

УДК 549.2+549.3+553.411 (470.54)

DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-1-1

**МИНЕРАЛОГИЯ ВОРОНЦОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
(СЕВЕРНЫЙ УРАЛ).
ЧАСТЬ 2: ПРОСТЫЕ ВЕЩЕСТВА, СУЛЬФИДЫ, АРСЕНИДЫ, ТЕЛЛУРИДЫ**

**А.В. Касаткин¹, С.Ю. Степанов², М.В. Цыганко³, Р. Шкода⁴, Ф. Нестола⁵,
Я. Плашил⁶, Э. Маковицки⁷, А.А. Агаханов¹, Р.С. Паламарчук⁸**

¹ Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Ленинский пр. 18/2, Москва,
119071 Россия; anatoly.kasatkin@gmail.com

² Институт геологии и геохимии УрО РАН, ул. Академика Вонсовского, 15 Екатеринбург, 620016 Россия

³ Минералогический музей «Штуфной кабинет», ул. Ватутина 17а,
Североуральск, Свердловская обл., 624480 Россия

⁴ Масариков университет, Котлариска 2, Брно, 61137 Чехия

⁵ Университет Падуи, Виа Градениго 6, Падуя, 35131 Италия

⁶ Институт физики АНЧР, На Слованце 1999/2, Прага, 18221 Чехия

⁷ Университет Копенгагена, Остерволдгаде 10, ДК-1350, Копенгаген, Дания

⁸ Южно-Уральский федеральный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, Миасс,
Челябинская обл., 456317 Россия

Статья поступила в редакцию 29.12.2020 г., принята к печати 18.02.2021 г.

**MINERALOGY OF THE VORONTSOVSKOE GOLD DEPOSIT (NORTHERN URALS).
PART 2: NATIVE ELEMENTS, SULFIDES, ARSENIDES, TELLURIDES**

**A.V. Kasatkin¹, S.Yu. Stepanov², M.V. Tsyganko³, R. Škoda⁴, F. Nestola⁵,
J. Plášil⁶, E. Makovicky⁷, A.A. Agakhanov¹, R.S. Palamarchuk⁸**

¹ Fersman Mineralogical Museum RAS, Leninsky pr. 18/2 Moscow, 119071 Russia; anatoly.kasatkin@gmail.com

² Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, ul. Akademika Vonsovskogo 15, Yekaterinburg, 620016 Russia

³ Mineralogical Museum «Shtufnoi Kabinet», ul. Vatutina 17a, Severouralsk, Sverdlovsk oblast, 624480 Russia

⁴ Masaryk University, Kotlářská 2, Brno, 61137 Czech Republic

⁵ University of Padova, Via Gradenigo 6, Padova, 35131 Italy

⁶ Institute of Physics ASCR, v.v.i., Na Slovance 1999/2, Prague, 18221 Czech Republic

⁷ University of Copenhagen, Østervoldgade 10, DK-1350, Copenhagen, Denmark

⁸ South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia

Received 29.12.2020, accepted 18.02.2021

Аннотация. Данная статья продолжает серию публикаций, посвященных минералогии Воронцовского золоторудного месторождения на Северном Урале (Касаткин и др., 2020). Описаны найденные на месторождении простые вещества, сульфиды, арсениды и теллуриды, приведены их химический состав, а для ряда минералов – параметры элементарных ячеек и оптические свойства. Находки гетчеллита, дюраниозита, парареальгара и пикополита являются первыми в Российской Федерации.

Ключевые слова: Воронцовское месторождение, Северный Урал, простые вещества, сульфиды, арсениды, теллуриды, первые находки в России.

Abstract. The paper continues a series of publications devoted to the mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit in the Northern Urals (Kasatkin et al., 2020). The paper reports on native elements, sulfides, arsenides and tellurides discovered at the deposit, their chemical compositions, as well as unit-cell parameters

and optical properties of some minerals. Getchellite, duranusite, pararealgar and picotpaulite are found for the first time in Russia.

Keywords: Vorontsovskoe deposit, Northern Urals, native elements, sulfides, arsenides, tellurides, first findings in Russia.

Для цитирования: Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицкий Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 2. Простые вещества, сульфиды, арсениды, теллуриды. Минералогия, 7(1), 5–22. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-1-1.

For citation: Kasatkin A.V., Stepanov S.Yu., Tsyganko M.V., Škoda R., Nestola F., Plášil J., Makovický E., Agakhanov A.A., Palamarchuk R.S. Mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). Part 2: native elements, sulfides, arsenides, tellurides. Mineralogy, 7(1), 5–22. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-1-1.

Введение

Настоящая статья является второй в серии публикаций о минералогии Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). В первой части (Касаткин и др., 2020) охарактеризованы история изучения месторождения, его геологическое положение и строение, типы руд, методы исследований, а также дан полный минеральный кадастр. В изученных образцах установлено девять устойчивых рудных минеральных ассоциаций: боскардинит-экранситовая (№ 1), воронцовит-гунгеровитовая (№ 2), гладковскиитовая (арсеносульфидная) (№ 3), киноварь-колорадоит-парапьерротитовая (№ 4), люборжакит-клеритовая (№ 5), ассоциация с самородным мышьяком (№ 6), цыганкоитом (№ 7) и минералами висмута (№ 8), а также гипергенная ассоциация (№ 9) (Касаткин и др., 2020). Эта и последующие части посвящены описанию конкретных минералов, достоверно установленных на месторождении как нами, так и предыдущими исследователями. Ниже речь пойдет о простых веществах, сульфидах, арсенидах и теллуридах. В статье использованы следующие обозначения минералов: Alb – алабандин, Ant – антимонит, Ару – арсенопирит, Агс – мышьяк, As₂O₃ – арсенолит/клаудетит, Au – золото, Cal – кальцит, Сср – халькопирит, Cln – клинохлор, Cnb – киноварь, Col – колорадоит, Dur – дюранозит, Hwl – хоулиит, Jlp – ялпаит, Jos – жозеит-А, Mgt – магнетит, Mtc – метациннабарит, Огр – аурипигмент, Pic – пикополит, Pyg – пирит, Rlg – реальгар, Rtr – рутьерит, Sph – сфалерит, Tdm – тетрадимит, Til – тилазит, Tnt – теннантит, Tsg – цыганкоит. Указанные ниже номера минеральных ассоциаций даны по (Касаткин и др., 2020).

Простые вещества

Самородное золото является главным объектом промышленной добычи на месторождении, по-

этому в минералогическом плане оно изучено очень детально (Сазонов и др., 1991; Мурзин, Варламов, 2010; Мурзин и др., 2011; Викентьев и др., 2016). В разных ассоциациях этот минерал образует мелкие (обычно не превышающие 0.1 мм) округлые и угловатые частицы, интерстициальные, пластинчатые и комковатые формы, а также зерна с элементами кристаллографической огранки. Обычны скопления кристаллов золота в кварц-слюдисто-карбонатной массе, реже фиксируются сростки самородного золота с реальгаром или выполнение им микротрещин в метакристаллах пирита. Часто изометричные кристаллы, округлые и удлинённые выделения самородного золота заключены в агрегатах пирита, арсенопирита, самородного мышьяка, свинцовых сульфосолей, блеклых руд. Химический состав самородного золота разных ассоциаций подробно изучен. По данным (Викентьев и др., 2016) примесь Ag варьирует практически от нуля в аурипигмент-реальгаровых рудах карбонатных брекчий и аргиллизитах (пробность золота достигает 989 и 993 ‰, соответственно) до 37.8 мас. % в пирит-пирротитовых рудах скарнов (пробность такого золота наиболее низкая – всего 614 ‰). Также в составе самородного золота фиксируется примесь Hg (до 5.5 мас. %) и Cu (до 0.7 мас. %).

Нами в 2016 г. на рудном складе встречено рекордно крупное для месторождения полумиллиметровое выделение самородного золота в кальците (рис. 1а). Оно также наблюдалось нами во всех без исключения изученных минеральных ассоциациях. Чаще всего оно встречается в ассоциации 6 (здесь и далее номера ассоциаций по (Касаткин и др., 2020)), где образует вкрапленность зерен до 0.1 мм в нерудных минералах брекчий (карбонаты, кварц, барит, мусковит и др.), самородном мышьяке и замещающих его гипергенных оксидах (арсенолит, клаудетит), на контакте последних с реальгаром и арсенопиритом (рис. 2г). В данной ассоциации оно представлено серебри-

сто-ртутистой разновидностью. Средний состав 10 зерен (мас. %): Ag 5.01, Au 87.12, Hg 8.42, сумма 100.55. Эмпирическая формула (расчет на сумму атомов, равную 1): $\text{Au}_{0.83}\text{Ag}_{0.09}\text{Hg}_{0.08}$.

Самородная медь по результатам оптических наблюдений отмечалась в составе продуктов гипергенного окисления сфалерита с эмульсионной вкрапленностью халькопирита в гранатовом скарне (Викентьев и др., 2016).

Самородный мышьяк впервые на месторождении описан В.Н. Сазоновым с соавторами (1991). В цементе рудных брекчий он составляет изометричные кристаллы или неправильные выделения размером до 1 мм. Зафиксирована также его эмульсионная вкрапленность (до 10–15 мкм) в антимоните. Минерал диагностирован по оптическим свойствам, химическому составу и дебаеграмме. В качестве примесей в самородном мышьяке зафиксированы Sb и S в количествах до 0.1 мас. %. В 2007 г. в Северном карьере было вскрыто массивное скопление самородного мышьяка, весившее более тонны (Викентьев и др., 2016). Оно приурочено к метасоматически измененным туфогенным породам, слагающим верхнюю часть месторождения. Метасоматит представлен существенно кварцевой массой, рассеянной зонами брекчирования мощностью до 5 см, к которым приурочены прожилки, линзы и гнезда агрегатов крупных зерен самородного мышьяка. Размер его мономинеральных обособлений достигает здесь 2–3 см. Самородный мышьяк и призматический арсенопирит распространены также и в массе породы вне зон брекчирования, где они формируют густую равномерно рассеянную вкрапленность с размером выделений не более 0.5 мм. В самородном мышьяке заключены многочисленные зерна самородного золота. В самородном мышьяке не зафиксированы примеси, содержание которых было бы выше порога обнаружения электронно-зондовым методом. Поверхность самородного мышьяка на воздухе быстро окисляется и покрывается пленкой арсенолита. В этой же минеральной ассоциации установлены алабандин, сфалерит, блёклые руды переменного состава, Cl-содержащий фторапатит (Мурзин и др., 2011).

В 2010 г. нам были переданы образцы самородного мышьяка из материала, добытого в 2007 г. Минерал в них составляет прожилки мощностью до 3 см, состоящие из коричневых до черных пластинчатых агрегатов, как свежих, так и частично окисленных с поверхности до арсенолита и клаудетита, в ассоциации с ярко-красным реальгаром и

желтым пленочным аурипигментом (рис. 2а–в, 1д). Изучение самородного мышьяка электронно-зондовым методом показало, что в его составе присутствует только As, и он содержит многочисленные микровостки самородного золота, арсенопирита, бурнонита и теннантита-(Fe). Рассчитанные по дифрактограмме параметры гексагональной элементарной ячейки приведены в табл. 1, № 1.

