дюмортьерит $Al_7(BO_3)(SiO_4)_3(O,OH)_3$ имеет кристаллическую структуру островного типа [Applin, Hicks, 1987]. Присутствие алюминия в октаэдрической координации приводит к смещению симметричных колебаний растяжения немостикового кислорода Si-O (800–1200 см$^{-1}$) в структуре. Полоса с пиком 850 см$^{-1}$ на КР-спектре, соответствующим тетраэдру Si-O, смещается в сторону увеличения относительного волнового числа и появляется при 950 см$^{-1}$ [Akaogi et al., 1984]. Характерные пики 950 см$^{-1}$ и 1000 см$^{-1}$ игольчатых кристаллов отражают симметричные колебания растяжения немостикового кислорода Si-O.

На КР-спектрах иголок в изучаемом нами кварце всегда присутствует характерный дублет с пиками 941 и 983 см$^{-1}$, а также ряд интенсивных линий с положениями 128, 205, 264, 355, 465, 696, 807, 1080, 1160 см$^{-1}$, часть из которых может быть отнесена к кварцу (рис. 4). Наличие линий кварца на КР-спектрах связано с тем, что область сбора сигнала составляла 3 мкм, что превышает толщину игольчатых включений, и происходит одновременное измерение включения и вмещающего его кварца. По данным КР-спектроскопии игольчатые включения в розовом кварце Пиртострова в целом имеют соответствие с дюмортьеритом, обнаруженным в образцах розового кварца других регионов [Goreva et al., 2001; Hu, Guo, 2018] и с эталонным спектром дюмортьерита (Сан-Диего, Калифорния, США, #X050064) из базы данных Rruff.info (см. рис. 4). Наблюдаемое отличное от эталона соотношение интенсивностей полос 941 и 983 см$^{-1}$ мы связываем с анизотропией дюмортьерита.

Методом микроэлементного ICP-AES анализа среди примесей в кварце установлены (ppm): Ca – 110, Al – 59, Na – 27, Fe – 12, Ti – 7,4, K – 7, Mg – 5,8, Cu – 4,1, B – 3,4, Li – 0,34, Mn – 0,23. Повышенное содержание Ca, Al, Na, K, Fe связано в основном с их присутствием в составе микроминеральных включений полевых шпатов, кальцита и слюды. Обращает на себя внимание высокое содержание бора в розовом кварце (3,4 ppm), которое превышает типовые значения этого элемента, установленные нами ранее в розовом (2,5–2,9 ppm), молочно-белом (1,5 ppm) и дымчато-сером (1,6–1,8 ppm) пегматитовом кварце из техногенных отвалов

