
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ

**НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО МИНЕРАЛОГИИ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
ПАСЕЧНОЕ (ЮЖНЫЙ СИХОТЭ-АЛИНЬ, РОССИЯ)**© 2021 г. д. чл. А. А. Гребенникова¹, *, Г. Р. Саядян¹, С. А. Шлыков²¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
просп. 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022 Россия²МИФ “Экоцентр”, Океанский просп., 29/31, 204, Владивосток, 690091 Россия

*e-mail: anylotina@mail.ru

Поступила в редакцию 01.10.2020 г.

После доработки 23.12.2020 г.

Принята к публикации 11.02.2021 г.

На основе результатов комплексного геологического и минералого-геохимического исследования руд месторождения Пасечное получены новые данные, отражающие типичные особенности оруденения. В составе руд установлены сульфиды мышьяка, железа, свинца, меди, висмута, сульфотеллурид висмута, самородный висмут, золото, интерметаллид золота – мальдонит, сульфосоли висмута, свинца и серебра, оксиды и арсенаты висмута, молибденит, шеелит и касситерит. Висмутовая минерализация тесно ассоциирует с самородным золотом и является индикатором условий формирования оруденения. Особенности вещественного состава руд и геологического строения месторождения Пасечное указывают на его принадлежность к золото-висмутовой формации.

Ключевые слова: арсенипирит, золото-висмутовая минерализация, самородное золото, мальдонит, месторождение Пасечное, Сихотэ-Алинь

DOI: 10.31857/S0869605521020064

Месторождение Пасечное локализовано в пределах Алексеевской рудоносной площади Южного Сихотэ-Алиня. О золоте в аллювии руч. Пасечного (приток р. Алексеевки) было известно еще в дореволюционное время. В советское время партией В.В. Углова (1979–1980 гг.) были проведены поисковые работы на золото, что позволило установить здесь не только вторичные ореолы золота, но и рудные зоны с содержанием золота до 13 г/т. Позднее, при проведении поисково-оценочных работ геологическими организациями ЗАО “Сент-Мартин” (2007 г.) и ООО МИФ “Экоцентр” (2014–2016 г.) в пределах Алексеевской рудоносной площади (РП) на месторождении было выявлено 26 рудных зон (РЗ), 11 из которых имеют параметры оруденения, близкие к промышленным. Наиболее изученными являются РЗ Алексеевская, Юго-Западная, Попутная и Светлана, в которых содержание золота колеблется от 0.2 до 33 г/т (по данным А.В. Северилова, 2007 г.).

Хотя в пределах Алексеевской рудоносной площади неоднократно проводились поисковые работы на золото, сведения о геологическом строении месторождения Пасечного и особенностях его минералогии остаются весьма ограниченными (Степанов, 2012; Эйриш, 2003). В предлагаемой работе приводятся результаты детальных исследований состава рудной минерализации. На месторождении установлены ранее неизвестные здесь минералы висмута, в том числе мальдонит. В совокупности с данными по геологическому строению и типоморфным особенностям руд эти данные мо-

гут быть использовано для минералого-геохимической типизации и определения формационной принадлежности золотого оруденения.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА¹

Алексеевская рудоносная площадь находится в Партизанском районе Приморского края в междуречье рр. Сергеевки, Алексеевки, Икрянки и Ималиновки, северо-восточнее поселка Монакино. В схеме геологического районирования Алексеевская РП приурочена к восточному флангу Монакинской вулкано-тектонической структуры (ВТС) в Южно-Приморском золотоносном районе и имеет сложное геологическое строение. В пределах РП выявлен ряд золото-серебряных рудопроявлений — Кипреевское, Кириенковское, Красавчик, Гранитное, Золотое и Турмалиновое. Пасечное месторождение находится в центральной части РП, на водоразделе рр. Алексеевки и Ималиновки (рис. 1).

Наиболее древними породами РП являются протерозойские метаморфиты сергеевского комплекса и раннепалеозойские таудеминские (тафуинские) гранит-плагиогранитные образования в пределах Сергеевского террейна. Они перекрыты позднепермскими осадочными отложениями чандалазской и ястребовской свит и юрско-меловыми вулканогенно-осадочными образованиями (Геодинамика..., 2006; Голозубов, 2006).

Сергеевские метагабброиды с абсолютным возрастом (К-Аг метод) 527–500 млн лет (Геодинамика..., 2006) представлены разгнейсованными породами основного–среднего состава с фашиальными переходами от габбро-амфиболитов к разгнейсованным габбро (Sayadyan, 2004), диоритам и их мигматитам.

Таудеминский комплекс гранит-плагиогранитовый включает плагиограниты, лейкограниты, разгнейсованные гранодиориты и граниты. Их возраст (К-Аг) соответствует среднему ордовику (472–463 млн лет) (Tsutsumi et al., 2016).

Породы чандалазской свиты представлены песчаниками, конгломератами, гравелитами, реже алевролитами и их туфогенными разновидностями, а также известняками, которые согласно перекрываются конгломератами, песчаниками и алевролитами с примесью пеплового материала ястребовской свиты.

Вулканогенно-осадочные образования представлены среднеюрско-меловым монакинским комплексом, который состоит из риолитов и их туфов, туфобрекчий, песчаников, алевролитов, дацитов и риодацитов, а также экструзий, силлов и даек риолитов.

Наиболее молодыми в пределах РП являются магматические образования палеоцен-эоценового кузнецовского комплекса, представленные дайками диоритов, базальтов и андезитов протяженностью от 50 м до 3 км, переменной (от 0.5 до 300 м) мощности, преимущественно северо-западного субмеридионального простирания.

На месторождении Пасечном установлено 26 рудных зон. Они локализованы в позднемеловом экструзиве риолитов и осадочных породах чандалазской свиты. Крутопадающие рудные зоны сложены кварц-сульфидными, кварцевыми, карбонат-кварцевыми, редко турмалин-кварцевыми рудами с золотой, золото-висмутовой, золото-серебрянной, иногда вольфрамоносной, минерализацией. Рудные зоны сопровождаются вторичными ореолами Au, Ag, As, Bi и W.

Перспективными считаются зоны Алексеевская и Юго-Западная. Протяженность первой составляет около 2.5 км, при ширине 200–300 м. В ее пределах развиты кварц-сульфидные тела, мощность которых колеблется от первых сантиметров до 0.2–0.5 м. Зона осложнена и контролируется многочисленными разрывными нарушениями северо-восточного простирания. Содержания золота в борздовых пробах по кварц-сульфидным телам изменяются от 4 до 33.4 г/т.

¹ При написании раздела использованы материалы А.В. Северилова (2007 г.).

