



МЕСТОРОЖДЕНИЕ ЖИЛЬНОГО КВАРЦА ГОРА ХРУСТАЛЬНАЯ КАК ОБЪЕКТ ПОЛИГЕННОГО И ПОЛИХРОННОГО ГЕНЕЗИСА

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

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Новые геологические наблюдения и научные исследования подтверждают мнение исследователей о гидротермальном генезисе месторождения Гора Хрустальная. Кварцевое тело этого месторождения является кварцево-жильным образованием выполнения, связанным по времени со становлением исетской калий-натриевой тоналит-гранодиоритовой серии Верх-Исетского батолита. Объемная форма тела – усеченная пирамида, а в поперечном сечении – трапеция. Подобная форма могла образоваться в результате проседания кровли массива гранодиоритов по системе тектонических трещин, создавших блоки клинообразного сечения больших размеров в нижнем основании и меньших – в верхнем. Это способствовало проседанию блоков при остывании магматического массива и образованию полостей огромных размеров, в которых и сформировались кварцевые жилы выполнения. Такие тела на Урале относятся к плутогенным гидротермальным образованиям. Многолетние исследования позволяют утверждать, что термин «силексит» для кварцевых объектов месторождений пьезооптического и жильного кварца неприменим и излишен.

Ключевые слова: жильный кварц, силексит, Гора Хрустальная, кварцевые жилы выполнения, гидротермальный генезис.

THE KHRUSTALNAYA MOUNTAIN QUARTZ DEPOSIT AS AN OBJECT OF POLYGENIC AND POLYCHRONIC GENESIS

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

The Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

New geological observations and scientific studies confirm the opinion of researchers on the hydrothermal genesis of the Khrustalnaya Mountain deposit. The quartz body of this deposit is a quartz-vein formation of filling associated in time with the formation of Isetian potassium-sodium tonalite-granodiorite series of the Verkh-Isetsky batholith. A closer look at the quartz body of the deposit shows that there is no unusual in its shape. The body shape can be described with a geometric figure as a truncated pyramid, and in cross section, the body shape is a trapezoid. This shape of the quartz body could be formed as a result of subsidence of the granodiorite massif roof through a system of tectonic cracks that created large blocks of wedge-shaped sections in the lower basement and smaller ones in the upper part, which contributed to the subsidence of the blocks during cooling of the magmatic massif and the formation of huge cavities in which quartz filling veins were formed. According to their genesis, the quartz bodies of filling in the Urals belong to plutogenic hydrothermal formations. Our long-term studies of quartz objects in the Urals suggest that the Silexite term for quartz objects in the piezooptical and vein quartz deposits is not applicable and are found to be unnecessary.

Keywords: vein quartz, Silexite, Khrustalnaya Mountain, quartz filling veins, hydrothermal genesis.

DOI 10.20403/2078-0575-2019-4-105-110

Россия относится к крайне ограниченному числу стран, которые не только широко используют в промышленности кварцевое сырье, но и имеют собственную базу. Минерально-сырьевая база кварца в России традиционно объединяет месторождения горного хрусталя, гранулированного и высококачественного метасоматического кварца, молочно-белого жильного кварца. Одним из крупнейших на Урале и в России геологическим объектом безрудного жильного кварца является месторождение Гора Хрустальная. Детальное изучение этого объекта было проведено сотрудниками экспедиции № 101 Мингео СССР. Эта огромная работа завершилась в июне 1978 г. утверждением в ГКЗ СССР запасов жильного кварца месторождения [8].

Опыт геологического изучения месторождения заслуживает внимания. Вполне естественно, что при любых детальном исследовании остаются

спорные вопросы, которые исследователям предстоит решать.

В период разведки и изучения указанного месторождения решался вопрос о генезисе кварцевого тела, а именно: относится этот объект к пегматитам или к кварцевым образованиям гидротермального генезиса.

По мнению геологов, принимавших участие в разведке месторождения, и по нашим исследованиям все известные геологические факты свидетельствуют о том, что месторождение является не обыкновенной кварцевой жилой гидротермально-метаморфогенного генезиса, а более сложным объектом, частично связанным с пегматитообразованием [4, 5, 7].

Наше многолетнее изучение кварцевых объектов Урала и Казахстана [7], история формирования которых в основном сложная (они полигенные

и полихронные), позволяют утверждать, что термин «силексит» для кварцевых объектов месторождений пьезооптического и жильного кварца необходимо применять с осторожностью, детально рассматривая вопросы генезиса. Рассмотрим эту проблему на примере месторождения Гора Хрустальная.

