

УДК 553.435:549.3(470.5)

DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-4-499-516

Элементы-примеси в сульфидах Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения, Южный Урал: форма нахождения и источники вещества

И. Ю. Мелекесцева, В. В. Масленников, С. П. Масленникова

Институт минералогии, УрО РАН, 456317, Челябинская обл., г. Миасс,
e-mail: melekestseva-irina@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.10.2019 г., принята к печати 31.12.2019 г.

Объект исследований. В статье представлены результаты изучения элементов-примесей (ЭП) в сульфидах главного рудного тела и северо-западного фланга Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения, залегающего в серпентинитах (Южный Урал). **Материалы и методы.** Исследованы халькопирит-пирит-марказитовые песчаники скв. 1Т в центральной части главного рудного тела и пирит-халькопирит-пирротиновые “гравелиты” скв. 200 на северо-западном фланге месторождения. Содержание ЭП проанализировано методом лазерной абляции с индуктивно-связанной плазмой. **Результаты.** Установлено, что содержания, распределение и форма нахождения ЭП в сульфидах скважин 1Т и 200 различаются. В рудах скв. 1Т большинство ЭП (Ag, Sn, Mn, As, Co, Ni, Te, Pb, Au) накапливается в пирите-1, пирит-марказитовые агрегаты концентрируют Ti и Bi, марказит – Mo и Sb, а халькопирит – Zn, Se и Cd. Пирит-2 не отличается по накоплению ЭП от других сульфидов. В рудах скв. 200 наибольшее количество ЭП накапливается в халькопирите (Bi, Te, Zn, Cd, Se, Pb, Au, Ti, Ni, Co). Олово накапливается в кубаните, As и Ni – в пирите-4, Ag, Mn и Mo – в пирротине, Sb – в пирите-3 и Co – в пирите-2. **Выводы.** На основании корреляционного анализа методом максимального корреляционного пути показано, что сульфиды главного рудного тела и северо-западного фланга месторождения характеризуются разной формой нахождения ЭП. Различающееся накопление ЭП в сульфидах главного рудного тела и северо-западного фланга месторождения обусловлено двумя причинами: 1) “мафитовым” источником металлов для сульфидов главного рудного тела и “ультрамафитовым” – для сульфидов северо-западного фланга месторождения и 2) разной степенью диагенетического преобразования сульфидов.

Ключевые слова: сульфиды, пирит, пирротин, халькопирит, кубанит, элементы-примеси, Дергамышское месторождение, Главный Уральский разлом, Южный Урал

Источник финансирования

Работа выполнена при поддержке проекта фундаментальных научных исследований по программам РАН (номер государственной регистрации АААА-А18-118060890054-0) и частично при поддержке темы № АААА-А19-119061790049-3

Trace-elements in sulfides of the Dergamysh cobalt-bearing massive sulfide deposit, the Southern Urals: Mode of occurrence and matter sources

Irina Yu. Melekestseva, Valery V. Maslennikov, Svetlana P. Maslennikova

Institute of Mineralogy UB RAS, Miass 456317, Chelyabinsk district, Russia,
e-mail: melekestseva-irina@yandex.ru

Received 14.10.2019, accepted 31.12.2019

Subject of study. The article presents the results of study of trace elements (TEs) in sulfides of the main ore body (borehole 1Т) and the northwestern ore body (borehole 200) of the Dergamysh cobalt-bearing massive sulfide deposit hosted in serpentinites (South Urals). **Materials and methods.** The chalcopyrite-pyrite-marcasite sandstones of the main ore body and pyrite-chalcopyrite-pyrrhotite “gravelites” of its northwestern satellite were studied with laser ablation with inductively coupled plasma. **Results.** The TE contents, distribution and mode of occurrence differ in sulfides of the main ore body

Для цитирования: Мелекесцева И.Ю., Масленников В.В., Масленникова С.П. (2020) Элементы-примеси в сульфидах Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения, Южный Урал: форма нахождения и источники вещества. *Литосфера*, 20(4), 499-516. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-4-499-516

For citation: Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P. (2020) Trace-elements in sulfides of the Dergamysh cobalt-bearing massive sulfide deposit, the Southern Urals: Mode of occurrence and matter sources. *Litosfera*, 20(4), 499-516. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-4-499-516

© И.Ю. Мелекесцева, В.В. Масленников, С.П. Масленникова, 2020

and its northwestern satellite. In ores of the main ore body, most TEs (Ag, Sn, Mn, As, Co, Ni, Te, Pb, Au) accumulate in pyrite-1, pyrite-marcasite aggregates concentrate Tl and Bi, marcasite is a host to Mo and Sb, and chalcopyrite contains Zn, Se and Cd. Pyrite-2 is depleted in TEs relative to other sulfides. In sulfides of the northwestern satellite, most TEs are related to chalcopyrite (Bi, Te, Zn, Cd, Se, Pb, Au, Tl, Ni, Co). Tin accumulates in cubanite, As and Ni are hosted in pyrite-4, Ag, Mn and Mo are concentrated in pyrrhotite, Sb is typical of pyrite-3, and Co accumulates in pyrite-2. *Conclusions.* Based on the correlation analysis, it is shown that sulfides of the main ore body and its northwestern satellite are characterized by different mode of TE occurrences. The differences are explained by two main reasons: 1) “mafic” and “ultramafic” metal sources for sulfides of the main ore body and its northwestern satellite, respectively, and 2) different degree of diagenetic alteration of sulfides.

Keywords: *sulfides, pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, cubanite, trace elements, Dergamysh deposit, Main Uralian Fault, South Urals*

Funding information

The work was supported by the project of fundamental scientific research on RAS programs (state registration number AAAA-A18-118060890054-0) and partially supported by the topic No. AAAA-A19-119061790049-3

Acknowledgements

The authors thank R. Large and L. Danyushevsky for the opportunity of analytical work at the University of Tasmania, as well as N.R. Ayupova and N.P. Safina for discussing the results. We are deeply grateful to the reviewer for the insightful comments, the correction of which allowed us to improve the original version of the article

ВВЕДЕНИЕ

Распределение и форма нахождения элементов-примесей (ЭП) в сульфидах является одним из ключевых вопросов последнего десятилетия в изучении рудных месторождений полезных ископаемых. Подобным исследованиям посвящено большое количество публикаций, поскольку, с фундаментальной точки зрения, распределение ЭП в минералах проливает свет на источники металлов, условия образования и преобразования руд, а информация о форме нахождения ЭП напрямую связана с извлечением ценных элементов из руд месторождений.

При изучении образцов сульфидных руд Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения в Республике Башкортостан установлено различие микропримесного состава руд главного рудного тела и северо-западного фланга месторождения. В связи с этим целью настоящей работы стало определение причин этого различия, а также установление формы нахождения ЭП в рудах.

Дергамышское кобальт-медноколчеданное месторождение являлось единственным обрабатываемым колчеданным месторождением на Урале, залегающим в ультрамафитовых породах, и обрабатывалось с 2012 по 2016 г. Руды месторождения характеризовались повышенными содержаниями Со (до 0.21 мас. %), но металл не извлекался и даже мешал технологическому процессу. Однако несмотря на то, что к настоящему моменту это месторождение отработано, результаты наших исследований могут быть учтены в будущем при возможной переработке Со-содержащих хвостов, а также при возможной разработке Ишкинского кобальт-медноколчеданного месторождения в ультрамафитах, расположенного в 20 км к западу от г. Гай в Оренбургской области.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Геологическая позиция

Дергамышское месторождение находится в 18 км к северо-западу от г. Бурибай в Баймак-Бурибайском колчеданноносном районе Республики Башкортостан (рис. 1). Месторождение приурочено к зоне Главного Уральского разлома, находится на западном крыле региональной синформы и сложено несколькими тектоническими пластинами серпентинитов, базальтов и вулканогенно-осадочных пород силура и девона мощностью 50–400 м (рис. 2) (Зайков и др., 2009; Melekestseva et al., 2013; Артемьев и др., 2016).

Нижняя пластина, подстилающая рудоносные серпентиниты, представлена олистостромовой толщей пестрого состава и сложного строения с олистолитами фтанитов, яшм, базальтов, андезитов, кварц-плагиоклазовых риолитов и офикальцитовых брекчий (не показана на рис. 2). Эта пластина не имеет выхода на площади месторождения, а обнажается на левобережье р. Дергамыш возле пос. Байгускарово. В кровле пластины залегают серпентинитовые конгломераты и песчаники. Следующая пластина сложена брекчированными серпентинитами Байгускаровского массива, в кровле которых располагается сульфидное линзообразное тело с массивными и обломочными рудами. “Надрудная” пластина представлена брекчированными серпентинитами с линзами тальк-карбонатных пород, блоков габброидов и габбродолеритов и перекрыта пластиной, сложенной вулканомиктовыми отложениями нижнего-среднего девона с прослоями углеродистых алевролитов и песчаников и плитчатыми телами серпентинитов. Пятая пласти-

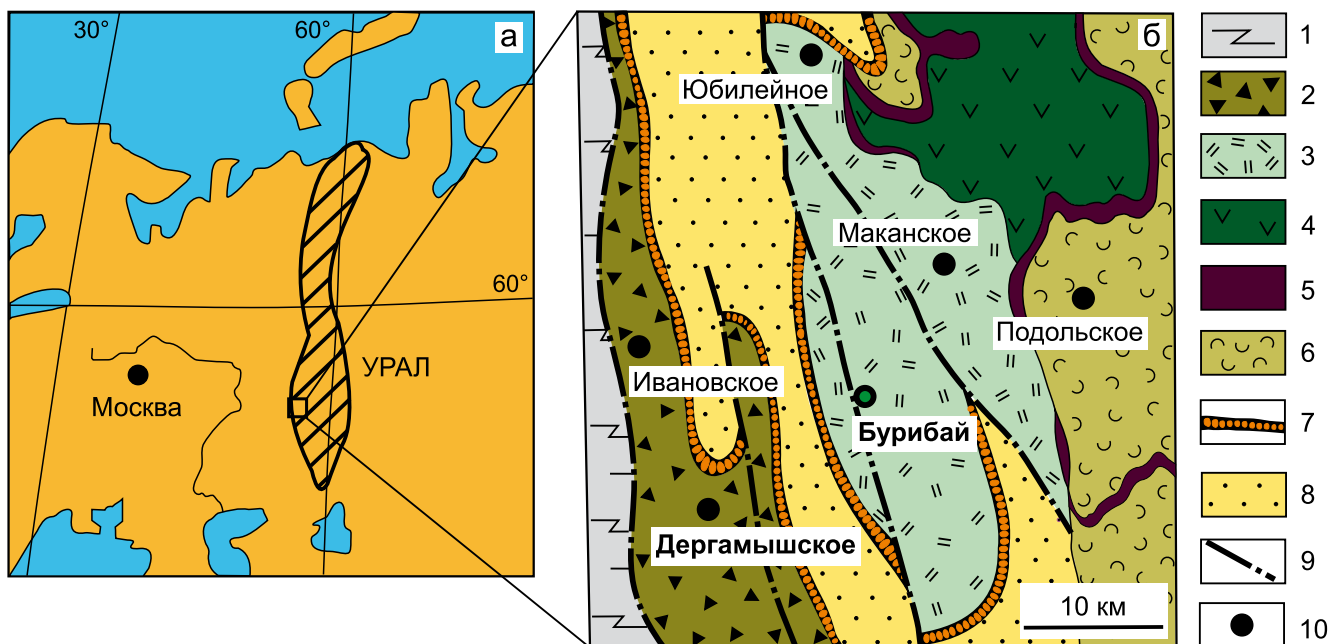


Рис. 1. Географическая позиция (а) и положение Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения на схеме Бурибайского рудного района (б), по (Зайков, 2006; Серавкин, 2010; Зайков, Мелекесцева, 2011; Puchkov, 2017) с упрощениями.