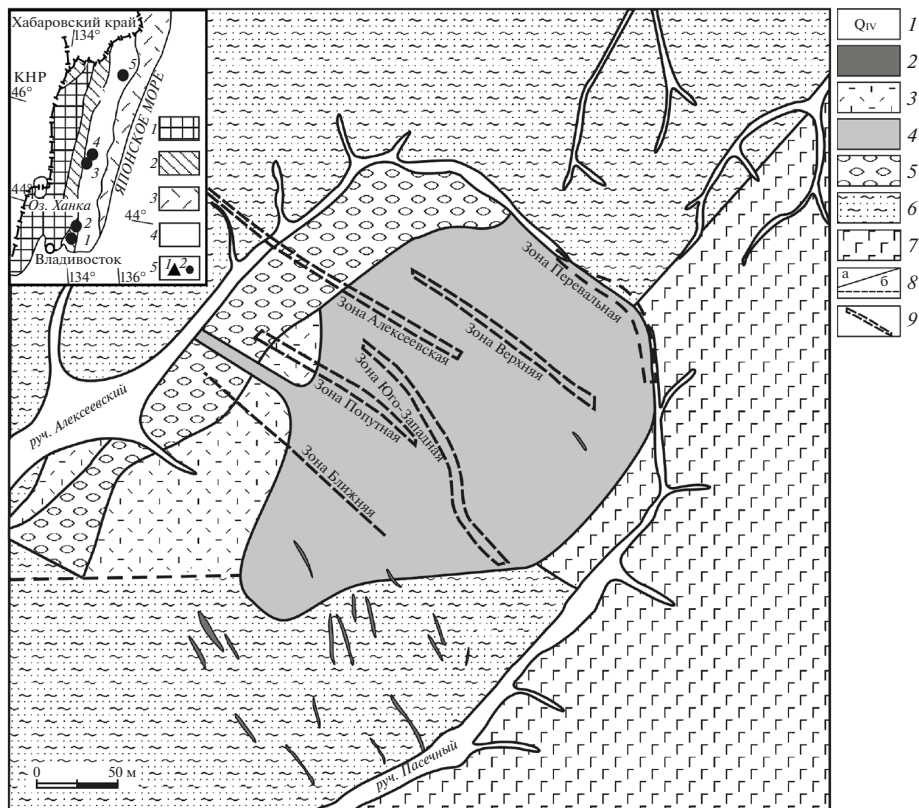


Рис. 1. Схематическая геологическая карта месторождения Пасечное (по материалам В.В. Углова, 1981 г.).

1 – современные аллювиальные отложения; 2 – палеоцен-эоценовые дайки: кузнецовские базальты, андезибазальты, андезиты; 3 – юрско-меловые дациты, риодациты, риолиты и их туфы, конгломераты, песчаники, туфопесчаники и каменные угли; 4 – юрско-верхнемеловые экструзии, силлы риолитов; 5 – позднепермские конгломераты, конглобрекции, песчаники, алевропесчаники, алевролиты, ястребовская свита; 6 – позднепермские конгломераты, песчаники, алевролиты, известняки, чандалазская свита; 7 – протерозойские амфиболитизированные габбро-гнейсы сергеевского комплекса; 8 – разрывные нарушения: а – установленные, б – предполагаемые; 9 – контуры рудных зон. На врезке: фрагмент схемы террейнов Сихотэ-Алинского орогенного пояса и прилегающих территорий по данным (Голозузов, 2006; Геодинамика..., 2006): 1 – Ханкайско-Буреинский кристаллический массив и его обрамление; 2 – Самаркинская аккреционная призма (турбидит-олистостромовая); 3 – Прибрежный вулканический пояс; 4 – Журавлевский – юг и Таухинский – север террейны; 5 – золоторудные месторождения (1 – Криничное, 2 – Пасечное, 3 – Малиновское, 4 – Глухое, 5 – Болотистое).

Fig. 1. Geological sketch map of the Pasechnoe deposit (after V.V. Uglov, 1981). 1 – recent alluvial deposits; 2 – Paleocene-Eocene dikes: basalts, andesibasalts, andesites; 3 – Jurassic-Cretaceous dacites, rhyodacite, rhyolites and their tufts, conglomerates, sandstones, tuff sandstones, and hard coals; 4 – Jurassic-Upper Cretaceous extrusions, sills of rhyolites; 5 – Late Permian conglomerates, conglobreccias, sandstones, silty sandstones, siltstones of Yastrebovskaya series; 6 – Late Permian conglomerates, sandstones, siltstones, limestones of the Chandalazskaya series; 7 – amphibolitized Proterozoic gabbro-gneiss of the Sergeevsky complex; 8 – faults: a – detected, b – assumed; 9 – contours of ore mineralization zones. The inset is fragment of the scheme of the Sikhote-Alin orogenic belt and adjacent territories, according to (Golozubov, 2006; Geodynamics..., 2006): 1 – the Khankaisko-Bureinsky crystal massif and its framing; 2 – Samarkinskaya accretion prism (turbidite-olistostromic); 3 – the Coastal volcanic belt; 4 – Zhuravlevsky (South) and Taukhinsky (North) terranes; 5 – gold ore deposits (1 – Krinichnoe, 2 – Pasechnoe, 3 – Malinovskoe, 4 – Glukhoe, 5 – Bolotistoe).

Зона Юго-Западная расположена в 200–300 м к юго-востоку от Алексеевской. Она имеет протяженность около 2 км, при ширине от 40–100 м на северо-западном до 300–400 м на юго-восточном фланге. Среднее содержание золота в ней составляет 13.3 г/т при мощности 1.5 м. По типу минерализации и по комплексу ореолообразующих элементов Юго-Западная зона аналогична зоне Алексеевской. В ней развиты кварц-сульфидные рудные тела, мощностью от первых сантиметров до 0.2–0.5 м.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток). Изучение образцов руд осуществлялось в полированных аншлифах с помощью микроскопа Axioplan 2 (Carl Zeiss). Идентификация рудных минералов проведена на основе анализа их физических, морфологических и оптических свойств. Химический состав минералов определялся с помощью микроанализатора JXA-8100 с системой INCA-sight (аналитик Г.Б. Молчанова).

ХАРАКТЕРИСТИКА РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

На месторождении Пасечном в основном преобладают руды с вкрапленными, прожилково-вкрапленными и массивными текстурами. По составу они – сульфидно-кварцевые, сульфидно-карбонатно-кварцевые и сульфидные. Доля рудных минералов в жилах составляет 1–5%.

Основным рудным минералом является арсенопирит. Его содержание относительно других рудных минералов изменяется от 10 до 50%. Среди прочих минералов наиболее распространены (в порядке убывания содержаний): сульфиды железа, меди, свинца, цинка, висмута; самородный висмут и самородное золото; сульфотеллуриды висмута; интерметаллид золота – мальдонит; сложные сульфосоли висмута, свинца и серебра; оксиды и арсенаты висмута.

Наиболее распространенными висмутовыми минералами являются самородный висмут и висмутин.

Жильные минералы в основном представлены кварцем, карбонатом, реже турмалином. В жилах встречаются молибденит, шеелит и касситерит. В окисленных образцах диагностированы гидроксиды железа, ковеллин, скородит, ярозит.

Арсенопирит характеризуется идиоморфными, изометричными, уплощенно-ромбическими или удлиненно-призматическими формами выделений. Он часто рассечен микротрещинами и замещается скородитом. В арсенопирите установлены включения пирита, халькопирита, пирротина, самородного висмута и самородного золота, висмутина, жозеита, мальдонита, сульфосолей висмута, свинца и серебра. Соотношение As/S в составе минерала изменяется незначительно.

