

Генетические модели формирования оруденения, связанного с кварцевыми жилами (на примере хрусталеносного и золотого оруденения)

© 2019 г. В. Н. Огородников¹, Ю. А. Поленов²

¹Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mail: ogorodnikov@igg.uran.ru

²Уральский государственный горный университет, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30,
e-mail: fgg.gl@m.ursmu.ru

Поступила в редакцию 18.05.2018 г., принята к печати 10.10.2018 г.

Актуальность работы. При проведении геологоразведочных работ постоянно возникают трудности по оперативной оценке перспектив открываемых рудопоявлений, флангов и глубоких горизонтов эксплуатируемых месторождений, новых жильных тел в пределах известных рудных полей и узлов. В этих условиях существенное значение имеет знание генетических моделей формирования золоторудного и хрустального оруденения, генетически связанного с кварцевыми жилами. **Цель работы.** К сожалению, сохраняется мнение, что промышленная хрусталеносность, связанная с кварцевыми жилами, характерна исключительно для формации безрудных кварцевых жил и вследствие этого именно такая формация является основным объектом прогнозирования при поисках месторождений горного хрусталя. В то же время в хрусталеносных кварцево-жильных месторождениях Урала установлено большое количество рудных минералов, причем как в жильных телах, так и в хрустальных полостях. **Результаты.** Анализ огромного фактического материала, проведенный авторами по закономерностям размещения кварцево-жильных образований на уральских месторождениях хрусталеносной и золотой минерализации свидетельствует о приуроченности кварцево-жильных полей к шовным зонам, представляющим узкие протяженные тектонические ансамбли сложного геологического строения, генетически и пространственно сопряженные с долгоживущими разломами глубинного заложения. Формирование кварцевых жил относится лишь к отдельным этапам развития месторождений, а сами они всегда приурочены к определенным структурным элементам, в пределах которых в последующие стадии формирования рудных полей они подвергаются преобразованиям, нередко весьма значительным. **Выводы.** Метаморфическая и метасоматическая зональности, различные термодинамические условия формирования проявляются в типоморфных особенностях жильного кварца: его внутренней структуре, химической чистоте, светопропускании, различного рода микродефектах, которые объективно отражают особенности его генезиса и могут быть использованы в качестве критериев прогнозирования и оценки объектов, в особенности на ранних стадиях геологоразведочных работ.

Ключевые слова: шовные зоны, метасоматоз, кварцевые жилы, горный хрусталь, рудные минералы, генетические модели

Genetic models of mineralization associated with quartz veins (on the example of crystal and gold mineralization)

Vitalii N. Ogorodnikov¹, Yurii A. Polenov²

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Acad. Vonsovsky st., Ekaterinburg, 620016 Russia, e-mail: ogorodnikov@igg.uran.ru

²Ural State Mining University, 30 Kuibyshev st., Ekaterinburg, 620144 Russia, e-mail: fgg.gl@m.ursmu.ru

Received 18.05.2018, accepted 10.10.2018

Background. Any exploration work involves difficulties associated with a rapid assessment of the development prospects of the discovered ore occurrences, flanks and deep horizons of the exploited fields, new vein bodies within the known ore fields and nodes. Under these conditions, knowledge of the genetic models of formation of gold and crystal mineralization, genetically associated with quartz veins, gains a particular importance. **Aim.** There is a widespread opinion that the presence of industrially applicable crystal is characteristic only of barren quartz veins. As a result, it is such formations that attract the interest of researchers searching for deposits of rock crystal. However, a large number of ore minerals have been found

Для цитирования: Огородников В.Н., Поленов Ю.А. (2019) Генетические модели формирования оруденения, связанного с кварцевыми жилами (на примере хрусталеносного и золотого оруденения). *Литосфера*, 19(4), 615–624. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-615-624

For citation: Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A. (2019) Genetic models of mineralization associated with quartz veins (on the example of crystal and gold mineralization). *Litosfera*, 19(4), 615–624. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-615-624

in the crystal-bearing quartz-vein deposits in the Urals, both in the vein bodies and in the crystal cavities. *Results.* The analysis of a large amount of factual material carried out to reveal regularities of location of quartz-vein formations in the Ural deposits of crystal-like and gold mineralization testifies to the confinement of quartz-vein fields to suture zones, representing narrow extended tectonic ensembles of a complex geological structure, genetically and spatially associated with long-lived faults of deep laying. The formation of quartz veins refers only to certain stages of the deposit development, while the deposits themselves are always confined to certain structural elements. These structural elements determine the subsequent formation of ore fields, which frequently undergo significant transformations. *Conclusions.* The metamorphic and metasomatic zonality, various thermodynamic conditions of formation are manifested in the typomorphic features of vein quartz: its internal structure, chemical purity, light transmission, presence of microdefects. These features reflect the peculiarities of quartz genesis and can be used as criteria for forecasting and evaluation of geological objects, particularly during initial stages of the exploration work.

Keywords: suture zones, metasomatism, quartz veins, rock crystal, ore minerals, genetic models

Acknowledgements

The work was performed under the theme № 0393-2016-0024 of the state task of IGG UrO RAS "Collision and post-collision ore-forming processes of intraplate mobile belts" (№ state registration AAA-A18-118052590028-9), head Dr. Geol.-mineral. Sciences A.Yu. Kissin.

ВВЕДЕНИЕ

Расшифровка обстановки формирования природных кварцевых образований, а следовательно, и закономерностей их размещения в земной коре, определяющих научные основы прогноза и поиска месторождений золоторудного и кварцевого сырья, осложняется чрезвычайным разнообразием условий их локализации.

Практика геологоразведочных и добычных работ на рудных месторождениях металлических полезных ископаемых сложилась таким образом, что изучение геологических объектов велось с большим акцентом на интересующие промышленное производство полезные компоненты, и, как правило, уделялось недостаточное внимание очень распространенному полезному ископаемому – кварцу. Так повелось, что при изучении рудных месторождений (золоторудных, вольфрамовых, оловянных, бериллиевых, тантал-ниобиевых и др.), в которых кварц является чаще всего весьма распространенным минералом, детального описания его особенностей и типоморфных характеристик не приводится. При исследовании же кварцевых объектов в целях добычи пьезооптического и жильного кварца из поля зрения нередко упускаются рудные минералы и их взаимоотношения с кварцем.