1 – метаморфизованные вулканогенно-осадочные отложения (PR); 2 – палеозойские океанические и островодужные комплексы зоны Главного Уральского разлома; 3 – риолиты, дациты, андезибазальты баймак-бурибайской свиты, D_1bb ; 4 – андезибазальты ирендыкской свиты, $D_{1-2}ik$; 5 – яшмы и гематит-кварцевые породы бугулыгирского горизонта, D_2 ; 6 – вулканомиктовые горизонты улутауской свиты, D_2 ; 7 – кремнистые сланцы мукасовского горизонта, D_3 ; 8 – осадочные породы зилаирской свиты, D_3-C_1 ; 9 – региональные разломы; 10 – колчеданные месторождения.

Fig. 1. Geographical setting (a) and position of the Dergamysh Co-bearing massive sulfide deposit within the Buribay ore district (b), simplified after (Zaykov, 2006; Seravkin, 2010; Zaykov, Melekestseva, 2011; Puchkov, 2017).

1 – metamorphosed volcanosedimentary rocks, Proterozoic; 2 – Paleozoic ocean floor and island arc complexes of the Main Uralian Fault Zone; 3 – rhyolites, dacites, basaltic andesites of the Baymak-Buribay Formation, Early Devonian; 4 – basaltic andesites of the Irendyk Formation, Early to Middle Devonian; 5 – jaspers and hematite-quartz rocks of the Bugulygyr Horizon, Middle Devonian; 6 – volcanomictic horizons of the Ulatau Formation, Middle Devonian; 7 – cherts of the Mukasovo Horizon, Upper Devonian; 8 – sedimentary rocks of the Zilair Formation, Upper Devonian–Lower Carboniferous; 9 – regional faults; 10 – massive sulfide deposits.

на сложена вулканитами баймак-бурибайской свиты, включающими базальты (преимущественно в дайках), бониниты, андезиты и дациты. Структура месторождения “запечатана” флишеидными отложениями зилаирской свиты с фтанитами и силицитами в основании разреза (мукасовский горизонт), образующими ядро брахисинклинальной складки.

Состав и строение рудного тела

Главное рудное тело имело северное падение под углом $30-35^\circ$ и выклинивалось на глубине 130 м (Бучковский, 1966ф). Форма тела линзовидная, мощность варьировала от 6.5 до 40 м в раздуве, поперечник 150–200 м. На флангах тело расщеплялось на 2–3 пластообразные выклинки-пластины, разделенные серпентинитами, габбро и пироксениитами. Контакты рудного тела с вмещающими породами резкие; в лежащем боку залежи они сопро-

вождаются маломощной зоной дробления и расланцевания, а в висячем – рудокластитами. Внутри залежи наблюдались линзы и отдельные обломки тальк-хлоритовых пород. Вмещающие породы подвержены оталькованию, окварцеванию, карбонатизации и хлоритизации. При геологоразведочных работах руды месторождения подразделяются на халькопирит-марказитовые и халькопирит-пиритовые, слагающие основной объем рудного тела, и пирит-марказитовые, развитые в подчиненном количестве в центральной части рудного тела. Главные рудные минералы – пирит, марказит, халькопирит; второстепенные – пирротин, магнетит, ильменит, хромит, минералы группы линнеита, сфалерит, кубанит; редкие – золото, валлериит, кобальтин, герсдорфит, никелин (Зайков и др., 2009).

Впоследствии по распределению и соотношению рудных фаций главное рудное тело было ре-

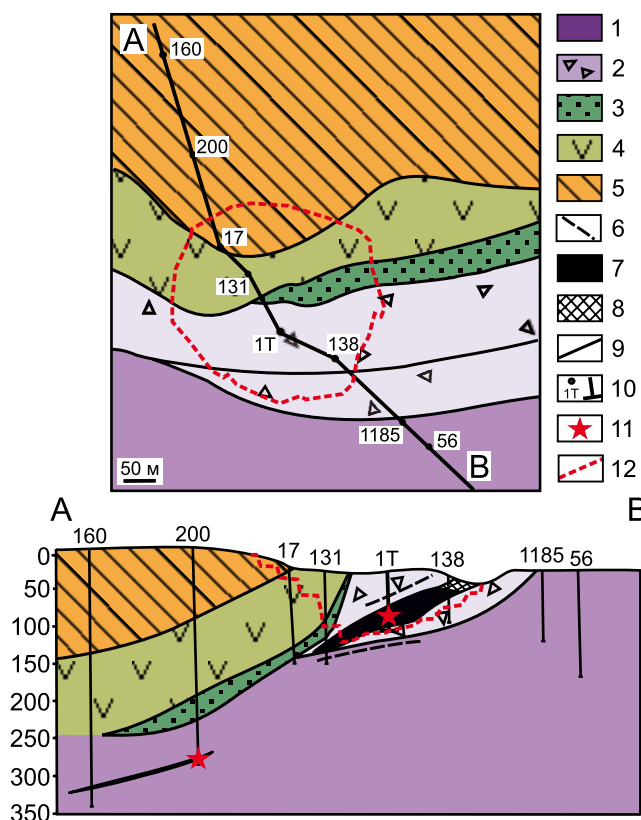


Рис. 2. Геологическая карта и разрез Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения, по (Melekestseva et al., 2013; Артемьев и др., 2016) с изменениями.

1, 2 – ультрамафитовый комплекс, О-С (?): 1 – серпентинитовый меланж по дунитам и гарцбургитам; 2 – брекчированные серпентиниты с зонами тальк-карбонатных метасоматитов и силлами диабазов и габбро; 3 – вулканомиктовые и полимиктовые песчаники с прослоями кремней и пластинами серпентинитов нижнего-среднего девона (?); 4 – дациты и подчиненные андезиты, андезибазальты, базальты и бониниты с линзами углеродистых алевролитов баймак-бурибайской свиты (D_1b-br); 5 – кремни мукасовского горизонта (D_3); 6 – тела габбро, габбро-дolerиты (внемасштабный знак); 7 – рудные тела; 8 – зона окисления главного рудного тела; 9 – границы тектонических пластин; 10 – разведочные скважины и их номера; 11 – места опробования керна скважин; 12 – контуры карьера.

Fig. 2. Geological map and cross-section of the Dergamysh Co-bearing massive sulfide deposit modified after (Melekestseva et al., 2013; Artem'ev et al., 2016).

1, 2 – ultramafic complex, Ordovician–Silurian (?): 1 – serpentinite mélange after dunites and harzburgites, 2 – brecciated serpentinites with zones of talc-carbonate metasomatites and sills of diabases and gabbro; 3 – volcanomictic and polymictic sandstones with interlayers of cherts and sheets of serpentinites, Lower and Middle Devonian (?); 4 – dacites and subordinate andesites, basaltic andesites, basalts and boninites with lenses of coaliferous siltstones, Lower Devonian Baymak-Buribay Formation; 5 – cherts, Upper Devonian Mukasovo Horizon; 6 – gabbro, gabbro-dolerites (not to scale); 7 – ore bodies; 8 – oxidation zone of the main ore body; 9 – boundaries of tectonic sheets; 10 – exploration boreholes and their numbers; 11 – sampling places; 12 – contours of the open pit.

конструировано как сильно разрушенный сульфидный холм (Масленников и др., 2014). Подрудные серпентиниты содержали вкрапленность пирита и халькопирита, а также редкие жилы этих минералов. Нижняя часть рудной линзы сложена гидротермально-метасоматическим серным колчеданом, а в ядре холма появляются ячеистые плиты, сложенные колломорфным пиритом. Среди последних иногда встречаются многочисленные включения трубок “червей” диаметром 0.8 мм, сложенных колломорфным пиритом (Масленников и др., 2016а, б, 2017). Верхняя часть рудной залежи сложена грубообломочными пиритовыми брекчиями, состоящими из обломков массивного и ячеистого серного колчедана. На восточном склоне сульфидного холма участками наблюдались слои (до 1 м) сульфидных брекчий, почти полностью состоящие из фрагментов пирит-халькопиритовых труб черных курильщиков. Стратиграфически выше нарастает количество тонких (1–10 см, реже до 20 см) прослоев сульфидных гравелитов и песчаников, переслаивающихся с алевролитами. Аналогичные слои образуют пластообразные выклинки рудной залежи, встречающиеся в керне скважин в виде слоев мощностью до 40 см. Для флангов месторождения характерны руды обломочной, брекчиевой и колломорфной текстур.

В центральной части рудного тела в 1999 г. была пробурена скв. 1Т. В ее разрезе выделено пять рудных интервалов, разделенных брекчиями серпентинитового или смешанного состава (обломки руды и серпентинитов), “перетертыми” (?) рудами, а также кластогенными слоями (Зайков и др., 2009). Изученные образцы из кровли рудного тела (глубина 46.3–49.4 м) находятся в прослое псаммитопсефитовых халькопирит-пирит-марказитовых руд (рис. 3а, б). В этом интервале руды содержат 4.7–6.2 г/т Au (Зайков и др., 2009).

В 2006 г. в 500 м к северо-западу от скв. 1Т на северо-западном фланге месторождения была пробурена скв. 200 (см. рис. 2), которая на глубине 276.1–276.3 м подсекала прослой пирит-халькопирит-пирротитовых “гравелитов” мощностью 20 см среди бутылочно-зеленых серпентинитов с карбонатными прожилками и жилами мощностью до 0.5 см (Зайков и др., 2009; Мелекесцева и др., 2018). “Гравелиты” сложены угловатыми, близкими к изометричным фрагментами пирита и пирротина размером 1–4 мм, на которые наложен более поздний халькопирит (рис. 4а). Цемент представлен псефитовой рудной и породной массой (рис. 4б). Обломки первичных руд в большинстве случаев практически полностью замещены более поздними пиритом, пирротинном, нерудными минералами и, местами, халькопиритом с сохранением обломочных контуров (см. рис. 4б–д). На обломочное происхождение этих руд указывают обломки хромита в цементе (см. рис. 4в). Многочис-

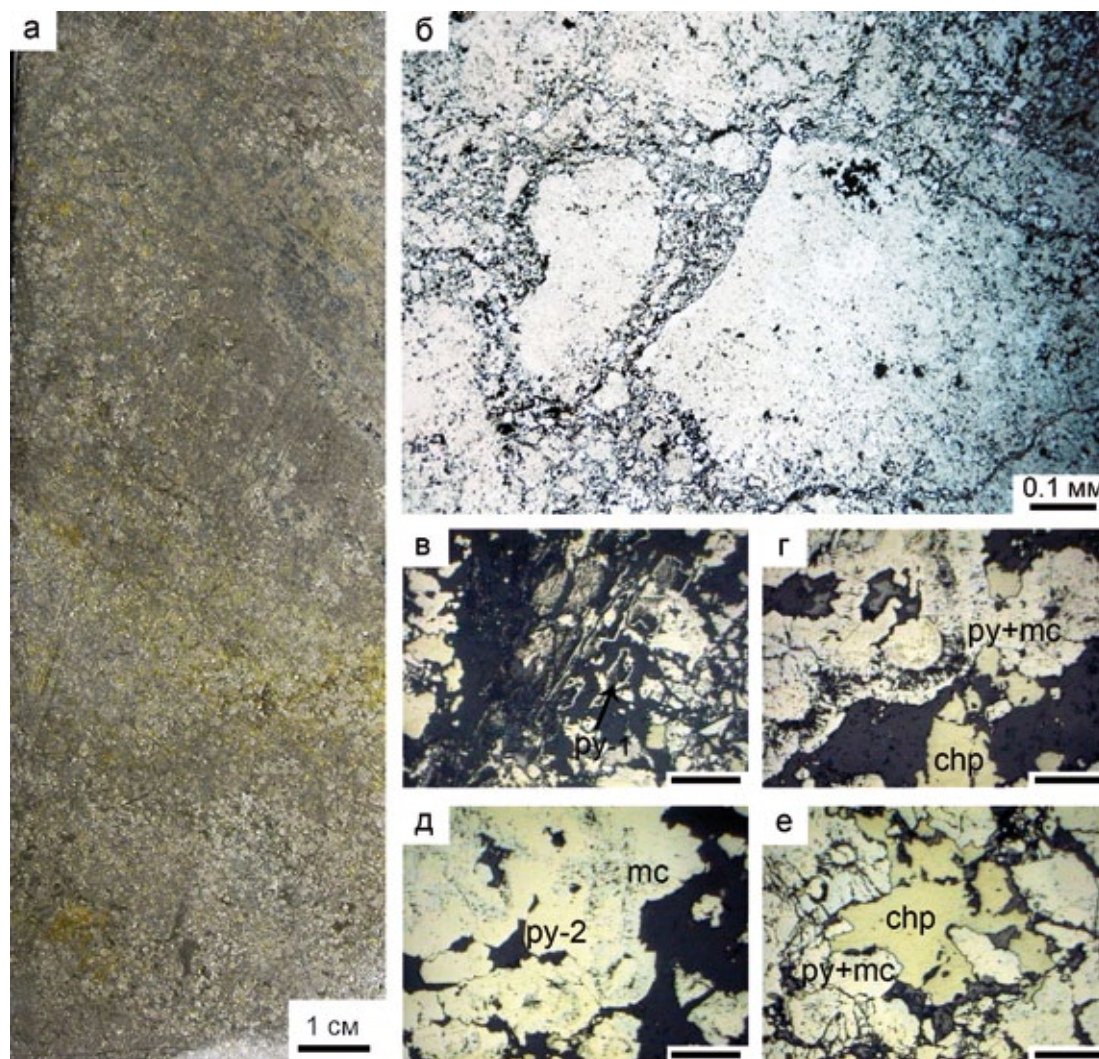


Рис. 3. Текстурно-структурные взаимоотношения рудных минералов в халькопирит-марказит-пиритовых рудах скв. 1Т Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения.