Пирит образует включения в арсенопирите и кварце размером от 15 до 100 мкм. Для выделений пирита характерно зональное строение. Его более светлые зоны обогащены мышьяком (As 0.56–1.66 мас. %) (табл. 1), в то время как в темных зонах примесей не установлено. В пирите зафиксировано включение эскимоита (рис. 2, з).

Халькопирит встречается редко. Размер его выделений около 10 мкм. Он образует включения в кварце и арсенопирите. Для него характерны сростания со сфалеритом, галенитом, а также с пирротинном и китайбелитом.

Пирротин образует изометричные аллотриоморфнозернистые выделения размером 1 до 40 мкм. Наблюдаются сростания пирротина с самородным висмутом, висмутином, сульфосолью Ag–Pb–Bi, халькопиритом. Обнаружены его включения в халькопирите. Пирротин содержит примесь кобальта (0.4 мас. %) (табл. 1).

Сфалерит образует незначительные по размерам выделения в арсенопирите. Для него характерны сростания с галенитом. В сфалерите установлена эмульсионная вкрапленность халькопирита. В его составе постоянно присутствуют примеси железа

Таблица 1. Состав сульфидных минералов месторождения Пасечное (мас. %)
Table 1. Composition of sulfide minerals (wt %) of the Paseshnoe deposit

№ п.п.	№ пробы	Fe	Cu	As	Zn	Pb	Ag	Sb	Co	Cd	Mn	S	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	ГП-2017-16	34.7	н.о.	44.25	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	20.4	99.35	$\text{Fe}_{1.01}\text{As}_{0.96}\text{S}_{1.00}$
2	ГП-2017-16	34.68	н.о.	44.03	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	19.9	98.61	$\text{Fe}_{1.02}\text{As}_{0.96}\text{S}_{1.00}$
3	ГП-1-88-99	34.68	н.о.	46.57	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	19.64	100.89	$\text{Fe}_{1.00}\text{As}_{1.01}\text{S}_{1.00}$
4	ГП-1-88-99	35.04	н.о.	43.87	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	20.87	99.78	$\text{Fe}_{1.01}\text{As}_{0.94}\text{S}_{1.00}$
5	ГП-3-80	8.45	н.о.	н.о.	54.45	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1.18	2.2	32.91	99.16	$(\text{Zn}_{0.81}\text{Fe}_{0.15}\text{Mn}_{0.04}\text{Cd}_{0.01})_{1.01}\text{S}_{1.00}$
6	ГП-2017-16	7.08	н.о.	н.о.	57.00	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1.17	0.5	32.51	98.26	$(\text{Zn}_{0.86}\text{Fe}_{0.12}\text{Mn}_{0.01}\text{Cd}_{0.01})_{1.00}\text{S}_{1.00}$
7	ПС-2018-1-3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	84.63	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	13.81	98.44	$\text{Pb}_{0.97}\text{S}_{1.03}$
8	ПС-2018-1-3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	84.73	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	13.60	98.33	$\text{Pb}_{0.98}\text{S}_{1.02}$
9	ПС-2018-1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	84.59	0.94	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	13.74	99.28	$(\text{Pb}_{0.97}\text{Ag}_{0.02})_{0.99}\text{S}_{1.01}$
10	ПС-2018-1-3	29.85	34.67	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	33.28	97.81	$\text{Cu}_{1.03}\text{Fe}_{1.01}\text{S}_{1.96}$
11	ПС-2018-1	30.46	34.52	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	33.77	98.75	$\text{Cu}_{1.01}\text{Fe}_{1.02}\text{S}_{1.97}$
12	ГП-2017-16	60.5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	36.80	97.30	$\text{Fe}_{0.97}\text{S}_{1.03}$
13	ГП-1-88-99	59.21	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.40	н.о.	н.о.	39.57	99.16	$\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.01}\text{S}_{1.07}$
14	ГП-2017-16	н.о.	46.35	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	53.00	99.35	$\text{Fe}_{1.00}\text{S}_{2.00}$
15	ПС-2018-1-3	н.о.	46.09	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	51.68	97.78	$\text{Fe}_{1.02}\text{S}_{1.98}$

Примечание: 1–4 – арсенопирит, 5–6 – сфалерит, 7–9 – галенит, 10–11 – халькопирит, 12–13 – пирротин, 14–15 – пирит. н.о. – не обнаружено. Анализы выполнены на микроанализаторе “УХА-8100” (ДВГИ ДВО РАН), аналитик: Г.Б. Молчанова.

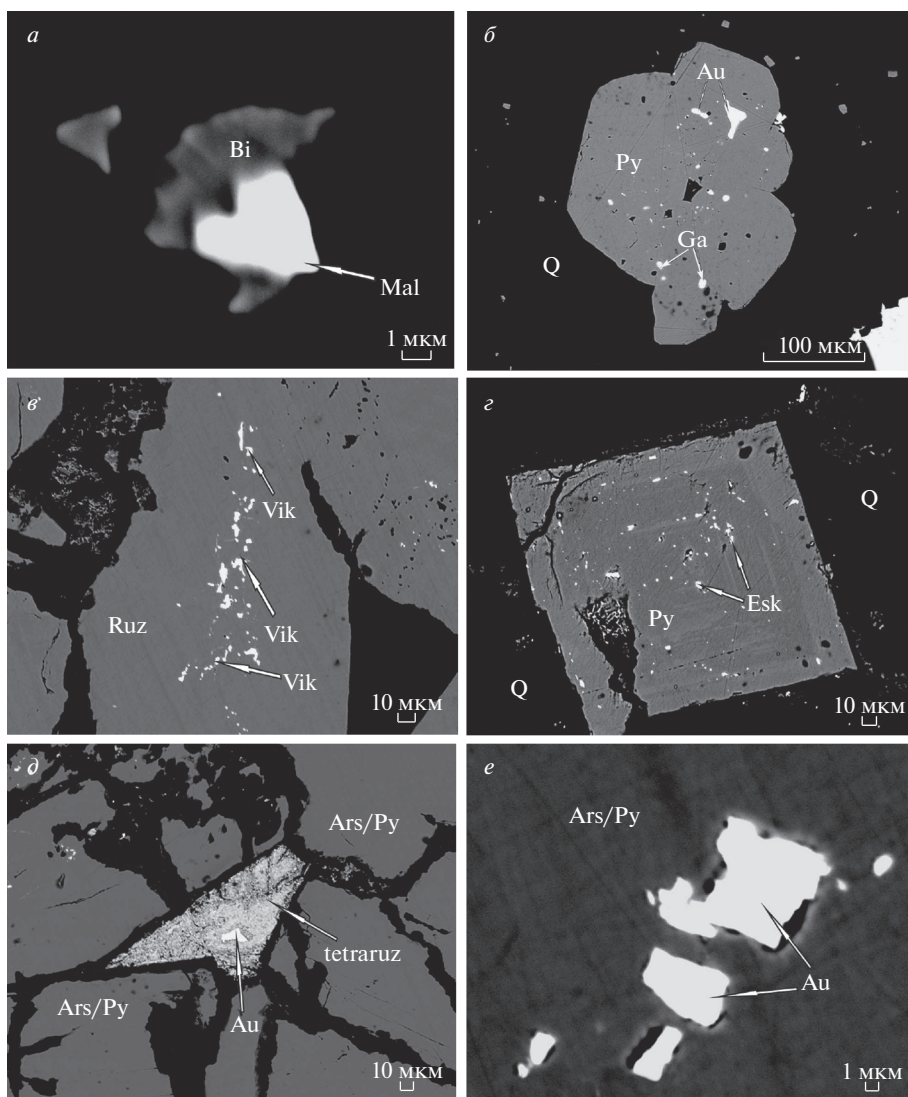


Рис. 2. Формы выделений и характер взаимоотношений редких минералов в золото-кварц-пирит-арсенопиритовых рудах месторождения Пасечное.