В настоящей статье авторы, имеющие большой опыт в проведении полевых наблюдений и лабораторных исследований объектов кварцево-жильной, хрустальной и золоторудной минерализаций, генетически связанных с кварцевыми жилами, излагают генетические модели их формирования:

ОБЗОР ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СВЯЗИ ХРУСТАЛЕНОСНЫХ И ЗОЛОТОНОСНЫХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ

К сожалению, и по настоящее время сохраняется мнение, что промышленная хрустальная мине-

рализация, связанная с кварцевыми жилами, свойственна исключительно формации безрудных кварцевых жил, именно поэтому такая формация является основным объектом прогнозирования при поисках месторождений горного хрусталя [Прогнозирование..., 1975; Критерии..., 1978]. Тем не менее известно большое количество рудных месторождений на Урале, Памире, Дальнем Востоке и в других регионах, где горный хрусталь добывается попутно в весьма значительных количествах [Эшкин, 1965; Мельников, Понадич, 1969; Рундквист и др., 1971; Бочкарев, 1971; Ануфриев и др., 1971]. Из зарубежных можно назвать редкометальное месторождение Кинсгейт (Австралия), где объем попутно добытых кондиционных кристаллов горного хрусталя достигал нескольких тонн в год. В хрусталеносных кварц-жильных месторождениях Приполярного Урала установлено большое количество рудных минералов, причем как в жильных телах, так и в хрустальных полостях. Здесь известно наложение хрустальной минерализации на кварцевые жилы с сульфидами и шеелитом [Эшкин, 1965; Буканов, 1974]. В пределах горного отвода Светлинского месторождения пьезокварца открыто и отрабатывается в настоящее время месторождение рудного золота. На Астафьевском месторождении пьезокварца выявлены и оконтурены золоторудные тела и подсчитаны прогнозные ресурсы золота по категории P_1 , а в его рудном поле – P_2 [Огородников, 1993].

Работами Д.В. Рундквиста [Рундквист, 1964; Рундквист и др., 1971] установлено, что на редкометальных и золоторудных месторождениях первоначально кварцевые жилы были безрудными и все рудные минералы (вольфрамит, шеелит, сульфиды, золото и др.) образовывались позднее, отлагаясь в кварцевых жилах по зальбандам и вдоль систем трещин.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ХРУСТАЛЬНОЙ И ЗОЛОТОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЙ

Как отмечалось выше, кварцево-жильные поля приурочены к шовным зонам сложного геологического строения, которые проявлены в виде долгоживущих разломов глубинного заложения. На Урале такими шовными зонами, помимо Главного Уральского глубинного разлома, являются Серовско-Маукская, Сугомакско-Кацбахская, Кидышевская, Светлинская и др. К этим шовным зонам тяготеют кварцево-жильные месторождения золота, вольфрама, молибдена, пьезооптического и жильного кварца и др. [Огородников и др., 2007, 2014; Коротеев и др., 2010]. По нашему глубокому убеждению, проблемы генезиса кварцево-жильных образований могут быть решены только в случае тщательной увязки результатов аналитических исследований с детальным изучением геологической обстановки локализации кварцевых объектов и выяснением онтогенетических особенностей всех типов кварца, слагающих кварцевое тело.

Образование кварцевых жил относится лишь к отдельным этапам развития месторождений, а сами они всегда приурочены к определенным структурным элементам, в пределах которых в последующие стадии формирования рудных полей они подвергаются преобразованиям, нередко весьма значительным. Метаморфическая и метасоматическая зональности, различные термодинамические условия кристаллизации жильного кварца проявлены в его типоморфных особенностях: внутренней структуре, химической чистоте, светопропускании, различных микродефектах, которые объективно отражают особенности его генезиса и могут быть использованы в качестве критериев прогнозирования и оценки объектов, в особенности на ранних стадиях геологоразведочных работ.

Шовные зоны играют большую роль в структуре земной коры [Огородников и др., 2004, 2014]. Известны закономерности их глобальной ориентировки, кинематические и морфогенетические типы, соотношения ряда количественных характеристик, роль в структурном контроле и локализации магматических, метасоматических рудных и нерудных тел. Неоспоримое значение в контроле размещения рудных полей, отдельных месторождений и рудных тел имеют разломы [Поспелов, 1963; Огородников, 1993; Огородников и др., 2014]. В формировании и размещении магматических и рудных образований (комплексов) в континентальной коре большую роль играют, в частности, сдвиговые тектонические нарушения. Поэтому установленные сдвиговые зоны различных рангов можно рассматривать как рудоносные структуры, развитие которых определило основные закономерности формирования и простран-

ственного размещения рудных районов, узлов и месторождений (рис. 1).

Важная роль сдвигов в высвобождении глубинного вещества в форме различного состава магм и рудных минеральных ассоциаций позволяет линейные области сдвиговых дислокаций рассматривать как магмо-металлогенетические зоны. Анализ размещения кварцево-жильных, хрусталеносных, редкометалльных, золоторудных месторождений и рудопроявлений с использованием геофизических материалов показывает, что они локализуются вдоль шовных тектонических структур (зон смятия), имеющих глубинное заложение и в микроконтинентах, имеющих мощность земной коры 35–45 км, при мощности гранитного слоя 15–25 км, создаваемой преимущественно за счет древних гнейсовых блоков континентальной коры, отчлененных от платформ при докембрийском рифтогенезе и преобразованных во время коллизий [Огородников, 1993; Огородников и др., 2004, 2007, 2014].

Установлено, что кварцево-жильные золоторудные, шеелитовые и хрусталеносные месторождения связаны со становлением и эволюцией габбро-тоналит-гранодиорит-гранитных комплексов [Мельников, 1988; Огородников, 1993; Сазонов и др., 2001; Ферштатер и др., 2007; Огородников и др., 2014]. Магматизм начинается габброидами так называемой раннедевонской Петрокаменской серии, имеющей возраст 420–380 млн лет (рис. 2). Этот магматизм создавал и вещество протолита тоналитов и гранодиоритов, источник энергии для их плавления. Базиты наращивали снизу кору, обусловили ее повышенную мощность в шовном мегаблоке и в области развития тоналит-гранодиоритовых массивов [Ферштатер и др., 2007].

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТОЙ И ХРУСТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЙ

Золото в процессе метаморфизма вулканогенно-осадочных и терригенно-осадочных горных пород перераспределяется под воздействием хлоритовых растворов. Наряду с изменениями T и P флюидный режим гидротермальных систем является одним из ведущих факторов минералообразования и смены парагенетических ассоциаций в ходе их эволюции [Сазонов и др., 2001].