Определения и термины

Силекситы – необычные геологические образования с присущими им чертами кварцевых ядер пегматитов и пневматолитовых кварцевых жил. Они долгое время не привлекали должного внимания геологов, хотя известны были давно [3]. Более подробно вопросы генезиса, состава, строения, закономерностей локализации и перспективной оценки силекситов изложены в трудах Н. П. Ермакова, С. М. Бескина, Б. Д. Эфроса, С. Д. Дмитриева, Я. Н. Соколова, А. В. Осинского, А. Г. Малышева, В. Н. Труфанова, В. П. Петрова, Ю. А. Долгова, В. Б. Лекуха, В. М. Смертенко, появившихся в результате обобщения материалов широких поисково-разведочных работ в Казахстане, Средней Азии, на Урале, Алтае и в других регионах. Одни авторы отстаивали магматогенное происхождение силекситов и приводили в пользу этого убедительные экспериментальные данные и полевые наблюдения; другие считали подобные образования метасоматическими или метаморфическими, и их доказательства и примеры были не менее убедительны. Затруднения в классификации и определении формационной принадлежности силекситов связаны не только с их полигенностью, но и с полихронностью и способами образования.

Е. П. Ермаков в 1958 г. впервые применил термин «силексит» к гиперкислым кварцевым магматическим дериватам приповерхностных гранитов Центрального Казахстана [4].

Силексит – горная порода, состоящая в основном из кварца магматического или гидротермального происхождения. Международная комиссия по номенклатуре и систематике изверженных пород (Берн, 1972) рекомендовала применять этот термин для всех изверженных пород, содержащих более 60 % кварца [2, с. 214].

Силекситы представляют собой пегматиты с резким преобладанием в их объеме кварцевого ядра (более 85 %), образующиеся в условиях высо-

коградиентного метаморфизма андалузит-силлиманитовой фации метаморфизма. Высокотемпературные условия образования обуславливают высокое содержание минеральных микропримесей и особенно алюминия [7].

Жила – протяженное в двух направлениях простое тело, образовавшееся либо в результате выполнения трещинной полости минеральным веществом или горной породой, либо вследствие метасоматического замещения горной породы вдоль трещин минеральными веществами. По форме жилы делятся на простые, плитообразные, сложные, камерные, линзовидные и др. [2, с. 245].

Месторождение Гора Хрустальная

Расположено на восточном склоне Среднего Урала, в геологическом плане находится в юго-восточной части Верх-Исетского антиклинория Восточно-Уральского поднятия в зоне пересечения эндо-контактной части Верх-Исетского гранитного массива крупным субмеридиональным нарушением позднелазейского возраста (рис. 1) [5, 12].

Месторождение представляет собой крупное тело, вытянутое на 370–380 м в северо-восточном (330–340°) направлении. Форма его каплевидная в плане и неправильная в разрезе. На глубине месторождение имеет тупое выклинивание с пологим падением (погружением) юго-западного контакта к северо-востоку под углом 8–10°. Падение восточного контакта жильного тела крутое (75–90°) к востоку, западный контакт до горизонта +(310–270) м падает к западу, а затем падение меняется на обратное. Длина тела по вертикали непостоянная – от



Рис. 1. Геолого-структурная позиция месторождений Гора Хрустальная и Светлореченского (по В. Д. Оболюну [5]): I – Верхнетуринско-Верх-Исетский мегантиклинорий, II – Медведево-Свердловский мегасинклинорий, III – Верх-Исетский антиклинорий

1 – порфириды базальтовые и андезит-базальтовые ($S_2 - D_1$); 2 – зеленые сланцы, углито-глинисто-кремнистые сланцы, диориты, амфиболиты (S_1); 3 – граниты биотитовые (PZ_3); 4 – диориты, кварцевые диориты, плагиогранодиориты (D_3); 5 – плагиограниты амфиболовые (D_3); 6 – габбро, габброамфиболиты (D_3); 7 – серпентиниты (C_1); 8 – кварцевые тела (А – Гора Хрустальная, Б – Светлореченское); 9 – разрывные нарушения



90 м в западной части до 190 м в восточной; ширина достигает 140 м [5, 7, 10, 11].