a – мальдонит (Mal) в сростании с самородным висмутом (Bi); *б* – микровыведения галенита (Ga), самородного золота (Au) в пирите (Py); *в* – микровыведения викингита (Vik) в рузевельтите (Ruz); *г* – зональный пирит с включениями эскимойта (Esk); *д* – выделение самородного золота в тетрарузельтите (tetrazuvelite); *е* – микровыведения самородного золота в арсенипирите. Фотографии в отраженных электронах.

Fig. 2. Forms of segregations and character of the rare minerals relationships in gold-quartz-pyrite-arsenopyrite ores of the Pasechnoe deposit.

a – maldonite (Mal) in intergrowth with native bismuth (Bi); *б* – microinclusions of galena (Ga) and native gold (Au) in pyrite (Py); *в* – micrograins of vikingite (Vik) in ruzevelkite (Ruz); *г* – zoned pyrite with inclusions of eskimoite (Esk); *д* – segregations of native gold in tetrazuvelite; *е* – microinclusions of native gold in arsenopyrite. BSE images.

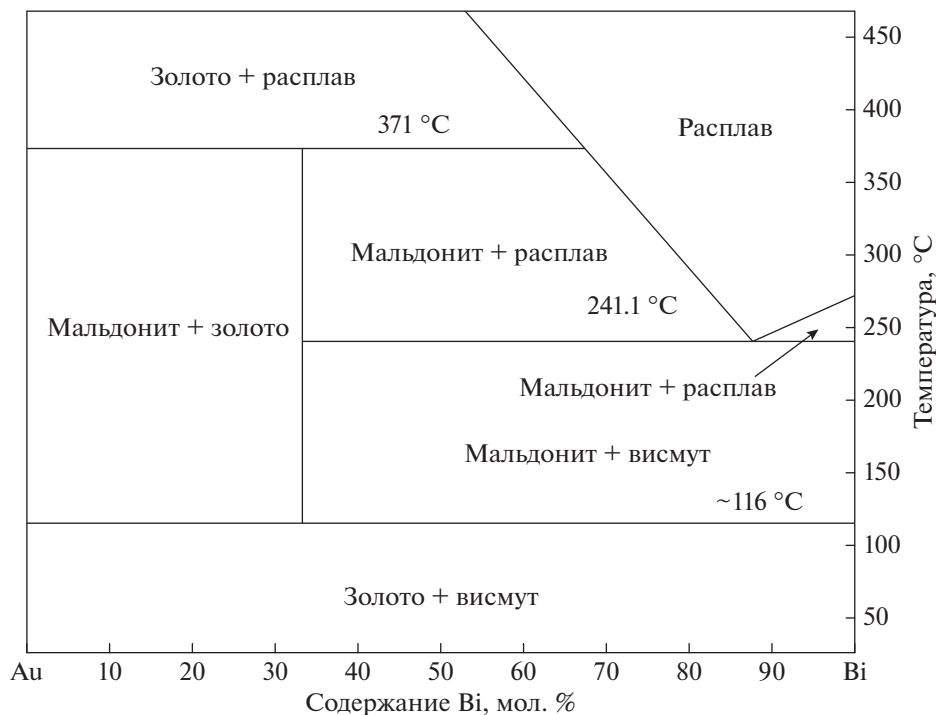


Рис. 3. Бинарная фазовая диаграмма системы Au–Bi (Zhou et al., 2016).

Fig. 3. Binary phase diagram of the Au–Bi system (Zhou et al., 2016)

(7.1–8.4 мас. %), марганца (0.5–3.7 мас. %) и спорадически – кадмия (0.7–1.2 мас. %) (табл. 1).

Галенит представлен округлыми, каплевидными выделениями в раздробленных кристаллах арсенопирита и в сростаниях со сфалеритом. Для него характерна примесь серебра (0.9 мас. %) (табл. 1).

Самородный висмут образует включения в кварце и арсенопирите размером от 1 до 15 мкм. Для него характерны сростания с висмутином, жозеитом, мальдонитом, пирротинном и арсенопиритом (рис. 2, а). Установлены реликты самородного висмута в скородите.

Висмутин зафиксирован в виде изометричных включений в арсенопирите. Размер его зерен от 3 до 10 мкм. Висмутин образует тесные сростания с самородным висмутом, халькопиритом и пирротинном. Данные по его химическому составу (табл. 2) показывают наличие примесей Sb (0.5–1.1 мас. %) и Ag (0.7–3.2 мас. %).

Жозеит А образует неправильные по форме выделения в арсенопирите размером от 1 до 4 мкм. Для него характерны сростания с самородным висмутом и мальдонитом. Рассчитанные кристаллохимические формулы жозеита А соответствуют теоретической формуле (табл. 2).

Интерметаллид золота – мальдонит – наблюдался в виде единичных включений в арсенопирите. Размер его зерен колеблется от 1 до 8 мкм. При этом мальдонит образует сростания с самородным висмутом (рис. 2, а). Рассчитанная кристаллохимическая формула мальдонита – $\text{Au}_{2.02}\text{Bi}_{0.98}$.

Таблица 2. Представительные анализы висмутовых минералов месторождения Пасечное (мас. %) **Table 2.** Representative analyses of bismuth minerals (wt %) of the Pasechnoe deposit