а – тонкообломочная, местами тонкослоистая и колломорфная текстура халькопирит-марказит-пиритовых руд (спил керна, глубина 46.3–47.3 м); б – марказит-пиритовые обломки в халькопирит-марказит-пиритовом цементе (обр. D1/46.3); в – пластинчатые агрегаты тонкодисперсного пирита-1 (*py-1*), который заместил кристаллы пирротина; г – концентрически-зональные агрегаты пирита и марказита (*py + mc*); д – кристаллический пирит-2 (*py-2*), который обрастает пирит-1 и пирит-марказитовые агрегаты; е – агрегаты позднего ксеноморфного халькопирита (*chp*).

Fig. 3. Textural-structural interrelations of ore minerals in chalcopyrite-marcasite-pyrite ores of borehole 1T of the Dergamysh Co-bearing massive sulfide deposit.

а – fine-clastic, locally fine-layered and colloform structure of chalcopyrite-marcasite-pyrite aggregates (unpolished drill core, depth of 46.3–47.3 m); б – marcasite-pyrite clasts in chalcopyrite-marcasite-pyrite matrix (sample D1/46.3); в – platy aggregates of fine-dispersed pyrite-1 (*py-1*), which replaced the pyrrhotite crystals; г – concentrically-zoned aggregates of pyrite and marcasite (*py + mc*); д – crystalline pyrite-2 (*py-2*), which overgrows pyrite-1 and pyrite-marcasite aggregates; е – aggregates of late anhedral chalcopyrite (*chp*).

ленные агрегаты кристаллического пирита обладают определенным сходством с конкрециями и имеют центральную пористую пиритовую зону, которая окружена каймой из сростков кристаллического пирита. Минеральный состав этого прослоя характеризуется преобладанием пирротина и присутствием ассоциирующих друг с другом Co–Ni (ко-

бальтин, герсдорфит, никелин) и Bi–Te (пильзенит) минералов и самородного золота (рис. 4е, ж).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Содержание ЭП (Mn⁵⁵, Co⁵⁹, Ni⁶⁰, Cu⁶⁵, Zn⁶⁶, As⁷⁵, Se⁷⁷, Mo⁹⁵, Ag¹⁰⁷, Cd¹¹¹, Sn¹¹⁸, Sb¹²¹, Te¹²⁵, Au¹⁹⁷,

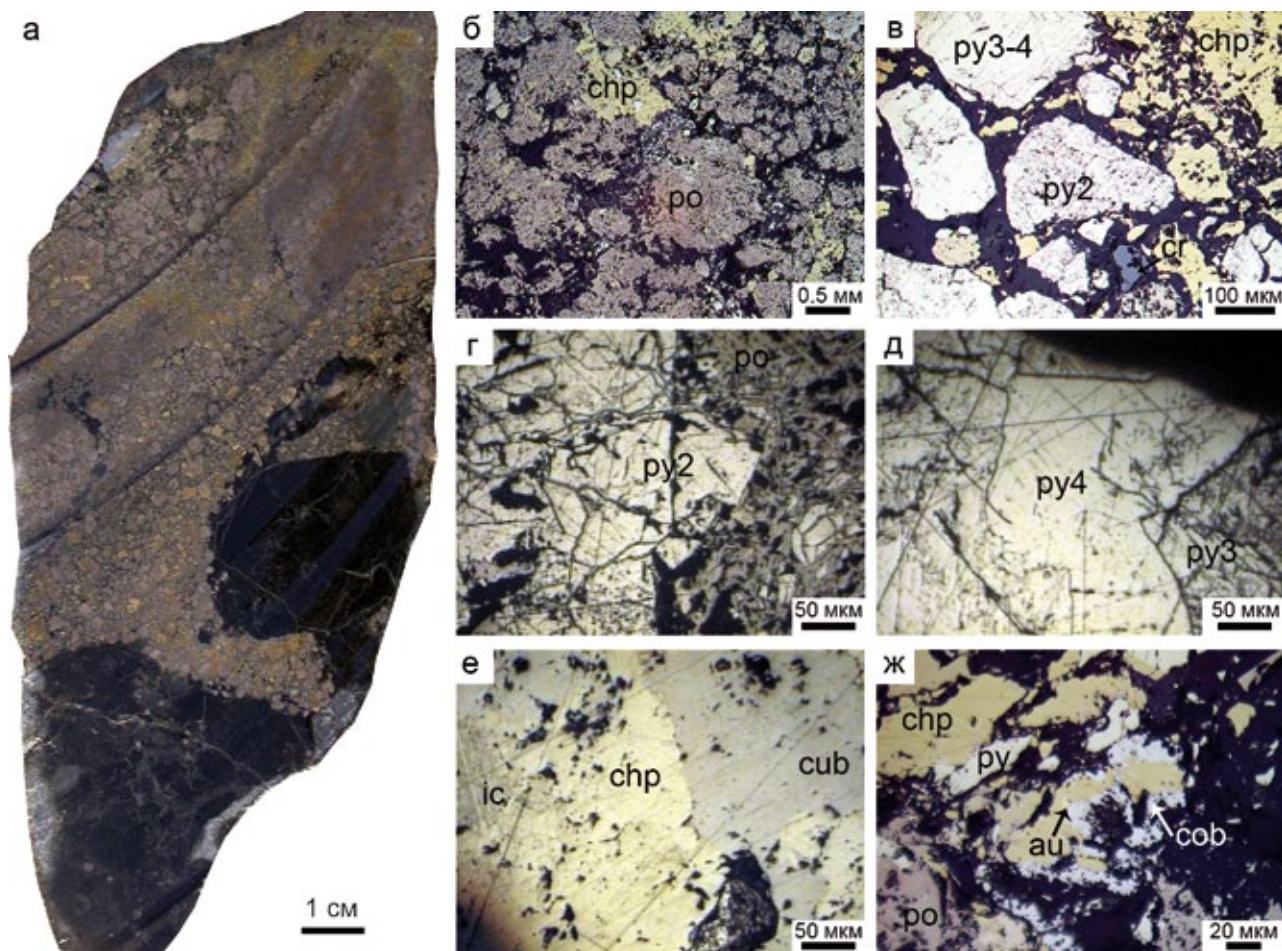


Рис. 4. Текстурно-структурные взаимоотношения рудных минералов в пирит-халькопирит-пирротиновой руде скв. 200 Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения.

а – мелкообломочное строение пирит-халькопирит-пирротиновой руды с крупными обломками серпентинитов (черное) (спил зерна, глубина 276.1–276.3 м); б – пятнистая текстура пирротиновых (po) агрегатов, сцементированных нерудными минералами и халькопиритом; в – остроугольные фрагменты (обломки?) кристаллического пирита-2 (py-2) с перистым внутренним строением и более гладкие кристаллы пирита-3-4 (py-3-4); г – замещение пирита-2 пирротинном; д – обрастание пирита-3 пиритом-4 (протравлено в $\text{HNO}_{3\text{конц}}$); е – агрегаты халькопирита с реликтами решетчатой структуры изокубанита (ic) и кубанита (cub); ж – обрастание позднего ксеноморфного халькопирита новообразованным кобальтином (cob), ассоциирующим с самородным золотом (au). Образец 200-276.1.

Fig. 4. Textural-structural interrelations of ore minerals in pyrite-chalcopyrite-pyrrhotite ore of borehole 200 of the Dergamysh Co-bearing massive sulfide deposit.

а – small-clastic structure of pyrite-chalcopyrite-pyrrhotite ore with large clasts of serpentinites (black) (unpolished drill core, depth of 276.1–276.3 m); б – spotty pyrrhotite (po) aggregates enclosed in opaque matrix and chalcopyrite; в – angular fragments (clasts?) of crystalline pyrite-2 (py-2) with pinnate internal structure and smoother crystals of pyrite-3-4 (py-3-4); г – replacement of pyrite-2 by pyrrhotite; д – overgrowing of pyrite-3 by pyrite-54 (etched in $\text{HNO}_{3\text{conc}}$); е – aggregates of chalcopyrite with relict isocubanite (ic) lamellae and cubanite (cub); ж – newly formed cobaltite (cob) associated with native gold (au) around late anhedral chalcopyrite. Sample 200-276.1.

Ti^{205} , Rb^{208} , Bi^{209}) в сульфидах образцов зерна скважин 1Т (обр. D1/46.3) и 200 (обр. 200-276.1) было проанализировано методом лазерной абляции с индуктивно-связанной плазмой (ЛА ИСП МС) на приборе New Wave 213-нм с квадрупольным масс-спектрометром Agilent 4500 в Центре по изучению генезиса рудных месторождений (CODES) Тасманийского университета (г. Хобарт, Австралия).

Методика анализа подробно изложена в работе (Maslennikov et al., 2009). Для общей выборки дисульфидов железа (пирит разных генераций + марказит), а также сульфидов меди и железа (халькопирит + кубанит) для каждой скважины рассчитаны ассоциации химических элементов методом максимального корреляционного пути (Смирнов, 1981). Локальные коэффициенты концентраций

для минералов рассчитаны как отношение медианного значения элемента в минерале к медианному значению элемента в общей выборке дисульфидов железа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Скважина 1Т

В халькопирит-пирит-марказитовых рудах изучены: 1) шагреновые пластинчатые агрегаты тонкодисперсного пирита-1, который заместил кристаллы пирротина (см. рис. 3в); 2) зональные сростки пирита и марказита (см. рис. 3г); 3) относительно крупные марказитовые зерна; 4) кристаллический пирит-2, который обрастает пирит-1 и пирит-марказитовые агрегаты (см. рис. 3д); 5) халькопирит, который заполняет межзерновое и межобломочное пространство (см. рис. 3е).

Для удобства описания содержания ЭП подразделены на высокие (>1000 г/т), повышенные (100–1000 г/т), умеренные (10–100 г/т) и низкие (<10 г/т). Все дисульфиды железа скважины 1Т содержат высокие концентрации Co (табл. 1). Пирит-1 также демонстрирует высокие содержания Cu, повышенные – Mn, Ni, Zn, As, Se, Ag, Sn, Sb и Pb, умеренные – Te и низкие – остальных ЭП. Пирит-марказитовые агрегаты характеризуются высокими содержаниями Cu, повышенными – Ni, Zn и Pb, умеренными – Mn, As, Se, Ag, Sb и Bi и низкими – остальных ЭП. Марказит содержит повышенные концентрации Ni, Cu, Zn и Pb, умеренные – As, Se, Ag, Sb и Bi и низкие – остальных ЭП. Пириту-2 свойственны умеренные содержания Ni, Cu, As, Se, Sb и Pb и низкие – остальных ЭП. Халькопирит характеризуется ультравысокими ($>10\,000$ г/т) содержаниями Zn, повышенными – Se, умеренными – Co, Ni, Cd, Sn и Pb и низкими – остальных ЭП (табл. 2).

