

УДК 553.435 : 548.0 : 550.812.1
DOI: 10.7868/S25000640190304

ГИДРОЭКСПЛОЗИВНЫЕ РУДЫ КОМСОМОЛЬСКОГО КОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

© 2019 г. И.А. Богуш¹, А.Б. Кафтанатий¹, Е.Б. Кафтанатий¹, Г.В. Рябов¹

Аннотация. Кластогенная форма колчеданных руд широко распространена в районах развития медноколчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений России и мира. Результаты минералогического картирования крупного южноуральского медноколчеданного месторождения Комсомольское позволили описать новую форму гидротермально-осадочного рудообразования – гидроэксплозивную. На примере этого объекта объясняется механизм кластогенного образования залежи. Изучение текстурно-структурных особенностей руд дало качественную информацию об условиях рудообразования и подтверждает выделение основных фациальных и текстурно-структурных групп. Группы отчетливо отличаются друг от друга минеральными особенностями, текстурами, структурами и способами локализации рудного вещества в рамках единого гидротермально-осадочного рудообразования. Подчеркнуто прикладное значение, генетическое разнообразие рудокластов и их роль в развитии основ теории гидротермально-осадочного рудообразования. Гидроэксплозивный режим осадочного рудонакопления связан с геологическими условиями проявления рудогенной структуры субмаринного эндогенного источника. Кластогенная неоднородность руд подтверждается их минералогическими и минералофизическими показателями. Формирование тела кластогенных руд сопровождало чередование осадочного процесса с периодическим наложением гидроэксплозий (вскипания) рудогенных флюидов. Этот процесс автоматически проявляется при превышении давлением рудного флюида давления столба океанской воды. При резком скачке роста давления рудных флюидов возникает предпосылка к флюидоэксплозии (гидроэксплозии) путем вскипания и взрыва газовой фазы. При дискретном пульсационном (прерывисто-непрерывном) режиме гидротермальной деятельности фронт и очаги эксплозии флюидов располагаются в верхней части растущего колчеданного тела. Только при таком размещении очагов эксплозии возможно дробление и кластеризация слабо литифицированных колчеданных руд. По мере роста рудного тела фронт перемещается в сторону кровли, и разброс рудных обломков происходит как по вертикали, так и по латерали. Синрудный механизм образования рудокластитов определен как эксплозивно-гидротермальный, связанный с зонами вскипания растворов, дезинтеграции пород и руд. В работе рассмотрены основные вопросы гидроэксплозивного (флюидоэксплозивного) механизма образования кластогенных колчеданных руд в рамках гидротермально-осадочного рудообразования.

Ключевые слова: колчеданное месторождение, генезис, рудолокализирующие факторы, типоморфизм, онтогенез, рудокластиты, гидроэксплозия.

HYDROEXPLOSIVE ORES OF THE SULPHIDE DEPOSIT KOMSOMOLSKOE

I.A. Bogush¹, A.B. Kaftanatiy¹, E.B. Kaftanatiy¹, G.V. Riabov¹

Abstract. The clastogenic form of pyrite ores is widespread in the areas of development of copper- and pyrite-polymetallic deposits in Russia and whole world. The results of mineralogical mapping of a large South Ural copper-ore deposit Komsomolskoe allowed to describe a new form of hydrothermal-sedimentary ore genesis – hydroexplosive. The mechanism of clastogenic formation of the deposit is explained by way of example of this object. The study of texture-structural features of ores gave qualitative information about the conditions of ore formation and confirms assignment of the main facies and texture-structural groups. The groups

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова (Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation), Российская Федерация, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, e-mail: kaftanatiy_ab@mail.ru

clearly differ from each other in mineral features, textures, structures and methods of ore matter localization within a single hydrothermal-sedimentary ore genesis. The applied importance, genetic diversity of ore-clasts and their role in the development of theoretical foundations of hydrothermal-sedimentary ore formation are emphasized. Hydroexplosive mode of sedimentary ore accumulation is associated with geological conditions of manifestation of ore-genetic structure of submarine endogenous source. Clastogenic heterogeneity of ores is confirmed by their mineralogical and mineral-physical indications. The forming of the body of clastic ores was accompanied by the alternation of sedimentary process with periodic imposition of hydroexplosions (ebullience) of ore-bearing fluids. This process is manifested automatically when the pressure of ore-bearing fluid exceeds the pressure of the ocean water column. With a sharp jump in the pressure growth of ore fluids there appears a prerequisite for fluid explosion (hydroexplosion), by boiling and explosion of the gas phase of ore fluid. With discrete pulsation (intermittent-continuous) mode of hydrothermal activity, the front and the centres of fluid explosion are located in the upper part of growing pyrite body. Only with this arrangement of the explosion foci, the splitting and clustering of weakly lithified pyrite ores is possible. As the ore body grows, the front moves towards the roof and the spread of ore debris occurs both vertically and laterally. Syn-ore mechanism of formation of ore debris is defined as explosive-hydrothermal associated with zones of boiling solutions, disintegration of rocks and ores. The report discusses the main issues of hydroexplosive (fluid explosive) mechanism of formation of clastic sulphide ores in the framework of hydrothermal-sedimentary ore genesis.

Keywords: massive sulphide deposit, genesis, ore localizing factors, typomorphism, ontogeny, ore clastites, hydroexplosion.

Кластогенная форма колчеданных руд широко распространена на Урале, Кавказе, Рудном Алтае и в настоящее время выделяется как рудная фация колчеданного рудогенеза [1–3]. Обломки сплошных сульфидных руд (рудокласты, рудные гальки, ксенолиты) сопровождают залежи, обнаруживая непосредственную связь с рудными телами. Изучение рудокластов началось в 60-х гг. прошлого столетия и по сей день привлекает внимание исследователей возможностью генетического анализа рудогенеза и детализации гидротермально-осадочной теории рудообразования [2; 4; 5].

Подробный обзор проблемы колчеданных рудокластов и анализ генетических представлений об их происхождении показали, что подавляющее большинство рудных обломков образовалось в придонной обстановке в результате разрушения колчеданных рудных тел до их перекрытия вмещающими вулканитами. Были разработаны представления о подводном выветривании (гальмиролизе) сульфидных построек и выделена фация колчеданных рудокластов [6; 7].