	№ пробы	Bi	Ag	Pb	Sb	Te	S	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	ГП-2017-16	64.03	11.66	6.43	н.о.	н.о.	17.10	99.16	$Ag_{9.23}Pb_{2.92}Bi_{29.69}S_{51}$
2	ГП-1-88-99	68.28	10.22	4.99	н.о.	н.о.	17.0	99.97	$Ag_{8.93}Pb_{2.27}Bi_{30.80}S_{50.00}$
3	ГП-1-88-99	40.92	9.32	26.82	8.54	н.о.	16.26	101.86	$Ag_{4.89}Pb_{7.33}Bi_{11.09}Sb_{3.97}S_{28.72}$
4	ГП-1-88-99	42.50	7.99	25.06	9.07	н.о.	16.00	100.62	$Ag_{5.18}Pb_{8.46}Bi_{14.23}S_{34.91}$
5	ГП-2017-16	71.00	9.99	н.о.	н.о.	н.о.	17.99	98.98	$Ag_{1.49}Bi_{5.47}S_{9.04}$
6	ГП-1-88-99	82.97	н.о.	н.о.	н.о.	8.49	7.11	98.57	$Bi_{4.06}Te_{0.68}S_{2.26}$
7	ГП-1-88-99	84.79	н.о.	н.о.	н.о.	8.22	6.81	99.82	$Bi_{4.16}Te_{0.66}S_{2.18}$
8	ГП-1-88-99	82.2	н.о.	н.о.	н.о.	9.3	6.9	98.4	$Bi_{4.04}Te_{0.75}S_{2.21}$
9	ГП-2017-16	79.72	н.о.	н.о.	1.08	н.о.	18.2	99.0	$(Bi_{1.99}Sb_{0.05})_{2.04}S_3$
10	ГП-2017-16	76.32	4.33	н.о.	н.о.	н.о.	18.51	99.16	$(Bi_{1.86}Sb_{0.20})_{2.06}S_{2.94}$
11	ГП-2017-16	75.29	3.69	н.о.	1.05	н.о.	18.31	98.34	$(Bi_{1.85}Sb_{0.18})_{2.03}S_{2.93}$

Примечание: 1–2 – сульфосоли $Ag_{10}Pb_{13}Bi_{30}S_{51}$ (расчет коэффициентов проведен на 92 атома), 3 – викингит ($Ag_5Pb_8Bi_{13}S_{30}$) (расчет коэффициентов проведен на 56 атомов), 4 – эскимоит ($Ag_7Pb_{10}Bi_{15}S_{36}$) (расчет коэффициентов проведен на 68 атомов), 5 – маковицкиит ($Ag_{1.5}Bi_{5.50}S_9$) (расчет коэффициентов проведен на 16 атомов), 6–8 – жозеит А (Bi_4TeS_2) (расчет коэффициентов проведен на 7 атомов), 9–11 – висмутин (Bi_2S_3) (расчет коэффициентов проведен на 5 атомов). н.о. – не обнаружено. При расчетах коэффициентов использовались формулы минералов, опубликованные в работе Y. Moelo с соавторами (Moelo et al., 2008). Анализы выполнены на микроанализаторе “JXA-8100” (ДВГИ ДВО РАН), аналитик: Г. Б. Молчанова.

Самородное золото образует изометричные, бесформенные и удлинённые выделения и микропрожилки размером от 2 до 14 мкм в арсенопирите (рис. 2, е). Также самородное золото установлено в виде включений в пирите (рис. 2, б). Наблюдаются сростания самородного золота с мальдонитом, жозеитом А и самородным висмутом. Установлены реликты самородного золота в рузвельтите (рис. 2, д). Состав самородного золота: Au 79.0–83.6 мас. %, Ag 16.4–20.1 мас. %.

Сульфосоли висмута, свинца и серебра выявлены в виде единичных пластинчатых включений в арсенопирите, пирите, оксидах и арсенатах висмута. Размеры этих включений изменяются в пределах 5–20 мкм. Диагностика минералов этой группы затруднена из-за малых размеров зерен и широких вариаций состава. Из-за незначительных размеров зерен не удалось провести их рентгенографическое изучение. По химическому составу изученные сульфосоли относятся к густавитовому ряду и представлены викингитом, эскимоитом, сульфосолю $Ag_{10}Pb_{13}Bi_{30}S_{51}$, маковицкиитом. Рассчитанные формулы минералов соответствуют теоретическим.

Викингит ($Ag_5Pb_8Bi_{13}S_{30}$) – редкий минерал среди Ag–Pb–Bi сульфосолей одноименной группы. Он установлен в рузвельтите (арсенате висмута) в виде реликта “дорожки” зерен (рис. 2, в). Викингит образует удлинённые, таблитчатые и округлые выделения размером от 1 до 12 мкм. Обладает белым цветом и отражением, как у галенита, от которого отличается только формой зерен. Содержание Ag в викингите (табл. 2) составляет 9.3 мас. %, Sb – 8.5 мас. %.

Эскимоит ($Ag_7Pb_{10}Bi_{15}S_{36}$) – редкий минерал, образует выделения неправильной формы размером от 2 до 15 мкм в зональном пирите (рис. 2, г). При этом он тяготеет к более светлым зонам, содержащим примесь мышьяка. Установлены реликты эскимоита в рузвельтите, а также в ассоциации с самородным висмутом. Содержание Sb в минерале составляет 9.1 мас. % (табл. 2).

Сульфосоли Ag–Pb–Bi–S по сравнению с викингитом и эскимоитом встречается реже. Она образует включения в арсенопирите и оксидах висмута размером от 1 до 10 мкм. Результаты анализа минерала пересчитываются на кристаллохимическую

формулу $\text{Ag}_{10}\text{PbBi}_{30}\text{S}_{51}$ (Clark, Tandy, 1988; Weiszburg et al., 1992) (табл. 2). Этот минерал относится к Pb-содержащей павонитовой группе сульфосолей и ранее назывался китабелитом (Sugaki, Yamae, 1952).

Маковицкиит ($\text{Ag}_{1.5}\text{Bi}_{5.50}\text{S}_9$) – редкий минерал, образующий включения в арсенопирите и скородите. Он также относится к павонитовой группе. Размер его выделений варьирует от 1 до 5 мкм.

Оксиды и арсенаты висмута являются одними из основных минералов-носителей этого элемента в рудах. Они широко развиты на месторождении. Выше рассмотренные минералы (самородный висмут, сульфотеллурид висмута, сульфиды и сульфосоли висмута и серебра, самородное золото) встречены в них в виде реликтов (рис. 2 в, 2 д). Оксиды и арсенаты висмута образуют чередующиеся ритмичные выделения или микропрожилки по арсенопириту. По химическому составу оксиды с содержанием Bi около 85 мас. % относятся к бисмиту. В случаях более высоких содержаний висмута (около 93 мас. %) – к сферобисмиту. Арсенат висмута с содержанием Bi около 60 мас. %, As – 20–22 мас. % назван рузвельтитом. В оксидах висмута фиксируются примеси As, Fe, а в арсенатах висмута – Sb (0.64–2.19 мас. %) и Ag (до 9 мас. %).

Скородит образует обширные зоны замещения по арсенопириту. В нем установлены включения мальдонита, самородных висмута и золота, рузвельтита.

По результатам проведенных исследований на месторождении Пасечном были выделены две минеральные ассоциации висмутовых минералов: (1) висмут-сульфидно-сульфотеллуридная с самородным висмутом, мальдонитом, самородным золотом, жозеитом А и висмутином; (2) висмут-сульфосольная с сульфосолями висмута, свинца и серебра.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее месторождение Пасечное упоминалось в литературе как рудный объект золото-серебряной формации (Эйриш, 2003; Степанов, 2012; Ивин и др., 2017). Проведенные исследования позволили впервые выявить в составе руд редкие минералы висмута: сульфосоли Ag–Pb–Bi группы (викингит, эскимоит, сульфосоль $\text{Ag}_{10}\text{PbBi}_{30}\text{S}_{51}$ маковицкиит), интерметаллид золота (мальдонит), сульфотеллурид висмута (жозеит А), висмутин, самородный висмут, а также вторичные висмутовые минералы – бисмит, сферобисмит и рузвельтит.