Скважина 200

В пирит-халькопирит-пирротиновых “гравелитах” изучены: 1) пористый кристаллический пирит-2, представленный фрагментами сростков (часто радиально-лучистых) с шагреновой поверхностью (возможно, содержит реликты обломочного пирита-1) и разбитый сетью пирротиновых прожилков (см. рис. 4в, г); 2) агрегаты гладкого зонального кристаллического пирита-3-4 (см. рис. 4д), который обрастает пирит-2 и зоны которого (пирит-3 и пирит-4) отличаются по химическому составу (см. табл. 1); 3) пирротин, замещающий пирит-2; 4) ксеноморфный халькопирит из межкристаллического и “межобломочного” пространства и 5) кубанит, ассоциирующий с халькопиритом и образующий ламелли в халькопиритовых агрегатах (см. рис. 4е).

Все сульфиды Fe скважины 200 характеризуются повышенными содержаниями Co и Ni (см. табл. 1). Пирит-2 содержит умеренные концентрации Se и низкие – остальных ЭП. Пирит-3 также демонстрирует повышенные содержания As, умеренные – Cu, Se и Sb и низкие – остальных ЭП. Для пирита-4 свойственны высокие содержания As, умеренные – Cu и Sb и низкие – остальных ЭП. Пирротин характеризуется повышенными содержаниями Cu, умеренными – Cr, As, Se и Sb и низкими – остальных ЭП. Халькопирит и кубанит имеют повышенные и высокие содержания Co и Ni, повышенные – Zn (халькопирит и кубанит) и Se (халькопирит), умеренные – Te (халькопирит, кубанит) и Se (кубанит) и низкие – остальных ЭП (см. табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований показывают, что содержания, распределение и форма нахождения ЭП в сульфидах главного рудного тела (скв. 1Т) и северо-западного фланга месторождения (скв. 200) различаются.

ЭП в сульфидах главного рудного тела и северо-западного фланга

Сравнительный анализ медианных содержаний (далее – содержаний) ЭП в сульфидах Fe главного рудного тела показывает, что пирит-1 характеризуется наибольшими содержаниями большинства ЭП (см. табл. 1, 3, рис. 5а). Исключением являются Mo, содержания которого примерно одинаковы в пирите-1, пирит-марказитовых агрегатах и марказите, Bi, содержания которого максимальны в пирит-марказитовых агрегатах и марказите, и Tl, максимальные содержания которого зафиксированы в пирите-2. Содержания большинства ЭП (Mn, Co, Ni, Zn, As, Mo, Ag, Cd, Sn, Au, Tl, Pb) в пирите из скв. 1Т уменьшаются от ранней генерации (пирит-1) к поздней (пирит-2) (см. табл. 1, рис. 5а). Такое обогащение ЭП ранних форм пирита свойственно многим месторождениям, включая колчеданные и золоторудные (Large et al., 2007, 2009; Maslennikov et al., 2009), и объясняется быстрым ростом ранних генераций пирита (тонкозернистого, сажистого, коллоформного, фрамбоидального) при низкой температуре, что способствует большему вхождению многих ЭП в структуру пирита, чем образованию включений других минералов (Large et al., 2009). В то же время кристаллические формы пирита растут медленно при более высоких температурах, что способствует высвобождению ЭП из структуры пирита и образованию в нем микро-включений других минералов.

Содержания Se, Sb, Te и Bi повышены в пирит-марказитовых агрегатах относительно пирита-1 и -2.

Таблица 1. Содержание элементов-примесей в сульфидах железа Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения, г/т
Table 1. Trace element content of Fe sulfides of the Dergamysh cobalt-bearing massive sulfide deposit, ppm

№ анализа	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Au	Tl	Pb	Bi	U	Co/Ni
Скв. 1Г																						
Пирит-1																						
МУ15А185	3.28	4.19	0.42	37	8075	567	6200	1600	254	120	4.96	174	1.50	183	116	18	5.56	0.06	532	0.96	0.18	14.23
МУ15А186	2.81	1.32	0.71	134	10724	867	4888	1218	195	180	14	140	1.02	105	106	21	3.92	0.07	353	5.34	0.13	12.37
МУ15А187	3.40	8.56	0.99	184	8125	692	9821	572	282	150	9.49	147	0.64	144	138	19	4.58	0.08	450	5.71	0.10	11.74
МУ15А188	2.95	8.43	1.10	80	7667	593	7029	575	280	112	3.42	191	0.70	209	137	20	5.83	0.07	601	0.32	0.24	12.94
МУ15А200	3.31	5.41	0.18	12	7507	531	4894	729	281	231	4.50	148	1.00	163	104	32	5.00	0.05	469	1.18	0.12	14.15
МУ15А201	2.93	4.15	0.62	1209	11097	1060	674	1182	114	329	58	39	1.27	24	93	12	1.86	0.18	209	12	0.21	10.47
МУ15А202	5.91	8.12	1.12	739	8429	901	771	2679	105	106	79	47	2.70	35	43	14	1.43	0.06	146	9.73	0.33	9.35
МУ15А205	47	44	5.38	75	6737	502	5796	560	200	270	3.36	136	0.56	129	103	15	3.68	0.04	402	3.49	0.13	13.42
Медиана	3.30	6.76	0.85	107	8100	642	5345	956	227	165	7.23	144	1.01	136	105	19	4.25	0.06	426	4.41	0.16	12.61
Пирит-марказитовые агрегаты																						
МУ15А176	2.91	6.31	0.29	26	1304	137	836	179	38	8.94	5.22	13	0.24	8.94	93	10.55	2.35	3.46	130	13	0.03	9.53
МУ15А177	3.12	3.68	0.19	29	1322	168	1725	1498	36	10	2.24	10	1.24	11	94	5.82	1.75	11	144	9.63	0.02	7.87
МУ15А178	2.18	3.63	0.77	8	1221	130	833	118	27	8.09	1.06	2.80	0.13	1.63	26	1.08	0.84	9.45	62	1.84	0.09	9.39
МУ15А179	3.26	2.59	1.29	16	1349	133	1771	237	31	5.81	1.48	8.64	0.19	4.84	89	3.36	2.31	9.57	135	6.07	0.04	10.11
МУ15А180	2.05	4.21	0.34	66	2539	84	1307	353	21	94	0.65	14	0.53	4.47	73	6.31	2.00	0.16	122	12	0.02	30.21
МУ15А181	2.57	3.89	0.76	35	1321	91	2458	92	49	5.89	4.20	9.85	0.15	2.03	147	0.48	2.54	13	237	1.10	0.07	14.51
МУ15А182	2.21	3.16	0.71	4	3142	226	2355	241	26	35	3.08	11	0.49	3.67	83	4.81	2.76	0.42	155	13	0.05	13.90
МУ15А183	1.88	1.93	0.28	94	2872	222	780	116	135	23	6.32	30	0.16	15	382	49	3.91	11	415	66	0.03	12.91
МУ15А184	4.36	6.44	0.16	99	3405	215	969	134	189	35	9.89	36	0.11	27	582	66	6.21	7.03	664	100	0.07	15.82
МУ15А203	3.73	6.60	1.02	288	6400	641	4820	535	66	254	4.15	22	0.80	17	151	20	2.62	0.04	189	32	0.15	9.98
МУ15А204	3.04	2.98	0.25	53	5623	372	1284	98	259	63	6.09	72	0.27	44	520	93	5.07	2.00	552	155	0.04	15.11
Медиана	2.91	3.68	0.34	35	2539	168	1307	179	38	23	4.15	13	0.24	8.94	94	6.31	2.54	7.03	155	13	0.04	15.12
Марказит																						
МУ15А189	2.79	36	2.47	45	5914	469	1543	220	90	486	3.99	56	0.22	59	48	6.75	1.71	0.02	163	1.08	0.06	12.60
МУ15А194	11	1.22	0.04	2.66	2243	143	644	72	32	18	4.44	12	0.21	2.42	477	9.23	2.02	0.05	185	19	0.01	15.71
МУ15А195	2.89	1.56	0.36	2.63	1450	117	613	37	22	8	7.25	11	0.14	2.44	122	5.30	1.12	0.50	105	6.71	0.02	12.43
МУ15А196	2.78	2.26	0.15	2.94	4847	227	1266	340	17	108	1.26	15	0.57	2.77	70	13	1.57	0.06	89	20	0.01	21.32
Медиана	2.84	1.91	0.25	2.80	3545	185	955	146	27	63	4.21	14	0.21	2.61	96	7.99	1.64	0.05	134	13	0.01	19.16
Пирит-2																						
МУ15А190	2.55	1.74	0.24	32	1219	128	131	43	20	16	12	2.57	0.20	0.44	84	0.63	0.34	11	52	2.58	0.05	9.53
МУ15А191	2.56	0.58	0.04	0.10	1751	98	30	5	6.37	46	0.85	1.07	0.26	0.28	208	0.23	0.16	0.00	42	0.00	0.00	17.89
МУ15А192	2.32	0.03	0.15	0.54	1533	96	27	3	0.94	32	2.87	0.61	0.04	0.17	4.74	0.10	0.03	0.00	3.50	0.07	0.00	15.96
МУ15А193	2.07	0.01	0.01	0.27	439	56	25	1	1.08	9.86	2.13	1.22	0.05	0.06	25	0.00	0.00	0.00	2.18	0.00	0.00	7.85
МУ15А197	1.42	1.84	1.94	0.76	2056	316	198	3	407	129	0.27	2.26	0.09	1.18	59	0.84	1.04	0.01	112	0.53	0.00	6.51
МУ15А198	3.05	11	1.20	213	2963	248	1261	230	105	26	24	34	0.39	15	346	39	2.41	3.05	246	81	0.14	11.95
МУ15А199	1.84	2.11	1.23	0.43	474	21	83	2	218	82	0.08	0.82	0.06	0.57	22	0.51	0.32	0.01	38	0.56	0.04	23.02
Медиана	2.32	1.74	0.24	0.54	1533	98	83	2.85	20	32	2.13	1.22	0.09	0.44	59	0.51	0.32	0.01	42	0.53	0.00	15.67