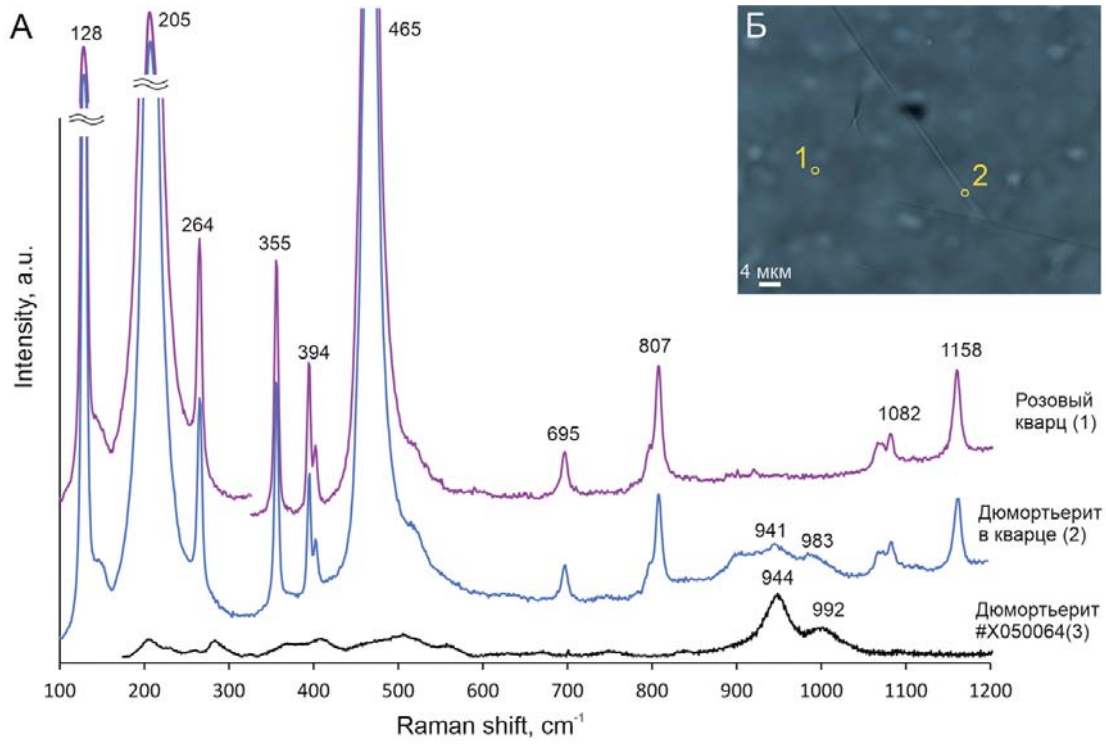


Рис. 4. А – КР-спектры розового пегматитового кварца проявления Пиртостров (1), тонкоигольчатого включения дюмортьерита из розового кварца (2), эталонного образца дюмортьерита (Сан-Диего, Калифорния, США, #X050064) из базы данных Ruff.info (3). Б – фотография игольчатого включения в кварце в проходящем свете с положением точек анализа (1) и (2)

Fig. 4. А – Raman spectra of rose pegmatite quartz from the Pirtostrov occurrence (1), fine-acicular dumortierite inclusion from rose quartz (2), reference dumortierite sample (San Diego, California, USA, #X050064) from the Ruff.info database (3). Б – transmitted-light photomicrographs of the acicular inclusion in quartz with the positions of analysis points (1) and (2)

Чупинского ГОКа [Светова и др., 2025]. Однако в целом видна тенденция концентрирования бора в розовом кварце, при том, что для других элементов связь их содержаний с принадлежностью кварца к какой-либо из цветовых разновидностей не прослеживалась. Отметим, что бор может накапливаться в пегматитовом кварце в виде включений боросиликатных минералов (дюмортьерита, турмалина), а также входить в кристаллическую решетку при замещении $Si^{4+} \rightarrow B^{3+}$ [Baron et al., 2015]. Накопление бора в пегматитовом кварце, вероятнее всего, связано с его транспортом в виде летучего комплекса BF_3, которым обогащен минералообразующий магматический флюид [Götze et al., 2012]. По данным прецизионного LA-ICP-MS анализа генетически различных типов кварца Норвегии, концентрация бора в пегматитовом кварце р-на Фроланн может достигать 2,7 ppm, в то время как в кварце гидротермальных жил, кварцитов и гранитов содержание бора находится ниже предела обнаружения (1,3 ppm) данного метода [Müller, Koch-Müller, 2009].

Известно, что дюмортьерит является вторым по распространенности боросиликатным минералом после турмалина и встречается, главным образом, в качестве второстепенного компонента в высокотемпературных богатых алюминием и бором метаморфических породах, пегматитах, иногда в гранитоидах и кварцевых жилах [Garašić et al., 2024 и ссылки в ней]. К настоящему времени процессы минерализации дюмортьерита и факторы, контролирующие его распространение, изучены ограничено. В частности, показано, что в пегматитовых жилах эклогитов Салмы Беломорской эклогитовой провинции (Карелия) образование дюмортьерита в ассоциации с полевыми шпатами, биотитом, мусковитом, кианитом, корундом, связано с наложенным метаморфизмом в условиях гранулитовой фации повышенных давлений и температуры 850–900 °С [Докукина и др., 2017]. В метаморфическую стадию также произошла кристаллизация дюмортьерита в гранитных пегматитах Вирорко (Пампасские хребты, центральная Аргентина) [Galliski et al., 2012]. Минерализация дюмортьерита

в кианит-мусковит-дюмортьеритовых жилах, встречающихся в метапелитах Амгаонского гнейсового комплекса (регион Саколи, Центральная Индия), явилась результатом гидротермальной активности, возможно, в переходной магматически-гидротермальной среде, вероятно, при $P > 2{,}5$ кбар и $400° < T < 550°$, что может быть связано с внедрением гранитных интрузий в этом районе [Dandekar et al., 2025].