Восточный контакт тела четкий, крутопадающий (75–90°), контролируется тектоническим нарушением; западный имеет более сложную конфигурацию, обусловленную заполнением пегматоидным и кварцевым материалом крупноглыбовой зоны брекчирования во вмещающих диоритах. Породы пегматоидного облика почти повсеместно наблюдаются и в нижней части тела, и по его западному и юго-восточному контактам. Подстилающие пегматоидные породы образуют пластообразные полого падающие тела, мощностью 5–45 м, участками разделенные пачками сланцев, диоритов, мусковитизированных гранитов, амфиболитов.

Кварцевое ядро является субмономинеральным телом, сложенным кварцем светло-серого, серого, молочно-белого или дымчато-серого цвета, участками прозрачного или полупрозрачного. Участки, представленные прозрачной разностью кварца, небольших размеров, наблюдаются довольно редко (1 % от объема кварцевого ядра) [4, 11]. Жильная масса содержит 98,89 % чистого кремнезема. Размер минеральных индивидов – до 1 м в поперечнике, они разделены неправильными поверхностями с индукционной штриховкой. Газово-жидкие включения располагаются по залеченным трещинам, секущим границы индивидов.

По степени минерализации кварц месторождения разделяется на две разновидности: мономинеральный или слабоминерализованный (до 8 %) кварц типа K_1 и сильноминерализованный (более 8 %) кварц типа K_2 . По данным минералогических анализов содержание твердых минеральных примесей в кварце K_1 в среднем составляет 1,1 %, в кварце K_2 – 16,1 % [4].

В жильном кварце месторождения определены и исследованы 22 минерала, являющиеся вредными примесями: сера самородная, пирит, рутил, брусит, псиломелан, гематит, гидрогетит, апатит, графит, опал, магнетит, серицит, флогопит, алмадин, эпидот, мусковит, биотит, хлорит, актинолит, микроклин, калиевый полевой шпат, кальцит. Наиболее распространены микроклин, мусковит, каолинит, кальцит, гидрогетит, пирит. Содержание их изменяется в следующих пределах (%): микроклин – от знаков до 40,16, мусковит – от 0,006 до 7,036, каолинит – от 0,002 до 0,108, гидрогетит – от знаков до 0,50, пирит – от знаков до 0,189. Остальные минералы распространены незначительно [5, 10].

В. Д. Оболкин и др. [10], Е. П. Мельников [3] рассматривают кварцевое тело месторождения как неполнозональный пегматит-силексит, приуроченный к зоне эндоконтактовой части Чусовского плутона – сателлита Верх-Исетской интрузии – и генетически связанный с поздними кислыми дериватами этой интрузии.

Наши геологические наблюдения и научные исследования подтверждают мнение исследовате-

лей о магматогенном и гидротермальном генезисе месторождения Гора Хрустальная. Кварцевое тело этого месторождения является полигенным и полихронным кварцево-жильным образованием выполнения, связанным по времени со становлением исетской фазы калий-натриевой тоналит-гранодиоритовой серии Верх-Исетского батолита [6, 7, 12].

При более внимательном рассмотрении в форме кварцевого тела месторождения нет ничего необычного: объемная его форма – усеченная пирамида, а в поперечном сечении – трапеция (рис. 2). Подобная форма могла образоваться в результате проседания кровли массива гранодиоритов по системе тектонических трещин, создавших блоки клинообразного сечения больших размеров в нижнем основании и меньших – в верхнем. При остывании магматического массива происходило проседание блоков и образование полостей огромных размеров, в которых и сформировались пегматиты и кварцевая жила выполнения.

Для жильного кварца месторождения характерно наличие многочисленных, в основном прямоугольной или овальной формы, ассимилированных ксенолитов горных пород, представленных преимущественно диоритами (рис. 3). Ксенолиты отмечаются по всему телу, но в основном концентрируются в верхних его частях, особенно в верхней западной. Размеры ксенолитов в среднем 2,5×1,0 м, иногда до 6,0×1,2 м. Характерной особенностью залегания наиболее крупных ксенолитов является то, что их длинные оси ориентированы параллельно зальбандам жильного тела и имеют северо-восточное падение под углом 30–40° [11].

Месторождение Гора Хрустальная располагается в восточной части Чусовского плутона, сложенного гранитоидами таватуйской тоналит-трондьемитовой серии. Плагиигранодиориты таватуйской серии прорываются гранодиоритами и гранитоидами северской и исетской серий, верхняя возрастная граница которых (по Rb-Sr методу) 316–320 млн лет [6].