Относительно высокотемпературные (500–620°C) постмагматические растворы, имеющие на этой стадии щелочную реакцию, поступают в тектонические структуры глубоких горизонтов месторождений в уже консолидированные гранитоиды и в породы их кровли. Золото и кремнезем мобилизуются из метаморфических пород флюидами существенно хлоридного состава при высокой активности углекислоты (рис. 3, левая ветвь), которые по мере остывания взаимодействуют со вмещающи-

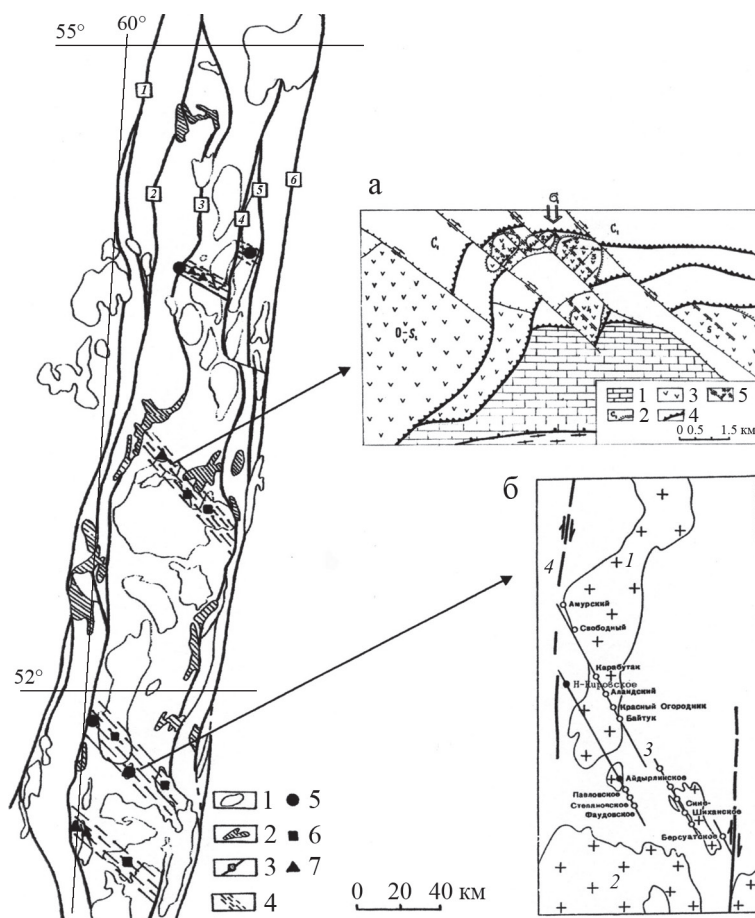


Рис. 1. Схема расположения шовных зон Южного Урала и диагональных рудоконтролирующих разломов в пределах Восточно-Уральской мегазоны с детализацией наиболее характерных участков (а, б).

1 – гранитоиды; 2 – габбро и ультрабазиты; 3 – шовные зоны (цифры в квадратах: 1 – Сугомакско-Кацбахская, 2 – Кидышевская, 3 – Светлинская, 4 – Борисовская, 5 – Успеновско-Павловская, 6 – Челябинская); 4 – рудоконтролирующие разломы; 5–7 – месторождения: золоторудные (5), редкометалльные (6), хрусталеносные (7).

а. Структурная схема Астафьевского хрусталеносного поля: 1 – мраморы, 2 – углисто-кремнистые сланцы, 3 – метавулканиды, 4 – надвиг раннего заложения, 5 – рудовмещающие структуры.

б. Приуроченность кварцево-жилых месторождений Суундукского (1) и Адамовского (2) гранитных массивов к диагональным разломам второго порядка (3), развивающимся в блоках пород между зонами глубинных разломов (4) (по [Рундквист, 1964]).

Fig. 1. The scheme of location of suture zones of the Southern Urals and the diagonal of ore-controlling faults within the East-Ural megazone with detail of the most characteristic sections (а, б).

1 – granitoids; 2 – gabbro and ultrabasic rocks; 3 – suture zones (figures in squares: 1 – Sugomakh-Katsbakh, 2 – Kidyshev, 3 – Svetloe, 4 – Borisovo, 5 – Uspensk-Pavlovsk, 6 – Chelyabinsk); 4 – ore-controlling faults; 5–7 – deposits: gold (5), rare metal (6), rock crystal (7).

а. Structural diagram of the rock crystal field: 1 – marbles, 2 – carbonaceous-siliceous shales, 3 – volcanic, 4 – overthrust early foundations, 5 – ore-bearing structure.

б. Coincidence of quartz-vein deposits of Suunduk (1) and Adamovo (2) granite massifs to diagonal faults of the second order (3), which develop in blocks of rocks between the zones of deep faults (4) (according to [Rundquist, 1964]).

ми породами и растворенной углекислотой, увеличивая постепенно количество бикарбоната натрия [Рябчиков, 1975; Колонин, 1977].

Многочисленные трещины отрыва и скалывания, возникающие в эндо- и экзоконтактах консолидированной части массивов, выполняются дайками “пестрого” состава и ранними кварцевыми жилами. Их формирование обусловлено резким па-

дением давления при открытии трещин, падением растворимости кремнезема и рудных элементов. Образуются жилы шеелит-кварцевого, моно-кварцевого, золото-кварцевого, шеелит-турмалин-кварцевого состава. Такие жилы обычно слабо золотосодержащие.

Во вмещающих плагиогранитах и дайковом комплексе в это время широко проявляются про-

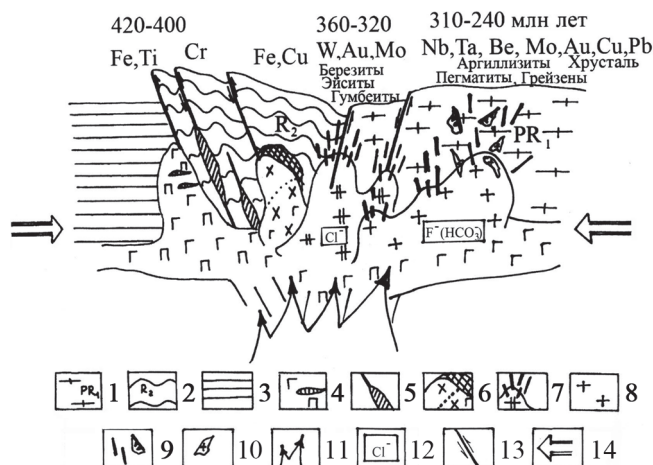


Рис. 2. Кинематическая модель формирования кварцево-жильных месторождений во время ранней и поздней коллизий [Огородников и др., 2014].

1 – древняя континентальная кора; 2 – вулканогенно-осадочные отложения континентального рифта; 3 – толеитовые раннеокеанические образования; 4 – ультрабазит-габбровый комплекс с титаномагнетитовой минерализацией; 5 – ультрабазиты дунит-гарцбургитового хромитового комплекса; 6 – габбро-диорит-гранодиоритовая формация с Fe-Cu скарнами; 7 – гранитоиды габбро-тоналит-гранодиоритовой формации с W, Mo и Au-кварцевыми жилами; 8 – микроклиновые граниты; 9 – золотоносные кварцевые жилы и хрусталеносные гнезда; 10 – пегматиты; 11 – мантийный теплофлюидопоток в шовных зонах; 12 – хлоро- и фторотипная специализация гранитоидов; 13 – блокоограничивающие шовные зоны; 14 – направления тангенциального сжатия во время коллизии.