Интересно, что в кристаллах горного хрусталя дюмортьерит может присутствовать в виде визуально различимых радиально-лучистых пучков и розеток игольчатых кристаллов синих оттенков размером до первых сантиметров, создающих эффект морозных узоров (так называемый дюмортьеритовый кварц, имеющий высокую коллекционную ценность) [Renfro et al., 2015]. Предполагается, что формирование таких включений происходило из пересыщенных бором и алюминием горячих растворов в результате первичной (или параллельной с осаждением кремнезема) кристаллизации дюмортьерита и последующим захватом их растущими гранями кристаллов кварца. Под воздействием давления в направлении роста кварца игольчатые кристаллы ориентируются параллельно или в виде радиально-лучистых пучков. Условия дефицита железа и магния препятствуют росту турмалина (шерла) и благоприятствуют синтезу боросиликата алюминия – дюмортьериту.

В массивном розовом кварце дюмортьерит, как было показано в нашем и других исследованиях [Goreva et al., 2001; Hu, Guo, 2018], образует тончайшую субмикроскопическую взвесь тонких иголок, концентрация которых определяет насыщенность розового оттенка. Аналогичным примером роста игольчатых кристаллов может служить «рутиловый кварц», внутри которого находятся тончайшие игольчатые или волосовидные включения рутила. Современные исследования выделяют два основных механизма образования рутиловых игл в кварце: механизм экссолюции (распад твердого раствора) и сингенетический рост (первичный захват) [Li et al., 2011]. Процесс экссолюции подразумевает, что при высоких температурах кварц способен вмещать в кристаллическую решетку значительное количество титана. С понижением температуры растворимость титана падает, он становится избыточным и выделяется в виде собственной фазы – микроскопических игл рутила внутри кристалла хозяина. В случае сингенетического роста, титан, высвобождающийся из флюида, сначала образует тонкие иглы рутила, а растущие грани кварца просто «обволакивают» и механически захватывают уже существующие или одновременно растущие рутиловые иглы. Исходя из микроскопического размера дюмортьеритовых включений в розовом кварце, их морфологии и однородности распределения, для их образования наиболее предпочтительным, на наш взгляд, является процесс экссолюции. Формирование дюмортьерита в пегматитовом кварце происходило на завершающих стадиях эволюции кислых магм, когда остаточные гидротермальные флюиды, обогащенные кремнием, алюминием и бором, кристаллизуются в режиме снижения температуры и давления. На этапе поздней магматической или ранней гидротермальной кристаллизации пегматита кварц растет при температуре выше 500–600 °С [Долгов, 1969; Müller et al., 2015]. В таких условиях кристаллическая решетка кварца способна вмещать в себя примеси бора и алюминия. В результате образуется единый, но нестабильный пересыщенный раствор. По мере остывания пегматитового тела температура падает, кристаллическая решетка кварца начинает сжиматься и стремится очиститься, «выталкивая» инородные химические элементы в межкристаллическое пространство или локализуя их в дефектах структуры. В дефектных областях атомы перегруппируются и закладывают центры кристаллизации новой микроскопической фазы. Полноценно разрастись внутри прочной матрицы кварца новый минерал не может ввиду отсутствия свободного пространства. Поэтому рост идет ограниченно: кристаллы приобретают форму тончайших иголок. Таким образом, внутри прозрачного пегматитового кварца возникает микроскопическая «сеть» дюмортьеритовых игл, которая придает кварцу розовый оттенок.

Заключение

В результате проведенного минералогического исследования массивного розового кварца из пегматитовой жилы проявления Пиртостров в Карелии были выявлены многочисленные равномерно распределенные в объеме кварца игольчатые включения толщиной около 0,5 мкм, идентифицированные методом КР-спектроскопии как боросиликатный минерал дюмортьерит $Al_7(BO_3)(SiO_4)_3(O,OH)_3$. Микроскопический размер дюмортьеритовых включений, их морфология и характер распределения позволили предположить, что они образовались из пересыщенных кремнием, бором и алюминием флюидов в результате процесса экссолюции на этапе поздней магматической или ранней гидротермальной

кристаллизации пегматита. Условия дефицита железа и магния препятствовали росту турмалина (шерла) и благоприятствовали синтезу дюмортьерита.

