

УДК 549.4+549.5+549.6+549.7+553.411 (470.54)

DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-3-1

МИНЕРАЛОГИЯ ВОРОНЦОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРНЫЙ УРАЛ). ЧАСТЬ 4: КИСЛОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

**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, Котларшска 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 12.08.2021 г., принята к печати 08.09.2021 г.

MINERALOGY OF THE VORONTSOVSKOE GOLD DEPOSIT (NORTHERN URALS). PART 4: OXYSALTS

**A.V. Kasatkin¹, S.Yu. Stepanov², M.V. Tsyganko³, R. Škoda⁴, F. Nestola⁵,
J. Plášil⁶, E. Makovický⁷, A.A. Agakhanov¹, R.S. Palamarchuk⁸**

¹ Fersman Mineralogical Museum of 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 12.08.2021, accepted 08.09.2021

Аннотация. Данная статья является заключительной в серии публикаций, посвященных минералогии Воронцовского золоторудного месторождения на Северном Урале. Описаны найденные на месторождении кислородные соединения (оксигалогениды, оксиды, гидроксиды, карбонаты, сульфаты, вольфраматы, фосфаты, арсенаты и силикаты), приведен их химический состав, а для целого ряда минералов – также параметры элементарных ячеек и оптические свойства. Находки арменита, клаудетита, рамсделлита, хинганита-(Nd) и чапманита являются первыми в Российской Федерации. В качестве подведения итогов по всей серии публикаций обсуждаются главные особенности минералогии месторождения, благодаря которым оно может с полным основанием считаться уникальным объектом не только на Урале, но и во всей России.

Ключевые слова: Воронцовское месторождение, Северный Урал, кислородные соединения, первые находки минералов в России.

Abstract. This is a final paper in a series of publications devoted to the mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit in the Northern Urals. The article reports on oxygen compounds (oxyhalides, oxides, hydroxides, carbonates, sulfates, tungstates, phosphates, arsenates and silicates) of the Vorontsovskoe deposit, their chemical composition and, for selected minerals, unit-cell parameters and optical properties. Armenite, claudetite, ramsdellite, hingganite-(Nd) and chapmanite are found for the first time in Russian Federation. As a conclusion for the entire series of publications, the general features of mineralogy of the Vorontsovskoe deposit are discussed, thanks to which it is considered a unique mineral locality not only in the Urals but in Russia as well.

Keywords: Vorontsovskoe deposit, Northern Urals, oxygen compounds, first mineral findings in Russia.

Для цитирования: Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 4: Кислородные соединения. Минералогия, 7(3), 5–31. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-3-1.

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 4: Oxyhalts. Mineralogy, 7(3), 5–31. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-3-1.

Введение

Настоящая статья является заключительной в серии публикаций о минералогии Воронцовского золоторудного месторождения на Северном Урале. В первой статье (Касаткин и др., 2020) охарактеризованы история изучения месторождения, его геологическое положение и строение, типы руд, методы исследований, а также подробно описаны девять наиболее устойчивых рудных минеральных ассоциаций и дан максимально полный на сегодня минеральный кадастр этого объекта. Во второй работе (Касаткин и др., 2021а) охарактеризованы простые вещества, сульфиды, арсениды и теллуриды, а в третьей (Касаткин и др., 2021б) – сульфосоли, включая открытые нами новые минеральные виды. В настоящей статье речь пойдет о всех кислородных соединениях, установленных на месторождении.

Минералы описаны в соответствии с химическими классами, а внутри классов приведены в алфавитном порядке. Указанные ниже номера минеральных ассоциаций даны по (Касаткин и др., 2020): боскардинит-экранситовая ассоциация – № 1, воронцовит-гунгеритовая ассоциация – № 2, гладковскиитовая (арсеносульфидная) ассоциация – № 3, киноварь-колорадоит-парапьерротитовая ассоциация – № 4, люборжакит-клеритовая ассоциация – № 5, ассоциация с самородным мышьяком

– № 6, цыганкоитовая ассоциация – № 7, ассоциация с минералами висмута – № 8, гипергенная ассоциация – № 9. В статье использованы следующие обозначения минералов: Cal – кальцит, Cln – клинохлор, Cnb – киноварь.