Ранее нами уже отмечалось (Касаткин и др., 2020), что образцы с самородным мышьяком из ассоциации 6, отобранные в отвалах Северного карьера, с большой долей вероятности также происходят из материала, отобранного в 2007 г. Самородный мышьяк здесь является главным рудным минералом. Он встречается в скоплениях до 3–4 см, изометричных зернах, почках, сростающихся с нерудными минералами цемента брекчий (кальцитом, доломитом, кварцем, баритом, клинохлором, мусковитом и др.) и содержащих востки реальгара, арсенопирита, пирита, блёклых руд переменного состава, а также обильную вкрапленность самородного золота в зернах до 0.1 мм. По самородному мышьяку развиваются пленки и корки гипергенных оксидов As^{3+} – арсенолита и клаудетита (рис. 2г). В составе минерала электронно-зондовым анализом примеси не обнаружены. В ассоциации 4 самородный мышьяк редок. Здесь он составляет мелкие (не более 50 мкм) включения в антимоните и на контакте последнего с карбонатами (кальцит, доломит) (рис. 3б). Минерал наблюдается совместно с различными Pb-Cu-Ag-содержащими сульфосолями (андорит, теннантит-(Zn), цинкенил), аурипигментом, реальгаром, колорадоитом, сфалеритом.

Самородное серебро отмечено в виде редкой очень мелкой вкрапленности в рудах (Викентьев и др., 2016). Нами Au-содержащее серебро («кюстелит») установлено в виде очень редких округлых зерен диаметром не более 20 мкм в аурипигменте из ассоциации 1. Его химический состав (мас. %): Ag 71.68, Au 28.15, сумма 99.83. Эмпирическая формула (расчет на сумму атомов, равную 1): $\text{Ag}_{0.82}\text{Au}_{0.18}$.

Сульфиды, арсениды, теллуриды

Акантит Ag_2S очень редок. В ассоциациях 1 и 4 встречаются его единичные обособления округлой формы размером не более 10 мкм в кальците. По химическому составу минерал близок к стехиометричному Ag_2S (табл. 2, ан. 1).

Алабандин MnS на месторождении обнаружен в одном образце в виде кристаллов или вы-

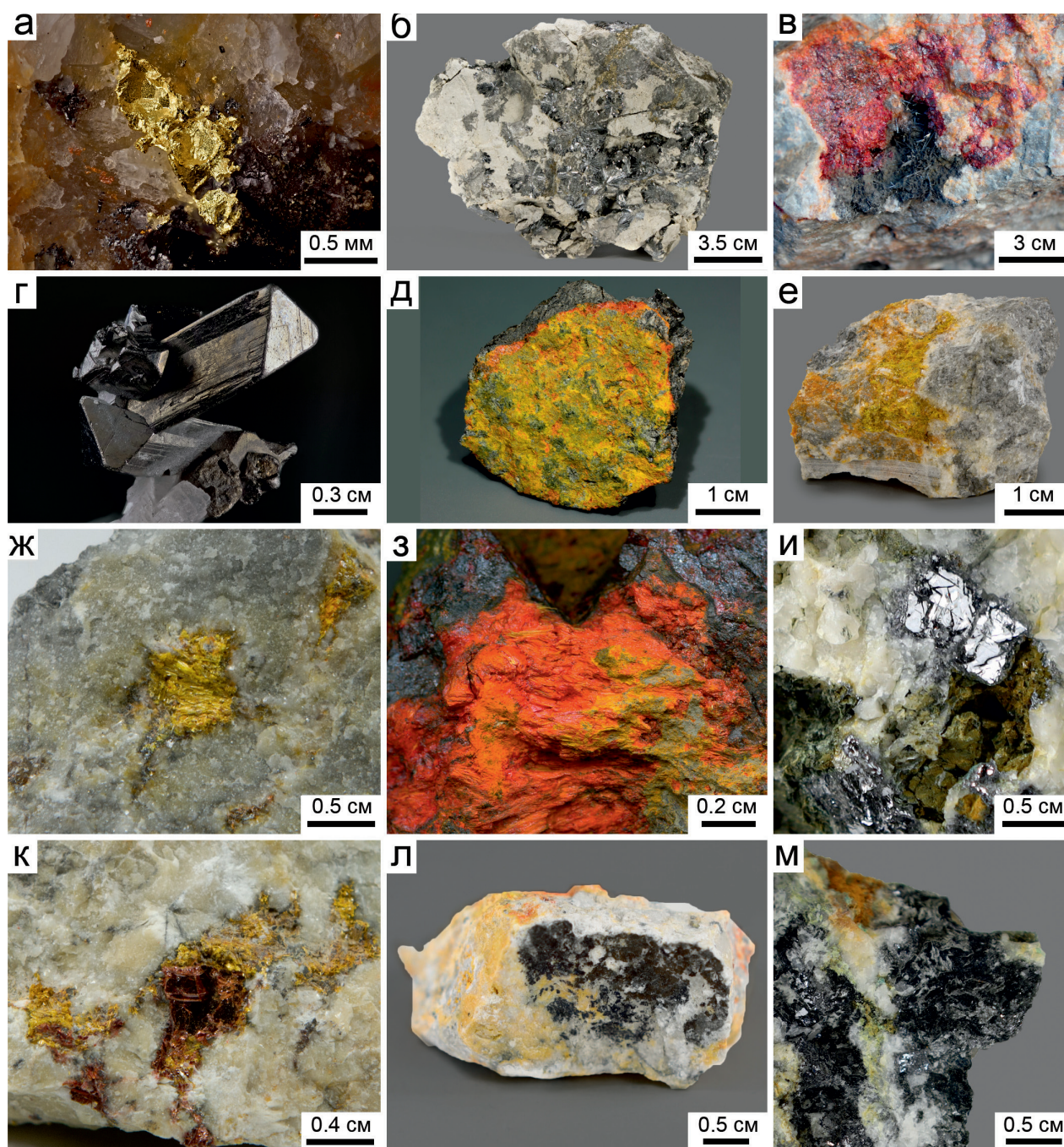


Рис. 1. Простые вещества и сульфиды Воронцовского месторождения:

а – кристаллический агрегат золота в кальците; б – радиально-лучистые агрегаты свинцово-серых кристаллов антимонита на доломите и кальците в ассоциации с золотистым пиритом; в – игольчатые кристаллы антимонита до 1 см в полостях карбонатной породы с ярко-красным реальгаром; г – сросток призматических кристаллов арсенопирита; д – прожилок ярко-желтого аурипигмента с ярко-красным реальгаром, рассекающий скопление самородного мышьяка; е – ярко-желтые волокнистые кристаллы вакабаяшилита в кальците и доломите с темным пиритом и антимонитом; ж – гнездо ярко-желтого вакабаяшилита в брекчии; з – желтый волокнистый вакабаяшилит, обильно прокрашенный ярко-красным порошковатым реальгаром; и – свинцово-серые изометричные кристаллы галенита в кварце; к – темно-красные пластинчатые выделения гетчеллита в кальцит-доломитовом агрегате с желтым вакабаяшилитом; л – темно-коричневые корочки грейгита на кальцит-доломитовом мраморе; м – черные порошковатые выделения джарлеита и ковеллина, развивающиеся по галениту.

Коллекции: А.В. Касаткина (б, е, ж, и–м), музея «Штуфной кабинет», г. Североуральск (а, в, г, з), В.В. Левицкого (д). Фото А.Д. Касаткиной (б, е, ж, и–м), М.В. Цыганко (в, з), Т.В. Пашко (а, г), В.В. Левицкого (д).

Fig. 1. Elements and sulfides of the Vorontsovskoe deposit, part I:

а – crystalline aggregate of native gold in calcite; б – radial aggregates of lead gray stibnite crystals on dolomite and calcite in assemblage with golden yellow pyrite; в – acicular stibnite crystals up to 1 cm in cavities of carbonate rock with brightly red realgar; г – cluster of prismatic arsenopyrite crystals; д – veinlet of brightly yellow orpiment with brightly red realgar in aggregate of native arsenic; е – brightly yellow fibrous wakabayashilite in calcite and dolomite with dark pyrite and stibnite; ж – pocket of brightly yellow wakabayashilite in breccia; з – yellow fibrous wakabayashilite colored by brightly red powdery realgar; и – lead gray isometric galena crystals in quartz matrix; к – dark red platy getchellite crystals in calcite-dolomite matrix with yellow wakabayashilite; л – dark brown greigite crusts on calcite-dolomite marble; м – black powdery djurleite and covellite aggregates on galena.

Collections: A.V. Kasatkin (б, е, ж, и–м), Museum Shtufnoi Kabinet, Severouralsk (а, в, г, з), V.V. Levitsky (д). Photo by A.D. Kasatkina (б, е, ж, и–м), M.V. Tsyganko (в, з), T.V. Pashko (а, г), V.V. Levitsky (д).

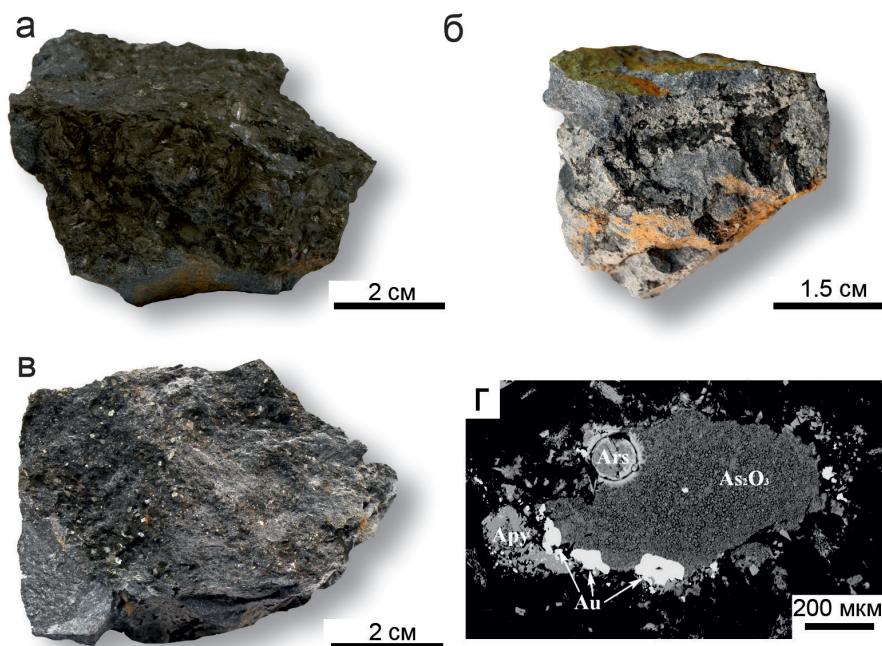


Рис. 2. Морфология самородного мышьяка Воронцовского месторождения:

а – мономинеральное выделение коричневого цвета; б – черные агрегаты в ассоциации с порошковатыми налетами белого арсенолита/клаудетита, пленками желтого аурипигмента и оранжевого реальгара; в – грубозернистый агрегат с хорошо видимой совершенной спайностью; г – почка с развивающимся вокруг гипергенным арсенолитом/клаудетитом в ассоциации с золотом и арсенопиритом в нерудной массе брекчий (кварц, кальцит, мусковит).

Коллекции: А.В. Касаткина (а, г), музея «Штуфной кабинет», г. Североуральск (б, в). Фото А.Д. Касаткиной (а), М.В. Цыганко (б, в), РЭМ-фото в отраженных электронах (г).