Следует обратить внимание, что формирование северской низкокалиевой тоналит-гранодиоритовой серии завершается аплитами, а исетской калий-натриевой тоналит-гранодиоритовой серии – жильными пегматитами, аплитами, гранитами [6]. Таким образом, пегматоидные породы могли формироваться в начальный период образования открытой полости будущего кварцевого тела, а в дальнейшем при понижении температуры флюида в полости отлагался кремнезем с образованием кварцевого ядра (силекситы, сложенные высокоминерализованным жильным кварцем K_2) [7]. Пегматоидные породы слагают пластообразные полого падающие тела мощностью 5–45 м, участками разделенные пачками сланцев, диоритов, мусковитизированных гранитов, амфиболитов. Температура образования пегматоидных пород по двухполюсовому геотермометру Барта – Рябчикова 480–505 °C [3].

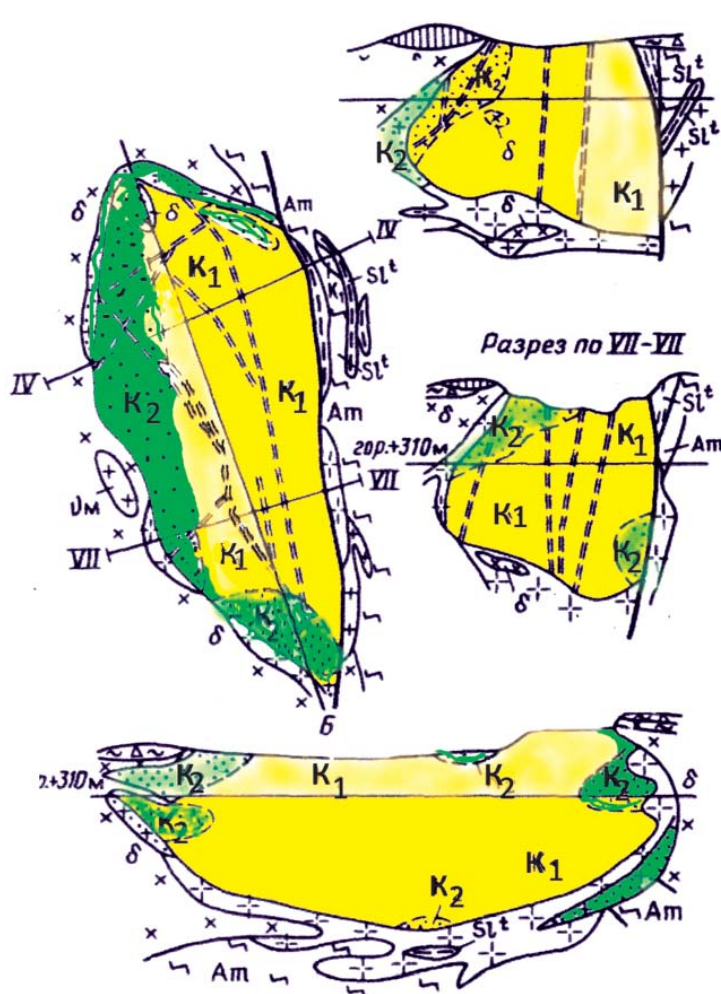


Рис. 2. Геологическое строение месторождения жильного кварца Гора Хрустальная (по В. Д. Оболенкину [5])

1 – отвалы; 2 – рыхлые четвертичные отложения; 3 – амфиболиты; 4 – тальк-серпентин-хлоритовые сланцы; 5 – диориты; 6 – граниты мусковитизированные; 7 – пегматоидная порода; 8 – кварц-мусковит-полевошпатовая порода аплитовой структуры; 9 – кварц типа K₂; 10 – кварц типа K₁; 11 – разрывное нарушение; 12 – зоны трещиноватости в кварце; границы: 13 – типов кварца, 14 – геологические

Процессы поздней коллизии, с которыми связано образование гранитоидов аятской адамеллит-гранитной серии возрастом 284–276 млн лет [6], наложившись на кварцевое тело, под их действием произошли частичные преобразования кварца силикатов и вмещающих пород.