Fig. 2. Kinematic model of formation of quartz-vein deposits during early and late collisions [Ogorodnikov et al., 2014].

1 – ancient continental crust; 2 – volcanogenic-sedimentary deposits of the continental rift; 3 – toleitic early oceanic formations; 4 – ultrabasic-gabbro complex with titanomagnetite mineralization; 5 – ultrabasic dunite-harzburgite chromite-bearing complex; 6 – gabbro-diorite-granodiorite formation with Fe-Cu scarns; 7 – granitoids of gabbro-tonalite-granodiorite formation with W, mo and AU – quartz veins; 8 – microcline granites; 9 – gold-bearing quartz veins and crystal-nests; 10 – pegmatites; 11 – mantle heat fluid flow in suture zones; 12 – chloro- and fluorotype specialization of granitoids; 13 – block-limiting suture zones; 14 – directions of tangential compression during collision.

цессы биотитизации и амфиболизации, при наложении которых на дайки основного состава образуются метасоматиты, известные на Урале как “табашки”. Золото на данной стадии процесса в небольших количествах концентрируется в биотите, амфиболе, плагиоклазе [Огородников, Сазонов, 1991; Огородников, 1993; Сазонов и др., 2001].

По мере снижения температуры происходит постепенное уменьшение щелочности раство-

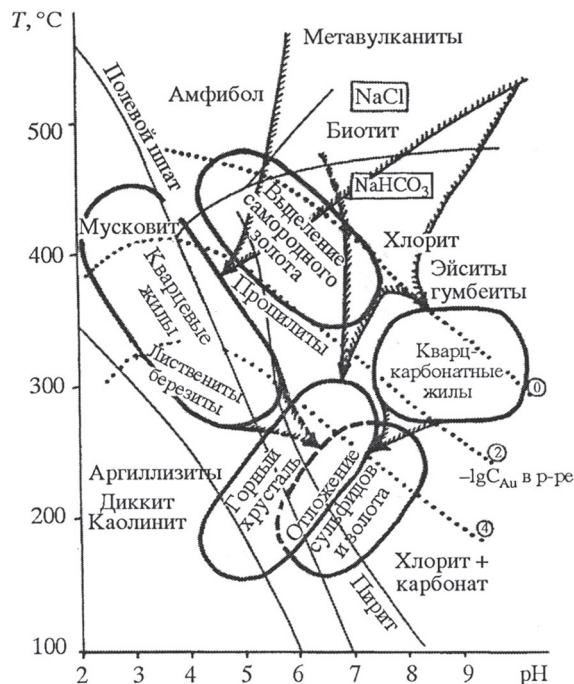


Рис. 3. Зависимость состава минеральных парагенезисов комплексных (золото + горный хрусталь) месторождений от T и pH среды минералообразования (кривые концентрации золота в растворе приведены по В.И. Белеванцеву и др. [1982], поля устойчивости минеральных парагенезисов – по И.Н. Говорову [1977]).

Fig. 3. The dependence of the composition of mineral assemblages integrated (gold + crystal rhinestone) deposits from T and pH of mineral-forming process (curves of the concentration of gold in solution is given by V.I. Belevantsev et al. [1982], the fields of stability of mineral parageneses – by I.N. Govorov [1977]).

ров и при температуре порядка 400–450°C осуществляется псевдоморфное замещение железомagneзиальных силикатов хлоритом. Дальнейший подъем растворов, усилившийся при обнавлении и новообразовании трещин в дайках и вмещающих породах, их постепенное остывание приводят к еще большему раскислению растворов. Этим обусловлено появление интенсивного окварцевания и мусковитизации (серицитизации), иногда с баритом или ангидритом, на верхних горизонтах, лиственизации и березитизации – на более глубоких горизонтах, где возрастает активность HCO_3 . Метасоматиты развиты в зальбандах кварцевых жил, образованных в трещинах отрыва при сдвиговых дислокациях вдоль границ даек или ранее образованных жил и трещин.

Изменения химического состава данных метасоматитов свидетельствуют о направленном раскислении растворов и кислотном выщелачивании пород, в условиях которого при температурах жиль-

образования золото становится мобильным, поэтому данные кварцевые жилы и околожилные метасоматиты на этом этапе не являются рудоносными. Золоторудная минерализация в жилах и метасоматитах отложилась в позднюю стадию гидротермального процесса при активизации трещинообразования, наложившегося и на кварцевые жилы. Ощелачивание раствора вызвано дальнейшим падением температуры и взаимодействием его с вмещающими породами. Сульфидная минерализация с золотом выполняет обычно сеть тонких трещин в кварце и на зальбандах жил, такие участки представляют собой богатые промышленные руды. Часть жил, где сульфидная минерализация отсутствует, остаются безрудными. Наиболее устойчивая корреляция золота устанавливается с висмутом, мышьяком, серебром, вольфрамом и свинцом, которые представляют собой благоприятный комплексный ореол [Огородников, 1993].

Кварцевые жилы сложены крупно- и гигантозернистым кварцем с отчетливым геометрическим отбором роста индивидов кварца и часто изобилует крупными “остаточными” полостями, инкрустированными друзьями горного хрусталя, нередко высокого качества. Это происходит в условиях ощелачивания раствора в кислотной области, в закрытой системе (полости). В случае рудной минерализации в жиле рудные минералы могут перекристаллизовываться и отлагаться в хрусталеносном гнезде или захватываться растущими кристаллами горного хрусталя. Аналогичные золоторудные жилы с крупными хрусталеносными полостями известны на Чукотке и в Верхоянье [Юргенсон, 1984].

Развитие метаморфогенно-гидротермальной системы, формирующей кварцево-жилы, хрусталеносные месторождения с сопряженной золоторудной минерализацией, связано с проявлением позднеколлизийного этапа в обрамлении древних гнейсовых блоков в шовных зонах смятия [Огородников, Сазонов, 1991].