На рудопроявлении Пасечном самородное золото установлено в виде субмикроскопических выделений в арсенопирите, реже в арсенате висмута и его оксидах. Оно ассоциирует преимущественно с самородным висмутом, мальдонитом и висмутином, реже с жозеитом А. Наиболее продуктивной ассоциацией на золотое оруденение является висмут-сульфидно-сульфотеллуридная с самородным висмутом, мальдонитом, жозеитом А, висмутином и самородным золотом.

Для изученных висмутовых минералов не характерны структуры распада, широко распространенные на золото-висмутовых месторождениях Якутии, Северо-Востока, Забайкалья и южного Сихотэ-Алиня (Гамянин и др., 1998; Литвиненко, Соломенцева, 2015; Гвоздев и др., 2016, 2020; Литвиненко, Шилина, 2020). В исследованных рудах был зафиксирован мальдонит в единичных зернах в сростании с самородным висмутом. Характерно самородное золото средней пробы и отсутствие высокопробного золота.

По литературным данным (Гамянин и др. 1986, Некрасов, 1991; Литвиненко и др., 2015, 2020), известно, что при наличии мальдонита в рудах может присутствовать самородное золото высокой пробы, возникшее как результат разложения мальдонита на самородное золото и висмут, с образованием субграфических миремкитовых структур. Однако на месторождении Пасечном подобных структур распада не было зафиксировано.

Для золоторудных месторождений с висмутовой минерализацией характерно сосуществование мальдонита с самородным висмутом (Tooth et al., 2008, 2011, 2013) в виде эвтектической ассоциации, образовавшейся при 241 °С в системе Au–Bi (рис. 3). Мальдонит устойчив в температурном диапазоне 371–116 °С. При постепенном понижении температуры мальдонит частично разлагается с образованием симплектитовых агрегатов самородного золота и самородного висмута (Некрасов, 1985, 1991; Tooth et al., 2008, 2011, 2013). Однако при резком снижении температуры создается своеобразный режим “закалки”, который ответственен за сохранность мальдонита при низких температурах (Некрасов, 1991). На основании проведенных исследований (Ciobanu, Cook, 2002) установлено, что стабильность самородного висмута и мальдонита контролируется восстановительной обстановкой, перекрывающей поля устойчивости пирротина и магнетита в координатах fS_2 и fO_2 . Отсутствие в рудах теллуридов висмута также может свидетельствовать о низких значениях фугитивности fTe_2 и являться подтверждением восстановительных условий рудообразования (Ciobanu, Cook, 2002; Новоселов и др., 2014).

На основании экспериментальных исследований установлено, что растворенное золото в гидротермальном флюиде может экстрагироваться висмутовым расплавом и в дальнейшем обогащать флюидную систему с последующей кристаллизацией уже при более низких температурах (Douglas et al., 2000; Tooth et al., 2008, 2011, 2013). Вследствие этого, дальнейшая миграция и отложение самородного золота происходят совместно с висмутом.

На фазовый состав рудных систем большое влияние оказывает соотношение активностей рудных компонентов (Некрасов, 1991). На основании термодинамического анализа системы Au–Pb–Bi–S показано, что в начале рудообразующего процесса высока активность висмута и поэтому в парагенезисе с золотом отлагались висмут и висмутин. В дальнейшем при смене рудоносного флюида, даже при незначительном увеличении фугитивности теллура отлагается мальдонит с сульфотеллуридом висмута. По мере снижения активности висмута на фоне снижающейся температуры в системе происходит возрастание активности свинца и серебра, что влечет за собой смену висмута и самородного висмута свинцовыми сульфовисмутитами и серебросодержащими сульфосолями (Некрасов, 1985, 1991).

Происхождение висмутовых солей (Pažout et al., 2017) связано с проникновением низкотемпературных флюидов (около 100–250 °С) в открытые трещины и заполнением пустот в более ранних рудных жилах, сложенных пиритом, арсенопиритом и др.

При окислении висмутовые минералы замещаются бисмитом, сферобисмитом и рувельтитом.

На месторождении Пасечном осаждение золота происходило в основном совместно с самородным висмутом, на более поздних стадиях – с мальдонитом, сульфотеллуридом висмута (жозеитом А) и висмутином, и, частично, совместно с арсенопиритом и пиритом. При незначительном увеличении фугитивности серы в конце рудообразующего процесса происходила смена высоковисмутовой ассоциации (висмут-сульфидно-сульфотеллуридной) на висмут-сульфосольную, при этом первыми кристаллизовались сульфосоли, богатые висмутом (павонитовые гомологи – сульфосоль $Ag_{10}Pb-Vi_{30}S_{51}$ и маковицкиит), далее – сульфосоли с меньшим содержанием висмута и примесью сурьмы (лилианитовые гомологи – викингит и эскимоит).

Поскольку в рудах месторождения Пасечного не наблюдаются текстуры распада мальдонита в симплектитовых агрегатах самородного золота и самородного висмута, можно предположить, что при формировании оруденения резкого понижения температуры (ниже ~116 °С) не происходило. Поэтому отсутствие теллуридов висмута при кристаллизации самородного висмута и мальдонита свидетельствует о низкой фугитивности fTe_2 , fS_2 и восстановительных условиях рудообразования.

Известно, что месторождения с золото-висмутовой минерализацией ассоциируют с гранитоидными системами *S-I* типа позднемелового–палеогенового возраста и широко проявлены в пределах Западного и Восточного Сихотэ-Алиня (Криничное, Болотистое, Малиновское и другие) (Ханчук, Иванов, 1999; Эйриш, 2003; Sayadyan, 2004; Лотина, 2011а; Лотина, 2011б; Степанов, 2012; Гребенникова, 2013; Гвоздев и др. 2016; Grebennikov et al., 2016; Доброшевский и др., 2017), Забайкалья (Гвоздев и др., 2020), на Северо-Востоке России (Мякитское, Порожисток, Чистое и др.) (Гамянин и др., 1998; Горячев, Гамянин, 2006; Vikent'eva et al., 2018) и являются экономически выгодными.

Поэтому месторождение Пасечное на основании проведенных исследований и выявленных типоморфных особенностей оруденения (геолого-структурной позиции, типа рудных тел, вещественного состава руд) можно относить к перспективным золоторудным объектам на территории Южного Сихотэ-Алиня.

ВЫВОДЫ

1. В рудах месторождения Пасечное арсенопирит является ведущим минералом, в котором установлены тонкодисперсные включения самородных золота и висмута, висмутина, мальдонита, сульфотеллурида висмута (жозеита А), сульфосолей состава $Ag-Pb-Bi$.