В известный Медногорский рудный район западного склона Южного Урала входят такие колчеданные месторождения, как Блявинское, Комсомольское, Яман-Касинское, Разумовское. Они приурочены к восточному крылу Блявинской брахисинклинальной структуры в пределах Курагано-Сакмарской структурно-формационной зоны. Комсомольское месторождение является генетическим аналогом Блявинского, которое послужило

А.Н. Заварицкому [4] примером вулканогенных месторождений. Позже это генетическое положение было дополнено и развито в статьях уральских геологов [8; 9] и группы ученых научной Оренбургской геологической экспедиции Московского государственного университета [10]. Работами этих и многих других исследователей были установлены геологические особенности Комсомольского месторождения, но генетические его позиции оставались дискуссионными. Наличие градационно слоистых сульфидно-оксидных руд в кровле и на флангах этих месторождений [2; 3] однозначно доказало гидротермально-осадочный генезис самих месторождений. Наши исследования позволили выяснить специфику рудогенеза сплошных колчеданных руд с преобладанием кластогенного характера.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработка генетических моделей Комсомольского месторождения прежде всего проводилась с учетом системного анализа геологических данных по типу вулканизма, регионального метаморфизма руд и вулканитов, зональности рудовмещающих комплексов и особенностей тектонического строения. Столь пристальное внимание к Комсомольскому месторождению объясняется крайне слабым проявлением регионального метаморфизма и сохранностью первичных особенностей руд. Модели зональности и генетических особенностей руд со-

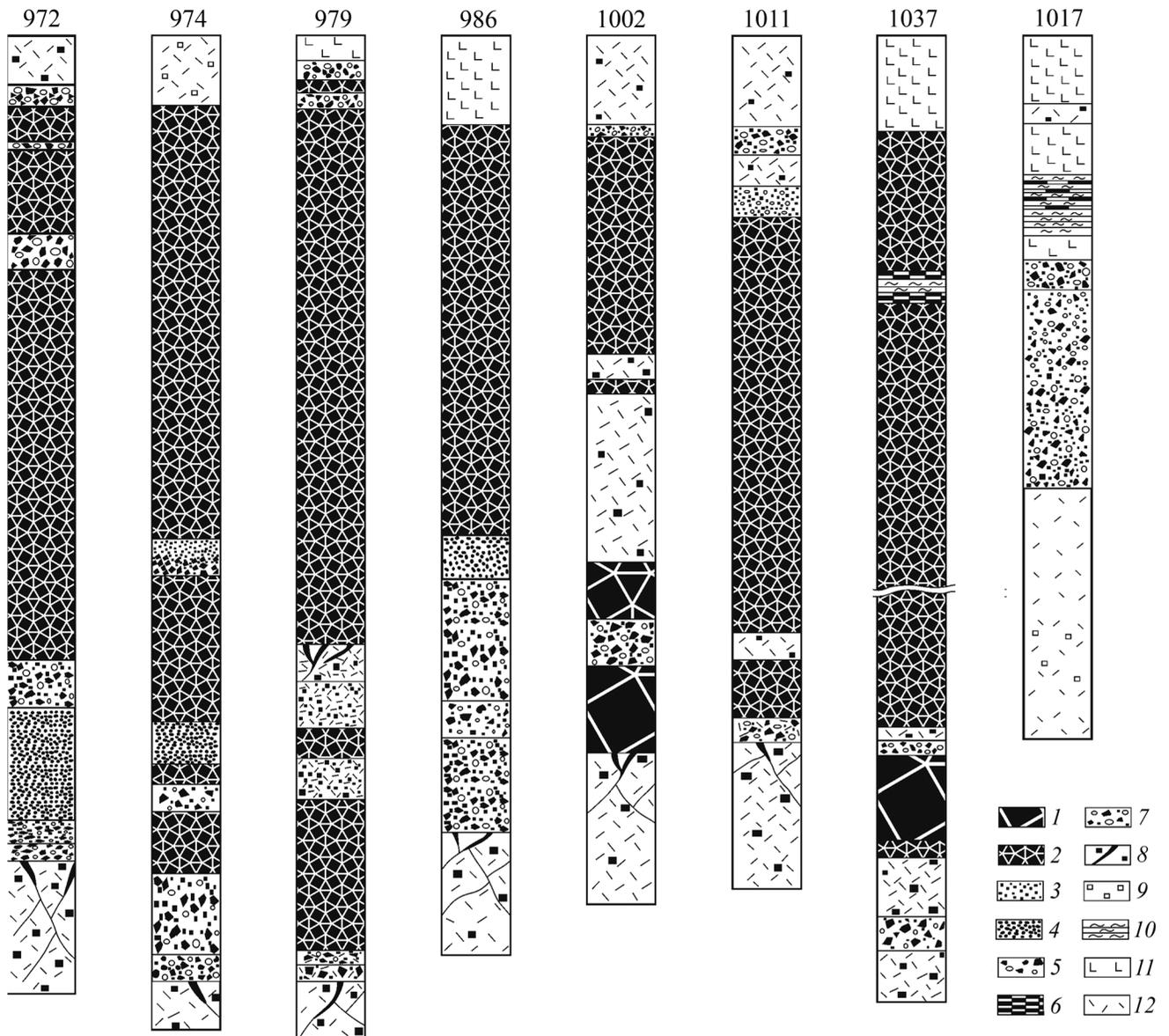


Рис. 1. Текстурно-структурные типы руд и метасоматитов в рудных сечениях Комсомольского месторождения. 1–4 – сплошные руды: 1 – крупноблоковые и массивные, 2 – гравелито-псаммитовые, 3 – песчано-алевролитовые, 4 – алевро-пелитовые; 5 – рудные конгломераты смешанного состава; 6 – кремнисто-сульфидно-оксидные руды, джеспероиды; 7 – гидротермально измененные рудокластиты смешанного состава; 8 – интенсивная прожилково-вкрапленная сульфидизация; 9 – рассеянная сульфидизация; 10 – кремнисто-оксидные породы; 11 – базальты; 12 – туфы риолито-дацитов.