Таблица 1. Окончание
Table 1. Ending

№ анализа	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Au	Tl	Pb	Bi	U	Co/Ni
Скв. 200																						
Пирит-2																						
MY15A225	1.45	0.01	0.40	1.17	863	406	10	1.67	77	109	1.06	0.04	0.07	0.01	26	0.01	0.03	0.01	0.25	0.00	0.00	2.12
MY15A226	1.34	0.02	0.19	0.12	1054	376	0.64	0.33	9.24	104	0.62	0.01	0.00	0.02	2.71	0.11	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	2.80
MY15A227	1.23	0.02	0.14	0.80	816	313	4.10	0.89	8.57	71	0.60	0.01	0.07	0.03	2.53	0.09	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	2.60
MY15A228	2.07	0.02	0.31	0.78	780	301	235	1.41	16	48	0.58	0.03	0.02	0.06	2.99	0.14	0.00	0.01	0.12	0.00	0.00	2.59
MY15A233	3.41	0.37	3.97	3.77	656	325	324	1.88	35	110	0.43	0.10	0.01	0.01	9.08	0.09	0.02	0.00	0.11	0.00	0.00	2.02
MY15A247	2.48	0.01	0.26	0.46	730	364	1.99	1.56	48	49	0.31	0.01	0.06	0.00	5.73	0.11	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	2.00
Медиана	1.76	0.02	0.29	0.79	798	345	7.00	1.49	26	88	0.59	0.02	0.04	0.01	4.36	0.10	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	2.32
Пирит-3																						
MY15A229	1.99	0.30	20	3.22	554	626	194	0.73	440	24	0.89	0.01	0.06	0.02	43	0.07	0.01	0.09	0.03	0.00	0.00	0.88
MY15A234	2.08	0.12	10	1.88	638	595	131	1.03	372	12	0.95	0.01	0.08	0.05	59	0.12	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	1.07
MY15A235	4.15	0.10	3.55	2.20	566	341	2.91	1.16	409	26	1.62	0.01	0.07	0.03	38	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	1.66
MY15A236	1.90	0.13	6.49	0.86	182	543	144	0.63	1473	2.64	0.27	0.05	0.07	0.01	52	0.09	0.02	1.65	0.25	0.01	0.00	0.34
MY15A237	2.88	0.86	62	0.97	32	175	4.17	1.18	3449	0.25	0.23	0.03	0.13	0.04	16	0.08	0.01	0.29	0.12	0.00	0.00	0.18
MY15A239	1.81	0.18	12	0.11	144	684	3.72	0.06	2127	2.07	0.48	0.01	0.21	0.02	27	0.01	0.08	0.38	0.39	0.00	0.00	0.21
MY15A262	1.98	0.00	0.02	0.89	1475	751	37	0.40	25	19	2.03	0.27	0.07	0.00	1.34	0.07	0.01	0.00	0.05	0.19	0.00	1.96
Медиана	1.99	0.13	10	0.97	554	595	37	0.73	440	12	0.89	0.01	0.07	0.02	38	0.07	0.01	0.09	0.05	0.00	0.00	0.93
Пирит-4																						
MY15A238	1.75	0.00	2.25	0.10	311	1146	13	0.04	1147	8.72	0.04	0.04	0.10	0.04	51	0.06	0.14	0.62	0.56	0.00	0.00	0.27
MY15A240	1.99	0.32	31.82	0.64	298	1138	8.01	0.05	3011	5.44	0.39	0.01	0.11	0.01	71	0.06	0.07	0.69	0.37	0.01	0.00	0.26
MY15A241	1.86	0.01	0.63	0.22	254	858	16	0.01	966	7.06	0.32	0.01	0.05	0.00	2.76	0.04	0.11	0.01	0.13	0.00	0.00	0.30
MY15A232	2.38	0.02	1.58	0.04	193	662	7.03	0.09	883	4.56	0.30	0.00	0.06	0.05	1.94	0.01	0.06	0.02	0.13	0.00	0.00	0.29
Медиана	1.93	0.02	1.91	0.16	276	998	11	0.05	1056	6.25	0.31	0.01	0.08	0.02	27	0.05	0.09	0.32	0.25	0.00	0.00	0.28
Пирротин																						
MY15A242	1.68	0.24	24	7.15	644	690	132	2.73	81	77	3.87	0.74	0.14	0.08	20	0.10	0.06	0.20	0.10	0.00	0.01	0.93
MY15A243	1.99	0.04	1.46	7.17	506	592	85	2.17	72	98	2.35	0.89	0.49	0.21	15	0.05	0.09	0.17	0.13	0.00	0.03	0.86
MY15A244	2.26	0.18	8.95	5.06	613	701	78	9.05	100	108	2.13	1.05	0.62	0.18	15	0.11	0.07	0.23	0.61	0.00	0.03	0.87
MY15A245	2.96	2.46	134	23	951	937	9700	68	194	80	1.70	0.81	0.40	0.21	35	2.07	0.14	0.24	2.68	0.02	0.14	1.02
MY15A248	3.26	1.30	38	13	581	584	190	11	89	120	3.31	0.84	0.29	0.16	14	0.08	0.12	0.22	1.14	0.00	0.03	1.00
Медиана	2.26	0.24	24	7.17	613	690	132	9.05	89	98	2.35	0.84	0.40	0.18	15	0.10	0.09	0.22	0.61	0.00	0.03	0.89

Таблица 2. Содержание элементов-примесей в сульфиде меди и железа Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения, г/т

Table 2. Trace element content in Cu and Fe sulfides of the Dergamysh cobalt-bearing massive sulfide deposits, ppm

№ анализа	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Zn	As	Se	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Au	Tl	Pb	Bi	U	Co/Ni
Халькопирит, скв. 1Г																					
MY15A209	1.62	0.54	3.94	5.85	36	12	12574	0.13	257	0.03	5.53	19	15	1.40	0.28	0.01	0.02	41	0.00	0.01	3.01
MY15A210	3.47	2.32	0.41	21	67	3.82	12288	0.05	268	0.00	9.18	16	77	2.70	0.00	0.06	0.02	16	0.22	0.03	17.45
MY15A211	2.45	0.02	0.78	0.43	309	2.59	15996	0.53	264	0.15	3.23	17	99	0.54	0.11	0.04	0.00	3.95	0.06	0.01	119.54
MY15A212	2.68	0.32	0.15	1.14	67	25	14782	0.15	210	0.08	11	27	12	0.38	0.57	0.00	0.01	78	0.01	0.00	2.68
MY15A213	2.50	0.07	1.39	1.05	97	0.18	18336	0.02	190	0.05	3.39	20	91	0.20	0.56	0.01	0.01	2.11	0.01	0.01	547.39
MY15A214	5.09	2.78	2.84	2.74	29	2.24	10700	0.02	218	0.02	2.52	12	68	2.55	0.25	0.05	0.01	11	0.01	0.06	13.06
MY15A215	1.74	0.50	0.18	0.76	26	15	11520	0.81	76	0.08	5.80	17	17	0.94	0.46	0.01	0.00	32	0.01	0.02	1.74
MY15A216	0.99	0.13	5.35	3.71	671	28	18225	1.20	299	0.10	5.73	25	29	3.20	0.41	0.00	0.00	45	0.11	0.02	24.04
MY15A217	2.37	0.97	2.03	1.24	35	5.35	11039	0.39	246	0.03	5.85	14	36	0.31	0.09	3.53	0.01	17	0.01	0.02	6.60
MY15A218	5.18	5.02	0.82	4.43	39	2.13	15890	0.94	188	0.11	5.56	20	39	15	0.08	0.04	0.01	33	0.01	0.12	18.12
MY15A219	3.04	0.26	0.45	5.16	127	11	16324	0.01	199	0.08	4.25	20	38	0.80	0.13	0.00	0.00	15	0.00	0.01	11.97
MY15A220	3.62	0.83	1.52	6.36	554	32	18591	0.70	246	0.10	9.17	25	25	3.93	0.45	0.01	0.01	61	0.06	0.04	17.18
MY15A223	2.73	0.10	0.05	0.75	46	13	14476	0.05	167	0.00	5.37	22	7.97	0.17	0.17	0.00	0.01	50	0.01	0.00	3.66
MY15A224	1.88	0.90	0.56	8.17	381	132	17290	13	217	0.09	11	24	49	16	0.86	0.01	0.01	63	0.29	0.04	2.89
Медиана	2.59	0.52	0.80	3.23	67	11	15336	0.27	217	0.08	5.64	20	37	1.17	0.27	0.01	0.01	32	0.01	0.02	5.93
Халькопирит, скв. 200																					
MY15A250	2.54	0.00	1.19	0.46	874	1014	592	5.71	847	2.66	0.10	1.91	0.20	2.73	84.96	0.38	0.88	3.54	2.41	0.00	0.86
MY15A254	0.80	0.02	0.69	0.68	177	595	185	6.95	168	1.40	0.07	0.85	0.05	0.94	6.17	0.03	0.49	0.23	0.63	0.03	0.30
MY15A255	12	0.06	3.00	0.34	331	478	624	0.37	760	0.04	0.26	2.72	0.24	0.26	76.29	0.57	0.09	0.21	2.33	0.09	0.69
MY15A256	1.57	0.04	2.71	0.91	677	758	1624	1.52	431	2.64	0.27	5.55	0.37	1.09	40.69	0.03	0.44	0.34	2.39	0.00	0.89
MY15A258	108	0.01	0.05	0.31	1111	1542	320	16	322	3.05	0.22	2.25	0.06	1.89	33.08	0.00	1.37	0.97	3.61	1.30	0.72
MY15A260	2.07	0.02	1.98	0.49	1098	1440	310	2.62	700	1.71	0.15	2.19	0.16	1.80	64.43	0.07	0.65	1.46	5.18	0.00	0.76
MY15A261D	1.62	0.00	0.24	0.78	722	1016	461	3.75	231	5.28	0.13	2.52	0.22	0.47	38.14	0.03	0.33	0.26	3.12	0.01	0.71
MY15A263	5.37	3.12	1.79	7.18	1312	1477	485	0.64	19	1.07	0.36	2.23	0.32	0.50	40	0.04	0.45	0.42	10.34	0.04	0.89
Медиана	2.31	0.02	1.59	0.58	798	1015	473	3.19	377	2.18	0.18	2.24	0.21	1.01	40	0.04	0.47	0.38	2.76	0.02	0.79
Кубанит, скв. 200																					
MY15A249	1.68	0.06	0.88	0.99	459	491	195	5.59	13	0.50	0.51	3.63	1.47	1.79	2.01	0.09	0.29	2.68	0.81	0.01	0.93
MY15A252	1.06	0.00	1.40	1.40	114	165	61	0.97	608	0.11	0.42	2.10	0.66	0.47	48	0.01	0.31	0.66	2.08	0.00	0.69
MY15A253	2.93	0.07	0.32	1.39	2631	1209	510	1146	40	0.99	5.92	2.27	0.49	83.68	109	0.09	1.61	0.53	4.23	0.00	2.18
MY15A257	4.05	0.03	0.66	1.68	161	204	121	1.74	17	0.00	0.70	2.03	1.86	0.32	47	0.20	0.02	0.06	1.89	0.00	0.79
MY15A259	1.86	0.10	1.28	0.24	1397	1743	20	5.33	307	0.74	1.01	2.11	0.37	3.39	24	0.04	1.96	2.01	4.15	0.01	0.80
Медиана	1.86	0.06	0.88	1.39	459	491	121	5.33	40	0.50	0.70	2.11	0.66	1.79	47	0.09	0.31	0.66	2.08	0.00	0.93

Таблица 3. Локальные коэффициенты концентрации в сульфидах Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения

Table 3. Local concentration coefficients of sulfides of the Dergamysh cobalt-bearing massive sulfide deposit

Главное рудное тело, скв. 1Т														
Пирит-1	Ag	Mn	As	Te	Co	Ni	U	Pb	Mo	V	Au	Sb	Cr	Ti
	13.8	12.8	8.5	8.4	5.8	4.9	4.3	3.9	3.3	3	2.8	1.5	1.3	1.2
Пирит-марказитовые агрегаты	Tl	Bi												
	157.7	11.8												
Халькопирит	Cd	Zn	Se											
	30.2	27.1	1.9											
Северо-западный фланг месторождения, скв. 200														
Пирит-2	Co													
	1.4													
Пирит-3	Sb													
	5.8													
Пирит-4	As	Ni												
	13.8	1.7												
Пирротин	Ag	Mn	Mo											
	11.7	9.1	4											
Кубанит	Sn													
	28.5													
Халькопирит	Bi	Te	Zn	Cd	Se	Pb	Au	Tl	Ni	Co				
	967.7	795	305.6	19.4	12.2	5	3.3	2.7	1.7	1.4				

Марказит характеризуется промежуточным уровнем содержаний между всеми разновидностями пирита, но содержания ЭП в нем наиболее близки к таковым в пирит-марказитовых агрегатах. Халькопирит характеризуется пониженными содержаниями всех ЭП относительно всех разновидностей пирита, за исключением Zn и Cd, а также Se. Носителями повышенных содержаний благородных металлов являются пирит-1 и пирит-марказитовые агрегаты.

В рудах скв. 200 наибольшее количество ЭП накапливается в халькопирите (Bi, Te, Zn, Cd, Se, Pb, Au, Tl, Ni, Co) (см. табл. 1, 3, рис. 56). Олово накапливается в кубаните, As и Ni – в пирите-4, Ag, Mn и Mo – в пирротине, Sb – в пирите-3 и Co – в пирите-2.