Литература

Балицкий В.С., Махина И.Б., Емельченко А.Г., Марьин А.А., Шингли Д., Фрич Э., Койвула Д. Экспериментальное изучение условий образования кристаллов розового фосфоросодержащего кварца и причины его редкой встречаемости в природе // Геохимия. 1996. № 11. С. 1074–1081.

Гродницкий Л.Л. Гранитные пегматиты Балтийского щита. Л.: Наука, 1982. 295 с.

Данилевская Л.А., Скамницкая Л.С., Щипцов В.В. Кварцевое сырье Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 226 с.

Докукина К.А., Конилов А.Н., Ван К.В., Минц М.В. Дюмортьерит- и корундсодержащие кварц-полевошпат-слюдяные пегматоидные породы Беломорской эклогитовой провинции: пример плавления фенгит+кварц // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477, № 3. С. 337–341.

Долгов Ю.А. Становление гранитных интрузий и образование камерных пегматитов // Условия образования пьезооптических минералов в пегматитах / Ред. В.П. Бутузов. Труды Всесоюзного научно-исследовательского института синтеза минерального сырья (ВНИИСИМС). М.: Недра, 1969. С. 3–22.

Лабунцов А.Н. Пегматиты СССР. Т. 2. Пегматиты Северной Карелии и их минералы. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1939. 260 с.

Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2. / Ред. В.П. Михайлов, В.Н. Аминов. Петрозаводск: Карелия, 2006. С. 87–102.

Светова Е.Н., Бубнова Т.П., Пикулев В.Б., Логинова С.В. Технологические свойства кварца из техногенных отвалов слюдоносных пегматитов Северной Карелии (Россия) // Журнал прикладной спектроскопии. 2025. № 1. С. 51–58.

Akaogi M., Ross N.L., Mcmillan P., Navrotsky A. The Mg_2SiO_4 polymorphs (olivine, modified spinel and spinel) – thermodynamic properties from oxide melt solution calorimetry, phase relations, and models of lattice vibrations // American Mineralogist. 1984. Vol. 69, no. 5. P. 499–512.

Alexander V.D., Griffen D.T., Martin T.J. Crystal chemistry of some Fe- and Ti-poor dumortierites // American Mineralogist. 1986. Vol. 71. P. 786–794.

Applin K.R., Hicks B.D. Fibers of dumortierite in quartz // American Mineralogist. 1987. Vol. 72. P. 170–172.

Atuchin V.V., Subanakov A.K., Aleksandrovsky A.S., Bazarov B.G., Bazarova J.G., Dorzhieva S.G., Gavrilova T.A., Krylov A.S., Molokeev M.S., Oreshonkov A.S., Pugachev A.M., Tushinova Yu.L., Yelisseyev. Exploration of structural, thermal, vibrational and spectroscopic properties of new noncentrosymmetric double borate $Rb_3NdB_6O_{12}$ // Advanced Powder Technology. 2017. Vol. 28, no. 5. P. 1309–1315.

Baron M.A., Stalder R., Konzet, J., and Hauzenberger C.A. Formation conditions of quartz recorded by OH-point defectsexperimental and analytical approach // Phys. Chem. Miner. 2015. Vol. 42. P. 53–62. doi: 10.1007/s00269-014-0699-4, 2015

Cassedanne J.P., Roditi M. Crystallized and massive rose quartz deposits in Brazil // Journal of Gemmology. 1991. Vol. 22, no. 5. P. 273–286.

Cohen A.J., Makar L.N. Differing effects of ionizing radiation in massive and single crystal rose quartz // Neues Jahrbuch für Mineralogie-Monatshefte. 1984. Vol. 11. P. 513–521.

Dandekar S., Mariani E., Dandekar T.R., Khatirkar R.K., Pande K., Gardner J., Bagshaw H., Randive K., Peshwe D. Kyanite-muscovite-dumortierite vein mineralization mechanisms from advanced microstructural analysis using EBSD // American Mineralogist. 2025. Vol. 110, no. 7. P. 1034–1045. doi: 10.2138/am-2024-9380

Galliski M.A., Marquez-Zavalia M.F., Lira R., Cempirek J., Skoda R. Mineralogy and Origin of the Dumortierite-Bearing Pegmatites of Virorco, San Luis, Argentina // The Canadian Mineralogist. 2012. Vol. 50, no. 4. P. 873–894.