Золоторудные месторождения и хрусталеносные кварцево-жилы поля с сопутствующей золоторудной минерализацией размещаются на удалении от интенсивно гранитизированного гнейсового блока, зон пегматитообразования, в кристаллических сланцах докембрийского осадочного чехла, метаморфизованных в условиях амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой фаций, и далее в блоках, сложенных метавулканитами, серпентинитами и терригенно-осадочными породами, метаморфизованными в условиях зеленосланцевой фации. В метавулканитах, метаморфизованных в условиях зеленосланцевой фации, ранняя щелочная стадия представлена биотитом в виде неориентированных таблитчатых кристаллов. Биотитизированные метавулканиты золотоносные, содержание золота в них достигает 9.6 г/т (Астафьевское месторождение пьезокварца). По-видимому, в указан-

ных породах золото фиксируется преимущественно в самородной форме. Его пробность высокая (более 900), так как в этих условиях серебро в растворе достаточно устойчиво. Наиболее яркая черта этих метасоматитов – широкое развитие теллуридов, которые совместно с самородным золотом определяют продуктивность рудных тел [Огородников, 1993; Сазонов и др., 2001]. Зона биотита в силу ряда причин является термодинамическим и, соответственно, геохимическим барьером, способствующим накоплению элементов [Блюман, 1985], т. е. зона биотитизации при снижении температуры и раскислении растворов (хлоритизация биотита) служит зоной перестройки флюидной системы, перехода ее из надкритического состояния расслоения на водную и газовую фазы. Такая перестройка резко сказывается на устойчивости растворенных рудных комплексных соединений и сопровождается их осаждением, в частности золота. Наряду с этим резко падает растворимость сульфидов в растворах по мере снижения температуры. Поэтому совместное осаждение золота и сульфидов приводит к формированию рудных тел и объектов, относящихся к золото-сульфидной формации.

При нарастающем снижении температуры процесс может идти двумя путями. Первый путь – дальнейшее раскисление раствора (см. первые, левые ветви на рис. 3). Примерная температура замещения биотита, а также альмандина и амфиболов хлоритом – 400–450°C [Огородников, 1993; Сазонов и др., 2001]. Хлорит замещает железо-магнезиальные минералы псевдоморфно, по составу относится к корундофиллитам-рипидолитам. В серпентинитах наблюдается образование зон хлорита и талькохлоритов. К концу этого процесса формируются мелкозернистые золотосодержащие пирит и халькопирит. В зонах хлоритизации концентрируется золото, содержание которого достигает 4 г/т. Возможность осаждения золота при понижении температуры щелочного раствора показана экспериментально [Рябчиков, 1975; Летников, Вилор, 1981; Белеванцев и др., 1982].

Более поздняя кислотная стадия гидротермальной деятельности отчетливо приурочена к зонам разломов различной ориентировки и трещинам их оперения. Ее продуктами в кристаллических сланцах являются кварцевые жилы, сопровождающиеся алюмокремниевыми метасоматитами с силлиманитом, андалузитом, мусковитом, хлоритом, плагиоклазом в ассоциации с кварцем. Анализ этих химических превращений свидетельствует о кислотном выщелачивании. Данные парагенезисы могут накладываться на метасоматиты раннеколлизийного этапа. Эти парагенезисы, соответственно, типоморфны для кварц-мусковитовой и березит-лиственитовой формаций и образуются при близких или одинаковых PT -параметрах раствора, но при различном содержании в нем HCO_3 и CO_2 . По-

следнее реализуется на месторождениях в связи с неравномерностью проявления катаклаза в зонах разломов, обусловившего дифференциальное выкипание CO_2 из раствора. В названных метасоматитах фиксируется пирит с незначительным (до 0.1 г/т) содержанием золота. Это естественно для пиритов стадии кислотного выщелачивания [Огородников, Сазонов, 1991; Огородников, 1993; Сазонов и др., 2001].

Формирование данных метасоматитов сопровождалось мобилизацией золота и халькофильных элементов в раствор, дальнейшее развитие процесса сопровождается рудоотложением. Рудные минералы в жилах отлагались на зальбандах и по трещинам в кварце и представлены молибденитом, пиритом, халькопиритом, ковеллином, шеелитом, гематитом, висмутином, золотом. Наблюдения показывают, что золотоносные метасоматиты с сульфидной и висмутовой минерализацией, сопровождаемые мусковит-кварцевыми метасоматитами, могут быть наложенными на раннегерцинские слабозолотоносные шеелит-кварцевые жилы и занимают секучее положение по отношению к ним. Содержание золота в метасоматитах с сульфидами достигает 3.5 г/т. Вмещающие гранитизированные кристаллические сланцы так же, как плагиогнейсы из гнейсовых блоков, в объеме всего блока характеризуются низкими фоновыми содержаниями золота (Джабык-Карагайский комплекс – 1.35 мг/т; Адамовский комплекс – 1.4 мг/т), при метасоматических преобразованиях оно возрастает и в рудных кварцевых жилах может достигать граммовых содержаний [Огородников, 1993]. Кварц кварцевых жил, в которых рудная минерализация отсутствует, подвергся грануляции, рекристаллизации с очищением от микропримесей, при значительной протяженности и мощности используются для плавки многокомпонентных стекол и в качестве сырья для синтеза кварца.

Второй путь в гидротермально-метасоматических преобразованиях связан с активизацией тектонической деятельности, после завершения образования кварцево-жильной минерализации и наложенного на них оруденения. При наличии контакта толщ метавулканитов с карбонатными отложениями хлоритовые растворы преобразуются в бикарбонат-хлоридные и приобретают отчетливо щелочную характеристику (см. рис. 3, правая ветвь).

Бикарбонатная специализация растворов приводила к значительному расширению щелочной обстановки до более низких температур. В условиях зеленосланцевой фации и хрупких деформаций при жиллообразовании происходило вскипание растворов, а падение давления стимулировало осаждение кварца с образованием кварцевых и кварц-карбонатных жил. Количество последних на золоторудных месторождениях всегда значительно выше.

Кварцевые жилы, сложенные полупрозрачным светло-серым кварцем с характерным блеском мощностью до 1.5–2.5 м, содержат рудную минерализацию 1–3% – пирит, тетраэдрит, пирротин, галенит, сфалерит, халькопирит, самородное золото, шеелит, теллуриды. Золото чаще всего содержится в кварце. Его выделения приурочены к трещинам, рассекающим кварц, или к границам зерен кварца. В зальбандах кварцевых жил пирит образует гнездообразные скопления (пирит золотоносный – 3.6–3.4 г/т, иногда 20–30 г/т).

Углекислота, образованная при вскипании бикарбонатных растворов, перемещаясь в верхние горизонты кварц-жильного поля, накапливалась под различными экранами, что приводило к формированию хрусталеносных зон аргиллизитов. Этот процесс промоделирован в экспериментах [Глюк, 1989] и зафиксирован на хрусталеносных объектах [Эшкин и др., 1983; Огородников, 1993; Огородников, Сазонов, 1991]. Щелочные бикарбонатно-хлоридно-натровые растворы обладают большой агрессивностью по отношению к кремнезему [Балицкий, 1972, 1978] и производят выщелачивание встречающихся на их пути кварцевых жил. Углекислота, раскисляя растворы, стимулировала осаждение кремнезема, но так как оно происходило в существенно закрытой системе, а в растворах концентрация кремнезема уже значительно ниже, чем при образовании жил, то наблюдается медленный рост качественных кристаллов горного хрусталя. Формирование кристаллов в полостях обычно происходило уже из существенно хлоридно-натриевых растворов, когда бикарбонатная составляющая была в значительной мере израсходована на образование карбонатов.