Форма нахождения ЭП в сульфидах

Корреляционный анализ данных ЛА-ИСП-МС методом максимального корреляционного пути для выборок минералов служит эффективным инструментом для выявления ассоциаций элементов-примесей в целях установления формы их нахождения в минералах (Maslennikov et al., 2009). Для выборки сульфидов Fe в халькопирит-пирит-марказитовых рудах главного рудного тела принято три минералого-геохимические ассоциации (табл. 4). Первая ассоциация объединяет элементы ассоциирующих микровключений халькопирита (Ag, Sn, Cu), золота и галенита (Au, Pb) и теллуридов Bi, возможно содержащих Sb. Вто-

рая ассоциация содержит микровключения сфалерита (Zn, Cd), который соединен “водородным” U (Butler, Nesbitt, 1999) с типичными ЭП пирита (Ni, Co, Se) и группой литогенных V, Cr и Ti (Масленников и др., 2014), отражающих включения нерудных элементов. В третью группу входят Mn и Mo, которые часто являются примесями в коллоидных разновидностях пирита (Масленников и др., 2014). As и Tl не имеют связей ни с одним элементом и, вероятно, изоморфно входят в структуру пирита.

Для халькопирита горизонта главного рудного тела установлено пять минералого-геохимических ассоциаций (см. табл. 4). Первая ассоциация отражает микровключения пирита (Ni, As, Bi, Mn, Tl), вторая – объединяет водородные (V, U) и литогенные (Ti) элементы, концентрирующиеся в силикатных минералах. Третья и четвертая ассоциации показывают разделение Cd и Zn между разными минералами: первый связан с Pb и Ag, что может указывать на присутствие собственного минерала этих элементов, тогда как вторая, вероятно, свидетельствует о том, что микровключения сфалерита содержат Co и Mo. Необычной представляется связь Se (типичного элемента в халькопирите) и Cr (элемента, типичного для нерудных минералов). Отсутствие связей Sn, Sb, Au и Te с другими ЭП наиболее вероятно объясняется их изоморфным положением в структуре халькопирита.

Для выборки сульфидов Fe (пирит + пирротин) в пирит-халькопирит-пирротинных “гравелитах” северо-западного фланга месторождения установ-

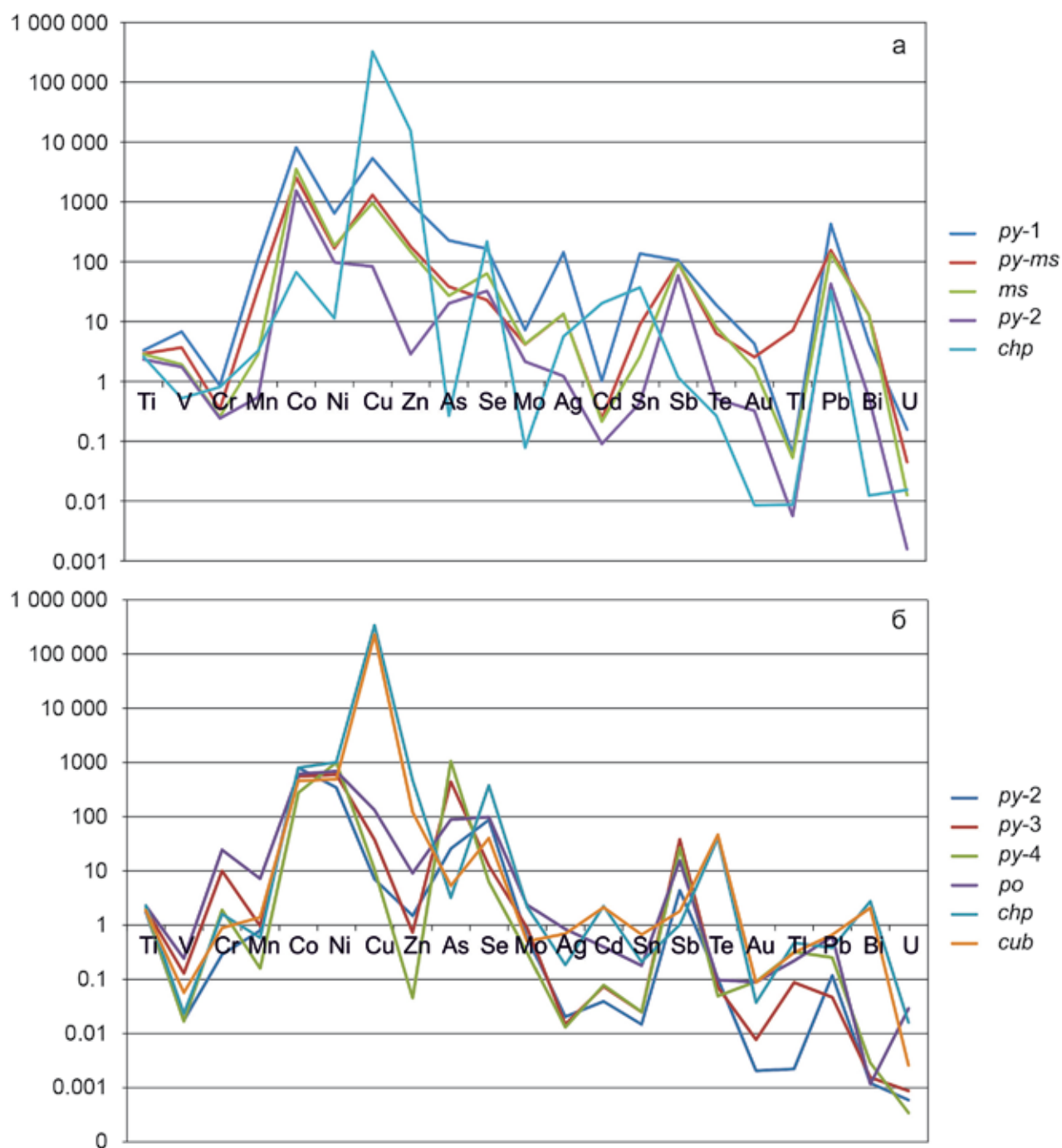


Рис. 5. Соотношение медианных содержаний элементов-примесей в различных сульфидах главного рудного тела (а) и рудного горизонта северо-западного фланга (б) Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения.

Fig. 5. Ratio of median trace element contents in various sulfides of the main ore body (a) and ore horizon of the north-western flank (б) of the Dergamysh Co-bearing massive sulfide deposit.

лено три минералого-геохимические ассоциации (см. табл. 4). Первая ассоциация отражает комплексные микровключения халькопирита, сфалерита и галенита (Cu, Te, Zn, Pb), хромита (V, Cr, Mn), ассоциирующих золота и никелина (Ni), ми-

нералов Sn, Ag, Cd (?), а также ранних форм пирита, концентрирующих As и Tl. Вторая ассоциация, вероятно, указывает на возможную примесь Bi в кобальтине по аналогии с Ишкинским кобальт-медноколчеданным месторождением, где кобаль-

Таблица 4. Ассоциации элементов-примесей в сульфидах Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения

Table 4. Trace element associations of sulfides of the Dergamysh Co-bearing massive sulfide deposit

Скв. 1Т	Скв. 200
Сульфиды Fe	Сульфиды Fe
I ($\text{Ag}^{0.99}\text{Sn}^{0.86}\text{Cu}^{0.68}(\text{Au}^{0.97}\text{Pb})^{0.75}(\text{Te}^{0.92}\text{Bi}^{0.82}\text{Sb})$) II ($\text{Zn}^{0.98}\text{Cd}^{0.78}\text{U}^{0.80}(\text{Ni}^{0.96}\text{Co}^{0.68}\text{Se})^{0.65}(\text{V}^{0.86}\text{Cr}^{0.79}\text{Ti})$) III ($\text{Mn}^{0.88}\text{Mo}$) As, Ti	I ($\text{Cu}^{1.00}\text{Te}^{0.98}\text{Zn}^{0.98}\text{U}^{0.93}\text{Pb})^{0.90}(\text{V}^{0.95}\text{Cr}^{0.79}\text{Mn})^{0.79}(\text{Sn}^{0.90}\text{Ag}^{0.87}\text{Cd})^{0.54}(\text{Au}^{0.73}\text{Ni})^{0.48}$) ($\text{Sb}^{0.58}\text{Ti}^{0.49}\text{As}$) II ($\text{Co}^{0.59}\text{Bi}$) III ($\text{Mo}^{0.53}\text{Se}$) Ti
Халькопирит	Халькопирит + кубанит
I ($\text{Ni}^{0.96}\text{As}^{0.75}\text{Bi}^{0.68}\text{Mn}^{0.57}\text{Ti}$) II ($\text{V}^{0.95}\text{U}^{0.74}\text{Ti}$) III ($\text{Cd}^{0.79}\text{Pb}^{0.78}\text{Ag}$) IV ($\text{Co}^{0.71}\text{Zn}^{0.58}\text{Mo}$) V ($\text{Se}^{0.58}\text{Cr}$) Sn, Sb, Au, Te	I ($\text{Ti}^{1.00}\text{U}$) II ($\text{V}^{1.00}\text{Cr}^{0.97}\text{Mn}^{0.78}\text{Bi})^{0.66}\text{Ni}^{0.75}\text{Ti}^{0.76}\text{Co}^{0.79}(\text{Sb}^{1.00}\text{As}^{0.99}\text{Ag}^{0.56}\text{Te})$) III ($\text{Zn}^{0.77}\text{Cd}$) Se, Mo, Sn, Au, Pb

Примечание. Элементы даны по убыванию коэффициентов корреляции.

Note. Elements are ranged in order of decreasing correlation coefficients.

тин содержит до 0.25 мас. % Bi (Зайков и др., 2009). Ассоциация Mo с Se связана с включениями кубанита, где Mo отрицательно коррелирует с Cu ($r^2 = -0.6$). Титан не образует связей с другими элементами, будучи связан с нерудной составляющей.

Для выборки сульфидов Cu и Fe (халькопирит + кубанит) в пирит-халькопирит-пирротиновых “гравелитах” северо-западного фланга месторождения установлено три минералого-геохимические ассоциации (см. табл. 4). Сильная связь отличает Ti и U, поскольку в этом горизонте U тяготеет к нерудным минералам цемента (Мелекесцева и др., 2018). Вторая ассоциация связана с включениями V-, Mn- и, возможно, Bi-содержащего хромита, пирита (Ni, Ti, Co), сульфоарсенидов, сульфоантимонидов и теллуридов. В третьей ассоциации обособились включения сфалерита. Элементы-примеси, изоморфно входящие в сульфиды Cu и Fe, не образуют связей с другими ЭП (Se, Mo, Sn, Au, Pb).

Причины различий в распределении ЭП в сульфидах

Разное накопление ЭП в сульфидах главного рудного тела и северо-западного фланга месторождения обусловлено двумя главными причинами: 1) разным источником вещества и 2) разной степенью диагенетической преобразованности сульфидов.

Ранее на основании валового Co/Ni отношения в рудах Дергамышского месторождения был предположен “мафитовый” источник металлов (Melekestseva et al., 2013). Считается, что Co/Ni отношение (>1 или <1) может быть информативно для выявления источника элементов, что основано на преобладании Ni в ультрамафитах и Co –

в основных вулканитах (Marques et al., 2006). Содержание Co и Ni в серпентинитах Байгускаровского массива, вмещающего Дергамышское месторождение, составляет 0.008 и 0.18 г/т (Захаров, Захарова, 1975) соответственно, и их Co/Ni отношение (0.04) близко мантийному значению (0.06) (McDonough, Sun, 1995). Средние содержания Co в рудах скв. 1Т (0.14%) значительно превышают средние содержания Ni (0.02%) ($\text{Co/Ni} > 1$) (Зайков и др., 2009), а Co/Ni отношение равно 7, что во много раз превышает мантийные значения, указывая на основные породы в качестве источника Co. Это предположение подтверждается и настоящим исследованием, в результате которого установлено Co/Ni отношение $\gg 1$ для всех сульфидов из скв. 1Т и раннего пирита скв. 200 и <1 для остальных сульфидов скв. 200 (см. табл. 1, 2). Подобная ситуация характерна для массивных руд гидротермального сульфидного поля Рейнбоу в Срединно-Атлантическом хребте, залегающего на ультрамафитах (Marques et al., 2006).