Garašić V., Lugović B., Krsnik M., Bilić Š., Meyer H.-P., Schuster R., Vrkljan M. First occurrence of dumortierite in Croatia: its chemical composition and appearance as an igneous mineral in leucogranite-hosted pegmatite // Geologia Croatica. 2024. Vol. 77, no. 1. P. 41–56. doi: 10.4154/gc.2024.01

Goreva J., Ma C., Rossman G.R. Fibrous nanoinclusions in massive rose quartz: The source of rose coloration // American Mineralogist. 2001. Vol. 86. P. 466–472.

Götze J., Schrön W., Möckel R., Heide K. The role of fluids in the formation of agates // Geochemistry. 2012. Vol. 72. P. 283–286. doi: 10.1016/j.chemer.2012.07.002

Holden E.F. The cause of color in rose quartz // American Mineralogist 1924. Vol. 9, no. 75–88. P. 101–8.

Hu Z., Guo Y. The Ecological Impact of Mining Rose Quartz with Needle-like Inclusions // Ekoloji. 2018. Vol. 27, no. 106. P. 1533–1541

Kibar R., Garcia-Guinea J., Çetin A., Selvi S., Karal T., Can N. Luminescent, optical and color properties of natural rose quartz // Radiation Measurements. 2007. Vol. 42, no. 9. P. 1548–1553.

Li X., Rusk B., Wang R., Morishita Yu., Watanabe Ya., Chen Z. Rutile inclusions in quartz crystals record decreasing temperature and pressure during the exhumation of the Su-Lu UHP metamorphic belt in Donghai, East China // American Mineralogist. 2011. Vol. 96. P. 964–973. doi: 10.2138/am.2011.3574.

Li X., Yang Y., Liu B., Kuang J. Electronic structure and Raman spectroscopy study of dibarium magnesium orthoborate, $Ba_2Mg(BO_3)_2$ // Vibrational Spectroscopy. 2015. Vol. 80. P. 53–58.

Ma C., Goreva J.S., Rossman J.S. Fibrous nanoinclusions in massive rose quartz: HRTEM and AEM investigations // American Mineralogist. 2002. Vol. 87, no. 2–3. P. 269–276.

Maschmeyer D., Lehmann G. A trapped-hole center causing rose coloration of natural quartz // Zeits. Kristall. 1983. Vol. 163. P. 181–196.

Müller A., Ihlen P.M., Snook B., Larsen R.B., Flem B., Bingen B., Williamson B.J. The chemistry of quartz in granitic pegmatites of southern Norway // Economic Geology. 2015. Vol. 110, no. 7. P. 1737–1757.

Müller A., Koch-Müller M. Hydrogen speciation and trace element contents of igneous, hydrothermal and metamorphic quartz from Norway // Mineralogical Magazine. 2009. Vol. 73, no. 4. P. 569–583. doi: 10.1180/minmag.2009.073.4.569

Renfro N., Sun Z., Koivula J. Dumortierite in Rock Crystal Quartz // Gems & Gemology. 2015. Vol. 51, no. 1. P. 100–102.

Rossman G.R. Colored varieties of the silica minerals // Reviews in Mineralogy. Vol. 29: Silica – Physical behavior, geochemistry and materials applications, Mineralogical Society of America / P. J. Heaney, C.T. Prewitt, G.V. Gibbs (eds.). Washington, 1994. P. 433–468.

Schmetzer K., Krzemnicki M. The orientation and symmetry of light spots and asterism in rose quartz spheres from Madagascar // The Journal of Gemmology. 2006. Vol. 30, no. 3. P. 183–191. doi: 10.15506/jog.2006.30.3.183

Smith G., Vance E.R., Hasan Z., Edgar A., Runciman W.A. A charge transfer mechanism for the colour of rose quartz // Physica Status Solidi (A). 1978. Vol. 46, no. 2. P. K135–K140.

Watson T.L., Beard R.E. The color of amethyst, rose, and blue varieties of quartz // Proceedings of the U.S. National Museum. 1917. Vol. 53. P. 553–63.

Wright P.M., Weil J.A., Buch T., and Anderson J.H. Titanium colour centers in rose quartz // Nature. 1963. Vol. 197. P. 246–248.