Fig. 2. Morphology of native arsenic of the Vorontsovskoe deposit:

а – monomineral brown aggregate; б – black aggregates in assemblage with powdery coatings of white arsenolite/claudeite, films of yellow orpiment and orange realgar; в – coarse-grained aggregate with perfect cleavage; г – nodule partially altered to supergene arsenolite/claudeite in assemblage with native gold and arsenopyrite in quartz, calcite and muscovite matrix.

Collections: A.V. Kasatkin (а, г), Museum Shtufnoi Kabinet, Severouralsk (б, в). Photo: A.D. Kasatkina (а), M.V. Tsyganko (б, в), BSE image (г).

делений неправильной формы размером 0.05–0.1 мм в карбонатной массе, иногда в сростках с пиритом. Диагностирован по химическому составу (отмечены примеси Fe до 3.5 мас. %, Cd и Hg – до 0.1 мас. %) и оптическим свойствам (Сазонов и др., 1991). Позднее беспримесный стехиометричный алабандин встречен в виде выделений размером до 0.15 мм в нерудных минералах брекчий в ассоци-

ации с грейгитом, а также в виде отдельных кристаллов и сростков с сульфосолями Mn в реальгаре (Мурзин, Варламов, 2010). В самородном мышьяке и арсенопирите из образцов 2007 г. установлены зерна алабандина округлой или овальной формы размером до 50–70 мкм, содержащие небольшие примеси Fe (0.6 мас. %) и Zn (0.1 мас. %) (Мурзин и др., 2011).

Таблица 1
Table 1
Параметры элементарных ячеек минералов Воронцовского месторождения
Unit-cell parameters of minerals of the Vorontsovskoe deposit

№ п/п	Минерал	№ ас.	Сингония	Параметры элементарной ячейки						Метод	
				a, Å	b, Å	c, Å	α, °	β, °	γ, °		
1	Мышьяк	6	Триг.	3.7395(2)		10.5246(8)				127.46(2)	ПР
2	Алабадин	1	Куб.	5.200(1)						140.61(7)	МКР
3	Антимонит	4	Ромб.	11.280(2)						487.5(1)	МКР
4	Арсенопирит	8	Мон.	5.739(5)	11.276(2)	3.833(1)			112.05(8)	174.8(2)	МКР
5	Аурипигмент	3	Мон.	11.475(1)	5.690(5)	5.775(4)			90.52(1)	464.52(7)	ПР
6	Вакабаяшиллит	1	Ромб.	25.21(3)	9.528(1)	4.248(1)				2450(16)	МКР
7	Вакабаяшиллит	2	Ромб.	25.40(3)	14.62(3)	6.65(4)				2378(4)	МКР
8	Галенит	9	Куб.	5.9522(10)	14.558(10)	6.432(5)				211.12(8)	МКР
9	Гетчеллит	1	Мон.	11.910(4)	9.0389 (13)	10.168 (9)			116.23(7)	981.9(9)	МКР
10	Грейгит	2	Куб.	9.8894(8)						967.20(22)	ПР
11	Джарлеит	9	Мон.	26.908(6)	15.722(2)	13.513(2)			90.42(2)	5716(1)	ПР
12	Киноварь	1	Триг.	4.1590(5)		9.212(2)				138.00(4)	ПР
13	Киноварь	4	Триг.	4.1473(3)		9.467(1)				141.01(2)	ПР
14	Ковеллин	9	Гекс.	3.7863(2)		16.352(2)				203.01(2)	ПР
15	Колорадоит		Куб.	6.435(11)						266.5(8)	МКР
16	Лёллингит	4	Ромб.	5.2846(9)	5.9669(8)	2.8736(7)				90.61(2)	ПР
17	Метациннабарит	4	Куб.	5.7295(3)						188.08(3)	ПР
18	Парареальгар	2	Мон.	9.968(3)	9.690(5)	8.574(8)			97.11(5)	821.9(9)	МКР
19	Пирит	1	Куб.	5.4145(4)						158.74(4)	МКР
20	Пирит	9	Куб.	5.408(13)						158.2(6)	МКР
21	Реальгар	1	Мон.	9.325(1)	13.562(2)	6.586(1)			106.43(2)	798.9(2)	ПР
22	Сфалерит	1	Куб.	5.4047(4)						157.88(3)	ПР
23	Халькопирит	1	Тетр.	5.300(3)		10.439(9)				293.2(3)	МКР
24	Хоулит	9	Куб.	5.8060(6)						195.71(6)	МКР

Примечание. № ас. – номер минеральной ассоциации; ПР – расчет по данным порошковой рентгенографии; МКР – монокристаллическая рентгенография.
Note. № ас. – number of mineral assemblage; ПР and МКР – unit-cell parameters calculated from powder and single-crystal X-ray diffraction data, respectively

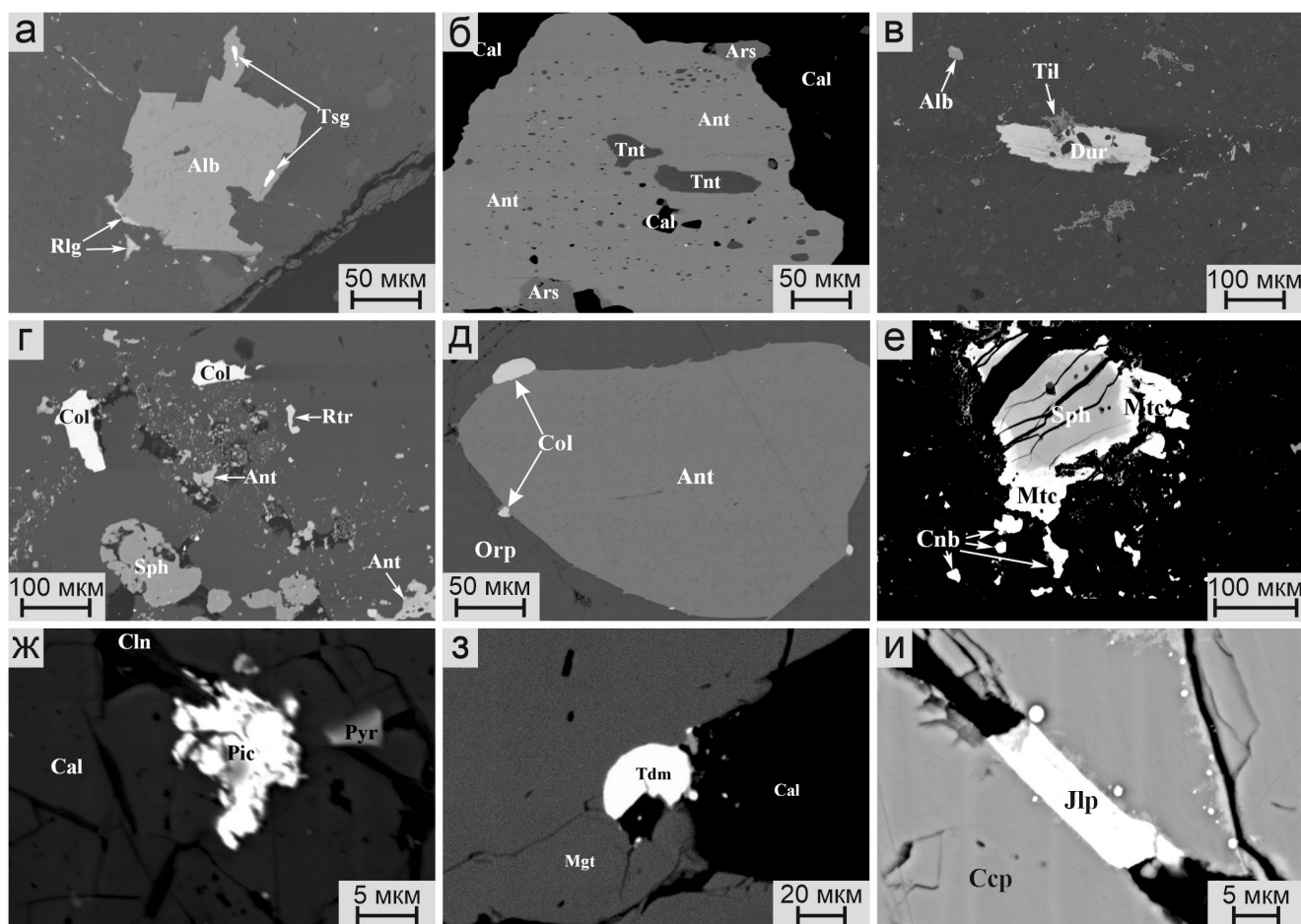


Рис. 3. Сульфиды, теллуриды и сульфосоли в карбонатных брекчиях Воронцовского месторождения:

а – сросток кристаллов алабандина с включениями мелких кристаллов цыганкоита и каймой реальгара в доломите и кальците; б – антимонит с включениями теннантита-(Zn) и мышьяка в кальците; в – призматический кристалл дюранюзита, обрастающий тилазитом в доломите и кальците с алабандином; г – крупные выделения колорадоита в ассоциации со сфалеритом, антимонитом и рутьеритом в кальците (монокристалльные рентгеновские данные для колорадоита были получены с левого зерна); д – зерна колорадоита (белые) на контакте антимонита и аурипигмента; е – каймы цинкисто-марганцовистого метациннабарита вокруг зерна ртутисто-марганцовистого сфалерита в нерудных минералах (доломит, кальцит, кварц) в ассоциации с киноварью; ж – зерно пикополита в кальците и клинохлоре с мелким кристаллом пирита; з – округлое зерно тетрадимита на контакте магнетита и кальцита; и – призматический кристалл ялпайта в халькопирите. РЭМ-фото в отраженных электронах.

Fig. 3. Sulfides, tellurides and sulfosalts in carbonate breccias of the Vorontsovskoe deposit:

а – crystalline aggregate of alabandite with inclusions of small tsyganokite crystals and realgar rim in dolomite and calcite; б – stibnite with inclusions of tennantite-(Zn) and native arsenic in calcite; в – prismatic duranuzite crystal rimmed by tilasite in dolomite and calcite with alabandite; г – large aggregate of coloradoite in assemblage with sphalerite, stibnite and routhierite in calcite (single-crystal XRD data for coloradoite were obtained from the left grain); д – coloradoite grains (white) at the contact with stibnite and orpiment; е – Zn-Mn-bearing metacinnabar rimming the grain of Hg-Mn-bearing sphalerite in dolomite, calcite and quartz matrix with cinnabar; ж – picotpaulite grain in calcite and clinocllore with small pyrite crystal; з – round tetradymite grain at the contact with magnetite and calcite; и – prismatic jalpaite crystal in chalcopryrite. BSE images.