Fig. 1. Textural and structural types of ores and metasomatites in the ore sections of the Komsomolskoe deposit: 1–4 – a solid ore: 1 – large block and a massive; 2 – gravelite-psammitic; 3 – sandy-silt; 4 – silt-pelitic; 5 – ore breccia conglomerates of mixed composition; 6 – siliceous-sulfide-oxide ore, jasperoids; 7 – hydrothermally altered oreclasstites of mixed composition; 8 – intense vein and disseminated sulfidization; 9 – scattered sulfidization; 10 – siliceous-oxide rocks; 11 – basalts; 12 – tuffs of the rhyolite-dacites.

ставлены по материалам минералогического и текстурно-структурного картирования керн скважин (№№ 971–1032) главных рудных разрезов в поперечных и продольных сечениях в наиболее мощной и представительной части рудной залежи (рис. 1). Минералогическое и текстурно-структурное картирование включало: а) макро- и микроизучение минерального состава, текстур и структур руд; б) исследование минералофизических (микротвердость,

термо-ЭДС, термобарометрия), геохимических и кристалломорфологических параметров.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМСОМОЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Крупное Комсомольское золото-медно-цинковое месторождение является типичным представителем колчеданных объектов, производных гидротер-

мально-осадочного рудогенеза [2; 3]. Представлено оно мощной залежью стратиформных руд с обширным подрудным ореолом гидротермально-метасоматических изменений пород лежачего бока (рис. 2).

Наряду со стратификацией рудных тел здесь хорошо проявляется универсальная вертикальная зональность гидротермально-осадочных залежей. В кровле и на флангах развиты градационно-слоистые сульфидно-оксидные руды. Сплошные кластогенные руды в форме линзовидных тел слагают рудную залежь, выполняя узкий тектонический трог. В лежачем боку развита мощная корневая зона метасоматического оруденения (рис. 2, 3). При палеорекострукции в качестве исходной горизонтальной поверхности, выполняющей функции дна троговой рудоконтролирующей структуры, выбран выдержанный по мощности маркирующий базальный горизонт рудоносных конглобрекчий.

Геологическое строение и контроль оруденения. В локализации и концентрации оруденения на Комсомольском месторождении отчетливо проявились стратиграфо-петрологический и структурно-палеотопографический рудо локализирующие факторы. Стратиграфо-петрологический контроль отражен в четкой приуроченности оруденения к стратифицированному контакту кремнекислых и перекрывающих их основных вулканитов. Структурный контроль оруденения [5; 9; 11] заключается в приуроченности рудной зоны месторождения к локальному субмеридиональному, конседиментационному трогу шириной 400–600 м, совпадающему по простиранию с Блявинско-Киндерлинской синклинальной зоной глубинного заложения [8–10; 12]. Основное рудоконтролирующее значение на месторождении имеют структуры, образующие корытообразный в поперечном сечении рудоаккумулирующий Комсомольский палеотрог (рис. 3). Ось палеодепрессии совпадает с направлением главных разломов северо-восточного простирания. Палеотопографические особенности бортов и ложа синрудной троговой депрессии определяют мощность, морфологию рудных тел и фациальные типы осадочного колчеданного оруденения. Раздувы стратиформных рудных тел по мощности связаны с конседиментационными депрессиями. Колчеданные руды локально выполняют и частично компенсируют прогибание конседиментационной впадины. В структурном отношении месторождение имеет сложное блоковое строение, обусловленное проявлением долгоживущих дислокаций синвулканического (синрудного) и унаследованного харак-

тера. Контакт надрудных базальтоидов с колчеданными рудами и подстилающими кремнекислыми породами носит нормальный стратиграфический характер и трассируется рудной галькой, туффитами и кремнисто-сульфидными эксгалитами. Сульфидное оруденение стратиграфически выше контакта практически не наблюдается.

Минеральный состав руд. Минеральный состав рудной залежи довольно стандартный, свойственный колчеданным объектам. Среди рудных минералов к главным можно отнести пирит, сфалерит, халькопирит, а также дисульфиды железа, структурно-морфологически соответствующие марказиту и мельниковиту (грейгиту). К второстепенным минералам относятся магнетит, гематит, гетит, гидрогетит, борнит, халькозин. Месторождение можно считать уникальным по сохранности и разнообразию текстурно-структурных типов руд, морфогенетических и кристалломорфологических разновидностей пирита [13]. В рудах Комсомольского месторождения выявлены все генетические разновидности пиритов [6], свойственные полигенным колчеданным объектам: диагенетический, автобластический, гидротермально-метасоматический, – за исключением метаморфогенных разновидностей высоких степеней метаморфизма.

На месторождении текстурно-структурные особенности руд несут важную качественную информацию об условиях рудообразования, что подтверждает выделение основных фациальных и текстурно-структурных групп (рис. 1). Первая группа приурочена к верхней части разреза и представлена такими текстурами, как брекчиевидная, слоистая, колломорфная, землисто-порошковая, типичными для гидротермально-осадочного рудообразования на выходе гидротермальной системы в открытый бассейн. На таком термодинамическом и геохимическом барьере в условиях лавинной седиментации и диагенетичного перерождения характерно формирование натечных, почковидных, секреторных, лучистых, конкреционных, микрозернистых агрегатных образований. Широкое распространение имеют пластинчатые, фрамбидальные, глобулярные, дендритовидные формы выделения дисульфидов железа. Вторую группу определяют структуры раскристаллизации и перекристаллизации сульфидов [14] с максимальным проявлением в нижних частях разреза. Наиболее характерны для этой группы зернистые структуры с различной крупностью и идиоморфизмом зерен, зональностью роста пирита, структуры распада твер-