2. Эволюционная направленность рудного процесса и последовательность кристаллизации минералов на месторождении Пасечном обусловлена осаждением самородного золота одновременно с самородным висмутом, мальдонитом, сульфотеллуридом Bi (жозеитом А), висмутином и частично с арсенопиритом и пиритом (висмут-сульфидно-сульфотеллуридная ассоциация). По мере увеличения фугитивности серы наблюдается смена высоковисмутовой ассоциации на висмут-сульфосольную, с последовательной кристаллизацией сначала богатых Bi сульфосолей (павонитовых гомологов – сульфосолей $Ag_{10}PbBi_{30}S_{51}$ и маковицкиита), затем – сульфосолей с пониженным содержанием Bi и примесью Sb (лилианитовых гомологов – викингита и эскимоита).

3. Выявленные особенности минерального состава рудных тел свидетельствуют о принадлежности месторождения Пасечного к висмут-арсенидно-сульфоарсенидному (золото-висмутовому) геохимическому типу.

Авторы выражают искреннюю признательность проф. В.Г. Хомичу (ДВГИ ДВО РАН) и неизвестному рецензенту за критические замечания по тексту статьи. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-05-00100 и проекта ДВО РАН 18-2-001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гамянин Г.Н., Некрасов И.Я. Самусиков В.П. Мальдонит из золоторудных проявлений Восточной Якутии // Минер. журн. **1986**. Т. 8. № 3. С. 65–71.

Гамянин Г.Н., Гончаров В.И., Горячев Н.А. Золото-редкометалльные месторождения Востока России // Тихоокеанская геология. **1998**. Т. 17. № 3. С. 94–103.

Гвоздев В.И., Доброшевский К.Н., Вах А.С., Горячев Н.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г. Малиновское месторождение – новый тип золоторудной минерализации в Приморском крае, Россия (геология, минералогия, генезис) // Тихоокеанская геология. **2016**. Т. 35. N 1. С. 37–53.

Гвоздев В.И., Гребенникова А.А., Вах А.С., Горячев Н.А., Федосеев Д.Г. Эволюция процессов минералообразования при формировании золото-редкометалльных руд Средне-Голготайского месторождения (Восточное Забайкалье) // Тихоокеанская геология. **2020**. Т. 39. № 1. С. 70–91.

Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, **2006**. 981 с.

Горячев Н.А., Гамянин Г.Н. Золото-висмутовые (золото-редкометалльные) месторождения Северо-Востока России: типы и перспективы промышленного освоения / Золоторудные месторождения России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, **2006**. С. 50–62.

Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 231 с.

Гребенникова А.А. Самородное золото Право-Соолийского рудно-россыпного узла (Хабаровский край): Типоморфные особенности как показатель связи в системе россыпь-коренной источник // Руды и металлы. 2013. №1. С.60–70.

Доброшевский К.Н., Гвоздев В.И., Шлыков С.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г. Вещественный состав и геохимические особенности руд Малиновского золоторудного месторождения (Приморский край) // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 5. С. 59–74.

Ивин В.В., Родионов А.Н., Медведев Е.И., Фатьянов И.И. Особенности размещения разнотипного по формационной принадлежности благороднометалльного оруденения Приморья и его ресурсный потенциал // Успехи современного естествознания. 2017. № 8. С. 80–88.

Литвиненко И.С., Соломенцева Л.А. Мальдонит в золото-редкометалльных проявлениях Мякит-Хурчанского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России) // Вестник ДВО РАН. 2015. № 2. С.68–77.

Литвиненко И.С., Шилина Л.А. Мальдонит, ютенбогаардит и разновидности самородного золота из рудных проявлений Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России) // ЗРМО. 2020. С.18–37.

Лотина А.А. Золото-висмут-теллуровая минерализация участка Болотистого (Северо-Западный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. 2011а. Т. 30. № 1. С. 97–107.

Лотина А.А. Золото-висмут-теллуровая минерализация в коренных источниках и россыпях месторождения Болотистого (Хабаровский край). Автореф. дис. ... канд. г.-м. н. Владивосток, 2011б. 26 с.

Некрасов И.Я. Экспериментальное изучение условий образования интерметаллидов серебра и золота // Минер. журн. 1985. Т. 7. № 2. С. 61–71.

Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 302 с.

Новоселов К.А., Белогуб Е.В., Ермолина-Кутсие О.С., Михайлов А.Б., Котляров В.А. Минералогия золоторудных проявлений зеленокаменного пояса Кухмо (Финляндия) // Литосфера. 2014. № 2. С. 115–124.

Степанов В.А. Металлогения золота Приморья // Вестник Амурского государственного университета. Серия: естественные и экономические науки. 2012. № 59. С. 112–119.

Ханчук А.И., Иванов В.В. Мезо-кайнозойские геодинамические обстановки и золотое оруденение Дальнего Востока России // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 9. С. 1635–1645.

Эйриш Л.В. Металлогения золота Приморья (Приморский край, Россия). Хабаровск, 2003. 148 с.

New Data on Mineralogy of the Pasechnoe Gold Deposit (Southern Sikhote-Alin, Russia)

A. A. Grebennikova^{a,*}, G. R. Sayadyan^a, and S. A. Shlykov^b

^aFar East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

^bMIF “Ekotsentr”, Vladivostok, Russia

*e-mail: anylotina@mail.ru

New data showing typical features of the Pasechnoe deposit mineralization have been obtained in results of the comprehensive geological and mineralogical-geochemical investigation. It was revealed that among ore minerals there are sulfides of iron, lead, arsenic and bismuth, the bismuth sulfotelluride, native bismuth, gold, copper, the gold intermetallid – maldonite, sulfosalts of bismuth, lead and silver, oxides and arsenates of bismuth, molybdenite, scheelite, and cassiterite. The bismuth mineralization is closely related to the native gold and is a typomorphic indicator of the forming conditions of the gold mineralization. The revealed characteristic peculiarities in the ore composition and geological structure of the deposit testify the belonging of this ore occurrence to the gold-bismuth formation.

Keywords: arsenopyrite, gold-bismuth mineralization, native aurum, maldonite, Pasechnoe deposits, Sikhote-Alin

REFERENCES

- Clark A.M., Tandy P.C. Thirty-fifth list of new mineral names. *Miner Mag.* 1988. Vol. 52. P. 721–732.
Ciobanu C., Cook N. Tellurides, selenides and Bi-sulphosalts in gold deposits. In: *11th IAGOD Symp. Geocongress. CD vol.* GeolSurv Namibia, 2002.

Dobroshevsky K.N., Gvozdev V.I., Fedoseev D.G., Shlykov S.A., Stepanov V.A. Material composition and geochemical characteristic of ores of the Malinovskoe gold-ore deposit (Primorskiy Krai, Russia). *Russian J. Pacific Geol.* **2017**. Vol. 11. N 5. P. 368–382.

Douglas N., Mavrogenes J., Hack A., England R. The liquid bismuth collector model: An alternative gold deposition mechanism. In: *Searching for a sustainable future: 15th Australian Geol. Convention* Sydney, **2000**. Abstr. N 59.

Eirish L.V. Gold metallogeny in Primorye (Primorsky Krai, Russia). Khabarovsk, **2003**. 148 p. (in Russian).

Gamyanin G.N., Nekrasov I.Ya., Samusikov V.P. Maldonite from gold occurrences of East Yakutia. *Mineral. J.* **1986**. Vol. 8. N 3. P. 65–71 (in Russian).