В результате поздних тектонических подвижек образовались биотитовая оторочка и слюдиты в зальбандах кварцевого тела, по которым развились метасоматические тальковые сланцы. Кварцевое тело находится в диоритах. Породы западного бока жилы представлены сильно метаморфизованными диоритами, в которых темноцветный минерал превращен в агрегат мелкошешуйчатого биотита. В восточном боку жилы залегают биотитовые слюдиты и тальковые сланцы, причем в южной части месторождения в зальбане кварцевой жилы залегают слюдиты, в северной непосредственно к кварцевой жиле примыкают тальковые сланцы. По данным Г. Н. Вертушкова и В. Н. Авдониной [1] слюдиты образовались по серпентинитам, а их оталькование произошло после тектонических подвижек.

На восточном экзоконтакте пегматоидные и мусковит-полевошпатовые породы отмечаются только на северном и южном выклинивании, центральная часть месторождения лишена оторочки этих пород. Поскольку восточный контакт квар-

цевого тела тектонический, можно предполагать, что здесь пегматоидная оторочка «сорвана» после формирования кварцевого тела в результате позднейших тектонических подвижек [11].

Во время поздней коллизии и активизации шовной зоны усиливается пневматолито-гидротермальная деятельность аятской адамеллит-гранитной серии Верх-Исетского массива, происходит дополнительное раскрытие пегматитового тела с образованием слабоминерализованного кварцево-жильного тела выполнения (кварц K₁) [7].

Жильный кварц крупно- и гигантозернистой структуры месторождения Гора Хрустальная содержит значительное количество газово-жидких включений. Большинство из них располагаются в системах трещин разлистования и являются вторичными. Гораздо более редки первичные включения, которые сгруппированы в основном по зонам роста индивидов. Их цепочки ориентированы косо по отношению к плоскостям трещин с вторичными включениями. Термобарогеохимические исследования по кварцу показали, что газово-жидкие включения в нем гомогенизируются в интервале 164–340 °С, а температурные пики массовой декрепитации газово-жидких включений соответствуют 160, 260, 360, 450, 500 °С. Это позволяет утверждать, что жильный кварц K₁ образовался при более низких температурах, чем



Рис. 3. Ксенолиты гранодиорита (темное) в жильном кварце (светлое). Карьер месторождения Гора Хрустальная

пегматоидные породы силекситов K_2 , и в самостоятельную гидротермальную стадию [5, 7].

Кварцевое тело месторождения генетически связано с гранитоидами тоналит-гранодиоритовой серии и сформировалось в период ранней коллизии. Формирование Верх-Исетского батолита происходило в условиях мезоабиссальной и абиссальной фаций глубинности. Наличие магматического эпидота свидетельствует о кристаллизации пород при давлении 4–8 кбар, температуре 600–800 °С и содержании воды в расплаве более 4 % [6]. Повышенное содержание воды понизило температуру кристаллизации гранитоидов и способствовало значительному сокращению объема застывающей магмы, что при благоприятной системе тектонических трещин привело к образованию крупных полостей, в которых и сформировалось полевошпат-кварцевое тело [7].

В результате эволюции постмагматических растворов по мере удаления от купола гранитов развиваются гидротермально-метасоматические образования, сопровождаемые кварц-жильными телами. Еще А. Н. Заварицкий расположил их в последовательности выделения по мере падения температуры и удаленности от купола в следующий ряд: пегматиты – альбититы – грейзены и слюдиты – березиты – листвениты – серицит-кварцевые породы. Процессы минералообразования происходят вблизи остывающих интрузивов в ореоле их воздействия на вмещающие породы. Основное внимание здесь следует уделить возникновению в околоинтрузивном пространстве своеобразной тектоники, обязанной своим происхождением термическому сокращению объема плутонов и играющей, по нашим представлениям, немаловажную роль в последующих процессах эндогенного минералообразования [7].

Вследствие больших размеров интрузивов оседание их поверхности при остывании происходит не целиком, а блоками с образованием расколов [7, 9]. Инъекции из остывающего расплава осуществляются по этим крутопадающим трещинам, образуя дайковый пояс на удалении от кровли. Возникновение пегматитов, грейзенов, кварцевых жил и т. д. обусловлено образованием «свободного» объема при