Нами алабандин обнаружен в ассоциациях 1, 3, 5 и 7. В первой из них он редок, тогда как в трех других распространен широко. Обычно минерал образует кубические кристаллы или гипидиоморфные зерна до 0.2 мм, рассеянные в нерудных минералах брекчий (рис. 3а, в). Будучи более ранним по

времени отложения, алабандин служит источником Mn для более поздних низкотемпературных сульфосолей: в шлифах часто наблюдаются реликты алабандина в Mn-содержащих арсено- и антимон-сульфидах (гладковскиит, люборжакит, цыганкоит), вплоть до образования почти полных псевдомор-

Таблица 2

Table 2

Химический состав (мас. %) сульфидов, арсенидов и теллуридов Воронцовского месторождения

Chemical composition (wt. %) of sulfides, arsenides and tellurides of the Vorontsovskoe deposit

№ ан.	№ ас.	Минерал	Mn	Fe	Cu	Zn	Ag	Hg	Pb	Bi	As	Sb	Te	S	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	1	Акантит	—	—	—	—	86.92	—	—	—	—	—	—	12.68	99.60	$Ag_{2,01}S_{0,99}$
2	7	Алабадин	63.18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	37.04	100.22	$Mn_{1,00}S_{1,00}$
3	4	Антимонит	—	—	—	—	—	—	0.23	—	0.76	70.69	—	27.90	99.58	$(Sb_{1,99}As_{0,03})_{2,02}S_{2,98}$
4	2	Аурипигмент	—	—	—	—	—	—	—	—	59.16	1.45	—	38.81	99.42	$(As_{1,96}Sb_{0,03})_{1,99}S_{3,01}$
5	9	Борнит	—	11.23	63.45	—	—	—	—	—	—	—	—	25.65	100.33	$Cu_{4,99}Fe_{1,01}S_{4,00}$
6	1	Вакабаяшиллит	—	—	—	—	—	—	—	—	56.17	6.51	—	36.42	99.10	$As_{9,28}Sb_{0,66}S_{14,06}$
7	8	Висмутин	—	—	—	—	—	—	—	81.44	—	—	—	18.76	100.20	$Bi_{2,00}S_{3,00}$
8	9	Галенит	—	—	—	—	—	—	86.62	—	—	—	—	13.45	100.07	$Pb_{1,00}S_{1,00}$
9	4	Герсдорфит	—	1.06	—	—	—	—	—	—	44.03	—	—	19.82	100.92	$(Ni_{0,64}Co_{0,36}Fe_{0,03})_{1,03}As_{0,96}S_{1,01}$
10	6	Гессит	—	—	—	—	64.95	—	—	—	—	—	34.92	—	99.87	$Ag_{2,06}Te_{0,94}$
11	1	Гетчеллит	—	—	—	—	—	—	—	—	26.06	41.80	—	33.18	101.04	$As_{1,01}Sb_{0,99}S_{3,00}$
12	1	Грейгит	—	56.78	—	—	—	—	—	—	—	—	—	42.33	99.11	$Fe_{3,05}S_{3,95}$
13	9	Джарлеит	—	—	79.03	—	—	—	—	—	—	—	—	20.46	99.49	$Cu_{31,06}S_{15,94}$
14	7	Дуранозит	—	—	—	—	—	—	—	—	91.00	—	—	9.61	100.61	$As_{4,01}S_{0,99}$
15	8	Жозеит-А	—	—	—	—	0.15	—	0.50	79.72	—	—	11.73	5.81	99.04	$Bi_{3,97}Pb_{0,03}Ag_{0,01}Te_{0,96}(S_{1,89}Se_{0,15})_{2,04}$
16	8	Икунолит	—	—	0.04	—	—	—	1.89	82.47	—	—	5.86	8.51	99.56	$Bi_{3,81}Pb_{0,09}Cu_{0,01}(S_{2,56}Te_{0,44}Se_{0,10})_{3,10}$
17	2	Киноварь	—	—	—	—	—	78.66	—	—	—	—	—	7.44	99.97	$Hg_{0,98}(S_{0,58}Se_{0,44})_{1,02}$
18	9	Ковеллин	—	—	65.23	—	—	—	—	—	—	—	—	35.12	100.35	$Cu_{0,97}S_{1,03}$
19	9	Колорадоит	—	—	—	—	—	61.45	—	—	—	—	39.44	—	100.89	$Hg_{1,00}Te_{1,00}$
20	6	Кубанит	—	41.29	23.69	—	—	—	—	—	—	—	—	35.10	100.08	$Cu_{1,01}Fe_{2,01}S_{2,98}$
21	6	Лёллингит	—	28.57	—	—	—	—	—	—	69.44	—	—	1.28	99.29	$Fe_{1,04}As_{1,88}S_{0,08}$
22	4	Метациннабарит	—	—	—	10.85	—	71.60	—	—	—	—	—	17.25	99.70	$(Hg_{0,67}Zn_{0,31})_{0,98}S_{1,01}$
23	4	Метациннабарит	1.70	—	—	15.01	—	64.12	—	—	—	—	—	18.50	99.33	$(Hg_{0,55}Zn_{0,40}Mn_{0,05})_{1,00}S_{1,00}$
24	2	Парарсальгар	—	—	—	—	—	—	—	—	69.48	—	—	29.85	99.33	$As_{3,99}S_{4,01}$
25	4	Пикополит	—	27.21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23.86	100.36	$Tl_{0,98}Fe_{1,99}S_{3,03}$
26	4	Реальгар	—	—	—	—	—	—	—	—	68.89	—	—	29.87	98.76	$As_{0,99}S_{1,01}$
27	4	Сфалерит	3.43	—	—	45.04	—	23.10	—	—	—	—	—	27.73	99.30	$(Zn_{0,80}Hg_{0,13}Mn_{0,07})_{1,00}S_{1,00}$
28	4	Сфалерит	—	—	—	66.94	—	—	—	—	—	—	—	32.80	99.74	$Zn_{1,00}S_{1,00}$
29	8	Тетрадимит	—	—	—	—	—	—	—	59.14	—	—	36.70	4.15	100.32	$Bi_{2,01}Te_{2,04}(S_{0,92}Se_{0,03})_{0,95}$
30	8	Халькопирит	—	30.56	35.15	—	—	—	—	—	—	—	—	35.12	100.83	$Cu_{1,01}Fe_{1,00}S_{2,00}$
31	8	Ялпаит	—	—	14.01	—	70.21	—	—	—	—	—	—	13.89	98.11	$Ag_{2,99}Cu_{1,01}S_{1,99}$

Примечание. № ан. – номер анализа, № ас. – номер минеральной ассоциации. Суммы анализов включают (мас. %) 13.15 Co, 22.86 Ni (ан. 8), 1.13 Se (ан. 15), 0.79 Se (ан. 16), 13.87 Se (ан. 17), 49.29 Tl (ан. 25) и 0.33 Se (ан. 29). Анализы 19 и 26 – средние значения по 15 и 20 анализам колорадоита и реальгара из разных ассоциаций, соответственно. Прочерк – содержание компонента ниже предела обнаружения. Образцы: № Vor-8bis-2 – ан. 1, № Vor-10-1 – ан. 2, 14, № СК-18-19 – ан. 3, № Vor-6/н-9 – ан. 4, № Vor-08/20-11 – ан. 5, № 610В – ан. 6, № Kas172 #11 – ан. 7, 15, 16, 29, № Vor-06/20-5 – ан. 8, № Vor-3 – ан. 9, 25, 26, № Vor-01/16-1a – ан. 10, № 862Г – ан. 11, № 1099Г – ан. 12, № Vor-03/16-6-6 – ан. 13, 14, № Vor-06/20-11 – ан. 17, № Vor-06/20-11 – ан. 18, 19, № Vor-01/16-1b – ан. 20, № 534Л – ан. 21, № 973М – ан. 22, № Vor-08/16-11-1 – ан. 23, 27, № Vor-08/20-7 – ан. 24, № 1221С – ан. 28, № 1066А – ан. 30, № Vor-08/20-8 – ан. 31. Формулы минералов рассчитаны на сумму атомов, равную двум (алабандин, ковеллит, кинобар, колорадоит, метациннабарит, реальгар, сфалерит), трем (акантит, гессит, лёллингит), четырем (халькопирит), пяти (антимонит, аурипигмент, висмутин, гетчеллит, дуранинит, тетрадимит), шести (герсдорфит, кубанит, пикополит, яллаит), семи (грейнит, жозеит-А, икунолит), восьми (парареальгар), десяти (борнит), 24 (вакабаяшиллит) и 47 (джарлеит).

Note. № ан. – number of analyses, № ас. – number of assemblage. The analytical total includes (wt. %) 13.15 Co, 22.86 Ni (ан. 8), 1.13 Se (ан. 15), 0.79 Se (ан. 16), 13.87 Se (ан. 17), 49.29 Tl (ан. 25) and 0.33 Se (ан. 29). Analyses 19 and 25 are the average values of 15 and 20 analyses of coloradoite and realgar from various assemblages. Dash – the content of element is below detection limit. Samples: № Vor-8bis-2 – ан. 1, № Vor-10-1 – ан. 2, 14, № СК-18-19 – ан. 3, № Vor-6/н-9 – ан. 4, № Vor-08/20-11 – ан. 5, № 610В – ан. 6, № Kas172 #11 – ан. 7, 15, 16, 29, № Vor-06/20-5 – ан. 8, № Vor-3 – ан. 9, 25, 26, № Vor-01/16-1a – ан. 10, № 862Г – ан. 11, № 1099Г – ан. 12, № Vor-03/16-6-6 – ан. 13, 14, № Vor-06/20-11 – ан. 17, № Vor-06/20-11 – ан. 18, 19, № Vor-01/16-1b – ан. 20, № 534Л – ан. 21, № 973М – ан. 22, № Vor-08/16-11-1 – ан. 23, 27, № Vor-08/20-7 – ан. 24, № 1221С – ан. 28, № 1066А – ан. 30, № Vor-08/20-8 – ан. 31. The mineral formulas are recalculated to atom sum of two (alabandite, galena, cinnabar, covellite, coloradoite, metacinnabar, realgar, sphalerite), three (chalcopyrite), four (chalcopyrite), five (stibnite, orpiment, bismuthinite, getchellite, duraninite, tetradymite), six (gersdorffite, cubanite, picotpaullite, jalpaite), seven (greigite, joséite-A, ikunolite), eight (pararealgar), ten (bornite), 24 (wakabayashilite) and 47 (djurleite).

фоз этих минералов по алабандину. Отмечаются и мелкие включения Mn-содержащих сульфосолей в кристаллах алабандина (рис. 3а). Минерал имеет черный цвет и полуметаллический блеск. В отраженном свете он серовато-белый, а на контакте с имеющим более высокую отражательную способность цыганкоитом – светло-серый. Химический состав алабандина стехиометричен (табл. 2, ан. 2). Параметр кубической элементарной ячейки приведен в табл. 1, № 2.

Антимонит Sb_2S_3 широко распространен на месторождении. В рудных брекчиях он образует игольчатые кристаллы размером до 0.2 мм или более крупные (до 3 мм) выделения неправильной формы, иногда тесно сростается с цинкениитом и халькостибитом и содержит включения самородных золота и мышьяка. Определен по оптическим свойствам и химическому составу. Минерал часто содержит примесь As (до 3.5 мас. %) (Сазонов и др., 1991). В более поздней работе (Мурзин, Варламов, 2010) минерал описан в виде редких зерен и угловатых интерстициальных выделений размером не более 0.1 мм в карбонате, часто в сростаниях с сульфосолями Hg и Tl. В его составе фиксируется до 7.5 мас. % As. В коллекции первого автора имеется крупный образец антимонита из рудной зоны Северного карьера, найденный в начале 1990-х гг. Минерал здесь слагает эффектные радиально-лучистые агрегаты диаметром до 2 см, состоящие из свинцово-серых призматических и игольчатых кристаллов, в открытой полости доломит-кальцитовый породы в ассоциации с пиритом и арсенопиритом (рис. 1б). В ассоциации 4 антимонит является главным рудным минералом наряду с пиритом и реальгаром. Он образует игольчатые кристаллы до 1 см и зерна неправильной формы в доломит-кальцитовый породе, сростаясь с аурипигментом и реальгаром (рис. 1в). В свою очередь, антимонит содержит многочисленные мелкие включения различных Pb-Cu-Ag-содержащих сульфосолей (андорит, теннантит (Zn), цинкениит), колорадоита, самородного мышьяка (рис. 3б). Минерал изучен химически (табл. 2, ан. 3) и рентгенографически (табл. 1, № 3).