Источник металлов, не связанный с ультрамафитами, для главного рудного тела Дергамышского месторождения также подтверждается и содержаниями в рудах и сульфидах ЭП полиметаллической ассоциации (Zn, Cd, Ag, Sn, Sb, Pb), не характерной для ультрамафитов. Содержания Zn в главном рудном теле Дергамышского месторождения составляют 0.12–2% по сравнению с рудами Ишкенинского (до 0.4% по данным геологоразведочных работ и 2–860 г/т в штучных пробах) и Ивановского (0.02–0.15%) месторождений (Зайков и др., 2009). По данным настоящего исследования, содержания Cd, Ag, Sn, Sb и Pb также повышены на порядок и выше в сульфидах скв. 1Т, тогда как

сульфиды скв. 200 содержат повышенные концентрации Cr, Ni, As – типичных элементов-примесей ультрамафитов (рис. 6а). Сходная картина обога-

щения и обеднения ЭП наблюдается и в халькопирите: халькопирит главного рудного тела обогащен Zn, Ag, Cd, Sn, Sb и Pb, тогда как халькопи-

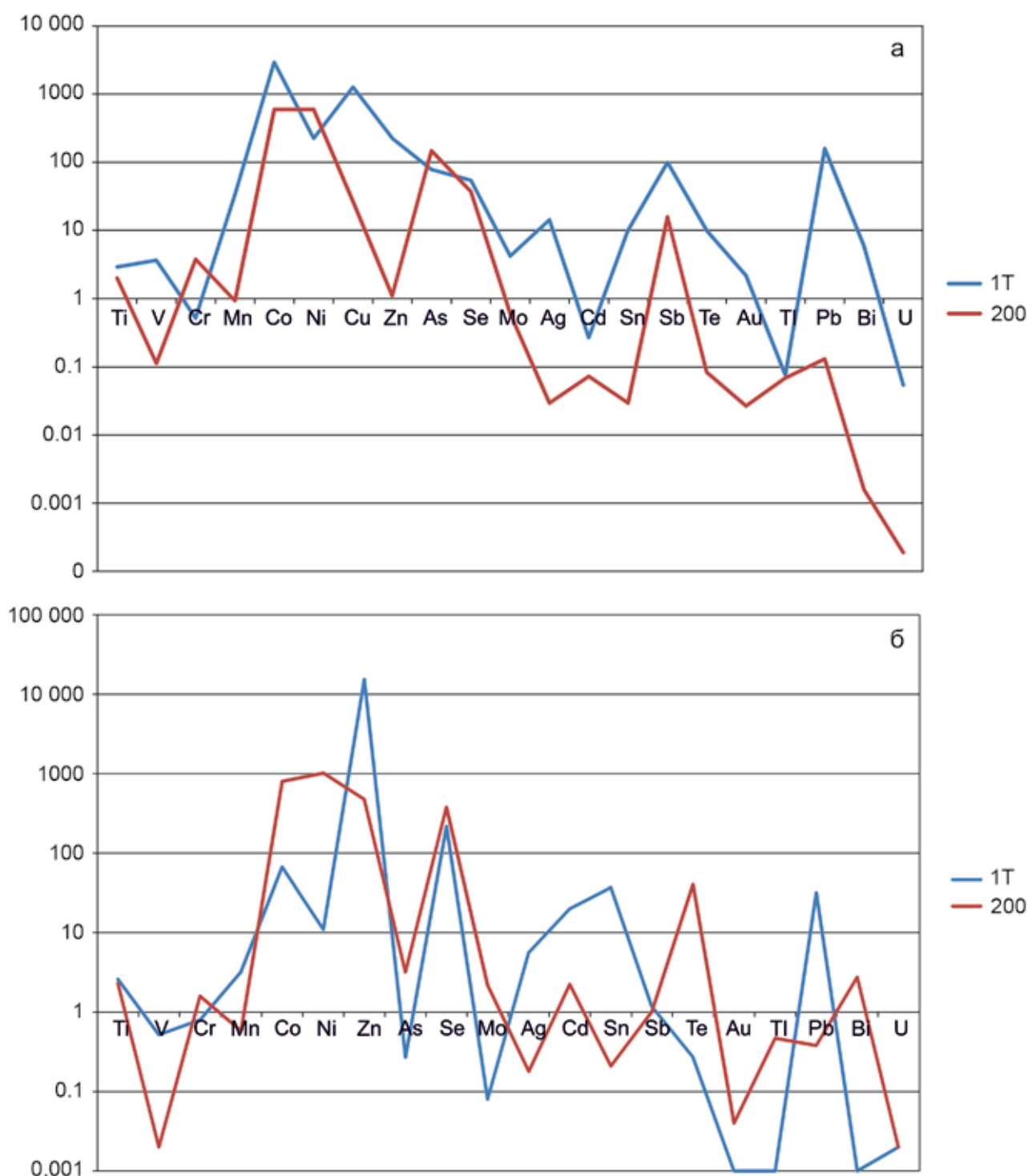


Рис. 6. Соотношение медианных содержаний элементов-примесей в дисульфидах Fe (пирит + пирротин) (а) и сульфидах Fe и Cu (халькопирит + кубанит) (б) Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения.

Fig. 6. Ratio of median trace element contents in Fe disulfides (pyrite + pyrrhotite) (a) and Fe and Cu sulfides (chalcopyrite + cubanite) (b) of the Dergamysh Co-bearing massive sulfide deposit.

рит северо-западного фланга богаче Cr, Co, Ni и As (рис. 6б).

По содержаниям Zn (а также Co и Ni) руды Дергамышского месторождения (Melekestseva et al., 2013) близки к рудам Летнего месторождения кипрского (домбаровского) типа, залегающим в базальтах офиолитовой ассоциации (Лядский и др., 1988; Зайков и др., 2001; Серавкин, 2010). В них также сфалерит является второстепенным минералом, а Co главным образом присутствует как примесь в пирите и редко образует мелкие кристаллы кобальтина (Зайков и др., 2001).

Известно, что Sn – один из элементов-индикаторов влияния ультрамафитов (или осадков) на рудообразование (Evrard et al., 2015), а в трубах курильщиков Дергамышского месторождения были обнаружены минералы Sn – касситерит и недиагностированный минерал Sn, Fe и Cu (Maslennikov et al., 2017). В сульфидах главного рудного тела Дергамышского месторождения его повышенные медианные концентрации характерны только для пирита-1, в котором он имеет сильную корреляционную связь с Pb, Ag (0.95), Au (0.96) и As (0.88), вероятно входя в состав золото-галенит-сульфосольной ассоциации. При этом халькопирит главного рудного тела обогащен Sn (медиана 37 г/т) относительно халькопирита северо-западного фланга месторождения (медиана 0.21 г/т). Возможно, некоторое обогащение Sn отражает локальные физико-химические условия образования минералов, а не общую картину в целом, так как на многих уральских колчеданных месторождениях, которые ассоциируют с вулканогенными комплексами, содержания Sn в минералах курильщиков высокие (Maslennikov et al., 2017).

Повышенные содержания ЭП в сульфидах Fe халькопирит-пирит-марказитовых руд скв. 1Т по сравнению с сульфидами Fe скв. 200, за исключением Cr, Ni и As (см. рис. 6а), могут также отражать меньшую степень их диагенетического преобразования, при котором ЭП высвобождаются из ранних обломочных сульфидов. Морфологически их меньшая степень преобразования подтверждается многообразием и сохранностью ранних форм минералов (обломки, почки, апопиротиновый пирит) и меньшим количеством аутигенных акцессорных минералов: в образцах скв. 1Т обнаружено только самородное золото. Напротив, пирит-халькопирит-пирротинные “гравелиты” скв. 200 являются более преобразованными, поскольку практически не содержат ранних морфологических форм сульфидов, а на их обломочное происхождение косвенно указывает только присутствие обломков хромита. Здесь найдены многочисленные собственные минералы Co, Ni, As, Au, Ag, Te и Bi (кобальтин, герсдорфит, никелин, самородное золото, пильзенит) (Зайков и др., 2009), которые образовались при высвобождении соответству-

ющих элементов из ранних сульфидов в процессе диагенеза рудокластических осадков. Большая степень преобразования “гравелитов” может быть связана с его небольшой (≈ 20 см) мощностью и смешением сульфидных обломков с серпентинитовыми, присутствие которых обеспечило благоприятные условия для почти полной пирротинизации первичных обломков дисульфидов Fe (Масленников и др., 2014).

ВЫВОДЫ

Установлено, что сульфиды главного рудного тела Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения обогащены большинством элементов-примесей по сравнению с сульфидами северо-западного фланга месторождения. Большинство элементов-примесей (Ag, Sn, Mn, As, Co, Ni, Te, Pb, Au) в них накапливается в пирите-1, пирит-марказитовые агрегаты концентрируют Tl и Bi, марказит – Mo и Sb, а халькопирит – Zn, Se и Cd. Наибольшее количество элементов-примесей в сульфидах северо-западного фланга месторождения накапливается в халькопирите (Bi, Te, Zn, Cd, Se, Pb, Au, Tl, Ni, Co). Олово накапливается в кубаните, As и Ni – в пирите-4, Ag, Mn и Mo – в пирротине, Sb – в пирите-3 и Co – в пирите-2.

В сульфидах Fe главного рудного тела элементы-примеси встречаются в виде изоморфной примеси (As, Tl, Ni, Co, Se) и ультрамикроскопических включений халькопирита (Ag, Sn, Cu), золота и галенита (Au, Pb) и Sb-содержащих теллуридов Bi. Халькопирит главного рудного тела включает изоморфные Sn, Sb, Au и Te, а также микроскопические зерна пирита (Ni, As, Bi, Mn, Tl), нерудных (V, U, Ti), минерала с Cd, Pb и Ag, а также Co- и Mo-содержащего сфалерита. Сульфиды Fe (пирит и пирротин) северо-западного фланга месторождения вмещают микровключения ассоциирующих халькопирита, сфалерита и галенита (Cu, Te, Zn, Pb), кубанита (Mo, Se), хромита (V, Cr, Mn), золота и минералов Ni, Sn, Ag, Cd, ранних форм пирита, концентрирующих As и Tl, а также Bi-содержащего (?) кобальтина. Сульфиды Cu и Fe (халькопирит + кубанит) северо-западного фланга месторождения также содержат во включениях нерудные минералы, концентрирующие Ti и U, хромит (Cr, V, Mn, Bi), пирит (Ni, Tl, Co), сульфоарсениды, сульфоантимониды и теллуриды (Sb, As, Ag, Te), сфалерит (Zn, Cd). Изоморфные элементы-примеси в сульфидах Cu и Fe представлены Se, Mo, Sn, Au, Pb.

Информация о распределении и форме нахождения элементов-примесей (особенно в их “невидимой” форме) чрезвычайно важна для оценки возможных потерь при отработке колчеданных руд и возможном извлечении ценных компонентов, включая высокотехнологические эле-

менты. Полученные нами результаты могут быть учтены при возможной отработке других кобальт-медноколчеданных месторождений южного фланга Главного Уральского разлома (Ишкининского и Ивановского).

Различающееся накопление ЭП в сульфидах главного рудного тела и северо-западного фланга месторождения обусловлено двумя главными причинами: 1) “мафитовым” источником металлов для сульфидов главного рудного тела и “ультрамафитовым” – для сульфидов северо-западного фланга месторождения и 2) разной степенью диагенетического преобразования сульфидов с менее преобразованными сульфидами главного рудного тела и более преобразованными сульфидами северо-западного фланга месторождения.