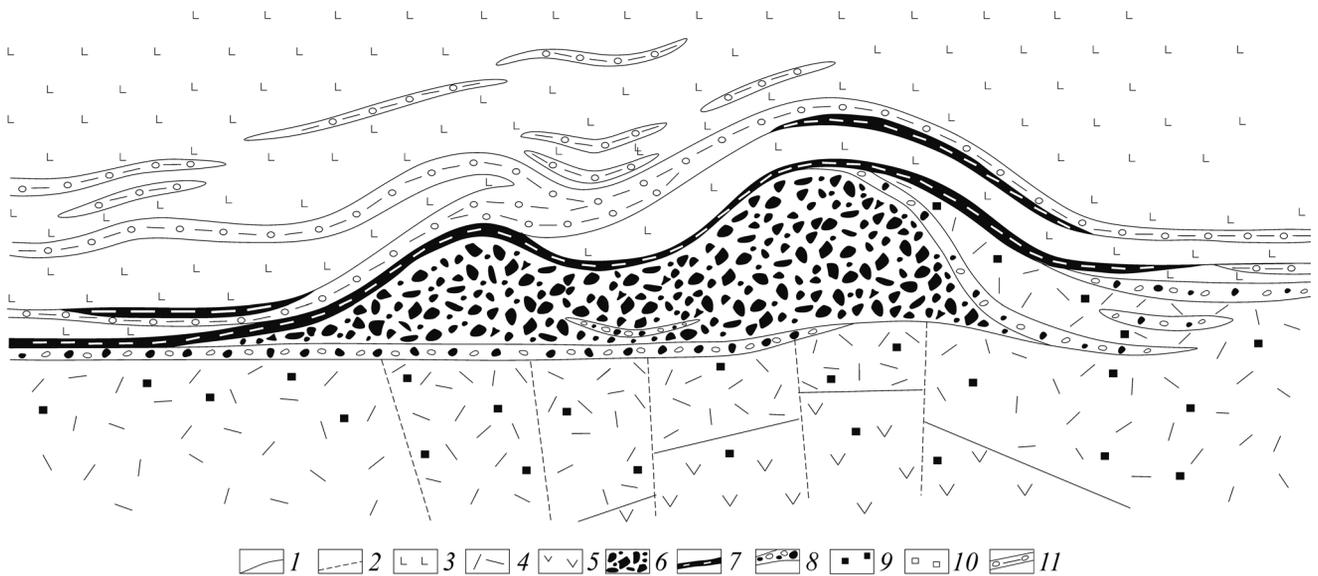


Рис. 2. Палинспастическая модель по продольному сечению Комсомольского месторождения: 1 – геологические границы; 2 – тектонические нарушения; 3 – несulfидизированные базальты; 4 – туфы риолито-дацитов; 5 – sulfидизированные базальтоиды; 6 – сплошные колчеданные руды обломочной текстуры (рудокластиты); 7 – эксгаляционно-осадочные, кремнисто-сульфидно-оксидные руды; 8 – рудные конглобрекции смешанного состава; 9 – интенсивная прожилково-вкрапленная sulfидизация; 10 – рассеянная sulfидизация; 11 – туфы и туффиты основного состава.

Fig. 2. Palinspastic model on longitudinal section of the Komsomolskoe deposit: 1 – geological borders; 2 – tectonic faults; 3 – nonsulphid basalts; 4 – tuffs of rhyolite-dacites; 5 – sulphidized basaltoids; 6 – solid sulphide ores of clastic structure (oreclastites); 7 – exhalation-sedimentary, siliceous sulphidic oxide ores; 8 – ore breccia conglomerate of mixed composition; 9 – intensive vein and disseminated sulfidization; 10 – scattered sulfidization; 11 – tuffs and tuffites of basic composition.

дых растворов. Структуры экслюзии (exsolution texture) наблюдаются в полиминеральных агрегатах сфалерит-халькопирит-борнит-изокубанитового состава. Выделяется катаклаз усадки, связанный с сокращением объема диагенетических агрегатов при их раскристаллизации и аутометасоматической перекристаллизации. С ними связаны структуры кластических деформаций, коррозии, разъедания и замещения, образующие третью группу и отвечающие процессам дезинтеграции и переотложения.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ И ФАЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ РУД

Рудное тело месторождения сложено следующими типами оруденения, подчеркивающими гидротермально-осадочный рудогенез в локализации колчеданных масс: 1) кремнисто-сульфидно-оксидные эксгалиты; 2) рудные конгломераты и конглобрекции смешанного состава; 3) моносulfидные брекчиевидные рудокластиты (гидроэксплозиты); 4) гидротермально-метасоматическое оруденение и метасоматиты корневой зоны. Эти руды отчетливо отличаются друг от друга минеральными особенностями, текстурами, структурами и способами локализации рудного вещества в рамках единого гидротермально-осадочного рудогенеза (рис. 1).

Кремнисто-сульфидно-оксидные эксгалиты представлены эксгаляционно-осадочными, терригенными и терригенно-пирокластическими кремнисто-железистыми образованиями (кремнистые эксгалиты, туффиты, рудные песчаники, госсаниты и джаспериты). Эти руды в качестве весомого аргумента процессов осадочности, диагенеза и гальмиролиза колчеданных руд описаны Н.С. Скрипченко [2; 3], В.В. Масленниковым [7] и др., как ритмичное чередование темно-красного туфо-алевролита, колчеданной руды и продуктов их выветривания. В настоящее время аналогичные руды рассматриваются как осадочные продукты гальмиролиза и эрозии кровли рудной залежи. Располагаясь в кровле и на флангах стратиформных колчеданных залежей, они фиксируют затухание или прекращение деятельности эндогенного рудного источника, конечный этап рудообразования.

Рудные конгломераты и конглобрекции. Рудносные вулканотерригенные обломочные образования (конгломераты и конглобрекции) смешанного рудного и петрогенного состава пространственно сопряжены с рудным телом в почве, кровле, внутри и на флангах. При наличии в руде отдельных окатанных петрогенных обломков и их скоплений, изометричной формы рудных обломков такие об-

разования определяются как рудные конгломераты смешанного состава. Пластовые тела обломочных руд смешанного состава строго стратифицированы и залегают как в основании, кровле рудной залежи, так и внутри ее (рис. 1–3). Для них характерна большая степень окатанности и сортировки по крупности петрокластического материала.