Области формирования хрусталеносных гнезд по температуре и щелочности растворов и области раннего рудоотложения сульфидов с золотом перекрывают друг друга. В процессе хрусталеобразования при наложении гнезд на рудные жилы нередко отмечается переотложение рудных минералов, а также золота в хрусталеносных гнездах. Литохимические съемки, выполненные на месторождениях, показали, что хрусталеносные зоны обрамляются контрастными ореолами сурьмы, мышьяка, серебра, свинца, висмута, меди и полями развития сульфидов [Огородников, Сазонов, 1991; Огородников, 1993; Огородников и др., 2014]. Совмещение хрусталеносных и золоторудных жил кроме Урала наблюдается на Дальнем Востоке, Памире, Кавказе, Тянь-Шане, в Казахстане и в других регионах [Шарков, 1960; Польшковский, 1963; Мельников, Падич, 1969; Бочкарев, 1971].

Наложение хрусталеносной минерализации на раннеколлизийные рудоносные кварцевые жилы зафиксировано в карьере Западного участка Астафьевского месторождения (рис. 4). Наблюдения в карьере подтверждают наложение хрусталеносной

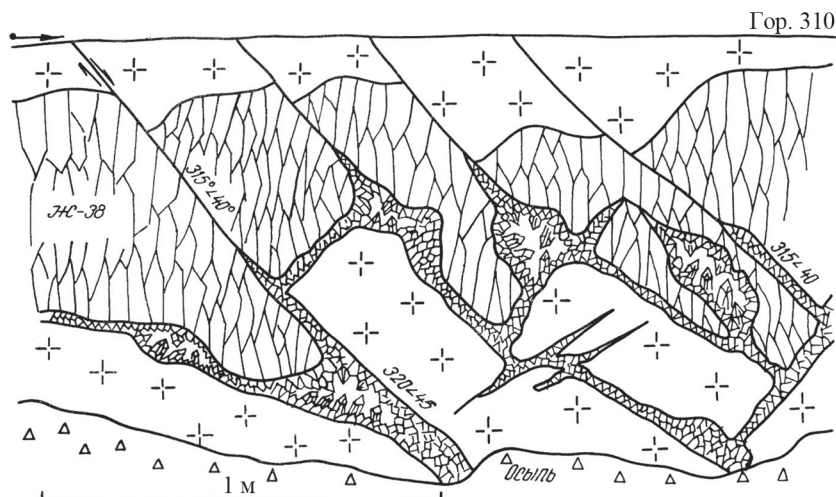


Рис. 4. Наложение хрусталеносной минерализации на монокварцевую жилу-38 (Западный участок Астафьевского месторождения, горизонт 310 м).

Fig. 4. Overlay of crystal-like mineralization on a mono-quartz vein (ж-38) (Western section of the Astafevskoe deposit, horizon 310 m).

минерализации ж-48 на плитообразную монокварцевую жилу (ж-38), которая по системе сколовых трещин (аз. пад. $315^\circ \angle 45^\circ$) была разбита на отдельные блоки, смещенные относительно друг друга.

ВЫВОДЫ

В заключение подчеркнем, что история геологического развития месторождений кварцево-жильного типа является сложной и охватывает значительные промежутки времени. “Корни металлогенической эволюции Земли следует, несомненно, искать в ее глобальной эволюции как планеты, в недрах которой от самого раннего докембрия к кайнозойе снижается общий фон температур, но растут градиенты глобальных тепловых полей, изменяются схемы циркуляции вещества на всех уровнях глубинности, нарастает степень его дифференциации с явным трендом к разрастанию континентальной литосферы и интенсифицируются процессы окисления” [Ткачев, 2009].

Геоструктурная эволюция метаморфического комплекса на начальном этапе приводит к образованию в диагональных шовных зонах благоприятных тектонических блоков, вмещающих кварцево-жильные золоторудные и редкометалльные рудные поля и месторождения. Дальнейшее их тектоническое преобразование создало благоприятные “желобообразные” дренажные тектонические структуры, активно проработанные метасоматическими процессами и вмещающие кварцево-жильные, хрусталеносные (с переотложенным золотом) зоны.

Формирование кварцевых жил относится лишь к отдельным этапам развития месторождений, а сами они всегда приурочены к определенным струк-

турным элементам, в пределах которых в последующие стадии формирования рудных полей они подвергаются преобразованиям, нередко весьма значительным.

Таким образом, метаморфическая и метасоматическая зональности, различные термодинамические условия формирования жильного кварца и сопряженного с ним золотого оруденения, реализованные в их типоморфных характеристиках, объективно отражают их генетические особенности и могут быть использованы в качестве критериев прогнозирования и оценки объектов, в особенности на ранних стадиях геологоразведочных работ.

Работа выполнена в рамках темы № 0393-2016-0024 государственного задания ИГГ УрО РАН “Коллизионные и постколлизионные рудообразующие процессы внутриплитных мобильных поясов” (№ гос. регистрации АААА-А18-118052590028-9), руководитель доктор геол.-минерал. наук А.Ю. Кисин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ануфриев Ю.Н., Москалюк А.А., Белик Д.М. (1971) Эволюция состава минералообразующих растворов на примере двух месторождений горного хрусталя на Урале. *Исследование минералообразующих растворов и расплавов по включениям*. Тр. ВНИИСИМС, XIV. Александров, 30-39.
- Балицкий В.С. (1972) Особенности растворимости кварца в гидротермальных растворах различного состава. *Метаморфогенное рудообразование*. М.: Недра, 252-260.
- Балицкий В.С. (1978) Экспериментальное изучение процессов хрусталеобразования. М.: Недра, 144 с.
- Белеванцев В.И., Колонин Г.Р. Васильева Н.Г., Широ-