Арсенопирит $FeAsS$ наряду с пиритом является одним из главных рудных минералов измененных вулканогенно-осадочных пород: содержания обоих сульфидов достигают 20–30 об. %. Арсенопирит образует здесь метакристаллы от 0.05 до 2–3 мм, а также замещает стенки раковин или зерна породообразующих минералов. В брекчиях арсенопирит слагает игольчатые кристаллы длиной до 0.2 мм,

часто срastaется с пирротинoм. В составе минерала редко фиксируются примеси Ni (до 0.2 мас. %) и Co (до 0.1 мас. %). Также арсенопирит отмечен в рудной минерализации волластонитовых метасоматитов (Сазонов и др., 1991).

Арсенопирит присутствует в большинстве изученных нами минеральных ассоциаций. Особенно он обилен в ассоциациях 6 и 7, где является одним из главных рудных минералов. В ассоциации 6 арсенопирит образует вкрапленность идиоморфных кристаллов до 1 мм в самородном мышьяке и арсенолите/клаудетите, а также на их контактах с нерудными минералами и золотом (рис. 2г). Химический состав арсенопирита из ассоциации 6 подробно охарактеризован в статье (Мурзин и др., 2011). В 2018 г. в отвалах Южного карьера нами найдены образцы арсенопирита с хорошо образованными призматическими кристаллами до 1 см (рис. 1г) и массивными выделениями стальнo-серого цвета до 6×5 см. Минерал диагностирован по химическому составу и рентгенографически (табл. 1, № 4).

Аурипигмент As_2S_3 локализуется в наиболее проницаемых для растворов породах – брекчированных известняках. Распространен он меньше, чем реальгар, но всегда встречается совместно с ним. В редких случаях скопления аурипигмента видны невооруженным глазом, когда они придают руде лимонно-желтый цвет. Отдельные зерна приурочены к границам зерен карбонатов в брекчиях и в большинстве своем имеют неправильную форму. Чаще встречаются мелкие игольчатые кристаллы размером до 0.3 мм, вкрапленные в обломки известняка. Минерал диагностирован по химическому составу и дебаграмме. В нем фиксируется примесь Sb до 4.4 мас. % (Сазонов и др., 1991). В более поздних работах аурипигмент отмечен в карбонатном цементе брекчий в виде самостоятельных выделений до 1 мм, иногда содержащих включения реальгара (Мурзин, Варламов, 2010; Викентьев и др., 2016). Нами аурипигмент встречен во всех семи минеральных ассоциациях, приуроченных к карбонатным брекчиям, где он наряду с реальгаром, пиритом, а иногда с антимонитом и арсенопиритом цементирует нерудные минералы. Наиболее распространен в ассоциации 3, где он является одним из главных рудных минералов. В ассоциации 6 встречены эффектные желто-красные прожилки аурипигмент-реальгарового состава, секущие почки самородного мышьяка (рис. 1д). Нами в аурипигменте установлена незначительная примесь Sb – не более 1.5 мас. % (табл. 2, ан. 4).

Расчетные параметры моноклинной элементарной ячейки приведены в табл. 1, № 5.

Борнит Cu_5FeS_4 находится в переменных количествах в рудах, развитых в зонах скарнирования диоритов, вместе с преобладающим халькопиритом. Оба сульфида слагают прожилково-гнездообразные выделения размерами 1–10 мм, приуроченные к участкам эпидот-кальцитового, эпидот-актинолит-кальцитового и кварц-серицит-кальцитового состава. Минерал диагностирован по химическому составу (Викентьев и др., 2016). Нами борнит встречен только в ассоциации 9 в виде очень редких и мелких (не более 20 мкм) включений в кальците и кварце. Химический состав его стехиометричен (табл. 2, ан. 5). Оптические свойства воронцовского борнита характерны для этого минерала.

Вакабаяшиллит $(\text{As,Sb})_6\text{As}_4\text{S}_{14}$ идентифицирован в образцах, отобранных в 2015–2016 гг. на рудном складе карьера (Касаткин, 2019). По набору минералов-спутников он отнесен к ассоциации 1. Это один из самых эффектных минералов, встречающихся на месторождении: он образует шестоватые и спутанно-волокнистые агрегаты и кристаллы неправильной формы до 2 см в кальцит-доломитовом мраморе (рис. 1е–з). Цвет вакабаяшиллита ярко-желтый до желто-оранжевого, блеск сильный шелковистый. Наблюдается совершенная спайность по $\{010\}$, $\{100\}$ и $\{101\}$. В отраженном свете минерал серовато-белый, в скрещенных николях – слабо анизотропный, с обильными внутренними рефlekсами лимонно-желтого цвета. Вакабаяшиллит ассоциирует с антимонитом, аурипигментом, гетчеллитом, киноварью, пиритом, реальгаром и целым рядом редких таллиевых и ртутных минералов, присутствующих в виде мелких включений – боскардинитом, дальнегроитом, колорадоитом, парапьерротитом, рутьеритом, шабурнеитом, экранситом и другими минералами. В минеральной ассоциации 2 вакабаяшиллит образует редкие и мелкие (не более 50 мкм) включения в карбонатах и наблюдается совместно с воронцовитом и ферроворонцовитом. Химический состав (табл. 2, ан. 6) и параметры ромбической элементарной ячейки вакабаяшиллита из разных ассоциаций (табл. 1, №№ 6, 7) соответствуют литературным данным для этого сульфида. Наша находка вакабаяшиллита – первая для Уральского региона и вторая на территории Российской Федерации: ранее этот минерал был описан на As-Sb-Hg-месторождении Гал-Хая в Восточной Якутии (Груздев и др., 1975).

Висмутин Bi_2S_3 встречен нами в виде редких гипидиоморфных зерен до 80 мкм в магнетите (ассоциация 8). Химический состав минерала (табл. 2, ан. 7) близок к Bi_2S_3 .

Галенит PbS отмечен как малораспространенный рудный минерал в измененных волластонитовых метасоматитах (Сазонов и др., 1991; Викентьев и др., 2016). Вместе со сфалеритом он образует гнезда размером 2–3 см в зеленоватых породах, состоящих из волластонита и замещающих его эпидота, актинолита и хлорита. В карбонатных брекчиях он редок и представлен мелкими (до 0.5 мм) ксеноморфными выделениями в нерудной массе, изредка – мелкими включениями в пирротине. Галенит часто находится в сростаниях со сфалеритом, сульфосолями свинца, тетраэдритом, корродирует арсенопирит, сфалерит (по трещинам спайности) и пирит (вдоль микротрещин). Нами галенит отмечен в качестве редкого акцессорного минерала карбонатных брекчий и скарнов в ассоциациях 1, 4, 6 и 8. В зоне окисления (ассоциация 9) он распространен более широко, образуя изометричные свинцово-серые кристаллы до 1 см (рис. 1и), а также выделения вытянутой формы до 7 см в сфалерите и прожилки в кварце с пиритом. Летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2 были найдены образцы белых массивных карбонат-кварцевых агрегатов с прожилками галенита мощностью до 3 мм и длиной до нескольких сантиметров. В последних электронно-зондовым методом обнаружены включения гессита, бенлеонардита, цнигриита и геокронита. В других образцах из этой же находки встречены сростки галенита с редкими для месторождения антимонсульфидами Pb – буланжеритом, гетероморфитом, плагионитом, семсейитом. Химический состав воронцовского минерала отвечает стехиометричному PbS (табл. 2, ан. 8), метрика кубической элементарной ячейки (табл. 1, № 8) отвечает галениту.

Герсдорфит NiAsS с существенной примесью Fe отмечался в качестве единичных включений размером 10–20 мкм в пирите (Викентьев и др., 2016). Нами он встречен в ассоциации 4 в виде очень редких кубических кристаллов до 10 мкм в кальците. При одном никеле герсдорфит белый, в скрещенных николях изотропный. В его составе фиксируются примеси Co и Fe (табл. 2, ан. 9).

Гессит Ag_2Te является одним из двух теллуридов, установленных на месторождении. Без описания диагностических признаков В.Н. Сазонов с соавторами (1991) упоминают единичную наход-

ку теллурида Ag размером 20 мкм, образующего сросток с колорадоитом. Нами гессит обнаружен в ассоциации 6 в виде очень редких изометричных зерен до 15 мкм в нерудной массе брекчий. Кроме того, гессит встречен при электронно-зондовом исследовании образцов кальцит-доломит-кварцевых агрегатов с простыми сульфидами (галенит, сфалерит), отобранных летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2. Он образует включения до 10 мкм в галените и ассоциирует с бенлеонардитом, геокронитом и цнигриитом. По химическому составу гессит близок к стехиометричному (табл. 2, ан. 10).

Гетчеллит AsSbS_3 найден в 2015 г. на рудном складе карьера (Касаткин, 2019) в виде типичных пластинчатых агрегатов красного цвета, прозрачных, с алмазным блеском и весьма совершенной спайностью по {001} (рис. 1к). Размер выделений до 2 см; минералы-спутники те же, что и у вакабаяшилита. Химический состав (табл. 2, ан. 11) стехиометричен, параметры моноклинной элементарной ячейки (табл. 1, № 9) отвечают гетчеллиту. Это первая достоверная находка минерала на территории Российской Федерации.

Грейгит Fe_3S_4 впервые для месторождения был упомянут в списке минералов, ассоциирующих с клеритом (Мурзин и др., 1996). Позже он отмечался в виде угловатых ксеноморфных выделений, реже – кристаллов размером до 0.15 мм, локализованных среди нерудных минералов цемента брекчий и обрастающих тонкими каймами реальгара. По химическому составу минерал соответствует сурьмяно-мышьяковой разновидности (Мурзин, Варламов, 2010). Нам образцы с макроскопическим грейгитом неоднократно попадались в 2018–2020 гг. в отвалах Южного карьера. Этот минерал находится здесь в виде темно-коричневых корочек и сажисто-черных пленок на кальците и доломите с вростками антимонита, пирита, аурипигмента, реальгара, барита и самородного мышьяка (рис. 1л). В отраженном свете он выглядит желтовато-коричневым, более ярким, чем сульфиды As, но существенно темнее пирита и антимонита в его наиболее светлом положении. Также грейгит идентифицирован в карбонатных брекчиях из ассоциации 2 с гунгеритом, аурипигментом и самородным мышьяком. Рентгенографические данные минерала приведены в табл. 2 (ан. 12), химический состав – в табл. 1 (№ 10).