Размер, состав, окатанность, сортировка обломков в этих образованиях сильно варьируют. Характерной особенностью этих образований является совместное нахождение петрокластов и рудокластов самого различного состава. Петрокласты представлены обломками риолитов, риолито-дацитов, дацитов, гранофиров, андезитов, базальтов, кремнисто-гематитовых пород, метасоматически измененных пород. Цементируются они более тонким обломочным материалом вплоть до алевроитовых и алевро-пелитовых фракций. Примечательно, что в большинстве случаев вторичные гидротермально-метасоматические изменения ограничены границами обломков и в породе соседствуют петрокласты различных фаций. Нерудные обломки представлены галечниково-гравелитовой фракцией. На конглобрекциях смешанного состава в лежачем боку месторождения могут накладываться гидротермально-метасоматические изменения, преимущественно развивающиеся по цементирующей массе. По степени окатанности обломки варьируют от угловатых до округло-овальных, комковатых. Максимальной окатанностью обладают петрологические гранофировые разности. Наименее окатаны петрокласты хлоритизированных вулканических стекол. Последние, по всей видимости, при перемещении легко раскалывались и растирались до пелитовых частиц тонкообломочного цемента. Количественные соотношения рудных и нерудных обломков сильно варьируют, и при уменьшении сульфидной составляющей рудные конглобрекции смешанного состава переходят фациально на флангах и в кровле месторождения в вулканно-терригенные конглобрекции. В отличие от взрывных брекчий, известных в Блявинском рудном поле [15], в конглобрекциях отсутствует лавовый цемент, вместо которого имеется как терригенная нерудная, так и сульфидная составляющая. В составе сульфидного цемента представлены практически все морфогенетические разности дисульфидов железа. В интервалах, сопредельных с корневой зоной, гидротермально-метасоматические изменения в первую очередь развиваются по цементирующей пористой массе и лишь в последнюю очередь по петрокластам. Обломки сульфиди-

зированных метасоматитов представлены разнофациальными разностями. Совместное нахождение обломков разнотипных руд, метасоматитов и петрокластов является результатом механического совмещения при сублатеральной транспортировке рудо- и петрокластов в объеме тел конглобрекций смешанного состава. Наряду с пестротой минерального состава руд в пределах одного штуфа обломковидные руды характеризуются ярко выраженной энергетической неоднородностью. Микрокартирование термо-ЭДС штуфа рудной конглобрекции в обломках только пирит-халькопиритового состава обнаруживает большой разброс показателей коэффициента термо-ЭДС с различными типами проводимости. Такая неоднородность не наблюдается в массивных колчеданах. Локализация и скопление этих обломков обусловлены гидродинамическим режимом рудоконтролирующей троговой впадины, донными эрозийными потоками.

Моносulfидные брекчиевые рудокластиты (гидроэксплозиты). Особого внимания заслуживают сплошные колчеданные руды Комсомольского месторождения, представленные специфической формой проявления гидротермально-осадочных процессов. Эти руды слагают до 90 % руд месторождения. Их важной и отличительной особенностью является всеобщая кластогенная микро- и макротекстура в сочетании с типоморфными признаками гидротермально-осадочного рудогенеза. В данном случае рудная залежь месторождения практически полностью сложена кластогенными рудами брекчиевидной текстуры, стратиформные тела которых локализованы в пределах узкого трога (рис. 2, 3). Массивные разности на месторождении присутствуют в крайне ограниченном количестве. Сплошные брекчиевидные руды сложены гранулометрически несортированными и практически не окатанными обломками сульфидных руд. Размер колчеданных обломков в этих рудах варьирует от пелитовых до глыбовых фракций с мелко- и тонкообломочной цементацией. Выделяется структурно-текстурная пестрота обломков. Присутствуют практически все установленные на месторождении морфологические типы пирита с сугубо подчиненным значением кристалломорфного. В пределах обломков, как правило, выдержаны структурный тип и текстурные рисунки, срезаемые границами обломка. В соседних, соприкасающихся обломках морфологические и минералофизические характеристики обычно резко контрастируют. Большей частью колчеданные обломки макроскопически

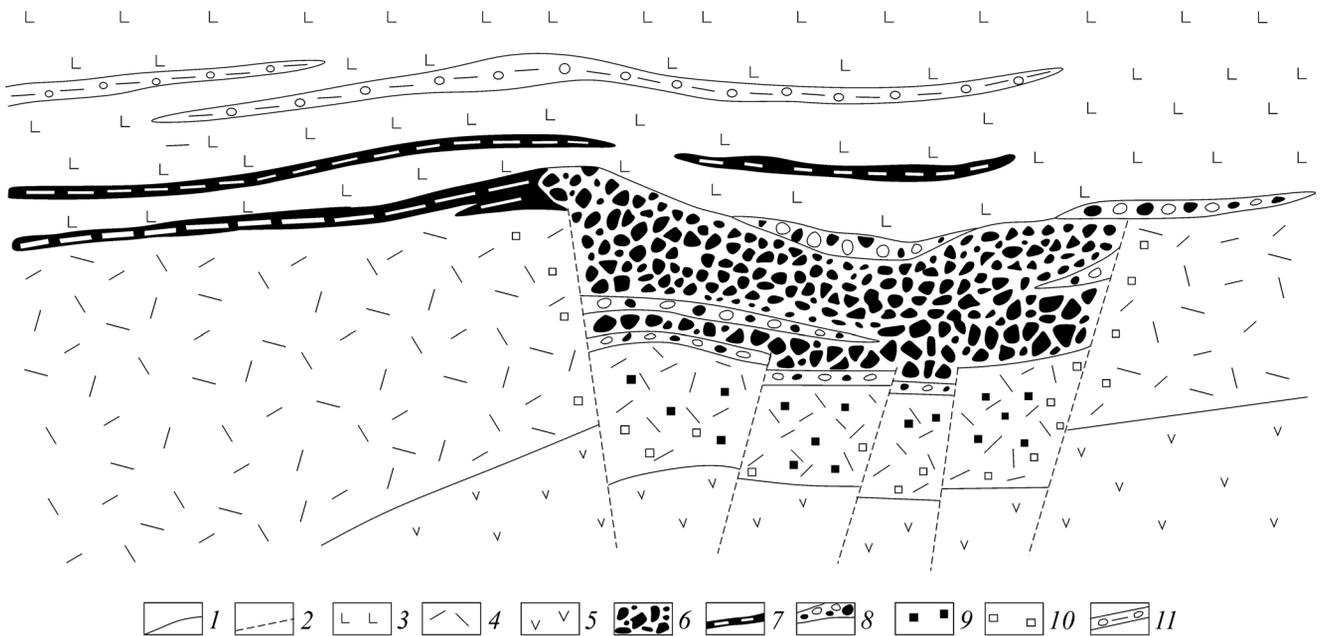


Рис. 3. Схематический поперечный разрез центральной части Комсомольского месторождения. Условные обозначения как на рисунке 2.