- носова Г.П., Шамовская Г.И. (1982) Возможные формы нахождения и растворимости золота в рудообразующих растворах. *Гидротермальное низкотемпературное рудообразование и метасоматоз*. Новосибирск: Наука, 83-117.
- Блюман Б.А. (1985) Эндогенные режимы и типы метаморфизма складчатых областей. М.: Недра, 183 с.
- Бочкарев А.И. (1971) К особенностям образования гидротермально-метаморфогенных хрусталеносных гнезд. *Зап. ВМО*, **100**(3), 309-313.
- Буканов В.В. (1974) Горный хрусталь Приполярного Урала. Л.: Наука, 212 с.
- Глюк Д.С. (1989) Экспериментальное моделирование гидротермально-метаморфогенного перераспределения вещества на примере золота. *Метасоматиты докембрия и их рудоносность*. М.: Наука, 259-264.
- Говоров И.Н. (1977) Термодинамика ионно-минеральных равновесий. М.: Наука, 249 с.
- Колонин Г.Р. (1977) Эволюция свойств и состава постмагматических рудообразующих флюидов при температурах ниже 450°C. *Флюидный режим земной коры и верхней мантии*. Иркутск: СО АН СССР, 87-88.
- Коротеев В.А., Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. (2010) Минерагения шовных зон. Екатеринбург: УрО РАН, 415 с.
- Критерии прогнозной оценки территорий на твердые полезные ископаемые (Под ред. Д.В. Рундквиста). (1978) Л.: Недра, 607 с.
- Летников Ф.А., Вилор Н.В. (1981) Золото в гидротермальном процессе. М.: Недра, 224 с.
- Мельников Б.Д., Попадич А.Ф. (1969) Возрастные взаимоотношения рудных и хрусталеносных жил Орулганского антиклинория. *Сов. геология*, (5), 127-133.
- Мельников Е.П. (1988) Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца. М.: Недра, 216 с.
- Огородников В.Н. (1993) Закономерности размещения и условия сопряженного образования кварцевожилных, хрусталеносных и золоторудных месторождений Урала: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Екатеринбург, 470 с.
- Огородников В.Н., Сазонов В.Н. (1991) Соотношения золоторудных и хрусталеносных месторождений обрамления гнейсовых блоков Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 70 с.
- Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. (2004) Минерагения шовных зон Урала. Кочкарский рудный район (Южный Урал). Екатеринбург: Изд-во УГГА, 216 с.
- Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. (2007) Минерагения шовных зон Урала. Уфалейский гнейсово-амфиболитовый комплекс (Южный Урал). Екатеринбург: ИГТ УрО РАН; УГГУ, 187 с.
- Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А., Бабенко В.В., Савичев А.Н. (2014) Золоторудная, редкометалльная и хрусталеносная минерализация месторождений Урала кварцево-жильного типа. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН; УГТУ, 312 с.
- Поспелов Г.Л. (1963) Геологические предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников. *Геология и геофизика*, (3), 18-38; (4), 24-41.
- Польковский В.С., Меркулов Б.С., Божко М.Т. (1963) Минералогическая и геохимическая характеристики ореолов пропаривания, выявленных декрипитацией пород около хрусталеносной жилы на Памире. *Минералогическая термометрия и барометрия*. Т. 1. М.: Наука, 204-215.
- Прогнозирование, поиски и оценка месторождений пьезооптического минерального сырья. (1975) М.: ВНИИСИМС, 212 с.
- Рундквист Д.В., Денисенко В.К., Павлова И.Г. (1971) Грейзеновые месторождения. М.: Недра, 328с.
- Рундквист Д.В. (1964) О структурах и закономерностях размещения кварц-редкометалльных жильных месторождений восточного склона Урала. *Геол. рудн. месторождений*, (2), 21-37.
- Рябчиков И.Д. (1975) Термодинамика флюидной фазы гранитоидных магм. М.: Наука, 230 с.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (2001) Месторождения золота Урала. Екатеринбург, 622 с.
- Ткачев А.В. (2009) Принципиальные черты эволюции глобальной металлогении Земли. *Минерагения докембрия*. Петрозаводск: Ин-т геологии КарНЦ РАН, 257-259.
- Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Кременецкий А.А., Шардакова Г.Ю., Шагалов Е.С. (2007) Магматический контроль гидротермального золотого оруденения на Урале. *Эндогенное оруденение в подвижных поясах*. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 181-184.
- Шарков А.А. (1960) Типы и минералогия хрусталеносных кварцевых жил Нагорного Дагестана. М.: ВНИИП, **IV**(1), 101-106.
- Эшкин В.Ю. (1965) Самородное золото в хрусталеносной кварцевой жиле на Приполярном Урале. *Зап. ВМО*, **94**(2), 203-204.
- Эшкин В.Ю., Карякина Т.А., Богданова Г.Н. (1983) Эволюция кристаллов кварца и стадийность хрусталеобразования. *Новые идеи в генетической минералогии*. Л.: Наука, 82-87.
- Юргенсон Г.А. (1984) Типоморфизм и рудоносность жильного кварца. М.: Недра, 149 с.

REFERENCES

- Anufriev Yu.N., Moskalyuk A.A., Belik D.M. (1971) The evolution of the composition of mineral-forming solutions on the example of two deposits of rock crystal in the Urals. *Issledovanie mineraloobrazuyushchikh rastvorov i rasplavov po vklucheniyam*. Tr. VNIISIMS, **XIV** [Study of mineral-forming solutions and melts by inclusions Proc. VNIISIMS, **XIV**]. Aleksandrov, 30-39. (In Russian)
- Balitskii V.S. (1972) Solubility features of quartz in hydrothermal solutions of different composition. *Metamorfogennoe rudoobrazovanie* [Metamorphogenic ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 252-260. (In Russian)
- Balitskii V.S. (1978) *Ekspериментal'noe izuchenie protsessov khrustaleobrazovaniya* [Experimental study of the processes of crystal formation]. Moscow, Nedra Publ., 144 p. (In Russian)
- Belevantsev V.I., Kolonin G.R., Vasil'eva N.G., Shironosova G.P., Shamovskaya G.I. (1982) Possible forms of finding and solubility of gold in ore-forming solutions. *Gidrotеrmal'noe nizkotemperaturnoe rudoobrazovanie i metasomatоз* [Hydrothermal low-temperature ore formation and metasomatism]. Novosibirsk, Nauka Publ., 83-117. (In Russian)
- Blyuman B.A. (1985) *Endogennye rezhimy i tipy metamor-*