References

Akaogi M., Ross N.L., Mcmillan P., Navrotsky A. The Mg_2SiO_4 polymorphs (olivine, modified spinel and spinel) – thermodynamic properties from oxide melt solution calorimetry, phase relations, and models of lattice vibrations. *American Mineralogist.* 1984;69(5):499–512.

Alexander V.D., Griffen D.T., Martin T.J. Crystal chemistry of some Fe- and Ti-poor dumortierites. *American Mineralogist*. 1986;71:786–794.

Applin K.R., Hicks B.D. Fibers of dumortierite in quartz. *American Mineralogist*. 1987;72:170–172.

Atuchin V.V., Subanakov A.K., Aleksandrovsky A.S., Bazarov B.G., Bazarova J.G., Dorzhieva S.G., Gavrilova T.A., Krylov A. S., Molokeev M.S., Oreshonkov A.S., Pugachev A.M., Tushinova Yu. L., Yelisseyev A.P. Exploration of structural, thermal, vibrational and spectroscopic properties of new noncentrosymmetric double borate $Rb_3NdB_6O_{12}$. *Advanced Powder Technology*. 2017;28(5):1309–1315.

Balitsky V.S., Makhina I.B., Emel'chenko A.G., Maryin A.A., Shingli D., Fritch E., Koivula D. Experimental study of the conditions of formation of pink phosphorus-containing quartz crystals and the reasons for its rare occurrence in nature. *Geokhimiya = Geochemistry.* 1996;11:1074–1081. (In Russ.)

Baron M.A., Stalder R., Konzet J., Hauzenberger C.A. Formation conditions of quartz recorded by OH-point defects experimental and analytical approach. *Phys. Chem. Miner*. 2015;42:53–62. doi: 10.1007/s00269-014-0699-4

Cassedanne J.P., Roditi M. Crystallized and massive rose quartz deposits in Brazil. *Journal of Gemmology*. 1991;22(5):273–286.

Cohen A.J., Makar L.N. Differing effects of ionizing radiation in massive and single crystal rose quartz. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Monatshefte*. 1984;11:513–521.

Dandekar S., Mariani E., Dandekar T.R., Khatirkar R.K., Pande K., Gardner J., Bagshaw H., Randive K., Peshwe D. Kyanite-muscovite-dumortierite vein mineralization mechanisms from advanced microstructural analysis using EBSD. *American Mineralogist*. 2025;110(7):1034–1045. doi: 10.2138/am-2024-9380

Danilevskaya L.A., Skamnitskaya L.S., Shchiptsov V.V. Quartz raw materials of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. 226 p. (In Russ.)

Dokukina K.A., Konilov A.N., Van K.V., Mintz M.V. Dumortierite- and corundum-bearing quartz–feldspar–mica rocks of the Belomorian eclogite province: an example of melting of phengite + quartz. *Doklady akademii nauk = Doklady Earth Sciences.* 2017;477(3):337–341. (In Russ.)

Dolgov Yu.A. Formation of granite intrusions and formation of chamber pegmatites. In: Conditions of formation of piezooptic minerals in pegmatites / ed. by V.P. Butuzov. Transactions of the All-Union Research Institute for the Synthesis of Mineral Raw Materials (VNIISIMS). Moscow: Nedra; 1969. P. 3–22. (In Russ.)

Galliski M.A., Marquez-Zavalia M.F., Lira R., Cempirek J., Skoda R. Mineralogy and origin of the dumortierite-bearing pegmatites of Virorco, San Luis, Argentina. *The Canadian Mineralogist.* 2012;50(4):873–894.

Garašić V., Lugović B., Krsnik M., Bilić Š., Meyer H.-P., Schuster R., Vrkljan M. First occurrence of dumortierite in Croatia: its chemical composition and appearance as an igneous mineral in leucogranite-hosted pegmatite. *Geologia Croatica.* 2024;77(1):41–56. doi: 10.4154/gc.2024.01

Goreva J., Ma C., Rossman G.R. Fibrous nanoinclusions in massive rose quartz: the source of rose coloration. *American Mineralogist.* 2001;86:466–472.