Fig. 3. Schematic cross-section of the central part of the Komsomolskoe deposit. See the legend in Fig. 2.

имеют четкие границы. Нередко контуры обломков, сложенных тонкозернистыми и тонкодисперсными разностями, с нечеткими границами, пластично и хрупко деформированы. При этом брекчиевидная текстура переходит на отдельных участках в комковатую и пятнисто-брекчиевую. В отдельных интервалах сплошных колчеданных руд проявляются признаки полосчатости и градационной слоистости. В отличие от латерально перемещенных форм рудокластов (рудная галька, турбидиты, гальмиролизные формы) рудные обломки сплошных руд месторождения не окатаны и не имеют признаков латерального перемещения.

Гидротермально-метасоматическое оруденение. Подстилается рудная залежь штокверковым прожилково-вкрапленным гидротермально-метасоматическим оруденением. Сульфидизация здесь неравномерная и представлена преимущественно пиритом, значительно реже – халькопиритом. Развивается она в виде секущих прожилков, а также метасоматически по цементу между туфогенными петрокластами. В приконтактных частях со сплошным оруденением пиритизированные метасоматиты лежачего бока в хлоритовом базисе содержат реликты диагенетических разностей. Подрудная прожилково-вкрапленная сульфидизация и метасоматическое оруденение переходят в пиритизированные метасоматиты кварц-серицитового и хлоритового состава.

ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные данные позволяют выделить и охарактеризовать специфику особого типа гидротермально-осадочного кластогенеза и рудогенеза. Перечисленные минералогические, текстурные и структурные признаки, зональность и стратификация руд Комсомольского месторождения однозначно указывают на гидротермально-осадочный процесс его образования [2; 3; 6]. Механизм и химизм этого процесс подтвержден многочисленными природными примерами и теоретическими работками [1; 4; 7; 16–22].

Полагается, что «черные курильщики» функционируют при условии превышения давлением рудного флюида давления надрудного столба воды [17; 21]. В субмаринной обстановке при поступлении горячих обогащенных сероводородом и металлами растворов в холодную слабощелочную придонную воду происходило лавинное сульфидообразование в виде взвесей и кристаллизации сульфидов внутри сульфидных холмов в порах, пустотах, полостях, трубах и трещинах и на их поверхности. Наблюдения за проявлениями «черных курильщиков» показывают, что из рудных холмов вырываются черные шлейфы уже кристаллизованных сульфидов, готовых взвесей твердых частиц сульфидов. В широко распространенных текстурах синрудного дробления обломочный материал

кристаллически зрелого зонального базисного пирита сцементирован агрегатом сажистого тонкодисперсного мельниквит-пирита (гель-пирита). Дроссельный эффект – процесс, вызывающий на участке дросселирования взрывообразное расширение флюида, – может вызывать настолько быстрое осаждение минералов из растворов, что в осадок будут переходить метастабильные фазы и ассоциации. Этот эффект в рудах должен вызывать «сильное опережение выпадения рудного вещества по сравнению с процессом роста кристаллов» [6]. Кристаллизация сульфидов из рудных флюидов непосредственно в придонной океанской воде имеет подчиненное значение.

Особенностью рудообразования основной залежи месторождения является повсеместный синрудный и интрудный кластогенез, охватывающий весь разрез рудного тела – от подрудных метасоматитов до кровли (рис. 1–3). Также отмечаются элементы, напоминающие катаклаз типа микровзрыва, когда обломки разнесены в стороны относительно центра или линейного источника. Мы связываем образование таких структур с механизмом гидроэксплозивной дезинтеграции вследствие вскипания гидротермальных растворов в поровой системе литифицированных сульфидных руд и подстилающих пород. Следы декомпрессии рудных растворов и синрудного дробления проявляются в подрудных метасоматитах в раздувах сульфидных прожилков. Полости между обломками туфов, переработанных в метасоматиты, иногда выполнены кластогенным агрегатом пирита и соединены между собой обычными тонкими прожилками-проводниками.

В кластогенных рудах не отмечается присутствие лав и наложенной гидротермальной минерализации, отличной от колчеданной. Состав руд обычен для колчеданных месторождений, что указывает на рудный кластогенез за счет самих рудогенных флюидов. Из дискретности и пульсационного характера гидротермально-осадочного рудообразования [13] следует, что формирование более чем стометровой мощности кластогенных руд сопровождало *in situ* чередование осадочного процесса с периодическим наложением взрывов (вскипания) рудогенных флюидов. Этот процесс автоматически проявляется при превышении давлением рудного флюида давления столба океанской воды. При стационарном режиме из рудного канала (труба, трещина) поступают порции спокойно изливающейся взвеси сульфидов «черного курильщика». При этом на самом выходе из сульфидной постройки рудный флюид

уже черного цвета, то есть обогащен взвесью тонкодисперсного сульфида. Очевидно, роль открытой придонной морской воды при возникновении взвеси и кристаллизации в ней сульфидов незначительна. Сульфиды кристаллизуются внутри рудной постройки на ее стенках в трубах, порах и пустотах.

При резком скачке роста давления рудных флюидов возникает предпосылка к флюидоэксплозии (гидроэксплозии) путем вскипания и взрыва газовой фазы рудного флюида. При дискретном пульсационном (прерывисто-непрерывном) режиме гидротермальной деятельности такие периодические импульсы вскипания вполне естественны. Фронт и очаги эксплозии флюидов располагаются внутри верхней части растущего колчеданного тела. Только при таком размещении очагов эксплозии возможно дробление и кластеризация слабо литифицированных колчеданных руд. По мере роста рудного тела этот фронт перемещается в сторону ее кровли. При эксплозии разброс рудных обломков происходит как по вертикали, так и по латерали. В случае Комсомольского месторождения латеральный разнос ограничен вертикальными границами трога так, что все события рудообразования заключены в рамках «кипящего трогового котла». За пределами троговой впадины кластогенные руды отсутствуют как по латерали, так и по стратиграфическому уровню.

Вероятность гидроэксплозивной деятельности при сульфидном рудообразовании отмечается многими исследователями как результат внезапного вскипания флюидов в надкритической обстановке. Большая глубина рудоотложения (первые километры) и высокое давление надрудного водного столба ограничивают эксплозивную деятельность. Для гидротермально-осадочного рудообразования гидроэксплозивный процесс условий надкритического вскипания рудных флюидов подробно рассматривается в работе [17]. Температурные и глубинные условия фазового перехода минерализованных морских вод на экспериментальном графике вод [21] подтверждаются нашими данными по термобарометрии монофракций пирита [23].

В настоящее время температуры субмаринных рудных гидротерм установлены в достаточно узких рамках – 220–250 °С. Для пирита основной части кластогенных руд Комсомольского месторождения термобарические исследования показали температуры образования 225–270 °С, что, соответствует глубинам бассейна (Н) в пределах 350–600 м. Это только минимальный ориентир глубины рудообра-

зования. Естественно, что глубина флюидоэксплозий рудокластов Комсомольского месторождений должна быть больше, поскольку для взрыва (инъекции) режим равновесия должен быть резко и значительно превышен, смещен на глубину и в область более высоких температур.

Режим и механизм гидроэксплозий корреспондируют с проявлениями гейзеров в вулканических областях. Основы гидроэксплозивного образования колчеданных брекчий ранее были показаны на примерах Урала и Алтая [1]. Синрудный механизм образования рудокластитов определен как эксплозивно-гидротермальный, связанный с зонами вскипания растворов, дезинтеграции пород (руд). Аналогичные брекчии и конглобрекчии характерны и для Блявинского месторождения. При всей широте рассмотрения условий сульфидного рудогенеза ранее не учитывались пульсационный и прерывисто-непрерывный характер процесса рудонакопления, кластогенеза и режима эндогенных

флюидов. Приведенный пример Комсомольского месторождения позволит детализировать картину кластогенного гидротермально-осадочного рудообразования, которая имеет, возможно, большее распространение в природе.

Результаты исследования получены в рамках реализации проекта Erasmus + 574061-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-SVNE-JP «Модернизация геологического образования в российских и вьетнамских университетах» МИНЕРАЛ. Этот проект финансировался при поддержке Европейской комиссии. Публикация отражает взгляды только авторов; Комиссия не может нести ответственность за любое использование информации, содержащейся в ней. (This project has been funded with support from the European Commission. This publication reflects the views only of authors; and the Commission cannot be held responsible for any use, which may be made of the information contained therein).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванкин П.Ф. 1962. О происхождении минерализованных брекчий некоторых месторождений колчеданного типа Алтая и Урала. *Доклады АН СССР*. 142(2): 422–424.
- Скрипченко Н.С. 1972. *Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтоидных формаций*. М., Недра: 214 с.
- Скрипченко Н.С., Воронов А.Р. 1969. О генезисе Блявинского месторождения. *Советская геология*. 12: 137–139.
- Заварицкий А.Н. 1963. Колчеданное месторождение Блява на Южном Урале и колчеданные залежи Урала вообще. В кн.: *Заварицкий А.Н. Избранные труды. Т. IV. Геологический очерк месторождений медных руд на Урале*. М., изд-во АН СССР: 291–318.
- Яковлев Г.Ф., Зарайский Г.П., Старостин В.И. 1965. Субвулканические тела кислого состава и медноколчеданное оруденение Блявинского района (Южный Урал). *Советская геология*. 4: 3–18.
- Богуш И.А., Воронов А.Р. 1989. Генетические особенности руд и кремнисто-железистые эксгалиты Комсомольского месторождения Южного Урала. В кн.: *Кремнисто-железистые отложения колчеданосных районов. Информационные материалы*. Свердловск, изд-во Уральского отделения АН СССР: 75–85.
- Масленников В.В. 2008. *Литогенез и колчеданообразование*. Миасс, Институт минералогии УРО РАН: 384 с.
- Герман А.К. 1964. Новые данные о генезисе колчеданных месторождений. *Доклады АН СССР*. 156(3): 591–593.
- Герман А.К., Русакова Л.Д. 1962. Медноколчеданное месторождение Блява на Южном Урале. В кн.: *Материалы по геологии и полезным ископаемым Южного Урала. Вып. 3*. М., Госгеолтехиздат: 78–86.
- Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Сергеева Н.Е., Позднякова Н.В. 2000. Типы массивных колчеданных месторождений вулканической ассоциации. *Геология рудных месторождений*. 42(2): 177–190.
- Яковлев Г.Ф., Гончарова Т.Я. 1965. Тектоника, магматизм и колчеданные месторождения Блявинского (Южный Урал). В кн.: *Труды ЦНИГРИ. Т. 65*. М., Недра: 201–208.
- Бородаев Ю.С., Гончарова Т.Я., Зарайский Г.П., Яковлев Г.Ф. 1965. Эксплозивные брекчии Блявинского рудного поля (Южный Урал). *Геология рудных месторождений*. 6: 49–63.
- Богуш И.А. 1983. Проявление дискретности в вулканогенно-осадочном рудогенезе. *Доклады АН СССР*. 272(1): 153–156.
- Кафтанатий А.Б., Кафтанатий Е.Б. 2018. Онтогенез высокометаморфизованного колчеданного месторождения по кристалломорфологическим характеристикам пирита. *Наука Юга России*. 14(3): 56–64. doi: 10.7868/S25000640180307
- Яковлев Г.Ф., Зарайский Г.П., Бородаев Ю.С., Гончарова Т.Я. 1965. Эксплозивные брекчии на медноколчеданных месторождениях Блявинского рудного поля Южного Урала. *Геология рудных месторождений*. 6: 12–21.
- Baross J.A., Deming J.W. 1983. Growth of 'black smoker' bacteria at temperatures of at least 250 °C. *Nature*. 303(4): 423–426. doi: 10.1038/303423a0
- Finlow-Bates T., Large D.E. 1978. Water depth as major control on the formations of submarine exhalative ore deposits. *Geol. Jarbuch*. D(30): 27–39.
- Haas J.L. 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Econ. Geol.* 66: 940–946.
- Парада С.Г. 2018. Закономерности размещения цветных и благородных металлов в пределах Малкинского ультрабазитового массива (Кабардино-Балкарская Республика). *Геология и геофизика Юга России*. 1: 69–78. doi: 10.23671/VNC.2018.1.11249

20. Парада С.Г. 2014. Перспективные геолого-промышленные типы рудопроявлений золота в Ростовской области. *Вестник Южного научного центра*. 10(4): 53–60.
21. Haymon R.M. 1983. Growth history of hydrothermal black smoker chimneys. *Nature*. 301: 695–698. doi: 10.1038/301695a0
22. Van Damm K.L. 1990. Seafloor hydrothermal activity: black smoker chemistry and chimneys. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 18: 173–204. doi: 10.1146/annurev.ea.18.050190.001133
23. Богущ И.А., Черненко М.Ю., Болтенко А.Е. 1991. *Методы рудноминералогенетического моделирования и локальный прогноз колчеданного оруденения*. Новочеркасск, изд-во НПИ: 47 с.
10. Eremin N.I., Dergachev A.L., Sergeeva N.E., Pozdnyakova N.V. 2000. [Types of massive pyrite deposits of volcanic Association]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 42(2): 177–190. (In Russian).
11. Yakovlev G.F., Goncharova T.Ya. 1965. [Tectonics, magmatism and massive sulfide deposits Blyava deposit (the Southern Urals)]. In: *Trudy TsNIGRI. T. 65. [Proceedings of the Central Research Geological Exploration Institute of non-ferrous and noble metals. Vol. 65]*. Moscow, Nedra: 201–208. (In Russian).
12. Borodaev Yu.S., Goncharova T.Ya., Zarayskiy G.P., Yakovlev G.F. 1965. [Explosive breccias of the Blyavinsky ore field (Southern Urals)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 6: 49–63. (In Russian).
13. Bogush A.I. 1983. [Manifestation of discreteness in volcanic-sedimentary ore genesis]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 272(1): 153–156. (In Russian).
14. Kaftanatiy A.B., Kaftanfiy E.B. 2018. [Ontogenesis of a highly metamorphosed sulphide deposit by crystallomorphological characteristics of pyrites]. *Nauka Yuga Rossii*. 14(3): 56–64. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640180307
15. Yakovlev G.F., Zarayskiy G.P., Borodaev Yu.S., Goncharova T.Ya. 1965. [Explosive breccias in massive sulfide deposits of Blyavian ore field, South Urals]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 6: 12–21. (In Russian).
16. Baross J.A., Deming J.W. 1983. Growth of ‘black smoker’ bacteria at temperatures of at least 250 °C. *Nature*. 303(4): 423–426. doi: 10.1038/303423a0
17. Finlow-Bates T., Large D.E. 1978. Water depth as major control on the formations of submarine exhalative ore deposits. *Geol. Jarbuch*. D(30): 27–39.
18. Haas J.L. 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Econ. Geol.* 66: 940–946.
19. Parada S.G. 2018. [Density regularities of colored and noble metals in the borders of the malkin ultrabasic massive (Kabardino-Balkar Republic)]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 1: 69–78. (In Russian). doi: 10.23671/VNC.2018.1.11249
20. Parada S.G. 2014. Promising geological-industrial types of golden ore manifestations in the Rostov Region. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 10(4): 53–60. (In Russian).
21. Haymon R.M. 1983. Growth history of hydrothermal black smoker chimneys. *Nature*. 301: 695–698. doi: 10.1038/301695a0
22. Van Damm K.L. 1990. Seafloor hydrothermal activity: black smoker chemistry and chimneys. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 18: 173–204. doi: 10.1146/annurev.ea.18.050190.001133
23. Bogush I.A., Chernenko M.Yu., Boltenko A.E. 1991. *Metody rudnominerалогенетического моделирования и локальный прогноз колчеданного оруденения. [Methods of ore-mineral-genetic modeling and local prediction of pyrite mineralization]*. Novocherkassk, Novocherkassk Polytechnic Institute: 47 p. (In Russian).

REFERENCES

1. Ivankin P.F. 1962. [On the origin of mineralized breccias of some deposits of pyrite type of Altai and Ural]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 142(2): 422–424. (In Russian).
2. Skripchenko N.S. 1972. *Gidrotermal'no-osadochnyye sul'fidnyye rudy bazal'toidnykh formatsiy. [Hydrothermal-sedimentary sulfide ores basalt formations]*. Moscow, Nedra: 214 p. (In Russian).
3. Skripchenko N.S., Voronov A.R. 1969. [On the Genesis of the Blyvian deposit]. *Sovetskaya geologiya*. 12: 137–139. (In Russian).
4. Zavaritskii A.N. 1963. [Blyava sulfide deposit in the Southern Urals and pyrite deposits of the Urals in general]. In: *Zavaritskiy A.N. Izbrannyye trudy. T. IV. Geologicheskii ocherk mestorozhdeniy mednykh rud na Urале. [Selected works. Vol. IV. Geological sketch of copper ore deposits in the Urals]*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR: 291–318. (In Russian).
5. Yakovlev G.F., Zarayskiy G.P., Starostin V.I. 1965. [Subvolcanic bodies of acid composition and copper-plated mineralization of Blyavian district (Southern Urals)]. *Sovetskaya geologiya*. 4: 3–18. (In Russian).
6. Bogush I.A., Voronov A.R. 1989. [Genetic features of ores and siliceous-ferruginous exhalites of the Komsomolsk deposit of the Southern Urals]. In: *Kremnisto-zhelezistyye otlozheniya kolchedanonosnykh rayonov. Informatsionnyye materialy. [Siliceous-ferruginous deposits of pyrite-bearing areas. Information materials]*. Sverdlovsk, Ural Branch of the Academy of Sciences of the USSR: 75–85. (In Russian).
7. Maslennikov V.V. 2008. *Litogenez i kolchedanoobrazovanie. [Lithogenesis and pyrite formation]*. Miass, Institute of Mineralogy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences: 384 p. (In Russian).
8. German A.K. 1964. [New data on the genesis of pyrite deposits]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 156(3): 591–593. (In Russian).
9. German A.K., Rusakova L.D. 1962. [Copper-plated deposit of Blyava in the Southern Urals]. In: *Materialy po geologii i poleznym iskopayemym Yuzhnogo Urала. Vyp. 3. [Materials on Geology and Mineral Resources of the Southern Urals. Vol. 3]*. Moscow, Gosgeoltekhizdat: 78–86. (In Russian).

Поступила 24.06.2019