Оксигалогениды

Бисмоклит BiOCl является единственным представителем класса галогенидов, встреченным на месторождении. Минерал обнаружен в образце VD-7.1с (ассоциация № 4) в виде очень мелких (не более 10 мкм) редких включений в кальцит-пренит-диопсидовой породе с золотом, парапьерротитом, пиритом, реальгаром и шабурнеитом. Химический состав бисмоклита (мас. %): Bi_2O_3 88.72, Cl 12.99, $-\text{O}=\text{Cl}_2$ –2.94, сумма 98.77. Состав отвечает эмпирической формуле (расчет на два аниона): $\text{Bi}_{1.01}\text{O}_{1.03}\text{Cl}_{0.97}$.

Оксиды и гидроксиды

Арсенолит As_2O_3 упомянут в составе продуктов окисления массивных темно-серых желваков и прожилков самородного мышьяка мощностью до 2–3 см в агрегате слоистого силиката и в виде мелкой рассеянной вкрапленности в брекчиях (Викентьев и др., 2016). Достоверные арсенолит и его диморф **клаудетит** установлены нами в матери-

але, найденном в 2018 г. в отвалах Северного карьера (Касаткин, 2019). Оба минерала тесно срастаются друг с другом, образуя серовато-белые порошковатые агрегаты, развивающиеся по самородному мышьяку из ассоциации № 6 с арсенопиритом, аурипигментом, золотом, кварцем, мусковитом-2M₁ и нерудным материалом цемента брекчий (кварц, кальцит, Cl-содержащий фторапатит и др.) (рис. 1а). В составе минералов установлены только As и O. Рентгеновская дифрактограмма образца 1810K с клаудетитом и арсенолитом приведена в табл. 1. Рассчитанные по ней параметры элементарных ячеек обоих минералов даны в табл. 2, №№ 1, 9. Достоверный клаудетит описан на территории Российской Федерации впервые.

Асболан Mn⁴⁺(O,OH)₂×(Co,Ni,Mg,Ca)_x(OH)_{2x}×nH₂O найден в зоне окисления в образцах с отвалов Южного карьера, собранных в 2018 г. Он образует вкрапленность черных сажистых зерен до 1 мм в

кальците и кварце с нонтронитом (рис. 1б). Минерал представлен кобальт-медистой разновидностью – в его составе установлено до 2.5 мас. % Co и 12.6 мас. % Cu. Также зафиксированы небольшие примеси Al, Si, V, Fe и Zn. Сильные линии порошковой рентгенограммы [*d*, Å (*I*)]: 9.66(100), 4.80(100), 2.42(40), 2.39(20), 1.92(10), 1.53(50), 1.43(50). Рассчитанные по ней параметры гексагональной элементарной ячейки минерала приведены в табл. 2, № 2.

Ахтенскит MnO₂ установлен в образцах из отвалов Южного карьера, собранных в 2018 г., в виде черных искристых пластинок до 0.5 мм, слагающих зону ~1 × 1 см в массивном буром лимоните и черном тусклом гётите с кварцем (рис. 1в). В составе минерала обнаружены только Mn и O. Главные линии дифрактограммы [*d*, Å (*I*)]: 2.41(70), 2.10(30), 1.63(100), 1.43(40), 1.07(10). Параметры гексагональной элементарной ячейки (табл. 2, № 3) соответствуют ахтенскиту.

Таблица 1

Результаты расчета порошковой дифрактограммы образца 1810K с клаудетитом и арсенолитом

Table 1

Powder XRD data of sample 1810K with claudetite and arsenolite

<i>d</i> , Å (<i>I</i> , %) обр. 1810K	Клаудетит [JCPDS-ICDD, 15-0778]	Арсенолит [JCPDS-ICDD, 36-1490]	Кварц [JCPDS-ICDD, 46-1045]	Мусковит-2M ₁ [JCPDS-ICDD, 06-0263]
10.01(30)				9.95(95)
6.37(50)	6.496(10)	6.3993(44)		
4.98(15)	4.924(25)			4.97(30)
4.45(20)				4.47(20)
4.24(25)	4.277(4)		4.2549(16)	
3.86(10)				3.88(14)
3.70(10)	3.717(2)			3.73(18)
3.47(15)	3.454(50)			3.48(20)
3.33(100)	3.356(20), 3.328(18)	3.3410(2)	3.3434(100)	3.34(25), 3.32(100)
3.24(25)	3.245(100)			
3.18(50)		3.1993(100)		3.19(30)
2.98(15)				2.987(35)
2.85(10)				2.859(25)
2.76(15)	2.771(35)	2.7698(26)		2.789(20)
2.66(8)	2.640(16)			
2.55(40)		2.5422(34)		2.566(55)
2.44(10)			2.4568(9)	2.450(8)
2.40(10)				2.398(10)
2.25(12)	2.264(25), 2.253(6)	2.2619(6)	2.2814(8), 2.2361(4)	2.254(10)
2.12(15)	2.104(6)	2.1327(12)	2.1277(6)	2.132(20)
1.98(15)			1.9798(4)	1.993(45)
1.95(25)		1.9587(22)		1.951(6)
1.87(5)	1.857(12)	1.8728(4)		1.871(4)
1.81(30)			1.8179(13)	
1.66(25)	1.6477(4)	1.6701(14)	1.6717(4), 1.6591(2)	1.662(12)
1.60(8)	1.5988(2)	1.5990(5)		1.603(6)
1.54(20)		1.5515(14)	1.5415(9)	1.541(4)
1.50(12)				1.504(30)
1.44(8)		1.4422(7)	1.4528(2)	1.453(4)

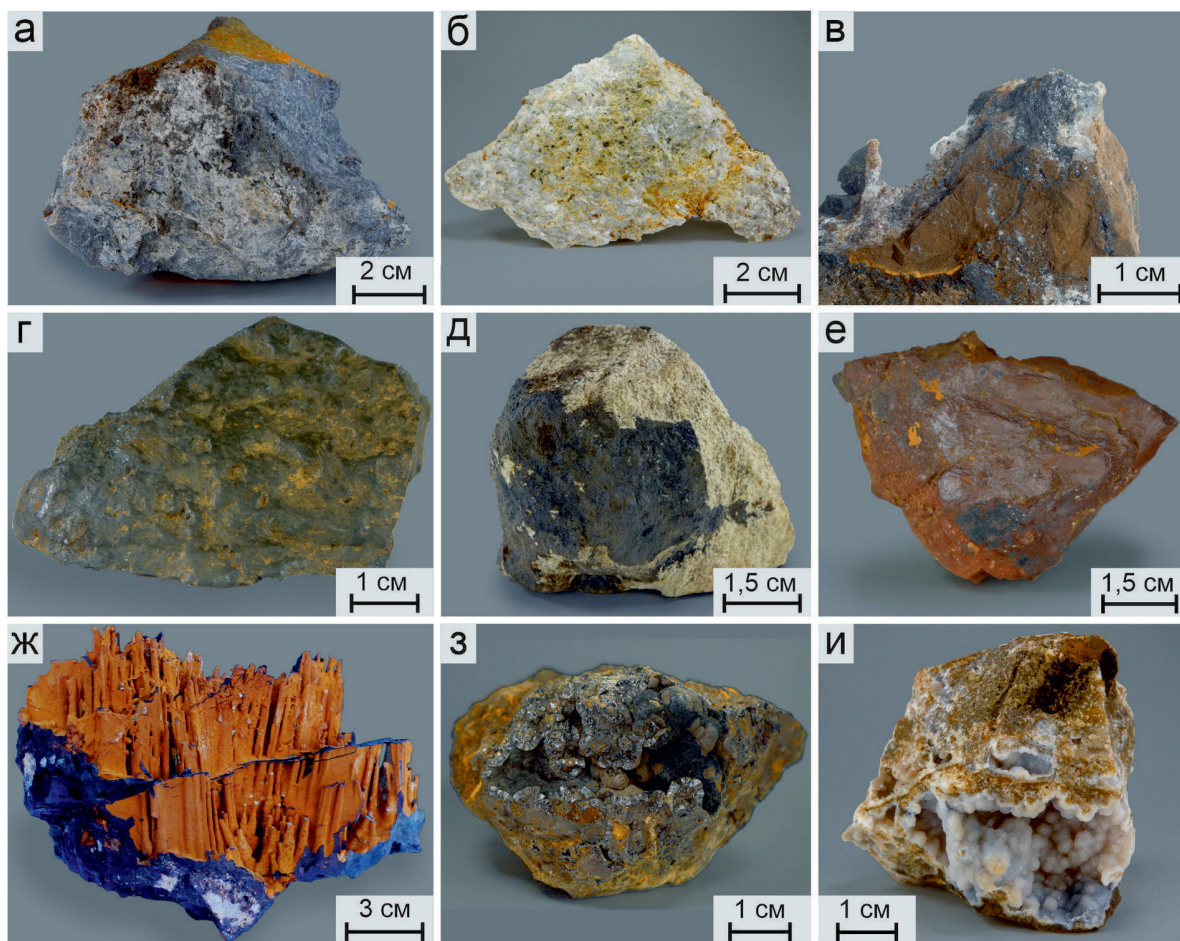


Рис. 1. Оксиды и гидроксиды Воронцовского месторождения, часть I:

а – серовато-белые порошковые агрегаты арсенолита и клаудетита на поверхности самородного мышьяка; б – черные сажистые зерна Со-Сu-содержащего асболана в кальците с желтым нонтронитом; в – черные искристые пластинки актенскита в краевой части образца в массе черного тусклого гётита и оранжевого лимонита; г – темно-коричневая корка, сложенная бёрнесситом, вернадитом, каолинитом и кварцем на кристалле гётита, замещающего пирит; д – темно-коричневая до черной порошковая корка, сложенная вернадитом и галлуазитом-7Å, на кварц-карбонатной породе; е – темно-красный массивный гематит с черной коркой (в нижней части), состоящей из голландита и литиофорита; ж – сталагмитоподобные агрегаты гётита; з – темно-коричневые до черных скорлуповатые агрегаты гётита на массивном лимоните; и – бледно-серовато-фиолетовые гроздьевидные корки халцедона в полостях массивного кварца. Коллекции: А.В. Касаткина (а–е, з), музея «Штуфной кабинет», г. Североуральск (ж, и). Фото: А.Д. Касаткиной (а–е, з), М.В. Цыганко (ж, и).

Fig. 1. Oxides and hydroxides of the Vorontsovskoe deposit, part I:

а – grayish white powdery arsenolite and claudetite aggregates on native arsenic; б – black sooty Co-Cu-bearing asbolane grains in calcite with yellow nontronite; в – black shiny akhtenskite plates on black dull goethite and orange limonite at the margin of the specimen; г – dark brown crust composed of birnessite, vernadite, kaolinite and quartz on pseudomorphic goethite after pyrite; д – dark brown to black powdery crust of vernadite and halloysite-7Å on quartz-carbonate rock; е – massive dark red hematite with black crust (in the bottom) of hollandite and lithiophorite; ж – stalagmite-like goethite aggregates; з – dark brown to black botryoidal goethite aggregates on massive limonite; и – pale grayish violet bunched chalcedony crusts in vugs of massive quartz. Collections: A.V. Kasatkin (а–е, з), Museum «Shtufnoi Kabinet», Severouralsk (ж, и). Photo: A.D. Kasatkina (а–е, з), M.V. Tsyganko (ж, и).

Бёрнессит $(\text{Na,Ca,K})_{0.6}(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{3+})_2\text{O}_4 \times 1.5\text{H}_2\text{O}$ встречен в образцах из отвалов Южного карьера, собранных в 2017 г. в составе мягких темно-коричневых корок, сложенных каолинитом (~80 об. %),

кварцем и гипергенными оксидами Mn (бёрнессит, вернадит). Корки нарастают на черную псевдоморфозу гётита по фрагменту крупного кристалла пирита (рис. 1г). Бёрнессит диагностирован

по качественному химическому составу (резко доминирующий Mn и подчиненное количество крупных катионов с $\text{Na} > \text{K} > \text{Ca}$) и рентгенометрически по следующим линиям дифрактограммы [d , Å]: 7.13(vs), 3.55(s), 2.53, 2.43, 2.14, 1.82, 1.46. Параметры моноклинной элементарной ячейки даны в табл. 2, № 4.

Биксбиит $\text{Mn}^{3+}_2\text{O}_3$ обнаружен в образцах, отобранных в 2017 г. в отвалах Южного карьера. Он присутствует в составе темно-коричневых до черных порошковатых агрегатов, образованных каолинитом и красящими его оксидами Mn (биксбиит, вернадит), в ассоциации с криптомеланом, кальцитом и кварцем. В составе минерала установлены Mn и Fe в соотношении, близком к 2 : 1, а также следы Ti и Ca. Главные линии рентгенограммы [2.69(vs), 1.65(s), 3.85, 2.34, 1.99, 1.80, 1.45, 1.40, 1.29 Å] и рассчитанные по ней параметры кубической элементарной ячейки (табл. 2, № 5) соответствуют биксбииту. Достоверный биксбиит в России был установлен в fumarольных отложениях вулкана Толбачик на Камчатке (Турчкова и др., 2018). Ранее этот минерал отмечался А.Г. Бетехтиным в окисленных рудах Кусимовского месторождения и А.А. Гавриловым в метаморфизованных рудах Сакмарской зоны на Урале, но в обоих случаях без приведения надежных диагностических признаков (Минералогия..., 2007), поэтому по степени достоверности наша находка, вероятно, является первой на территории Уральского региона и второй в России.

Вернадит $(\text{Mn,Fe,Ca,Na})(\text{O,OH})_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ упомянут на месторождении как широко распространенный акцессорный минерал экзогенных образований: в отдельных небольших участках карстовых отложений его содержание достигает нескольких процентов (Сазонов и др., 1991). Нами вернадит установлен в образцах из отвалов Южного карьера в виде мономинеральных темно-коричневых корок, а также в составе полиминеральных порошковатых агрегатов разных оттенков коричневого и черного цвета, сложенных глинистыми минералами (каолинит, галлуазит, диксит), карбонатами (кальцит, родохрозит), тонкозернистым кварцем и другими гипергенными оксидами Mn (бёрнессит, биксбиит, криптомелан, тодорокит) (рис. 1г, д). Вернадит диагностирован по качественному химическому составу (резко доминирующий Mn, подчиненное количество Fe, примеси K и Ca) и дифрактограмме (характерные диффузные линии с $d = 2.41$ и 1.41 Å).

Гейкилит MgTiO_3 и **пирофанит** $\text{Mn}^{2+}\text{TiO}_3$ из группы ильменита встречаются в образце Vor-10bis-3с в качестве редких акцессорных минералов в ассоциации № 7. Ксеноморфные зерна до 30 мкм в кальцит-доломит-клинохлоровой породе содержат зоны, отвечающие по составу обоим этим минералам. Составы наиболее магнезиального гейкилита / наиболее марганцовистого пирофанита (мас. %): MgO 16.77 / 11.38, MnO 23.08 / 30.71, TiO_2 59.88 / 57.81, суммы 99.73 / 99.90. Эмпирические формулы (расчет на три атома O): $(\text{Mg}_{0.56}\text{Mn}_{0.44})_{1.00}\text{Ti}_{1.00}\text{O}_3$ и $(\text{Mn}_{0.60}\text{Mg}_{0.39})_{0.99}\text{Ti}_{1.01}\text{O}_3$, соответственно.

Гематит Fe_2O_3 фиксируется на флангах зон развития прожилково-вкрапленного золотого оруденения. В измененных скарнах он развивается по магнетиту, реже его пластинчатые агрегаты образуют скопления в кальците. Гематит был определен рентгенографически (Сазонов и др., 1991). Нами в существенных количествах встречен темно-красный массивный гипергенный гематит (ассоциация № 9), обособления которого покрыты черными корками, сложенными голландитом и литиофоритом (рис. 1е). В минерале установлены только Fe и O. По рентгенограмме минерал отвечает гематиту, параметры элементарной ячейки приведены в табл. 2, № 6.

Гётит $\text{FeO}(\text{OH})$ установлен рентгенографически в составе нескольких полиминеральных проб (Сазонов и др., 1991). Наряду с гидрогётитом и лимонитом, он является основным рудным компонентом зоны окисления. Такие образцы найдены нами в отвалах Южного карьера. Гётит в них слагает сплошные тонкозернистые массы, скорлуповатые и почковидные корки, сталагмитоподобные образования черного и разных оттенков бурого цвета (рис. 1ж, з), псевдоморфозы по пириту. Нами химически и рентгенографически изучен черный скорлуповатый гётит. В его составе установлены только Fe и O. По дифрактограмме минерал отвечает гётиту, параметры элементарной ячейки приведены в табл. 2, № 7.