Джарлеит $\text{Cu}_{31}\text{S}_{16}$ установлен по результатам электронно-зондового анализа (табл. 2, ан. 13) и рентгенографически в составе черных порошкова-

тых корок, развивающихся по галениту на кварцевом агрегате. Этот материал собран летом 2020 г. в отвалах Южного карьера (ассоциация 9, рис. 1м). Спутники джарлеита – ковеллин, биверит-(Cu), малахит и гипс. Главные линии рентгенограммы [d , Å (I): 3.27(30), 3.05(20), 2.82(10), 2.63(10), 2.48(10), 2.37(90), 1.96(100), 1.88(100), параметры моноклинной элементарной ячейки приведены в табл. 1, № 11. В свежеприготовленных шлифах джарлеит выглядит светло-серым с голубоватым оттенком, но быстро покрывается пестрой побежалостью.

Диморфит As_4S_3 упомянут в списке низкотемпературных минералов цемента брекчий (Степанов и др., 2017). В этой работе приведено три химических анализа, приблизительно соответствующих формуле As_4S_3 . Тем не менее, данная находка нуждается в подтверждении рентгенографическим методом, т. к. опыт наших многочисленных электронно-зондовых анализов показывает, что завышение As относительно S может быть вызвано микровостками самородного мышьяка в реальгаре. Нами диморфит на месторождении достоверно не встречен.

Дюранюзит As_4S диагностирован в ассоциациях 2 и 7. Он образует призматические кристаллы до 0.2 мм, заключенные в карбонатной массе брекчий (рис. 3в), иногда обрастает тилазитом и содержит включения самородного мышьяка. По всей видимости, дюранюзит является здесь более ранним минералом по отношению к самородному мышьяку, но более поздним по отношению к реальгару и аурипигменту, представляя собой своего рода промежуточный продукт изменения последних. Дюранюзит имеет темно-красный цвет и металлический блеск. В отраженном свете минерал светло-серый, двуотражение очень слабое; в скрещенных николях – отчетливо анизотропный в желтоватых тонах, с красными внутренними рефлексами. Химический состав (табл. 2, ан. 14) близок к идеальному для данного минерала. Ранее на территории Российской Федерации дюранюзит не отмечался.

Жозеит-А Bi_4TeS_2 образует редкие сростки с павонитом в магнетите из ассоциации 8. Размер зерен жозеита-А не превышает 20 мкм. В отраженном свете в контакте с павонитом он имеет кремово-белый цвет; свежеполитованные зерна в шлифе спустя несколько недель хранения покрываются тонкой оксидной пленкой с характерной побежалостью. Жозеит-А характеризуется небольшой примесью Se (табл. 2, ан. 15).

Икунолит $Bi_4(S,Se)_3$, представленный Те-содержащей разновидностью, встречен в виде единичных сростков до 20 мкм с лиллианитом, заключенных в магнетите (ассоциация 8). В отраженном свете икунолит белый, приблизительно такой же по яркости, как и лиллианит, но эффекты анизотропии (в блеклых коричневатых тонах) у первого выражены существенно слабее. Химический состав минерала приведен в табл. 2, ан. 16.

Киноварь HgS отнесена В.Н. Сазоновым с соавторами (1991) к очень редким минералам воронцовских руд. Ее зерна размером 0.1–0.3 мм локализуются вместе с реальгаром в тонких (1–2 мм) карбонатных прожилках, рассекающих сульфидизированную брекчию известняка, или заключены в карбонатной массе брекчий в ассоциации с реальгаром и ртутистым сфалеритом. Химический состав очень близок к стехиометричному HgS (Сазонов и др., 1991). Наши наблюдения позволяют квалифицировать его как распространенный. Относительно редко киноварь попадает в ассоциации 1, гораздо чаще – в ассоциациях 2 и 3, где образует зерна размером до 0.2 мм. В ассоциации 4 киноварь является одним из главных рудных минералов, образуя богатые тонкозернистые скопления темно-красного цвета в карбонатах, кварце и барите вместе с Hg-содержащим сфалеритом, антимонитом, метациннабаритом и реальгаром (рис. 4а). В составе киновари из большинства ассоциаций электронно-зондовым методом установлены только Hg и S. Исключением является ассоциация 2, где в качестве изоморфной примеси в существенном количестве присутствует Se (13.9 мас. %) (табл. 2, ан. 17). Параметры гексагональной элементарной ячейки киновари из ассоциаций 1 и 4 приведены в табл. 1, №№ 12, 13.

Ковеллин CuS развивается по сфалериту, насыщенный эмульсионной вкрапленностью халькопирита, в гранатовом скарне из зоны гипергенеза (Викентьев и др., 2016). Нами минерал встречен в июне 2020 г. в ожелезненных кварцевых агрегатах в образцах из отвалов Южного карьера в ассоциации 9. Ковеллин вместе с джарлеитом образует черные порошковатые корочки, развивающиеся по галениту, и наблюдается совместно с биверитом-(Cu), малахитом и гипсом (рис. 1м). Ковеллин диагностирован по оптическим свойствам, химическому составу (табл. 2, ан. 18) и рентгенограмме (табл. 1, № 14).

Колорадоит $HgTe$ отмечался в виде единичных зерен размером 0.05–0.1 мм в известняке в

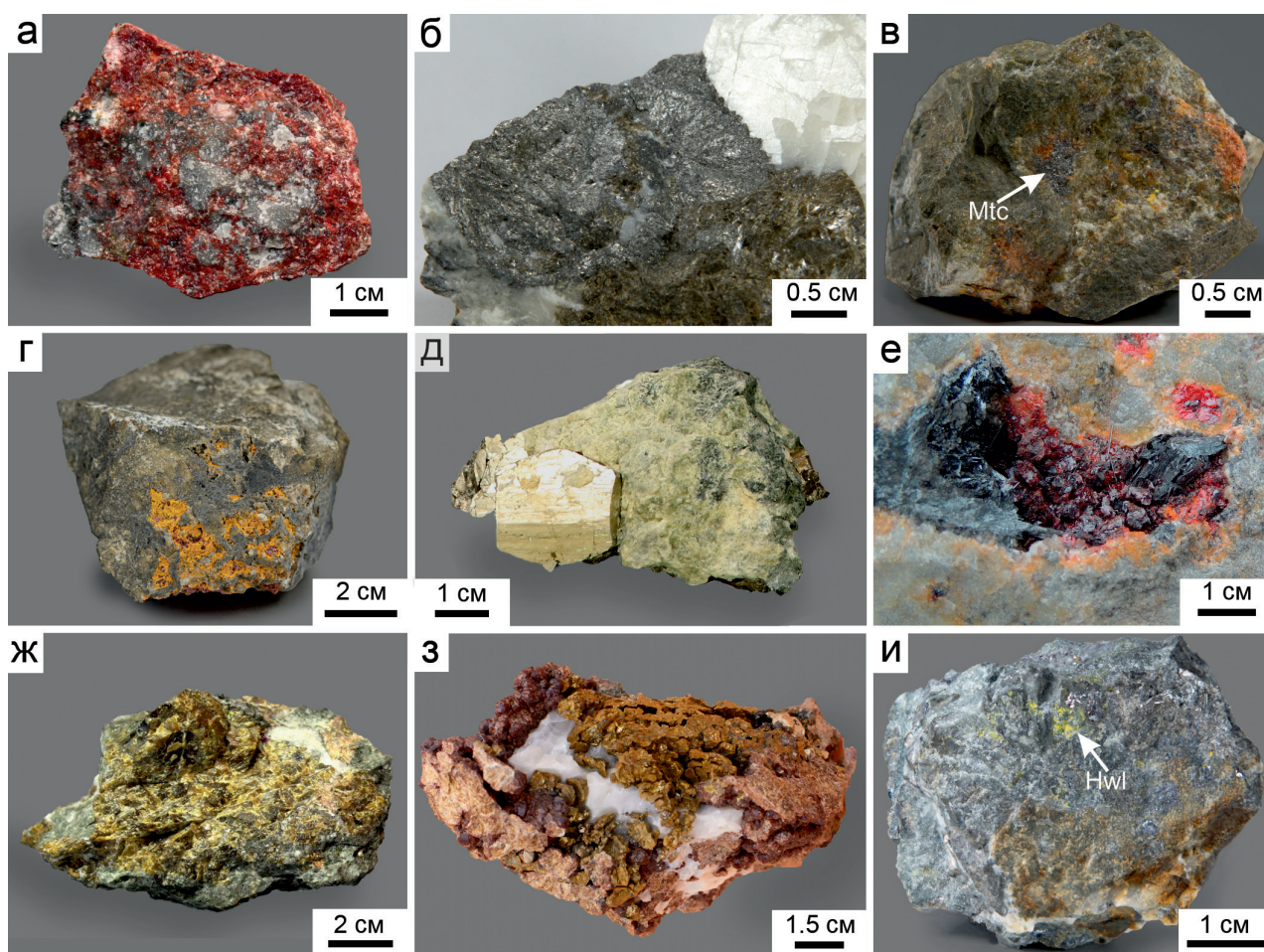


Рис. 4. Сульфиды Воронцовского месторождения:

а – скопления красной киновари в карбонатной породе с антимонитом; б – гнездо серо-стального лёллингита с массивным коричневым сфалеритом в белом кальците; в – черное зерно метациннабарита (в центре) в кальците с доломитом, реальгаром и другими минералами; г – ярко-оранжевые корки парареальгара, развивающиеся по темно-красному реальгару в карбонатной брекчии; д – кристалл пирита в карбонатной породе с пижонитом; е – кристаллы темно-красного реальгара свободного роста с серым антимонитом на стенках небольшой каверны в окварцованном известняке; ж – массивный сфалерит желто-коричневого цвета; з – агрегаты золотистых кристаллов халькопирита на кальците с андрадитом; и – желтые порошковые выделения хоулиита на сфалерите.

Коллекции: музея «Штуфной кабинет», г. Североуральск (а, д, ж, з), А.В. Касаткина (б-г, и), В.В. Левицкого (е). Фото А.Д. Касаткиной (б-г, и), М.В. Цыганко (а, д, ж, з), В.В. Левицкого (е).

Fig. 4. Sulfides of the Vorontsovskoe deposit, part II:

а – red fine-grained cinnabar in carbonate matrix with stibnite; б – pocket of steel gray löllingite with massive brown sphalerite in white calcite; в – black metacinnabar grain (in center) embedded in matrix of calcite, dolomite, realgar and other minerals; г – brightly orange pararealgar crusts growing on deep red realgar in carbonate breccia; д – pyrite crystal in carbonate matrix with pigeonite; е – free standing crystals of dark red realgar with gray stibnite in cavity of silicified limestone; ж – massive yellow-brown sphalerite; з – aggregates of golden yellow chalcopyrite crystals on calcite and andradite; и – yellow powdery hawleyite on sphalerite.

Collections: Museum Shtufnoi Kabinet, Severouralsk (а, д, ж, з), A.V. Kasatkin (б-г, и), V.V. Levitsky (е). Photo by A.D. Kasatkina (б-г, и), M.V. Tsyganko (а, д, ж, з), V.V. Levitsky (е).