Благодарности

Авторы благодарят Р. Ларжа и Л. Данюшевского за возможность выполнения аналитических работ в Университете Тасмании, а также Н.Р. Аюпову и Н.П. Сафину за обсуждение результатов. Мы также глубоко признательны рецензенту за проникательные замечания, исправление которых позволило улучшить первоначальный вариант статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемов Д.А., Мелекесцева И.Ю., Третьяков Г.А. (2016) Геологическое строение и состав рудовмещающей толщи Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения (Южный Урал): новые данные. *Металлогения древних и современных океанов–2016. От минералогенеза к месторождениям*. Миасс: ИМин УрО РАН, 110-116.
- Бучковский Э.С. (1966) Отчет о результатах поисково-ревизионных работ на силикатный и сульфидный никель, выполненный Байгускаровской геолого-поисковой и Байгускаровской геофизическими партиями в 1964–1966 гг. Уфа, Геолфонды. (Не опубликовано.)
- Зайков В.В. (2006) Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин: на примере колчеданосных зон Урала и Сибири. М.: Наука, 429 с.
- Зайков В.В., Масленников В.В., Зайкова Е.В., Херрингтон Р. (2001) Рудно-формационный и рудно-фациальный анализы колчеданных месторождений Уральского палеоокеана. Миасс: ИМин УрО РАН, 315 с.
- Зайков В.В., Мелекесцева И.Ю. (2011) Минералы золота и серебра в рудных фациях золото-колчеданно-полиметаллических месторождений Баймакского рудного района, Южный Урал. *Литосфера*, (6), 47-67.
- Зайков В.В., Мелекесцева И.Ю., Артемов Д.А., Юминов А.М., Симонов В.А., Дунаев А.Ю. (2009) Геология и колчеданное оруденение южного фланга Главного Уральского разлома. Миасс: Геотур, 376 с.
- Захаров А.А., Захарова А.А. (1975) Зависимость состава руд Ивановского сульфидного месторождения на Южном Урале от их литологической приуроченности. *Геология и условия образования месторождений меди на Южном Урале*. Уфа: ИГ БФ АН СССР, 105-110.
- Лядский П.В., Полуэктов А.П., Губанов Л.И., Исмагилов М.И., Грязнов О.Н., Чесноков В.И., Берг Л.Я. (1988) Месторождение Летнее. *Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение*. Свердловск: УрО АН СССР, 23-32.
- Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Третьяков Г.А., Мелекесцева И.Ю., Сафина Н.П., Белогуб Е.В., Ларж Р.Р., Данюшевский Л.В., Целуйко А.С., Гладков А.Г., Крайнев Ю.Д. (2014) Токсичные элементы в колчеданообразующих системах. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 340 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23720644>
- Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Целуйко А.С. (2016a) Гидротермальные биоморфозы колчеданных месторождений: микротекстуры, микроэлементы и критерии обнаружения. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 388 с.
- Масленников В.В., Мелекесцева И.Ю., Масленникова А.В., Третьяков Г.А., Масленникова С.П., Аюпова Н.Р., Сафина Н.П., Филиппова К.А., Удачин В.Н., Целуйко А.С., Аминов П.Г. (2016b) Дифференциация токсичных элементов в условиях литогенеза и техногенеза колчеданных месторождений. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 368 с.
- Мелекесцева И.Ю., Масленников В.В., Сафина Н.П., Артемьев Д.А. (2018) Микротопохимия пирротин-пиритовой конкреции Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения, Южный Урал. *Минералогия*, (3), 93-107. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36360067>
- Серавкин И.Б. (2010) Металлогения Южного Урала и Центрального Казахстана. Уфа: Гилем, 284 с.
- Смирнов В.И. (1981) Корреляционные методы при парагенетическом анализе. М.: Недра, 174 с.
- Evrard C., Fouquet Y., Moelo Y., Rinnert E., Etoubleau J., Langlade J.A. (2015) Tin concentration in hydrothermal sulfides related to ultramafic rocks along the Mid-Atlantic Ridge: a mineralogical study. *Eur. J. Mineral.*, **27**, 627-638. DOI: 10.1127/ejm/2015/0027-2472
- Large R.R., Danyushevsky L., Hollit C., Maslennikov V., Meffre S., Gilbert S., Bull S., Scott R., Emsbo P., Thomas H., Singh B., Foster J. (2009) Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Econ. Geol.*, **104**, 635-668. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.5.635>
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. (2007) Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Gold Province, Russia. *Econ. Geol.*, **102**, 1233-1267. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. (2009) Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP MS). *Econ. Geol.*, **104**, 1111-1141. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.8.1111>
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R., Danyushevsky L., Herrington R.J., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Lein A.Yu., Tseluykov A.S., Melekestseva I.Yu., Tessalina S.G. (2017) Chimneys in Paleozoic massive

sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 64-106. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.012>

- Marques A.F.A., Barriga F.J.A.S., Chavagnac V., Fouquet Y. (2006) Mineralogy, geochemistry, and Nd isotope composition of the Rainbow hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. *Min. Dep.*, **41**, 52-67. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0040-8>
- McDonough W.F., Sun S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Melekestseva I.Yu., Zaykov V.V., Nimis P., Tret'yakov G.A., Tessalina S.G. (2013) Cu-(Ni-Co-Au)-bearing massive sulfide deposits associated with mafic-ultramafic rocks of the Main Urals Fault, South Urals: Geological structures, ore textural and mineralogical features, comparison with modern analogs. *Ore Geol. Rev.*, **52**, 18-36. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.03.005>
- Puchkov V.N. (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: what, where, when and why. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 4-29.

REFERENCES

- Artem'ev D.A., Melekestseva I.Yu., Tret'yakov G.A. (2016) Geological structure and composition of ore-hosting sequence of the Dergamysh Co-bearing massive sulfide deposit (South Urals). *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2016. Ot mineralogeneza k mestorozhdeniyam* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2016. From mineralogenesis to deposits]. Miass, IMin UB RAS, 110-116. (In Russian)
- Buchkovsky E.S. (1966) Report on researching works on silicate and sulfide nickel conducted by the Bayguskarovo Geological Survey and Bayguskarovo Geophysical parties in 1964-1966. Ufa, Geological Founds (In Russian, unpublished)
- Evrard C., Fouquet Y., Moelo Y., Rinnert E., Etoubleau J., Langlade J.A. (2015) Tin concentration in hydrothermal sulfides related to ultramafic rocks along the Mid-Atlantic Ridge: a mineralogical study. *Eur. J. Mineral.*, **27**, 627-638. DOI: 10.1127/ejm/2015/0027-2472
- Large R.R., Danyushevsky L., Hollit C., Maslennikov V., Meffre S., Gilbert S., Bull S., Scott R., Emsbo P., Thomas H., Singh B., Foster J. (2009) Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Econ. Geol.*, **104**, 635-668. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.5.635>
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. (2007) Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Gold Province, Russia. *Econ. Geol.*, **102**, 1233-1267. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>
- Lyadsky P.V., Poluektov A.P., Gubanov L.I., Ismagilov M.I., Gryaznov O.N., Chesnokov V.I., Berg L.Ya. (1988) The Letnee deposit. *Mednokolchedannye mestorozhdeniya Urala. Geologicheskoe stroenie* [Massive sulfide deposits of the Urals. Geological structure]. Sverdlovsk, UB AN SSSR, 23-32. (In Russian)
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Maslennikova S.P., Tret'yakov G.A., Melekestseva I.Yu., Safina N.P., Belogub E.V., Large R.R., Danyushevsky L.V., Tseluyko A.S., Gladkov A.G., Kraynev Yu.D. (2014) *Toksichnyye elementy v kolchedanoobrazuyushchikh sistemakh* [Toxic elements in massive sulfide systems]. Ekaterinburg, RIO UB RAN, 340 p. (In Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=23720644>
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Maslennikova S.P., Tseluyko A.S. (2016a) *Gidrotermal'nye biomorfozy kolchedannykh mestorozhdenii: mikrotekstury, mikroelementy i kriterii obnaruzheniya* [Hydrothermal biomorphoses of massive sulfide deposits: microstructures, trace elements and searching criteria]. Ekaterinburg, RIO UB RAN, 388 p. (In Russian)
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. (2009) Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP MS). *Econ. Geol.*, **104**, 1111-1141. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.8.1111>
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R., Danyushevsky L., Herrington R.J., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Lein A.Yu., Tseluykov A.S., Melekestseva I.Yu., Tessalina S.G. (2017) Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 64-106. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.012>
- Maslennikov V.V., Melekestseva I.Yu., Maslennikova A.V., Tret'yakov G.A., Maslennikova S.P., Ayupova N.R., Safina N.P., Filippova K.A., Udachin V.N., Tseluyko A.S., Aminov P.G. (2016b) *Differentsiatsiya toksichnykh elementov v usloviyakh litogeneza i tekhnogeneza kolchedannykh mestorozhdenii* [Differentiation of toxic elements under lithogenesis and technogenesis of massive sulfide deposits]. Ekaterinburg, RIO UB RAN, 368 p. (In Russian)
- Marques A.F.A., Barriga F.J.A.S., Chavagnac V., Fouquet Y. (2006) Mineralogy, geochemistry, and Nd isotope composition of the Rainbow hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. *Mineral. Dep.*, **41**, 52-67. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0040-8>
- McDonough W.F., Sun S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Safina N.P., Artemyev D.A. (2018) Microtopochemistry of a pyrrhotite-pyrite nodule of the Dergamysh cobalt-bearing massive sulfide deposit, South Urals. *Mineralogiya*, (3), 93-107. (In Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=36360067>
- Melekestseva I.Yu., Zaykov V.V., Nimis P., Tret'yakov G.A., Tessalina S.G. (2013) Cu-(Ni-Co-Au)-bearing massive sulfide deposits associated with mafic-ultramafic rocks of the Main Urals Fault, South Urals: Geological structures, ore textural and mineralogical features, comparison with modern analogs. *Ore Geol. Rev.*, **52**, 18-36. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.03.005>
- Puchkov V.N. (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: what, where, when and why. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 4-29.
- Seravkin I.B. (2010) *Metallogeniya Yuzhnogo Urala i Tsentral'nogo Kazakhstana* [Metallogeny of South Urals and Central Kazakhstan]. Ufa, Gilem Publ., 284 p. (In Russian)

- Russian)
- Smirnov V.I. (1981) *Korrelyatsionnye metody pri parageneticheskom analize* [Correlation methods in paragenetic analysis]. Moscow, Nedra Publ., 174 p. (In Russian)
- Zaykov V.V. (2006) *Vulkanizm i sul'fidnye kholmy paleookeanicheskikh okrain na primere kolchedanosnykh zon Urala i Sibiri* [Volcanism and sulfide mounds of paleoceanic margins: example of massive sulfide-bearing zones of the Urals and Siberia]. Moscow, Nauka Publ., 429 p. (In Russian)
- Zaykov V.V., Maslennikov V.V., Zaykova E.V., Herrington R. (2001) *Rudno-formatsionnyi i rudno-fatsial'nyi analizy kolchedannykh mestorozhdenii Ural'skogo paleookeana* [Ore-formational and ore-facial analysis of massive sulfide deposits of the Uralian paleocean]. Miass, IMin UB RAN, 315 p. (In Russian)
- Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu. (2011) Au and Ag minerals in ore facies of gold-polymetallic massive sulfide deposits of the Baymak ore region, South Urals. *Litosfera*, (6), 47-67 (In Russian)
- Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu., Artem'ev D.A., Yuminov A.M., Simonov V.A., Dunaev A.Yu. (2009) *Geologiya i kolchedannoe orudnenie yuzhnogo flanga Glavnogo Ural'skogo razloma* [Geology and massive sulfide mineralization of the southern flank of the Main Uralian Fault]. Miass, Geotur Publ., 376 p. (In Russian)
- Zakharov A.A., Zakharova A.A. (1975) Correlation between the composition of ores from the Ivanovka sulfide deposit in the South Urals and their host rocks. *Geologiya i usloviya obrazovaniya mestorozhdenii medi na Yuzhnom Urale* [Geology and formation conditions of Cu deposits in the South Urals]. Ufa, IG BF AN SSSR, 105-110. (In Russian)