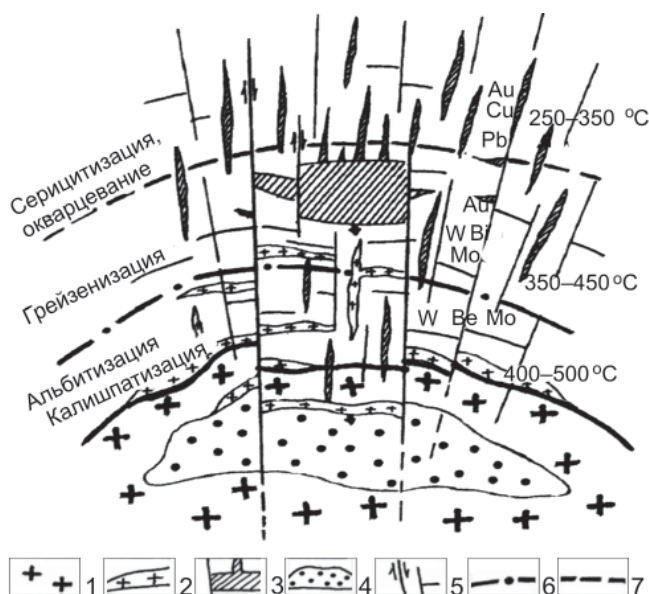


Рис. 4. Схема формирования метасоматической зональности в надкупольной зоне гранитов с образованием тел пегматитов, грейзенов и кварцевых жил (составлена с использованием материалов Ф. А. Летникова [9])

1 – купол гранита; 2 – тела аплит-гранитов и пегматитов; 3 – кварцево-жильные тела; 4 – флюидно-газовая полость в кровле гранитов; 5 – разрывные нарушения и трещины отслоения; границы: 6 – калишпатизации, альбитизации, 7 – грейзенизации и серицит-кварцевых метасоматитов

оседании поверхности куполообразного выступа интрузива и отставания оседания перекрывающих пород (рис. 4).

Происходит это потому, что гранитный батолит прежде всего отдает тепло покрывающим его породам. Поэтому сначала застывает наружная корка, которая постепенно нарастает снизу, приближаясь к центральному очагу. В верхней части последнего к этому времени образуется крупный флюидо-расплавный «пузырь». Одновременно идет сокращение объема отвердевших частей батолита, вследствие чего кровля раскалывается рядом трещин, которые возникают сначала наверху и постепенно разрастаются книзу. Часть этих трещин идет радиально, веером, другие протягиваются перпендикулярно к ним, т. е. параллельно поверхности охлаждения, образуя трещины отслоения, контракции. При остывании гипабиссальных интрузивов уменьшение их внешнего объема составляет примерно 5–7 % начального объема интродуцировавшей магмы [9]. Если возникающая полость отслоения не получает сообщения с нижерасположенным исходным расплавом интрузива, то она может быть превращена в жилородное пегматитовое тело, а еще позже – в кварц-полевошпатовую и, наконец, в типичную гидротермальную жилу (месторождения Гора Хрустальная, Светлая речка, Желанное и др.).

Выводы

В геологической истории развития Урала подавляющее большинство кварцево-жильных образо-

ваний сформировались в стадии ранней и поздней коллизий, продуктами которых являются гранитоиды тоналит-гранодиоритовой и гранитной формаций соответственно. Кварцевые тела выполнения на Урале относятся к плутоногенным гидротермальным образованиям. Наши многолетние исследования кварцевых объектов Урала позволяют утверждать, что термин «силексит» для кварцевых объектов месторождений пьезооптического и жильного кварца неприменим и излишен.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГГ УрО РАН (госрегистрации № АААА-А18-118052590028-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вертушков Г. Н., Авдонин В. Н. Метасоматическое изменение серпентинитов в «слюдиты» около кварцевой жилы горы Хрустальной на Урале // Зап. ВМО. – 1957. – Ч. 86, вып. 1. – С. 65–71.
2. Геологический словарь: в 2 т. Т. 2 / под ред. К. Н. Паффенгольца. – М.: Недра, 1978. – 456 с.
3. Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца / сост. Е. П. Мельников. – М.: Недра, 1988. – 216 с.
4. Глаголев Е. В. Месторождение кварца Гора Хрустальная // Минеральное сырье Урала. – 2006. – № 2 (5). – 40 с.
5. Жильный кварц Урала в науке и технике. Геология основных месторождений кварцевого сырья / А. А. Евстропов, Ю. И. Бурьян, Н. С. Кухарь и др. – М.: Недра, 1995. – 207 с.
6. Зинькова Е. А., Ферштатер Г. Б. О природе гранитов полиморфного Верх-Исетского массива (Средний Урал) // Ежегодник-1994. – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1995. – С. 73–74.
7. Золоторудная, редкометалльная и хрусталеносная минерализация месторождений Урала кварцево-жильного типа / В. Н. Огородников, В. А. Коротеев, Ю. А. Поленов и др. – Екатеринбург: УрО РАН, УГГУ, 2014. – 312 с.
8. История поисков, разведки и освоения уральских хрусталеносных месторождений (1937–1991) / под ред. Ю. А. Поленова. – Екатеринбург: УГГУ, 2017. – 114 с.
9. Летников Ф. А. Синэнергетика геологических систем. – Новосибирск: Наука, 1992. – 228 с.
10. Оболкин В. Д., Мельников Е. П., Евстропов А. А. Вещественный состав силексита месторождения Гора Хрустальная (Средний Урал) // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1981. – № 6. – С. 119–128.
11. Оболкин В. Д., Мельников Е. П., Евстропов А. А. Светлореченский силексит – новый промышленный тип месторождений кварцевого сырья (Средний Урал) // Изв. АН СССР. – 1983. – № 3. – С. 85–90.
12. Ферштатер Г. Б. Гранитоидный магматизм и формирование континентальной земной коры