срастании с самородным мышьяком и недиагностированным теллуридом Ag (гесситом?) (Сазонов и др., 1991), а также выделений размером 40–50 мкм в «пьерротите» в ассоциации с самородным золотом (Мурзин, Варламов, 2010). Нами колора-

доит обнаружен во всех ассоциациях, связанных с карбонатными брекчиями, кроме ассоциации 6. Обычно этот теллурид образует редкие округлые и угловатые зерна размером 5–40 мкм в кальците и доломите. В ассоциации 2 он распространен

шире, а в ассоциации 4 встречается повсеместно. Колорадоит здесь отличается крупными размерами: он слагает угловатые обособления размером до 0.12×0.06 мм в кальците (рис. 3г), доломите и реальгаре, вытянутые зерна на контакте аурипигмента и антимонита (рис. 3д) и включения в последнем, сростки с Hg-содержащим сфалеритом и цинкенимом. Остальные спутники колорадоита – акташит, андорит, геттардит, золото, киноварь, мышьяк, пирит, рутьерит и теннантит-(Zn). Во всех ассоциациях химический состав минерала стехиометричен и не содержит примесей (табл. 2, ан. 19). Параметр кубической элементарной ячейки колорадоита из ассоциации 4 приведен в табл. 1, № 15.

Кубанит CuFe_2S_3 встречен в единственном образце № Vor-01/16-1b из ассоциации 6 в виде включений до 20 мкм в доломите и самородном мышьяке с пиритом, сфалеритом, тетраэдритом-(Zn) и халькопиритом. Минерал диагностирован по химическому составу (табл. 2, ан. 20) и характерным оптическим свойствам (светло-коричневая окраска в отраженном свете, сильная анизотропия в розовато-коричневых и серовато-голубых тонах).

Лёллингит FeAs_2 установлен в сростаниях с самородным мышьяком и арсенопиритом. Его агрегаты имеют форму розеток, друзовидных сростаний игольчатых кристаллов зонального строения и состава. В воронцовском лёллингите содержится переменное количество S, подчас существенное (Викентьев и др., 2016). Нами крупные (до 3 см) гнезда стально-серого лёллингита с массивным коричневым сфалеритом в белом кальцит-доломитовом мраморе встречены в 2017 г. в образцах из отвалов Северного карьера (рис. 4б). В этом минерале здесь фиксируется небольшая примесь S – до 1.3 мас. % (табл. 2, ан. 21). Параметры ромбической элементарной ячейки приведены в табл. 1, № 16.

Метациннабарит HgS установлен в качестве редкого минерала ассоциаций 1–3. Он хорошо отличается от киновари железно-черным цветом и отсутствием спайности. В отраженном свете метациннабарит светло-серый, в отличие от киновари изотропен и не имеет внутренних рефлексов. В ассоциации 4 он встречается чаще и в существенно более крупных выделениях. Метациннабарит слагает зерна до 0.5×0.5 см в кальците и доломите вместе с киноварью, реальгаром, сфалеритом, акташитом, антимонитом, колорадоитом, пиритом, рутьеритом, баритом (рис. 4в). Он представлен высокоцинкистой разновидью – т. н. гвадалкацаритом (табл. 2, ан. 22). Изоморфное вхождение

Zn в структуру метациннабарита отражается и на рентгеновских данных. Каждая из главных линий дифрактограммы [d , Å (I): 3.318(100), 2.865(80), 2.028(20), 1.735(80), 1.438(20), 1.325(30), 1.175(20), 1.106(20)] отличается по межплоскостному расстоянию от соответствующей линии синтетической кубической фазы HgS в меньшую сторону на 0.2–0.7 Å. Соответственно, объем элементарной ячейки воронцовского метациннабарита (табл. 1, № 17) существенно меньше объема ячейки синтетической ртутной фазы: 188 Å^3 против 200 Å^3 . В некоторых случаях Zn-Mn-содержащий метациннабарит образует кубические кристаллы до 30 мкм в карбонатах или слагает краевые зоны размером 0.08–0.1 мм в зернах Hg,Mn-содержащего сфалерита (рис. 3е). Химические составы обоих сульфидов приведены в табл. 2, ан. 23, 26. В.И. Васильев (2011), изучавший твердые растворы системы Zn–Hg–S, пришел к выводам об отсутствии непрерывного изоморфного ряда в серии кубических сульфидов ZnS – HgS и разрыве смесимости в промежуточном интервале от $(\text{Zn}_{0.752}\text{Hg}_{0.248})\text{S}$ до $(\text{Hg}_{0.539}\text{Zn}_{0.461})\text{S}$. Полученные нами данные подтверждают эти выводы, причем в составе воронцовского метациннабарита установлено 15.0 мас. % Zn (или 15.4 мас.% при пересчете без учета Mn и с нормированным на 100% составом), что близко к максимально возможной концентрации цинка в метациннабарите (17.7 мас. %).

Молибденит MoS_2 отмечался в борнит-халькопиритовых рудах, развитых в зонах скарирования диоритов (Викентьев и др., 2016). Нами он встречен в виде мелких овальных включений до 20 мкм в кальците с пиритом, реальгаром, сфалеритом, дальнегроитом, криститом, колорадоитом, метациннабаритом, рутьеритом, филлотитом в ассоциации 1. Химический состав минерала (мас. %): Mo 60.14, S 39.17, сумма 99.31.

Парареальгар As_4S_4 обнаружен летом 2020 г. в образцах со склада забалансовых руд № 2 в виде ярко-оранжевых порошковатых выделений, развивающихся по ярко-красному реальгару на фрагментах карбонатной брекчии (рис. 4г). Изучение брекчии электронно-зондовым методом позволяет отнести установленный в ней набор минеральных видов к ассоциации 2. Среди рудных минералов идентифицированы многочисленные зерна воронцовита и ферроворонцовита, а также галхит, боскардинит, экрансит, рутьерит, антимонит, киноварь, колорадоит, метациннабарит, пирит и сфалерит. Жильные минералы представлены кальцитом, Mn-содержащим доломитом и баритом.

Диагностика парареальгара подтверждена электронно-зондовым (табл. 2, ан. 24) и монокристалльным рентгеновским (табл. 1, № 18) методами. По оптическим свойствам минерал близок к реальгару. При одном никеле он выглядит тускло-серым, двуотражение отчетливое. Анизотропия сильная. В полностью скрещенных николях она маскируется обильными внутренними рефlekсами желтого и оранжевого цвета. На территории Российской Федерации парареальгар достоверно зафиксирован впервые.

Пикополит TlFe_2S_3 является единственным сульфидом Tl без As или Sb, встреченным нами на месторождении: остальные таллиевые минералы представлены сульфосолями. Он идентифицирован всего в двух аншлифах (ассоциации 3 и 4) в виде очень редких и мелких (не более 15×12 мкм) включений в нерудных минералах брекчий (кальцит, доломит, барит, клинохлор) и сростков с реальгаром. В ассоциации 3 его спутниками также являются гладковскиит, золото и рутьерит, а в ассоциации 4 – аурипигмент, киноварь, колорадоит, кристит, метациннабарит, парапьерротит, пирит и шабурнеит (рис. 3ж). В отраженном свете минерал кремово-розоватый, в сростках с реальгаром выглядит существенно светлее последнего. Двуотражение отчетливое. В скрещенных николях пикополит сильно анизотропный, в серо-фиолетовых тонах. Его химический состав близок к идеальному TlFe_2S_3 (табл. 2, ан. 25). С точки зрения достоверности мы оцениваем нашу находку этого сульфида как первую в Российской Федерации.

Пирит FeS_2 – главный рудный минерал различных пород месторождения. В метасоматитах его содержание обычно колеблется в диапазоне 1–10 %, но не так редко опускается и ниже 1 %. Пирит, в основном, слагает зерна от десятых до сотых долей миллиметра в виде включений в других минералах. Менее распространены кристаллы размером до нескольких миллиметров. В кальцит-гроссуляровых метасоматитах развиты кристаллы пирита до 1 см. В кварцевых жилах среди березитов и листовитов пирит представлен двумя генерациями: ранней в виде кубических кристаллов размером 0.5–1 мм (редко до 5 мм) и поздней – мелкими (менее 0.1–0.2 мм) кристаллами сложных форм. Пирит обычно содержит много микровключений других рудных минералов, в первую очередь, халькопирита и пирротина. Наряду с магнетитом пирит является единственным рудным минералом неизмененных скарнов, где представлен интерстициальными вы-

делениями размером до нескольких миллиметров. В измененных скарнах пирит образует крупные (1–10 мм) выделения, часто кристаллы сложных форм, заключенные в кварц-кальцитовый массив. В пропилитизированных породах обильна его вкрапленность в вулканогенных толщах или в цементе рудных брекчий в виде кристаллов, обычно не превышающих 0.1–0.3 мм, но иногда достигающих 2 см.

Пирит является главным рудным минералом измененных вулканогенно-осадочных пород: его содержание вместе с арсенопиритом достигает 20–30 мас. %. Пирит здесь образует кристаллы от 0.05 до 2–3 мм, а также замещает стенки раковин или отдельные зерна породообразующих минералов. Чрезвычайно широко распространен пирит в цементе брекчий, где он слагает кристаллы и их агрегаты размером до 1.5 см, рассеянные в карбонатной породе (Сазонов и др., 1991). Нами в 2017 г. в отвалах Южного карьера найден образец с хорошо образованным кристаллом пирита необычно светлого серебристого цвета размером 25×25 мм в агрегате кальцита и доломита с пижонитом (рис. 4д). Воронцовский пирит химически хорошо изучен: в его составе фиксируются примеси Co, Ni и As до 1.1 мас. % (Сазонов и др., 1991; Мурзин, Варламов, 2010). И.В. Викентьевым с соавторами (2016) подробно исследованы морфология кристаллов пирита и их химический состав. Нами проведено рентгенографическое исследование пирита из минеральных ассоциаций 1 и 9 (табл. 1, №№ 19, 20).

Пирротин Fe_{1-x}S слабо распространен на месторождении. Он отмечен в виде включений до 0.5 мм в сфалерите и на контакте сфалерита и галенита в составе рудной минерализации в волластонитовых метасоматитах. Вместе с халькопиритом пирротин образует выделения до нескольких сантиметров в измененных скарнах. В цементе брекчий он представлен редкими кристаллами до 0.1 мм в карбонате, округлыми или каплевидными включениями размером до 0.05 мм в более ранних пирите или арсенопирите, а также в виде эмульсионной вкрапленности в сфалерите. Минерал изучен химически (Сазонов и др., 1991; Викентьев и др., 2016).

Реальгар As_4S_4 является главным рудным минералом брекчий, образуя скопления зерен, рассеянных в массе обломков известняка и придающих брекчии красноватые тона. Его отдельные выделения небольших размеров (обычно до 0.2 мм, но

иногда до 5 мм) выполняют промежутки между зернами карбоната и имеют угловатые формы. Изредка реальгар выполняет микротрещины в кристаллах пирита. Наиболее крупные выделения реальгара часто содержат включения других минералов, таких как пирит, сфалерит, сульфосоли Tl и Hg (Сазонов и др., 1991). В 2015 г. на рудном складе В.В. Левицким были найдены кристаллы реальгара свободного роста до 0.5 см (рис. 4е). В монографии (Сазонов и др., 1991) реальгар диагностирован по дебаграмме и оптическим свойствам. Что касается химического состава, то отмечались трудности в получении количественных данных из-за неустойчивости минерала под электронным пучком, поэтому состав реальгара был определен лишь качественно. В более поздней работе (Мурзин, Варламов, 2010) эти трудности были преодолены, суммы анализов реальгара составили 98.5–100.8 мас. %; в минерале была установлена примесь Sb (до 1.6 мас. %). Однако в указанных работах отсутствуют данные об условиях анализа реальгара. Нами также отмечался факт его плавления в ходе анализа электронно-зондовым методом при стандартных для сульфидов и сульфосолей условиях (ВДС, 25 кВ, 20 нА, 1 мкм). Удовлетворительных результатов удалось достичь при понижении ускоряющего напряжения до 15 кВ и анализе расфокусированным зондом с площадки 10×10 мкм. В составе реальгара из большинства ассоциаций нами установлены только As и S (табл. 2, ан. 26). Параметры моноклинной элементарной ячейки даны в табл. 1, № 21.

Сфалерит ZnS – один из главных рудных минералов месторождения, распространенный повсеместно. Вместе с галенитом он составляет гнезда размером 2–3 см в волластонитовых метасоматитах. В измененных скарнах сфалерит присутствует в виде прожилков или включений в пирите и сам, как правило, содержит эмульсионную вкрапленность халькопирита и пирротина. В цеменгах брекчий он образует самостоятельные выделения изометрично-неправильной формы размером от 0.05 до 0.4 мм, заключенные в карбонатах или кварце, часто в сростаниях с баритом, пиритом или блеклой рудой, а также мелкие (0.01–0.07 мм) вроски в пирите и рутьерите. В сфалерите зафиксированы выделения тетраэдрита и минералов Tl, вроски самородного золота, эмульсионная вкрапленность халькопирита. В составе сфалерита часто присутствуют изоморфные примеси (мас. %) Hg (до 23.1), Mn (до 4.9), Fe (до 8.5), Cd (до 1.3), Cu (до 0.7) и Ag (до 0.4) (Сазонов и др., 1991; Мурзин, Варламов,

2010). Mn-содержащий сфалерит (до 7.6 мас. % Mn) описан в виде округлых и овальных включений до 50–70 мкм в самородном мышьяке и арсениопирите в образцах 2007 г. (Мурзин и др., 2011).

Нам в отвалах Южного карьера и на складе забалансовых руд № 2 неоднократно попадались образцы с массивным сфалеритом темно-зеленого цвета в выделениях размером до 20 см с включениями галенита. В его составе установлены только Zn и S. Желто-коричневый сфалерит, найденный в образцах с рудного склада в 2017 г. (рис. 4ж), также практически свободен от примесей (табл. 2, ан. 28). Параметр его кубической элементарной ячейки приведен в табл. 1, № 22. В ассоциации 4 заключенные в карбонатной массе (доломит, кальцит) зерна Hg, Mn-содержащего сфалерита до 0.2 мм часто обрастают каймами Zn-Mn-содержащего метациннабарита мощностью до 40 мкм (рис. 3е). Химический состав такого сфалерита приведен в табл. 2, ан. 27. При оптическом изучении в отраженном свете ртутисто-марганцовистые разновидности сфалерита демонстрируют не вполне обычные для этого минерала темно-красные внутренние рефлексы.

Тетрадимит Bi_2Te_2S встречен в скарнах в ассоциации 8 в виде округлых зерен до 40 мкм на контакте с магнетитом и кальцитом (рис. 3з). Химический состав тетрадимита близок к стехиометричному (табл. 2, ан. 29).

Халькопирит $CuFeS_2$ широко распространен на месторождении. Он отмечен в составе полиметаллической минерализации в волластонитовых метасоматитах и измененных скарнах. В виде крупных (до 5 мм) выделений сложной формы и мелких (до 0.1 мм) кристаллов он рассеян в кварцевых жилах среди березитов и листовенитов. В цеменгах брекчий халькопирит образует ксеноморфные выделения размером от 10 мкм до 2–3 мм в карбонате, а также эмульсионную вкрапленность в сфалерите, часто содержит включения сульфосолей, галенита и сфалерита (Сазонов и др., 1991). В то же время, распространение халькопирита в изученных нами карбонатных брекчиях носит весьма локальный характер: минерал встречен только в ассоциациях 1 и 6. Гораздо чаще он встречается в ассоциации 8, где образует кристаллы искаженного тетраэдрического облика размером до 0.5 см, сгруппированные в агрегаты и массивные выделения золотистого цвета, и наблюдается совместно с андрадитом, кальцитом, магнетитом, арсениопиритом, блёклыми рудами, пиритом и сфалеритом (рис. 4з). В зоне гипергенеза халькопирит образует мелкую вкраплен-

ность зерен, часто окисленных с поверхности, в кварц-кальцитовых агрегатах. Здесь он выступает основным источником Си для карбонатов (азурит, малахит) и сульфатов (биверит-(Си), брошантит, халькантит). Химический состав халькопирита близок к идеальному (табл. 2, ан. 30). Параметры его тетрагональной элементарной ячейки приведены в табл. 1, № 23.

Хоулит CdS обнаружен летом 2020 г. в образцах из отвалов Южного карьера, где находится в виде желтых порошковатых прожилков, развивающихся по сфалериту вместе с галенитом (ассоциация 9) (рис. 4и). В отраженном свете хоулит темно-серый, но светлее сфалерита; на контакте с галенитом приобретает отчетливо зеленоватый оттенок. Минерал изотропный, с желтыми внутренними рефлексами. В составе хоулита установлена изоморфная примесь Zn (мас. %): Cd 68.72, Zn 8.25, S 23.45, сумма 100.42. Его эмпирическая формула (расчет на сумму двух атомов): $\text{Cd}_{0.83}\text{Zn}_{0.17}\text{S}_{1.00}$. Параметр кубической элементарной ячейки хоулита приведен в табл. 1, № 24.

Ялпайт Ag_3CuS_2 установлен в образце, отобранном летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2, в виде мелких призматических кристаллов до 20×10 мкм в халькопирите (рис. 3и) в ассоциации с купрополибазитом, полибазитом, пиритом, галенитом, сфалеритом, тетраэдритом-(Fe), кальцитом и кварцем. Минерал диагностирован по химическому составу (табл. 2, ан. 31). В отраженном свете на фоне вмещающего халькопирита ялпайт выглядит серым, в скрещенных николях слабо анизотропен.

Авторы искренне благодарят И.В. Пекова, В.В. Гуржия и Е.В. Белогуб за редакторскую правку текста и обсуждение, А.Д. Касаткину, В.В. Левицкого и Т.В. Пашко – за фотографирование образцов и А.А. Готтмана (АО «Полиметалл УК») – за образцы самородного мышьяка, представленные нам для исследований.

Литература

- Васильев В.И. (2011) Новые данные о составе метациннабарита и ртутистого сфалерита с изоморфной примесью кадмия. *Геология и геофизика*, **52**(7), 896–905.
- Викентьев И.В., Тюкова Е.Э., Мурзин В.В., Викентьева О.В., Павлов Л.Г. (2016) Воронцовское золоторудное месторождение. Геология, формы золота, генезис. Екатеринбург, Форт Диалог-Исеть, 206 с.
- Груздев В.С., Волгин В.Ю., Шумкова Н.Г., Черницова Н.М., Иванов В.С. (1975) Вакабаяшиллит

$(\text{As,Sb})_2\text{S}_3$ из мышьяково-сурьмяно-ртутных месторождений СССР. *Доклады АН СССР*, **224**(2), 418–421.

Касаткин А.В. (2019) Новые находки редких минералов на территории постсоветских государств. *Минералогический альманах*, **24**(2), 4–47.

Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. (2020) Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 1: История изучения, минеральные ассоциации, кадастр минеральных видов. *Минералогия*, **6**(4), 3–34.

Мурзин В.В., Варламов Д.А. (2010) Золото-сульфидно-сульфосольный парагенезис минералов из брекчий с кремнистыми обломками Воронцовского месторождения (Средний Урал). *Вестник Уральского отделения РМО*, **7**, 92–100.

Мурзин В.В., Бушмакин А.Ф., Сустанов С.Г., Щербачев Д.К. (1996) Клерит MnSb_2S_4 – новый минерал из Воронцовского золоторудного месторождения (Урал). *Записки ВМО*, **125**(3), 95–101.

Мурзин В.В., Варламов Д.А., Ровнушкин М.Ю. (2011) Парагенезис самородного мышьяка и арсениопирита на Воронцовском золоторудном месторождении (Северный Урал). *Вестник Уральского отделения РМО*, **8**, 80–87.

Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А., Гладковский Б.А. (1991) Эндогенное оруденение девонского андезитоидного вулканоплутонического комплекса (Урал). Свердловск, УрО АН СССР, 184 с.

Степанов С.Ю., Шарпёнок Л.Н., Антонов А.В. (2017) Флюидо-эксплозивные брекчии Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). *Записки РМО*, **146**(1), 29–43.

References

Gruzdev V.S., Volgin V.Yu., Shumkova N.G., Chernitsova N.M., Ivanov V.S. (1975) [Wakabayashilite $(\text{As,Sb})_2\text{S}_3$ from arsenic-antimony-mercury deposits of the USSR]. *Doklady AN SSSR [Doklady Academy of Sciences of the USSR]*, **224**(2), 418–421. (in Russian)

Kasatkin A.V. (2019) New findings of rare minerals from post-Soviet Union countries. *Mineralogical Almanac*, **24**(2), 4–47.

Kasatkin A.V., Stepanov S.Yu., Tsyganko M.V., Škoda R., Nestola F., Plášil J., Makovický E., Agakhanov A.A., Palamarchuk R.S. (2020) [Mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). Part 1: History of study, mineral assemblages, list of minerals]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **6**(4), 3–34. (in Russian)

Murzin V.V., Varlamov D.A. (2010) [Gold-sulfide-sulfosalt mineral assemblage from breccias with siliceous clasts of the Vorontsovskoe deposit (Central Urals)]. *Vestnik*

Uralskogo Otdeleniya RMO [Bulletin of the Urals Branch of the Russian Mineralogical Society], **7**, 92–100 (in Russian).

Murzin V.V., Bushmakina A.F., Sustavov S.G., Shcherbachov D.K. (1996) [Clerite MnSb_2S_4 – a new mineral from the Vorontsovskoe gold deposit in the Urals]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **125**(3), 95–101. (in Russian)

Murzin V.V., Varlamov D.A., Rovnushkin M.Yu. (2011) [Assemblage of native arsenic and arsenopyrite of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals)]. *Vestnik Uralskogo Otdeleniya RMO [Bulletin of the Urals Branch of the Russian Mineralogical Society]*, **8**, 80–87. (in Russian).

Sazonov V.N., Murzin V.V., Grigoriev N.A., Gladkovsky B.A. (1991) [Endogene mineralization of the

Devonian andesite volcano-plutonic complex (the Urals)]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 184 p. (in Russian)

Stepanov S.Yu., Sharpenok L.N., Antonov A.V. (2017) [Fluid-explosive breccias of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals)]. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **146**(1), 29–43. (in Russian)

Vasiliev V.I. (2011) New data on the composition of metacinnabar and Hg-sphalerite with an isomorphous Cd admixture. *Russian Geology and Geophysics*, **52**(7), 701–708.

Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Murzin V.V., Vikent'eva O.V., Pavlov L.G. (2016) [Vorontsovskoe gold deposit. Geology, modes of occurrence of gold, genesis]. Yekaterinburg, Fort Dialog-Iset, 204 p. (in Russian)