Gamyanin G.N., Goncharov V.I., Goryachev N.A. Gold-rare-metal deposits of East Russia. *Russian J. Pacific Geol.* **1998**. Vol. 17. N 3. P. 94–103 (in Russian).

Geodynamics, magmatism and metallogeny of Russian Far East. Vladivostok: Dalnauka, **2006**. 981 p. (in Russian).

Golozubov V.V. Tectonics of Jurassic and Lower Cretaceous complexes of the north western framing of the Pacific. Vladivostok: Dalnauka, **2006**. 231 p.

Goryachev N.A., Gamyanin G.N. Gold-bismuth (gold-rare-metal) deposits of the northeastern Russia: types and prospects of commercial development. In: *Gold deposits of Russia*. Magadan, **2006**. P. 50–63 (in Russian).

Grebennikov A.V., Khanchuk A.I., Gonevchuk V.G., Kovalenko S.V. Cretaceous and Paleogene granitoid suites of the Sikhote-Alin area (Far East Russia): geochemistry and tectonic implications. *Lithos.* **2016**. Vol. 261. P. 250–261.

Grebennikova A.A. Native gold from Pravo-Sooliy ore placer area (Khabarovsk territory): typomorphic features as a bond indicator in the source – placer deposit system. *Ores and metals.* **2013**. N 1. P. 60–70 (in Russian).

Gvozdev V.I., Dobroshevskii K.N., Vakh A.S., Goryachev N.A., Stepanov V.A., Fedoseev D.G. Malinovka Deposit – a new type of gold mineralization in Primorye, Russia: geology, mineralogy, and genesis. *Russian J. Pacific Geol.* **2016**. Vol. 10. N 1. P. 34–49.

Gvozdev V.I., Grebennikova A.A., Vakh A.S., Goryachev N.A., Fedoseev D.G. Mineral evolution during formation of gold – rare-metal ores in the Sredne-Golgotay deposit (Eastern Transbaikalia). *Russian J. Pacific Geology.* **2020**. Vol. 39. N. 1. P. 66–86.

Ivin V.V., Rodionov A.N., Medvedev E.I., Fatyanov I.I. Location features and resource potential of the Primorsky region noble-metal mineralization belonging to different-type formations. *Advances in current natural sciences.* **2017**. N 8. P. 80–88 (in Russian).

Litvinenko I.S., Solomentseva L.A. Maldonite in gold-rare metal occurrences of the Myakit-Khurchansky ore-placer cluster (North-East of Russia). *Bull. FEB Russian Acad. Sci.* **2015**. N 2. P. 68–77 (in Russian).

Litvinenko I.S., Shilina L.A. Maldonite, utenbogaardtite and varieties of native gold in lodes of the Nizhne-Myakitsky mineral district, North-East Russia. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Sci.)*. **2020**. N 3. P. 18–37 (in Russian).

Lotina A.A. Gold-bismuth-tellurium mineralization of the Bolotisty area (Northwestern Sikhote-Alin). *Russian J. Pacific Geol.* **2011a**. Vol. 30. N 1. P. 97–107 (in Russian).

Lotina A.A. Gold-bismuth-tellurium mineralization in native sources and placers of the Bolotistoye deposit (Khabarovsk Territory). Ph.D. thesis. syn. **2011b**. 26 p (in Russian).

Možlo Y., Makovicky E., Mozgova N.N., Jambor J.L., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel E.H., Graeser S., Karup-Møller S., Balic-Žunic T., Mumme W.G., Vurro F., Topa D., Bindi L., Bente K., Shimizu M. Sulfosalt systematics: a review. Report of the sulfosalt sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. *Eur. J. Mineral.* **2008**. N 20. P. 7–46.

Nekrasov I.Ya. Experimental study of conditions of silver and gold intermetallic formation. *Miner. J.* **1985**. Vol. 7. N 2. P. 61–71 (in Russian).

Nekrasov I.Ya. Geochemistry, mineralogy, and origin of gold ore deposits. Moscow: Nauka, **1991**. 302 p. (in Russian).

Novoselov K., Beglob E., Ermolina-Coetzee O., Mikhailov A., Kotlyarov V.A. Mineralogy of gold occurrences from the Kuhmo greenstone belt (Finland). *Lithosphere.* **2014**. N 2. P. 115–124 (in Russian).

Pažout R., Sejkora J., Šrein V. Bismuth and bismuth-antimony sulfosalts from Kutná Hora vein Ag–Pb–Zn ore district, Czech Republic. *J. Geosci.* **2017**. Vol. 62. P. 37–57.

Sayadyan G.R. Geology, magmatism and gold mineralization of South Primorye (the Askold strike-slip fault zone, Sergeevka terrane). In: *Metallogeny of the Pacific Northwest (Russian Far East): Tectonics, magmatism and metallogeny of active continental margins. Interim IAGOD Conf. Excursion Guidebook*. Vladivostok: Dalnauka, **2004**. P. 137–146 (in Russian).

Stepanov V.A. Gold metallogeny of Primorye. *Bull. Amur State University. Series: Natural and Economical Sciences.* **2012**. N 59. P. 112–119 (in Russian).

Sugaki A., Yamae N. Thermal studies in the intergrowth of chalcopyrite and sphalerite. *Sci. Rep. Tohoku Univ. Sendai.* **1952**. P. 103–110.

Tooth B., Brugger J., Ciobanu C.L., Liu W. Modeling of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids. *Geology*. **2008**. Vol. 36. P. 815–818.

Tooth B., Ciobanu C.L., Green L., O'Neill B., Brugger J. Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **2011**. Vol. 75. P. 5423–5443.

Tooth B., Etschmann B., Pokrovski G.S., Testemale D., Hazemann J., Grundler P.V., Brugger J. Bismuth speciation in hydrothermal fluids: an X-ray absorption spectroscopy and solubility study. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **2013**. Vol. 101. P. 156–172.

Tsutsumi Yu., Yokoyama K., Kasatkin S.A., Golozoubov V.V. Age of igneous rocks in southern part of Primorye, Far East Russia. *Memoirs National Museum Nature Sci.* **2016**. N 51. P. 71–78.

Vikent'eva O.V., Prokofiev V.Yu., Gamyagin G.N., Goryachev N.A., Bortnikov N.S. Intrusion-related gold-bismuth deposits of North-East Russia: PTX parameters and sources of hydrothermal fluids. *Ore Geol. Rev.* **2018**. P. 240–259.

Weiszbarg T.G., Criddle A.J., Stanley C.J. Reexamination of the original “wehrlite” sample. In: *Joint Annual Meet. Geol. Assoc. Canada / Miner. Assoc. Canada Abstr.* Wolfville, Nova Scotia, Canada, **1992**. P. 116.

Zhou H., Suna X., Fub Y., Linb H., Jiang L. Mineralogy and mineral chemistry of Bi-minerals: Constraints on ore genesis of the Beiya giant porphyry-skarn gold deposit, southwestern China. *Ore Geol. Rev.* **2016**. Vol. 79. P.408–424.