в ходе развития Уральского орогена // Литосфера. – 2001. – № 1. – С. 62–85.

REFERENCES

1. Vertushkov G.N., Avdonin V.N. [Metasomatic change of serpentinites to “micas” near the quartz vein of Khrustalnaya Mountain in the Urals]. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*, 1957, vol. 86, issue 1, pp. 65–71. (In Russ.).
2. *Geologicheskii slovar'* [Geological Dictionary]. Ed. K.N. Paffengolts. In 2 volumes. Vol. 2. Moscow, Nedra Publ., 1978. 456 p. (In Russ.).
3. *Geologiya, genezis i promyshlennye tipy mestorozhdeniy kvartsa* [Geology, genesis and industrial types of quartz deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 216 p. (In Russ.).
4. Glagolev E.V. [The Khrustalnaya Mountain Quartz deposit]. *Mineral'noe syrye Urala*, 2006, no. 2 (5). 40 p. (In Russ.).
5. Evstropov A.A., Buryan Yu., Kukhar N.S., et al. *Zhil'nyy kvarts Urala v nauke i tekhnike. Geologiya osnovnykh mestorozhdeniy kvartsevoogo syr'ya* [Vein quartz of the Urals in science and technology. Geology of the main deposits of quartz raw materials]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 207 p. (In Russ.).
6. Zinkova E.A., Fershtater G.B. [On the nature of granites of the polymorphic Verkh-Isetsy massif (Middle Urals)]. *Ezhegodnik-1994* [Yearbook-1994]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ., 1995, pp. 73–74. (In Russ.).
7. Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A., Babenko V.V., Savichev A.N. *Zolotorudnaya, redkometall'naya i khrustalenosnaya mineralizatsiya mestorozhdeniy Urala kvartsevo-zhil'nogo tipa* [Gold ore, rare metal and crystal-bearing mineralization of the Urals quartz-vein deposits]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ., 2014. 312 p. (In Russ.).
8. Polenov Yu.A., ed. *Istoriya poiskov, razvedki i osvoeniya ural'skikh khrustalenosnykh mestorozhdeniy (1937–1991)* [The History of prospecting, exploration and development of the Ural crystal deposits]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 2017. 114 p. (In Russ.).
9. Letnikov F.A. *Sinenergetika geologicheskikh sistem* [Synergy of geological systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 228 p. (In Russ.).
10. Obolkin V.D., Melnikov E.P., Evstropov A.A. [The material composition of sillexite of the Khrustalnaya Mountain deposit (Middle Urals)]. *Izvestiya AN SSSR, Ser. Geologicheskaya*, 1981, no. 6, pp. 119–128. (In Russ.).
11. Obolkin V.D., Melnikov E.P., Evstropov A.A. [Svetlorechensky sillexite is a new industrial type of quartz deposits (Middle Urals)]. *Izvestiya AN SSSR*, 1983, no. 3, pp. 85–90 (In Russ.).
12. Fershtater G.B. [Granitoid magmatism and the formation of the continental crust during the development of the Ural Orogen]. *Litosfera – Lithosphere*, 2001, no. 1, pp. 62–85. (In Russ.).

© В. Н. Огородников, Ю. А. Поленов, В. В. Бабенко, 2019