Götze J., Schrön W., Möckel R., Heide K. The role of fluids in the formation of agates. *Geochemistry.* 2012;72:283–286. doi: 10.1016/j.chemer.2012.07.002

Grodnitsky L.L. Granite pegmatites of the Baltic Shield. Leningrad: Nauka; 1982. 295 p. (In Russ.)

Holden E.F. The cause of color in rose quartz. *American Mineralogist*. 1924;9(75–88):101–8.

Hu Z., Guo Y. The ecological impact of mining rose quartz with needle-like inclusions. *Ekoloji.* 2018;27(106):1533–1541.

Kibar R., Garcia-Guinea J., Çetin A., Selvi S., Karal T., Can N. Luminescent, optical and color properties of natural rose quartz. *Radiation Measurements.* 2007;42(9):1548–1553.

Labuntsov A.N. Pegmatites of the USSR. Vol. 2. Pegmatites of North Karelia and their minerals. Moscow. Leningrad: The USSR Academy of Sciences Publ.; 1939. 260 p. (In Russ.)

Li X., Rusk B., Wang R., Morishita Yu., Watanabe Ya., Chen Z. Rutile inclusions in quartz crystals record

decreasing temperature and pressure during the exhumation of the Su-Lu UHP metamorphic belt in Donghai, East China. *American Mineralogist*. 2011;96:964–973. doi: 10.2138/am.2011.3574

Li X., Yang Y., Liu B., Kuang J. Electronic structure and Raman spectroscopy study of dibarium magnesium orthoborate, $Ba_2Mg(BO_3)_2$. *Vibrational Spectroscopy.* 2015;80:53–58.

Ma C., Goreva J.S., Rossman J.S. Fibrous nanoinclusions in massive rose quartz: HRTEM and AEM investigations. *American Mineralogist.* 2002;87 (2–3):269–276.

Maschmeyer D., Lehmann G. A trapped-hole center causing rose coloration of natural quartz. *Zeits. Kristall.* 1983;163:181–196.

Mikhailov V.P., Aminov V.N. (eds.). Mineral resource base of the Republic of Karelia. Book 2. Petrozavodsk: Karelia; 2006. P. 87–102. (In Russ.)

Müller A., Ihlen P.M., Snook B., Larsen R.B., Flem B., Bingen B., Williamson B.J. The chemistry of quartz in granitic pegmatites of southern Norway. *Economic Geology.* 2015;110(7):1737–1757.

Müller A., Koch-Müller M. Hydrogen speciation and trace element contents of igneous, hydrothermal and metamorphic quartz from Norway. *Mineralogical Magazine.* 2009;73(4):569–583. doi: 10.1180/minmag.2009.073.4.569

Renfro N., Sun Z., Koivula J. Dumortierite in rock crystal quartz. *Gems & Gemology.* 2015;51(1): 100–102.

Rossman G.R. Reviews in Mineralogy. Vol. 29: Silica – Physical behavior, geochemistry and materials applications. *Mineralogical Society of America.* Washington; 1994. P. 433–462.

Schmetzer K., Krzemnicki M. The orientation and symmetry of light spots and asterism in rose quartz spheres from Madagascar. *The Journal of Gemmology*. 2006;30(3):183–191. doi: 10.15506/jog.2006.30.3.183

Smith G., Vance E.R., Hasan Z., Edgar A., Runciman W.A. A charge transfer mechanism for the colour of rose quartz. *Physica Status Solidi (A).* 1978;46(2): K135–K140.

Svetova E.N., Bubnova T.P., Pikulev V.B., Loginova S.V. Technological features of quartz from muscovite pegmatite mining wastes of North Karelia (Russia). *Journal of Applied Spectroscopy.* 2025;92(1):45–52. doi: 10.1007/s10812-025-01876-3

Watson T.L., Beard R.E. The color of amethyst, rose, and blue varieties of quartz. *Proceed. of the U.S. National Museum.* 1917;53:553–63.

Wright P.M., Weil J.A., Buch T., Anderson J.H. Titanium colour centers in rose quartz. *Nature.* 1963;197:246–248.

Поступила в редакцию / received: 27.08.2026; принята к публикации / accepted: 01.10.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Светова Евгения Николаевна
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: ensvetova@krc.karelia.ru

Исаенко Сергей Иванович
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: s.i.isaenko@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Svetova, Evgeniya
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Isaenko, Sergey
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher