



СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.411:550.4

Филогенез золота вулканогенно-осадочных колчеданно-полиметаллических руд

Мотов А. П., Соболев А. О.

ООО «Геоконсалт Групп», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Геодинамическая обстановка формирования вулканогенно-осадочного колчеданно-полиметаллического месторождения предопределяет уровень содержания Au в рудах. Руды, сформированные в обстановке срединно-океанического хребта, характеризуются низкими содержаниями Au. Руды, образованные в условиях островной дуги, имеют более высокие содержания Au. В ходе дальнейшего существования месторождения его руды испытывают неоднократное внешнее воздействие: подводный гальмиролиз, термальный и динамический метаморфизм, гидротермально-метасоматические преобразования, экзогенное окисление. Эти процессы приводят к переводу Au из микро-, наноразмерной в сульфидах к свободной форме нахождения Au и перераспределению Au в рудном поле месторождения. Неоднородность руд по содержанию Au и форме его нахождения необходимо учитывать при составлении ТЭО. Работа предназначена для геологов, проводящих горно-геологическое моделирование, проектирующих способы добычи руды и предлагающих технологию рудопереработки.

Ключевые слова: содержание и формы нахождения золота; массивные, прожилково-вкрапленные и окисленные руды; геодинамические обстановки формирования VMS месторождений, трудно- и легкоизвлекаемое золото.

Для цитирования: Мотов А. П., Соболев А. О. Филогенез золота вулканогенно-осадочных колчеданно-полиметаллических руд. Руды и металлы. 2023. № 2. С. 64–77. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10009.

Phylogenesis of gold in polymetallic volcanogenic-sedimentary massive sulfide ores

Motov A. P., Sobolev A. O.

ООО Geoconsult Group, St. Petersburg, Russia

Annotation. The Au concentrational level of the ores of polymetallic volcanogenic-sedimentary massive sulfide deposits is predetermined by the geodynamic setting of their formation. The ores formed in a mid-ocean ridge setting are characterized by low Au grades. The ores formed under the island arc conditions possess higher Au contents. In the course of the further existence of the ore deposit, its ores experience repeated external influences: underwater halmyrolysis, thermal and dynamic metamorphism, hydrothermal-metasomatic transformations, and exogenous oxidation. These processes lead to the transfer of gold from a micro- or nano-sized form in the sulfides to the free form and to redistribution of Au over the ore field of the deposit. The heterogeneity of the ores in terms of the Au content and existence forms must be taken into account when preparing a feasibility study. The work is intended for geologists conducting mining and geological modeling, designing techniques for the ore extraction, and proposing ore processing technologies.

Key words: gold content and forms of existence; massive, veinlet-disseminated, and oxidized ores; geodynamic formation conditions of VMS deposits; hardly and easily recoverable gold.

For citation: Motov A. P., Sobolev A. O. Phylogenesis of gold in polymetallic volcanogenic-sedimentary massive sulfide ores. Ores and metals, 2023, № 2, pp. 64–77. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10009.



Под филогенезом золота вулканогенно-осадочных колчеданно-полиметаллических месторождений мы понимаем последовательно проявленные геологические события, определяющие уровень содержания и форму нахождения золота в рудах колчеданно-полиметаллических месторождений.

В международной геологической литературе широко распространена аббревиатура VMS (volcanogenic massive sulfide), применяемая для типизации вулканогенно-осадочных колчеданно-полиметаллических руд и месторождений. Далее по тексту для краткости изложения материала мы также будем использовать эту аббревиатуру.

Уровень концентрации золота в руде VMS месторождений и его характеристики влияют на оценку рентабельности освоения этих месторождений. В работе рассматриваются геологические события, влияющие на данные параметры.

Геодинамические условия формирования VMS руд и уровень содержания в них Au. Современные VMS рудные концентрации дна мирового океана отличаются от сформированных в предшествующие эпохи VMS месторождений отсутствием наслаивающегося влияния последующих за формированием месторождений геологических событий. Поэтому для современных вулканогенно-осадочных колчеданных руд можно проследить связь между уровнем концентрации Au в них и геодинамической обстановкой их формирования. Накопленные к настоящему времени характеристики современных подводных VMS руд [17] позволяют увидеть тренд увеличения уровня содержания Au в рудах этого типа в следующем ряду геодинамических условий их формирования:

- 1) срединно-океанические хребты;
- 2) внутриконтинентальные задуговые бассейны и внутриконтинентальные рифты;
- 3) внутриокеанические задуговые бассейны;
- 4) вулканические дуги.

В рудах, сформированных в структурах срединно-океанических хребтов (Восточно-Тихоокеанский, Центрально-Индийский и др.) медианное содержание Au 0,59 г/т. В рудах

внутриконтинентального задугового бассейна (желоб Окинава) или внутриконтинентального рифта (Красное море) медианное содержание Au 1,65 г/т. Ещё выше медианное значение содержания Au (2,85 г/т) в рудах, образованных во внутриокеанических задуговых бассейнах (Марианский жёлоб, бассейн Лау и др.). Наиболее высокое медианное значение содержания Au (5,6 г/т) установлено в рудах, локализованных в вулканических дугах (Марианская, Эллинская и др.) (табл. 1).

Аналогичная тенденция последовательного увеличения содержания Au зафиксирована в литифицированных VMS залежах. В рудах месторождений, образованных в обстановке спрединга, медианное содержание Au 0,46 г/т. В рудах, расположенных в структурах внутриконтинентального задугового бассейна и внутриконтинентального рифта, медианное содержание Au 0,7 г/т. Наконец, в рудах, приуроченных к структурам вулканических дуг, медианное значение содержания Au 1,6 г/т (табл. 2; см. табл. 1).

Тренд повышения содержания Au в сульфидных рудах, сформированных в ряду перечисленных структур, может объясняться [17] последовательным увеличением степени гомодромной дифференцированности состава магматического материала в ряду этих структур, что способствует формированию всё более насыщенного золотом флюида.

Преимущественной формой нахождения Au и в современных, и в VMS залежах фанерозоя являются микро-, наноразмерные включения каплевидной и чешуйчатой формы в сульфидных минералах – пирите, халькопирите, марказите, сфалерите, арсенопирите [2, 14, 22]. Сами агрегаты этих минералов проявлены слоистыми скоплениями сульфидов, обладающих микроконцентрически-зонально-коллоидным строением. Такая форма нахождения Au в сульфидных минералах и их агрегатах отражает коллоидное, флокулирующее состояние золота и других рудных элементов в придонных иловых осадках при рудообразовании [2, 22]. Доля рассеянного в сульфидах микро-, наноразмерного золота в массивных стратифицированных сульфидных рудах,

Табл. 1. Содержание Au в рудах современных и фанерозойских месторождений, сформированных в различных геодинамических обстановках

Table 1. Au content in ores of Recent and Phanerozoic ore deposits formed in different geodynamic settings

Геодинамическая обстановка рудоформирования	Число рудных объектов	Число проб	Содержание Au, г/т				Примеры рудных объектов, [литературный источник]
			медианное	среднее арифметическое	min	max	
<i>Современные руды</i>							
Срединно-океанический хребет (зона спрединга)	62	2220	0,56	1,17	0,01	11	Локис Каstell, Месо, Соне, Эдмонд, Логки [17]
Внутриконтинентальный задуговый бассейн или внутриконтинентальный рифт	23	227	1,65	1,99	0,06	4,5	Норт Кнолл, Минами Инсайт Сайт, Ихеа Ридж, Узена Кулдрон, Хакури, Атлантис Диип [17]
Внутриокеанический задуговый бассейн	35	543	2,85	4,61	0,01	31	Сумизу Рифт, Алис Спрингс, Яманака Сайт, Пика Сайт [17]
Вулканическая дуга	6	1398	5,6	7,97	0,05	43	Сумизу Рифт, Алис Спрингс, Яманака Сайт, Пика Сайт [17]
<i>Фанерозойские руды</i>							
Срединно-океанический хребет (зона спрединга)	12	нет данных	0,46	0,68	0,14	1,7	Махаб, Сафит, Аль Джадид, Ортаklar, Маваровуни [15]
Внутриконтинентальный задуговый бассейн и внутриконтинентальный рифт	17	нет данных	0,7	0,98	0,17	3,07	Карибу, Брунsvик, Лэндин-Лейк, Стратман Мэйн, Мэри Брук, Гримсделен [21, 25]
Вулканическая дуга	25	нет данных	1,6	2,19	0,3	9,1	Манто Рэйс, Лос-Мантос, Сан-Фернандо, Ла-Плата [23]

например, Учалинского месторождения, достигает 85 % от общего количества золота в рудах этого месторождения [3]. Помимо непосредственных наблюдений микро-, нано-включений Au в сульфидах под электронным микроскопом на тесную связь золота с минералообразующими элементами сульфидов указывают значимые коэффициенты парной корреляции этого элемента с Cu, Zn, Pb, As и элементами-примесями в сульфидных минералах, такими как Cd, In, Bi, Sb, Ag, Vi, Mo,

Ag, а также пространственное совпадение ореолов концентрации Au и вышеуказанных элементов в разрезах сульфидных залежей. Подобные признаки ассоциативности золота с главными минералами полиметаллических залежей зафиксированы на уральском Ново-Учалинском месторождении [3], канадском месторождении Мобурб [20] и других VMS месторождениях. Иными словами, в подавляющем объёме массивных сульфидных руд золото находится в связанной с сульфидами фор-



ме, трудноизвлекаемой при переработке руд. Чуть бóльшая доля свободного золота проявлена в весьма локальных по объёму своего проявления так называемых кондуитах – линейных крутопадающих обособлениях рудного материала, трассирующих положение флюидопроводящих каналов внутри залежей массивных сульфидных руд [6, 10].

Частичное изменение формы нахождения Au в сульфидных рудах вследствие процессов подводного гальмиролиза формирующихся VMS руд. Формирование VMS руд проходит в обстановке тектонической активности участка рудоконцентрирования и прерывистопорционного поступления рудоносного флюида в морскую среду. Эти события приводят к инверсии кислотной обстановки, окружающей формирующуюся колчеданную залежь. Тектонические нарушения придонных сульфидных построек в сопровождении парциально проявляющейся окислительной обстановки в морской среде, окружающей рудную залежь, приводят к частичному разрушению колчеданной залежи и замещению сульфидных минералов оксидными [6, 10]. Сульфиды замещаются магнетитом, гематитом, гётитом, халькозином, борнитом, самородным серебром и другими минералами, свойственными минеральному набору «железной шляпы» над колчеданными месторождениями. Часть золота в ходе этих процессов освобождается из сульфидов, и в зоне окисления появляется самородное золото, а также сильванит и электрум, то есть происходит увеличение массы легкоизвлекаемого золота. Размер выделений свободного золота варьирует от 0,00п до 4 мм. Доля этих образованных в подводных условиях окисленных разностей сульфидных руд в общем объёме VMS руд невелика, но возможность присутствия таких руд, включающих золото в свободной форме, целесообразно учитывать при разведке конкретного месторождения.

Прожилково- жильные штокверковые руды в рудных полях VMS месторождений. В рудных полях VMS месторождений отмечаются проявления жильно-штокверковой полиметаллической, золотополиметаллической, золото-

кварцевой, золото-баритовой минерализации, которая рассматривается и как гидротермально-метасоматическая стадия, развивающаяся по трещинам в подстилающих массивные рудные залежи вулканогенно-осадочных толщах близко/одновременно с накоплением массивных вулканогенно-осадочных руд, и как проявление гидротермальной минерализации последующей коллизионной эпохи [4, 7, 9]. Вероятнее всего, жильно-штокверковая минерализация может формироваться и одновременно с осадочной массивной сульфидной рудой, и в ходе более позднего коллизионного геологического этапа [16].

К числу признаков формирования жильно-штокверковой минерализации коллизионного этапа могут быть отнесены следующие характеристики.

- Наличие в рудном поле VMS месторождения как слабо-, так и значительно золотоносных массивных колчеданно-полиметаллических руд [9] (табл. 3). Для Галкинского месторождения (Урал) доля слабозолотоносных медно-цинковых и цинковых руд составляет 64 % от общего объёма. На долю обогащённых золотом медно-цинковых и цинковых руд приходится 28 %, доля малосульфидных золотокварцевых руд – 11 %. То есть примерно треть объёма руд Галкинского месторождения представлена золотосодержащими рудами. Другим примером золотоносности VMS месторождения является Риддер-Сокольное (Рудный Алтай), где 15 % руд занято собственно золотокварцевыми [4].

- Отсутствие парной корреляции содержания Au с содержаниями Cu, Zn, Pb при наличии парной корреляции прочих рудных компонентов друг с другом.

- Приуроченность ореолов концентрации Au к линейным крутопадающим разрывным нарушениям, пересекающим плащеобразные залежи колчеданно-полиметаллических руд, и выход этих ореолов концентрации Au за пределы колчеданно-полиметаллических руд (рис. 1) [4, 9].

- Изотопно-геохронологические датировки околорудных гидротермально-метасоматических минералов жильно-прожилковой ми-

Табл. 2. VMS месторождения, сформированные в различных геодинамических обстановках

Table 2. VMS deposits formed in different geodynamic settings

География	Региональная рудоконтролирующая структура	Рудовмещающие комплексы и формации	Примеры месторождений (содержание Au в руде, г/т) [литературный источник]
<i>Срединно-океанический хребет (зона спрединга)</i>			
Россия, Южный Урал	Магнитогорская мегазона	Зона контакта серпентинитов и вмещающих их базальтоидов однородной базальтовой формации, переслаивающейся с углисто-кремнистыми сланцами и песчаниками, объединённых в сакмарскую свиту (O_3-S_1)	Дергамышское (0,6); Ивановское (0,42); Ишкинское (1,4) [10, 19]
Оман	Пояс Оманских гор	Зона контакта пластинообразных серпентинизированных перидотитов и известковистых кремнистых сланцев, объединённых в комплекс Сэмейл (K_2)	Махаб-4 (0,18); Макэйл Южный (0,14); Хаил Аз Сафит (0,50); Аль Аз Асгар (0,9); Аль Джадид (0,38); Байада (1,2) [15]
Турция	Анатолийский пояс	Зона контакта пластин серпентинизированных гарцбургитов с базальтами и пелагическими известняками, объединённых в комплекс Кочали (T_3)	Ортаклар (0,38) [27]
Кипр	Таврический пояс	Подушечные лавы базальтового состава, объединённые в вулканическую серию Троодос (K_2)	Маваровуни (0,3); Калавосус-Мусулос (1,7) [12, 18]
<i>Внутриконтинентальный задуговой бассейн</i>			
Канада	Пояс группы Батерст	Рудные залежи локализованы среди вулканитов базальт-риолитовой формации, выделяемой в составе группы Батерст (O_2)	Карибу (0,89); Брунвик № 12 (0,67); Каноз Лэндин Лэйк (2,28); Хэалтс Стеел Б Зон (0,7); Лувикурт (2,43); Мэри Брук (0,8); Орван Брук (0,9); Рестигуш (1,61); Роки Турн (3,07); Стратман Мэйн (1,01); Ведж (0,68) [20, 21, 23]
<i>Внутриконтинентальный рифт</i>			
Норвегия	Пояс Фундсйо	Туфы базальт-риолитовой формации, выделяемой в составе группы Фундсйо (C_3)	Нордр Гэйтригэн (0,27); Сендр Гейтриген (0,35); Новедрува (0,35); Гримсделен (0,25); Гримсталагрува (0,17) [13]

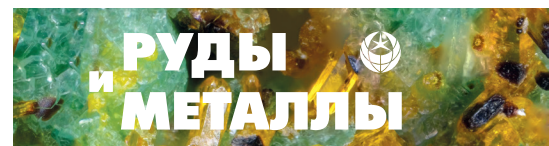


Табл. 2. Продолжение

<i>Палеоостровная дуга</i>			
Мексика	Пояс Фзулакес-Тланильра серии	Углисто-кремнистые сланцы на контакте базальтов и перекрывающих их риолитов (базальт-риолитовая формация) (K_1)	Манто Райс (0,5); Лос-Мантос (0,86); Эл Капирэ (0,61); Аврора-1 (1,79); Аврора-2 (1,51); Круз Бланка (0,43); Гуадалупе (0,88) [23]
Урал	Тагильская мегазона	Кремнистые сланцы, алевриты среди вулканитов базальт-дацит-риолитовой формации, объединяемые в нижнешемурскую свиту (O_3-S_1)	Саумское (1,7) [8]
		Туфы и лавы базальт-риолитовой формации, объединяемые в верхнешемурскую свиту (S_1)	Валенторское (1,36); Галкинское (0,71) [8, 9]
		Вулканиты базальт-риолитовой формации, углисто-кремнистые сланцы, алевриты, объединяемые в краснотурьинскую свиту (O_3-S_1)	Хабуня (1,16); Уткинское (1,88) [8]
		Вулканиты базальт-риолитовой формации, объединяемые в кабанскую свиту (O_3-S_1)	Кабан-1 (1,04) [8]
		Вулканиты базальт-риолитовой формации, туфопесчаники, объединённые в павдинскую свиту (S_1)	Северо-Калугинское (4,03) [8]
	Магнитогорская мегазона	Вулканиты базальт-риолитовой формации с прослоями известняков, объединённые в кармалыташскую свиту (D_2)	Учалинское (1,6); Ново-Учалинское (1,4); Узельгинское (1,8) [3, 10]
		Вулканиты базальт-риолитовой формации, песчаники, известняки, объединённые в баймак-бурибайскую свиту (D_1)	Таш-Тау (3,2); Вишневское (2,4); Балта-Тау (4,5) [6]
Куба	Пояс свиты Лос-Пасос	Вулканиты андезит-дацитовой формации, объединённые в подсвиту Лос-Пасос (K_1)	Сан-Фернандо (9,1); Инрдэпэнсиа (3,0); Антолнио (0,3); Лос-Серрос (4,17) [5]
Эквадор	Западные Кордильеры	Вулканиты базальт-андезит-дацитовой формации, объединённые в свиту Макучи (эоцен)	Ла-Плата (4,8) [26]

нерализации и сопоставление их с палеонтологическим возрастом вулканогенно-осадочных руд, вмещающих стратифицированную массивную колчеданно-полиметаллическую минерализацию. Так, на месторождениях Муракты и Карагайлы Южного Урала наблюдались факты наложения жильно-прожилковых гид-

ротермальных руд на массивные сульфидные залежи, принадлежащие кармалыташской вулканогенно-осадочной свите среднего девона. При этом изотопно-геохронологическое датирование околорудных гидротермально-метасоматических минералов из околорудного ореола жильно-прожилковых руд Rb-Sr

Табл. 3. Разновидности руд Галкинского месторождения (Урал) [9]

Tab. 3. Ore varieties of the Galkinskoe ore deposit in the Urals [9]

Тип руды (глубина отбора проб, м)	Число проб в выборке	Параметры	Au, г/т	Ag, г/т	Pb, %	Cu, %	Zn, %
				Пробирный анализ		Атомно-абсорбционный	
				Лаборатория АО «ЗСУ»			
Медь-цинк- колчеданная (10–74 м)	24	среднее	0,19	32,73	0,22	2,29	3,54
		min	0,05	2,5	0,05	0,95	0,05
		max	0,4	234	1,14	10,2	22,4
Цинк- колчеданная (11–106 м)	516	среднее	0,28	6,52	0,15	0,13	1,78
		min	0,05	2,5	0,05	0,05	0,85
		max	0,43	120	1,58	0,43	10,9
Золото-медно- колчеданная (13–93 м)	127	среднее	5,14	141,91	1,08	3,41	15,82
		min	0,54	16,70	0,05	0,96	1,33
		max	82,2	1269	13,8	9,5	51,9
Золото-медно- колчеданная (11–97 м)	119	среднее	1,2	56,58	0,58	0,19	2,27
		min	0,45	2,5	0,05	0,05	0,85
		max	18,1	644	7,6	0,44	11,2
Золотокварцевая (12–88 м)	98	среднее	1,04	46,22	0,08	0,08	0,18
		min	0,45	2,5	0,05	0,05	0,05
		max	4,3	871	0,24	0,44	0,44

методом указывают на раннепермский возраст этих минеральных гидротермально-метасоматических ореолов [7].

- Структурно-геологические реперы, отделяющие залежи массивных сульфидных руд от более поздних жильно-штокверковых руд. Так, на месторождениях Бакр-Тау и Таш-Тау Южного Урала помимо массивных медно-цинковых руд проявлены поздние золото-барит-полиметаллические руды, наложенные на массивные медно-цинковые руды. Эти два типа руд разделены интрузивными телами крупнопорфировых риодацитов [11].

В золото-сульфидно-кварцевых прожилках штокверковых руд золото находится в свободной форме. Размер обособлений золота, как правило, от 0,0п до 0,00п мм [6], но в некоторых случаях, как например в золотокварцевых жилах месторождения Риддер-Сокольное (Восточный Казахстан), размер выделений золо-

та достигает 4 мм [4]. Среднее содержание Au в золото-сульфидно-кварцевых жилах может превышать среднее содержание Au в массивных сульфидных рудах. Так, на Риддер-Сокольном месторождении среднее содержание Au в массивных сульфидных рудах составляет 4 г/т, а в золото-кварц-сульфидных жильных – 32 г/т [4]. В качестве другого примера подобной же тенденции различия уровня содержания Au в массивных сульфидных и в прожилковых рудах можно привести VMS месторождение Ортаklar (Турция), в массивных сульфидных рудах которого среднее содержание Au 0,23 г/т, а в штокверковых рудах – 0,97 г/т [27].

VMS руды, подвергнутые динамометаморфизму. Следы термального и динамометаморфизма VMS руд наблюдаются на многих месторождениях. В результате этих процессов происходит перекристаллизация

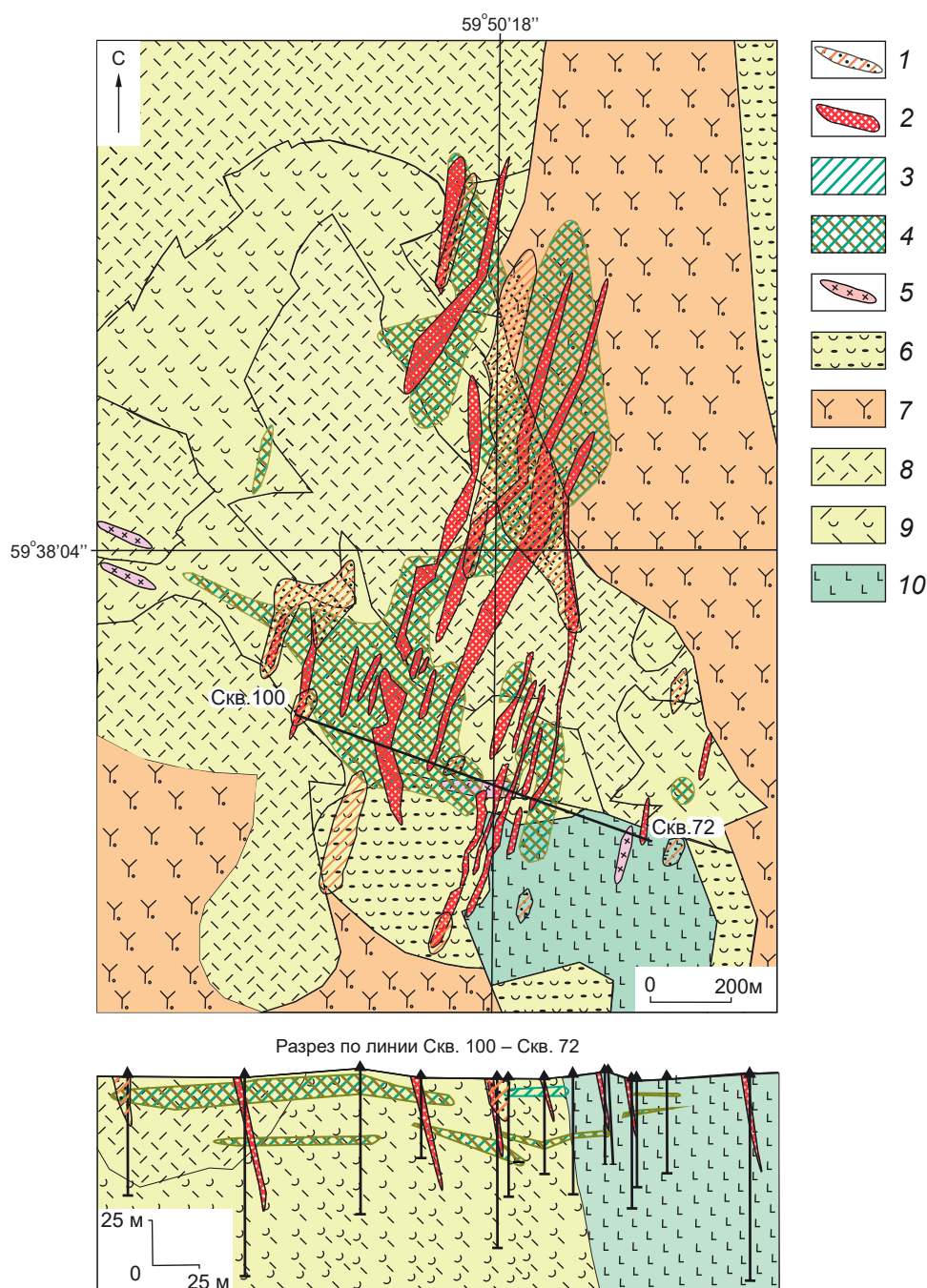


Рис. 1. План и разрез рудного поля Галкинского месторождения (Северный Урал) [9]:

1 – окисленные руды; первичные руды с содержанием главных рудных компонентов: 2 – Au ≥ 1,0 г/т, 3 – Cu ≥ 1 %, 4 – Cu ≥ 1 %, Zn ≥ 1 %; вмещающие породы: 5 – диориты, 6 – туфопесчаники и туфоконгломераты, 7 – дацит-порфиры, 8 – фельзиты массивные, 9 – туфы агломератовые, 10 – андезибазальты

Fig. 1. Plan and cross-section of the ore field of the Galkinskoe deposit, Northern Urals [9]:

1 – oxidized ores; primary ores with the contents of the main ore components: 2 – Au ≥ 1.0 g/t, 3 – Cu ≥ 1%, 4 – Cu ≥ 1%, and Zn ≥ 1%; host rocks: 5 – diorites, 6 – tuff sandstones and tuff conglomerates, 7 – dacite-porphyrries, 8 – massive felsite, 9 – agglomerate tuffs, 10 – basaltic andesites

сульфидных руд. При этом вновь образованные сульфидные минералы освобождаются от микро-, нановключений золота в своём составе, а золото приобретает собственную форму обособления. Эти процессы были прослежены при микрозондовом анализе распределения Au в образцах арсенопирита из VMS руд месторождений Скеллефте в Швеции [24].

Пробы арсенопирита были выбраны из руд месторождений, расположенных в различных метаморфических зонах. Исследования показали, что наиболее очищенные от Au арсенопириты (среднее содержание Au 0,21 г/т) находятся в зоне наиболее значительного метаморфизма андалузит-мусковит-амфиболитовой фации, тогда как в арсенопирите из руд зеленосланцевой фации среднее содержание Au 35,1 г/т. При этом в зоне максимального метаморфизма андалузит-мусковит-амфиболитовой фации распространены богатые (содержание Au 300–600 г/т) золотокварцевые жилы. По данным изучения газовой-жидких включений кварца из этих жил, их формирование происходило при температуре 400–450 °С и давлении 5 кбар.

Распределение Au в вертикальном профиле экзогенного окисления VMS руд. Переход золота из упорной в легкоизвлекаемую форму происходит при окислении сульфидных руд. В зоне окисления сульфидных руд золото представлено двумя разновидностями – остаточным и вновь образованным золотом. Остаточное формируется за счёт слипания субмикроскопических частиц гипогенного золота, выделившегося вследствие разрушения золотосодержащих сульфидных минералов. При этом образуется так называемое горчичное золото, представленное скрытокристаллическими пористыми агрегатами. Вновь образованное золото формируется из растворов в форме: 1) агрегатов дендритовидной формы; 2) плёнок вокруг реликтовых золотин или кристаллов самородной меди; 3) золотосодержащего шахнерита (AgHg); 4) электрума. Распределение золота в профиле вертикальной зональности зоны окисления сульфидных руд, в частности, изучено на Александринском VMS месторождении (Южный Урал) [1]. Среднее

содержание Au в первичных сульфидных рудах этого месторождения 6,6 г/т. В зонах окисленных железняков и сульфидно-баритовой содержание Au увеличивается в 2,4 раза, достигая 16 г/т (рис. 2). В вертикальном профиле зоны окисления полиметаллическая руда постепенно окисляется, переходя от кристаллических сульфидных агрегатов к бурожелезняковым и охристым агрегатам (рис. 3).

Извлечение золота из окисленных руд, как правило, производится путём чанового или наземного в куче цианирования. При этом потребляемое количество цианида напрямую зависит от количества медьсодержащих минералов в руде (самородная медь, биверит, халькозин и др.). Цианид в первую очередь взаимодействует с медьсодержащими минералами, переводя медь в раствор, в форму медьсодержащих комплексных соединений.

Заключение. Рассмотренные материалы позволяют сделать следующие выводы.

1. Наиболее насыщенные золотом VMS руды формируются в обстановке островной дуги. При этом на месторождениях, образованных в этом геодинамическом режиме, нередко формируются не только вулканогенно-осадочные массивные, но и штокверковые руды. Примерами таких руд, в частности, являются руды вышеупомянутых Галкинского (Урал), Риддер-Сокольного (Рудный Алтай), Ортаклар (Турция) месторождений. Пространственная неоднородность состава руд VMS месторождений, образованных в обстановке островной дуги, требует особо пристального внимания.

2. При разведке VMS месторождений помимо общей задачи оценки ресурсов главных рудных компонентов целесообразно искать признаки геологических событий, изменяющих форму нахождения золота в рудах с трудноизвлекаемой на легкоизвлекаемую, а также обогащающих золотом залежи массивных сульфидных руд и в целом – рудное поле месторождения. К числу таких признаков можно отнести:

- Участки субмаринного гидролизного и экзогенного окисления первичных руд, создающих участки вторичного обогащения золотом окисленных руд.

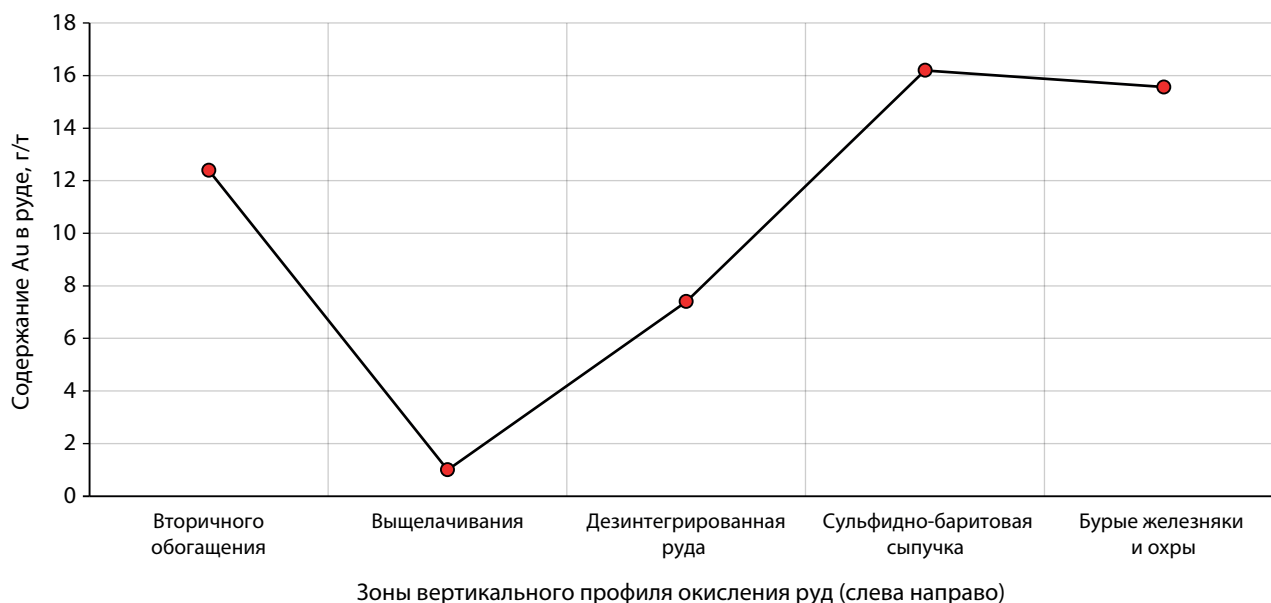


Рис. 2. Распределение содержания Au в вертикальном профиле окисленных руд Александринского месторождения [1]

Fig. 2. Vertical distribution of the Au content of oxidized ores of the Alexandrinskoe deposit [1]



Рис. 3. Фото окисленных полиметаллических руд в вертикальном профиле возрастания степени окисления:

a – частично окисленная полиметаллическая руда; *b* – полностью окисленная дезинтегрированная руда; *c* – бурый железняк с включениями самородного золота; *d* – окисленная руда в состоянии охры

Fig. 3. Photos of the oxidized polymetallic ores along the vertical profile of increasing the oxidation degree:

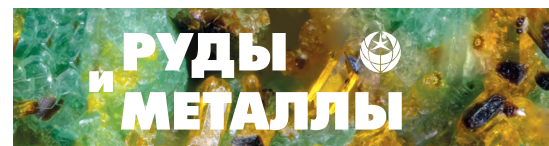
a – partially oxidized polymetallic ore; *b* – completely oxidized disintegrated ore; *c* – brown iron ore with inclusions of native gold; *d* – oxidized ore at the other degree

- Фрагменты рудного поля, подвергнутые динамо- и термальному метаморфизму. Реперами термального метаморфизма являются проявления высокотемпературных метасоматических минералов, таких как гранат, цоизит, амфибол, пироксен, андалузит, магнетит и др. Динамометаморфизм руд проявляется в формировании участков перекристаллизации рудных минералов с образованием директивной текстуры агрегатов рудных минералов.
- Проявление внутри плащеобразных залежей массивных сульфидных руд линейных зон концентрации Au, имеющих крутое залегание и выходящих за пределы залежей массивных сульфидных руд в виде малосульфидной золотокварцевой минерализации.

Дифференцированный подход к типизации рудного поля VMS месторождения может способствовать более экономически рентабельной селективной отработке месторождения. Из золотообогатённых массивных сульфидных руд могут быть получены золотосодержащие цинковые, медные, свинцовые концентраты, стоимость которых будет в разы выше стоимости этих концентратов с низким содержанием золота. Жильные малосульфидные золотокварцевые руды, так же как и руды зон вторичного сульфидного обогащения, могут перерабатываться прямым чановым выщелачиванием золота с переводом в золотосодержащий катодный концентрат, поступающий на дальнейшее рафинирование с получением сплава Доре.

Список литературы

1. Блинов И. А., Белогуб Е. В., Новоселов К. А. Минералогия золота и серебра в бурых железняках Александринского месторождения (Южный Урал) // Минералогия. – 2017. – Т. 3, № 3. – С. 28–36.
2. Викентьев И. В. Невидимое и микроскопическое золото в пирите: методы исследования и новые данные для колчеданных руд Урала // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57, № 4. – С. 267–298.
3. Викентьев И. В., Спирина А. В. Геохимическая зональность рудной залежи Ново-Учалинского колчеданного месторождения (Южный Урал, Россия) // Вестник геонаук. – 2022. – № 11 (335). – С. 11–19.
4. Ганженко Г. Д., Юдовская М. А., Викентьев И. В. Золотополиметаллическая минерализация Риддер-Сокольского месторождения на Рудном Алтае (Восточный Казахстан) // Минералогия. – 2018. – № 4 (1). – С. 8–34.
5. Колон Д. Н., Пачеко М. С. Золоторудные и золотосодержащие пластово-колчеданные месторождения Центральной Кубы // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2020. – № 63 (3). – С. 27–37.
6. Зайков В. В., Мелекесцева И. Ю. Минералы золота и серебра в рудных фациях золото-колчеданно-полиметаллических месторождений Баймакского рудного района, Южный Урал // Литосфера. – 2011. – № 6. – С. 71–90.
7. Знаменский С. Е., Знаменская Н. М. Полигенно-полихронные золотосульфидные месторождения Магнитогорской мегазоны (Южный Урал) // Международная конференция «Рудогенез» (2–7 февраля 2008, Екатеринбург). – С. 108–110.
8. Контарь Е. С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале. – Екатеринбург : УГГУ, 2013. – 199 с.
9. Несис В. Н., Мотов А. П., Бутняков А. В. Золотообогатённые колчеданные Саумское и Галкинское месторождения, Северный Урал // Руды и металлы. – 2019. – № 2. – С. 73–83.
10. Масленников В. В., Аюпова Н. Р., Масленникова С. П., Целуйко А. С. Гидротермальные биоморфозы колчеданных месторождений: микротекстуры, микроэлементы и критерии обнаружения. – Екатеринбург : РИО УрО РАН, 2016. – 388 с.
11. Серавкин И. Б. Проблемы и некоторые результаты изучения колчеданных месторождений Южного Урала // Геологический сборник. – 2001. – № 2. – С. 133–151.
12. Adamides N. G. Mafic-dominated volcanogenic sulphide deposits in the Troodos ophiolite, Cyprus Part 2 – A review of genetic models and guides for



- exploration // Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B). – 2010. – V. 119, № 4. – P. 193–204.
13. *Bjerkard T., Bjorlykke A.* The Stratabound sulfide deposits in the Folldal area, Southern Trondheim Region, Norway // Norsk Geologisk Tidsskrift. – 1974. – № 74. – P. 1–25.
 14. *Bortnikov N. S., Cabri L. J., Vikentiev I. V. [et al.].* Invisible Gold in Sulfides from Seafloor Massive Sulfide Edifices // Geology of Ore Deposits. – 2003. – V. 45, № 3. – P. 201–212.
 15. *Close R.* VMS Exploration in Oman. Update on Discovery history. Mining and stratigraphy // Presentation on the report at the SMEDG Talk. – 2015. – 45 p.
 16. *Dube B., Gosselin P., Merrcier-Langevin P. [et al.].* Gold-rich Volcanogenic Massive Sulfide Deposits // Mineral Deposits of Canada: Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Province, and Exploration Methods, Special Publication. – 2007. – № 5. – P. 75–94.
 17. *Fuchs S., Hanington M. D., Petersen S.* Diving gold in seafloor polymetallic massive sulfide systems // Mineralium Deposita. – 2019. – № 54. – P. 789–820.
 18. *Hanington M. D., Galley A. G., Herzig P. M. [et al.].* Comparison of the Tag mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. – 1998. – V. 158. – P. 389–415.
 19. *Jonus P.* Tectonostratigraphic of oceanic crustal terrains hosting serpentinite-associated massive sulfide deposits in the Main Uralian Fault Zone (South Ural): Phd thesis. – Freiburg, 2003. – 123 p.
 20. *Larocque A. C. L., Hodgson C. J., Lafleur P. J.* Gold Distribution in the Moburb Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposit, Noranda, Quebec: A Preliminary Evaluation of the Role of Metamorphic Remobilization // Economic Geology. – 1993. – V. 88. – P. 1443–1459.
 21. *McClenaghan S. H., Lentz D. R.* Abundance and speciation of gold massive sulfides of the Bathurst mining, New Brunswick, Canada // The Canadian Mineralogist. – 2004. – V. 42. – P. 851–871.
 22. *McLeish D. F., Williams-Jones A. E., Vasykova O. V. [et al.].* Colloidal transport and flocculation are the cause of hyperenrichment of gold in nature // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2021. – V. 118. – № 20. – P. 1–6.
 23. *Rhys D. A., Enns S. G., Ross K. V.* Geological Setting of deformed VMS-type mineralization in the Azulaquez-Tlanilpa area, Northern Guerrero state, Mexico // Conference: VMS Deposits of Latin America, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. Volume: VMS Deposits of Latin America, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. – 2000. – P. 113–133.
 24. *Wagner T., Klemnd R., Wenzel T. [et al.].* Gold upgrading in metamorphosed massive sulfide ore deposits: Direct evidence from laser-ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry analysis of invisible gold // Geology. – 2007. – V. 35, № 9. – P. 775–778.
 25. *Wright J., Lentz D. R., Rossiter S., Garland P.* Analysis of Au-Ag Mineralization in the Caribou Base-Metal VMS Deposit, New Brunswick; Examination of Micro-Scale Inter- and Intra-Sulfide Distribution and Its Relation of Geometallurgy // Minerals. – 2016. – № 6 (4): 113. – P. 1–25.
 26. *Tripodi D., Chiradia M., Fontbote L.* Geological setting, mineralogy, and geochemistry of the Early Tertiary Au-rich volcanic-hosted massive sulfide deposit of La Plata (Western Cordillera, Ecuador) // Mineral Exploration and Sustainable Development, Proceedings of the Biennial SGA Meeting, 24–28 August 2003, Athens (Greece). – P. 1–4.
 27. *Yildirim N., Donmez C., Kang J. [et al.].* A magnetite-rich Cyprus-type VMS deposit in Ortaklar: A unique VMS style in the Tethyan metallogenic belt, Gaziantep, Turkey // Ore Geology Reviews. – 2016. – № 79. – P. 425–442.

References

1. Blinov I. A., Belogub E. V., Novoselov K. A. Mineralogiya zolota i srebro v burykh zheleznyakakh Aleksandrinskogo mestorozhdeniya (Yuzhnyi Ural) [Mineralogy of gold and silver of gossans of the Alexandrinskoe deposit (South Urals)], *Mineralogiya [Mineralogy]*, 2017, V. 3, No 3, pp. 28–36. (In Russ.).
2. Vikent'ev I. V. Nevidimoe i mikroskopicheskoe zoloto v pirite: metody issledovaniya i novye dannye dlya kolchedannykh rud Urala [Invisible and microscopic gold in pyrite: methods and new data for massive sulfide ores of the Urals], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 2015, V. 57, No 4, pp. 267–298. (In Russ.).

3. Vikent'ev I. V., Spirina A. V. Geokhimicheskaya zonal'nost' rudnoi zalezhi Novo-Uchalinskogo kolchedannogo mestorozhdeniya (Yuzhnyi Ural, Rossiya) [Geochemical zonality of the ore lode of the Novo-Uchal VMS deposit (South Urals, Russia)], *Vestnik geonauk [Bulletin of Geosciences]*, 2022, No 11 (335), pp. 11–19. (In Russ.).
4. Ganzhenko G. D., Yudovskaya M. A., Vikent'ev I. V. Zolotopolimetallicheskaya mineralizatsiya Ridder-Sokol'nogo mestorozhdeniya na Rudnom Altae (Vostochnyi Kazakhstan) [Gold-polymetallic mineralization of the Ridder-Sokolnoye deposit in the Rudny Altai (Eastern Kazakhstan)], *Mineralogiya [Mineralogy]*, 2018, No 4 (1), pp. 8–34. (In Russ.).
5. Kolon D. N., Pacheko M. S. Zolotorudnye i zoloto-soderzhashchie plastovo-kolchedannye mestorozhdeniya Tsentral'noi Kuby [Gold and gold-bearing volcanogenic massive sulphide deposits of Central Cuba], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]*, 2020, No 63 (3), pp. 27–37. (In Russ.).
6. Zaikov V. V., Melekestseva I. Yu. Mineraly zolota i serebra v rudnykh fatsiyakh zoloto-kolchedannopolimetallicheskih mestorozhdenii Baimakskogo rudnogo raiona, Yuzhnyi Ural [Minerals of gold and silver in the ore facies of gold-sulfide-base-metal deposits of the Baimak region, South Urals], *Litosfera [Lithosphere]*, 2011, No 6, pp. 71–90. (In Russ.).
7. Znamenskii S. E., Znamenskaya N. M. Poligenno-polikhronnye zolotosul'fidnye mestorozhdeniya Magnitogorskoi megazonny (Yuzhnyi Ural) [Polygenic-polychronous gold-sulfide deposits of the Magnitogorsk megazone (Southern Urals)], *Mezhdunarodnaya konferentsiya "Rudogenez" (2–7 fevralya 2008, Ekaterinburg) [International Conference "Rudogenesis" (February 2–7, 2008, Ekaterinburg)]*, pp. 108–110. (In Russ.).
8. Kontar' E. S. Geologo-promyshlennye tipy mestorozhdenii medi, tsinka, svintsa na Urals [Geological and industrial types of copper, zinc, lead deposits in the Urals], Ekaterinburg, UGGU Publ., 2013, 199 p.
9. Nesis V. N., Motov A. P., Butnyakov A. V. Zolotoobogashchennye kolchedannye Saumskoe i Galkinskoe mestorozhdeniya, Severny Ural [Gold-rich pyrite Saumskoe and Galkinskoe deposits, North Urals], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2019, No 2, pp. 73–83. (In Russ.).
10. Maslennikov V. V., Ayupova N. R., Maslennikova S. P., Tseluiko A. S. Gidrotermal'nye biomorfozy kolchedannykh mestorozhdenii: mikrotekstury, mikroelementy i kriterii obnaruzheniya [Hydrothermal biomorphoses of massive sulfide deposits: biomineralization, trace elements and bio-productivity criteria], Ekaterinburg, RIO UrO RAN Publ., 2016, 388 p.
11. Seravkin I. B. Problemy i nekotorye rezul'taty izucheniya kolchedannykh mestorozhdenii Yuzhnogo Urala [Problems and some results of the study of sulfide deposits of the Southern Urals], *Geologicheskii sbornik [Geological Collection]*, 2001, No 2, pp. 133–151. (In Russ.).
12. Adamides N. G. Mafic-dominated volcanogenic sulphide deposits in the Troodos ophiolite, Cyprus Part 2 – A review of genetic models and guides for exploration, *Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B)*, 2010, V. 119, No 4, pp. 193–204.
13. Bjerkerud T., Bjorlykke A. The Stratabound sulfide deposits in the Folldal area, Southern Trondheim Region, Norway, *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 1974, No 74, pp. 1–25.
14. Bortnikov N. S., Cabri L. J., Vikentiev I. V. [et al.]. Invisible Gold in Sulfides from Seafloor Massive Sulfide Edifices, *Geology of Ore Deposits*, 2003, V. 45, No 3, pp. 201–212.
15. Close R. VMS Exploration in Oman. Update on Discovery history. Mining and stratigraphy, *Presentation on the report at the SMEDG Talk*, 2015, 45 p.
16. Dube B., Gosselin P., Merrcier-Langevin P. [et al.]. Gold-rich Volcanogenic Massive Sulfide Deposits, *Mineral Deposits of Canada: Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Province, and Exploration Methods*, Special Publication, 2007, No 5, pp. 75–94.
17. Fuchs S., Hanington M. D., Petersen S. Diving gold in seafloor polymetallic massive sulfide systems, *Mineralium Deposita*, 2019, No 54, pp. 789–820.
18. Hanington M. D., Galley A. G., Herzig P. M. [et al.]. Comparison of the Tag mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1998, V. 158, pp. 389–415.
19. Jonus P. Tectonostratigraphic of oceanic crustal terrains hosting serpentinite-associated massive sulfide deposits in the Main Uralian Fault Zone (South Ural): Phd thesis, Freiburg, 2003, 123 p.
20. Larocque A. C. L., Hodgson C. J., Laflleur P. J. Gold Distribution in the Moburb Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposit, Noranda, Quebec: A Preliminary Evaluation of the Role of Metamorphic Remobilization, *Economic Geology*, 1993, V. 88, pp. 1443–1459.



21. McClenaghan S. H., Lentz D. R. Abundance and speciation of gold massive sulfides of the Bathurst mining, New Brunswick, Canada, *The Canadian Mineralogist*, 2004, V. 42, pp. 851–871.
22. McLeish D. F., Williams-Jones A. E., Vasykova O. V. [et al.]. Colloidal transport and flocculation are the cause of hyperenrichment of gold in nature, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, V. 118, No 20, pp. 1–6.
23. Rhys D. A., Enns S. G., Ross K. V. Geological Setting of deformed VMS-type mineralization in the Azulaquez-Tlanilpa area, Northern Guerrero state, Mexico, Conference: VMS Deposits of Latin America, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. Volume: VMS Deposits of Latin America, Geological Association of Canada, *Mineral Deposits Division*, 2000, pp. 113–133.
24. Wagner T., Klemnd R., Wenzel T. [et al.]. Gold upgrading in metamorphosed massive sulfide ore deposits: Direct evidence from laser-ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry analysis of invisible gold, *Geology*, 2007, V. 35, No 9, pp. 775–778.
25. Wright J., Lentz D. R., Rossiter S., Garland P. Analysis of Au-Ag Mineralization in the Caribou Base-Metal VMS Deposit, New Brunswick; Examination of Micro-Scale Inter- and Intra-Sulfide Distribution and Its Relation of Geometallurgy, *Minerals*, 2016, No 6 (4): 113, pp. 1–25.
26. Tripodi D., Chiradia M., Fontbote L. Geological setting, mineralogy, and geochemistry of the Early Tertiary Au-rich volcanic-hosted massive sulfide deposit of La Plata (Western Cordillera, Ecuador), *Mineral Exploration and Sustainable Development, Proceedings of the Biennial SGA Meeting, 24–28 August 2003, Athens (Greece)*, pp. 1–4.
27. Yildirim N., Donmez C., Kang J. [et al.]. A magnetite-rich Cyprus-type VMS deposit in Ortaklar: A unique VMS style in the Tethyan metallogenic belt, Gaziantep, Turkey, *Ore Geology Reviews*, 2016, No 79, P. 425–442.

Мотов Андрей Павлович (apmotov@gmail.com)

кандидат геол.-минерал. наук, научный сотрудник

Соболев Александр Олегович

кандидат геол.-минерал. наук, главный геолог

ООО «Геоконсалт Групп», г. Санкт-Петербург, Россия