- fizma skladchatykh oblastei* [Endogenous regimes and types of metamorphism of folded regions]. Moscow, Nedra Publ., 183 p. (In Russian)
- Bochkarev A.I. (1971) To the peculiarities of formation of hydrothermal-metamorphogenic crystal-bearing nests. *Zap. VMO*, **100**(3), 309-313. (In Russian)
- Bukanov V.V. (1974) *Gornyi khrustal' Pripolyarnogo Urala* [Rock crystal of the Subpolar Ural]. Leningrad, Nauka Publ., 212 p. (In Russian)
- Eshkin V.Yu. (1965) Native gold in a crystal quartz vein in the Subpolar Urals. *Zapiski VMO*, **94**(2), 203-204. (In Russian)
- Eshkin V.Yu., Karyakina T.A., Bogdanova G.N. (1983) Evolution of quartz crystals and the staging of crystal formation. *Novye idei v geneticheskoi mineralogii* [New ideas in genetic mineralogy]. Leningrad, Nauka Publ., 82-87. (In Russian)
- Fershtater G.B., Kholodnov V.V., Kremenetskii A.A., Sharadkova G.Yu., Shagalov E.S. (2007) Magmatic control of hydrothermal gold mineralization in the Urals. *Endogennoe orudenenie v podvizhnykh poyasakh* [Endogenous mineralization in mobile belts]. Ekaterinburg, IGG UB of RAS, 181-184. (In Russian)
- Glyuk D.S. (1989) Experimental modeling of hydrothermal-metamorphogenic redistribution of a substance using gold as an example. *Metasomatity dokembriya i ikh rudonosnost'* [Precambrian metasomatites and their ore-bearing]. Moscow, Nauka Publ., 259-264. (In Russian)
- Govorov I.N. (1977) *Termodinamika ionno-mineral'nykh ravnovesii* [Thermodynamics of ion-mineral equilibria]. Moscow, Nauka Publ., 249 p. (In Russian)
- Kolonin G.R. (1977) Evolution of the properties and composition of postmagmatic ore-forming fluids at temperatures below 450°C. *Flyuidnyi rezhim zemnoi kory i verkhnei mantii* [Fluid regime of the Earth crust and upper mantle]. Irkutsk, SB Akad. Nauk USSR, 87-88. (In Russian)
- Koroteev V.A., Ogorodnikov V.N., Sazonov V.N., Polenov Yu.A. (2010) *Minerageniya shovnykh zon* [Minerageny of suture zones]. Ekaterinburg, UB of RAS, 415 p. (In Russian)
- Kriterii prognoznnoi otsenki territorii na tverdye poleznye iskopaemye*. (1978) [Criteria for predictive assessment of areas for solid minerals]. (Ed. D.V. Rundkvist). Leningrad, Nedra Publ., 607 p. (In Russian)
- Letnikov F.A., Vilor N.V. (1981) *Zoloto v gidrotermal'nom protsesse* [Gold in the hydrothermal process]. Moscow, Nedra Publ., 224 p. (In Russian)
- Mel'nikov B.D., Popadich A.F. (1969) The age relationship of ore and crystal-bearing veins of Orulgan anticlinorium. *Sov. Geologiya*, (5), 127-133. (In Russian)
- Mel'nikov E.P. (1988) *Geologiya, genezis i promyshlennyye tipy mestorozhdenii kvartsa* [Geology, genesis and industrial types of deposits of quartz]. Moscow, Nedra Publ., 216 p. (In Russian)
- Ogorodnikov V.N. (1993) *Zakonomernosti razmeshcheniya i usloviya sopryazhennogo obrazovaniya kvartsevo-zhil'nykh, khrustalenosnykh i zolotorudnykh mestorozhdenii Urala*. Dis. dokt. geol.-min. nauk [Regularity of location and conditions for the conjugate formation of quartz-vein, crystal-bearing and gold-ore deposits of the Urals: Dr. geol. and min. sci. diss.]. Ekaterinburg, 470 p. (In Russian)
- Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A., Babenko V.V., Savichev A.N. (2014) *Zolotorudnaya, redkometall'naya i khrustalenosnaya mineralizatsiya mestorozhdenii Urala kvartsevo-zhil'nogo tipa* [Auriferous, rare metal and crystal-bearing mineralization of deposits of the Urals quartz-vein type]. Ekaterinburg, UB of RAS; UGGU Publ., 312 p. (In Russian)
- Ogorodnikov V.N., Sazonov V.N. (1991) *Sootnosheniya zolotorudnykh i khrustalenosnykh mestorozhdenii obramleniya gneisovykh blokov Urala* [The ratio of gold and crystal deposits framing gneiss blocks of the Urals]. Sverdlovsk, UB of Akad. Nauk SSSR, 70 p. (In Russian)
- Ogorodnikov V.N., Sazonov V.N., Polenov Yu.A. (2004) *Minerageniya shovnykh zon Urala. Kochkarskii rudnyi raion (Yuzhnyi Ural)* [Minerageny of the Urals suture zones. Kochkar ore region (South Ural)]. Ekaterinburg, UGGGA Publ., 216 p. (In Russian)
- Ogorodnikov V.N., Sazonov V.N., Polenov Yu.A. (2007) *Minerageniya shovnykh zon Urala. Ufaleiskii gneisovo-amfiborlitovyi kompleks (Yuzhnyi Ural)* [Minerageny of the Ural suture zones. Ufalei gneiss-amphibolite complex (Southern Urals)]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN; UGGU Publ., 187 p. (In Russian)
- Pospelov G.L. (1963) Geological prerequisites to the physics of ore-controlling fluid conductors. *Geol. Geofiz.*, (3), 18-38; (4), 24-41. (In Russian)
- Polykovskii V.S., Merkulov B.S., Bozhko M.T. (1963) The mineralogical and geochemical characteristics of the steaming halos, identified by decryption of rocks near the crystal-bearing vein in the Pamirs. *Mineralogicheskaya termometriya i barometriya. T. 1* [Mineralogical thermometry and barometry. V. 1]. Moscow, Nauka Publ., 204-215. (In Russian)
- Prognozirovaniye, poiski i otsenka mestorozhdenii p'ezo-opticheskogo mineral'nogo syr'ya*. (1975) [Forecasting, prospecting and evaluation of deposits of piezo-optical mineral raw materials]. Moscow, VNIISIMS, 212 p. (In Russian)
- Rundkvist D.V. (1964) On the structures and patterns of placement of quartz-rare metal vein deposits on the eastern slope of the Urals. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, (2), 21-37. (In Russian)
- Rundkvist D.V., Denisenko V.K., Pavlova I.G. (1971) *Greizenovyye mestorozhdeniya* [Greisen deposits]. Moscow, Nedra Publ., 328 p. (In Russian)
- Ryabchikov I.D. (1975) *Termodinamika flyuidnoi fazy granitoidnykh magm* [Thermodynamics of the fluid phase of granitoid magma]. Moscow, Nauka Publ., 230 p. (In Russian)
- Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A. (2001) *Mestorozhdeniya zolota Urala* [Ural gold deposits]. Ekaterinburg, IGG UB RAS; UGGU Publ., 622 p. (In Russian)
- Sharkov A.A. (1960) Types and mineralogy of crystal quartz veins of the Nagorny Dagestan. Moscow, VNIIP, **IV**(1), 101-106.
- Tkachev A.V. (2009) The principal features of the evolution of the global metallogeny of the Earth. *Minerageniya dokembriya* [Precambrian Mineralization]. Petrozavodsk, IG KarNTs RAS, 257-259. (In Russian)
- Yurgenson G.A. (1984) *Tipomorfizm i rudonosnost' zhil'nogo kvartsa* [Typomorphism and ore content of vein quartz]. Moscow, Nedra Publ., 149 p. (In Russian)