Кварц SiO_2 является одним из главных жильных минералов Воронцовского месторождения, однако его содержание в различных породах варьирует. В метасоматитах молочно-белый, местами серый полупрозрачный кварц слагает жилы с убогой вкрапленной сульфидной (пирит и халькопирит) минерализацией. Кварц находится в виде мелких ксеноморфных зерен до сотых долей миллиметра в ассоциации с хлоритами, слюдами, карбонатами,

Таблица 2

Параметры элементарных ячеек кислородных соединений Воронцовского месторождения (наши данные)

Table 2

Unit-cell parameters of oxysalts from the Vorontsovskoe deposit (our data)

№	Минерал	№ ас.	Сингония	Параметры элементарной ячейки							Метод			
				<i>a</i> , Å	<i>b</i> , Å	<i>c</i> , Å	α, °	β, °	γ, °	<i>V</i> , Å³				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Оксиды и гидроксиды														
1	Арсенолит	6	Куб.	11.0412(7)						1346.01(3)	ПР			
2	Асболоан	9	Гекс.	2.9602(3)	2.8411(3)	10.048(5)	104.30(2)			76.25(4)	ПР			
3	Ахтенскит		Гекс.	2.8328(7)		4.330(3)				30.09(2)	ПР			
4	Бёрнессит		Мон.	5.2094(7)		7.2924(9)				104.59(2)	ПР			
5	Биксбиит		Куб.	9.3665(8)						821.7(2)	ПР			
6	Гематит		Триг.	5.0208(4)	13.735(2)	299.85(5)				ПР				
7	Гётит		Ромб.	9.9711(8)	3.0225(4)	4.6144(4)				139.086(2)	ПР			
8	Голландит		Тетр.	9.9124(9)		2.9074(5)				285.67(5)	ПР			
9	Клаудетит	6	Мон.	5.2467(6)	13.000(2)	4.5398(5)		94.11(1)		308.85(5)	ПР			
10	Коронадит	9	Тетр.	9.923(1)		2.8655(6)				282.16(7)	ПР			
11	Криптомелан		Тетр.	9.828(1)		2.8523(3)			275.52(5)	ПР				
12	Литиофорит		Триг.	2.8873(4)		28.039(3)			202.44(4)	ПР				
13	Магнетит	8	Куб.	8.3990(8)						592.50(17)	ПР			
14	Манганит	9	Мон.	5.302(3)	5.190(1)	5.335(1)	114.69(4)			133.37(5)	ПР			
15	Манжироит		Тетр.	9.7829(5)		2.8560(2)				273.33(2)	ПР			
16	Пиролозит		Тетр.	4.3915(2)		2.8610(1)				55.175(5)	МКР			
17	Рамсделлит		Ромб.	4.4939(6)	9.2058(9)	2.8493(4)				117.88(2)	МКР			
18	Рансьеит		Триг.	2.7871(3)		7.699(4)				51.79(2)	ПР			
19	Романешит		Мон.	13.865(2)	2.8428(5)	9.734(1)				92.472(8)	383.31(6)	ПР		
20	Тодорокит		Мон.	9.8559(9)	2.8478(4)	9.500(1)				95.271(9)	265.53(4)	ПР		
21	Цезаролит		Триг.	2.8378(3)		20.536(3)				143.22(3)	ПР			
Карбонаты														
22	Азурит	9	Мон.	5.0165(16)	5.856(2)	10.359(5)	92.53(3)			304.0(2)	МКР			
23	Кутногорит		Триг.	4.8272(5)		16.460(4)				332.16(8)	ПР			
24	Малахит		Мон.	9.458(1)	11.945(1)	3.2416(4)				98.46(1)	362.24(5)	МКР		
25	Родохрозит		Триг.	4.7874(6)		15.655(4)					310.74(9)	ПР		
26	Церуссит		Ромб.	5.1691(6)	8.503(1)	6.102(1)					268.21(5)	МКР		
Сульфаты														
27	Англезит	9	Ромб.	8.460(1)	5.3908(6)	6.966(1)	82.77(2)	103.73(1)	104.70(1)	317.71(6)	МКР			
28	Биверит-(Cu)		Триг.	7.1888(7)		17.096(6)				765.1(2)	ПР			
29	Брошантит		Мон.	13.091(1)	9.820(1)	6.0211(8)				751.90(5)	ПР			
30	Гипс		Мон.	5.6697(9)	15.289(3)	6.551(1)				118.50(2)	499.0(1)	ПР		
31	Пентагидрит		Трикл.	6.247(1)	10.561(2)	6.017(1)				109.13(2)	362.35(8)	ПР		
32	Старкеит		Мон.	5.9233(8)	13.614(1)	7.956(1)				90.97(1)	641.5(1)	ПР		
33	Халькантит		Трикл.	6.101(1)	10.717(2)	5.943(1)				82.49(2)	107.23(2)	102.66(1)	361.18(9)	ПР
34	Эпсомит		Ромб.	11.840(2)	11.941(8)	6.846(1)						968.0(5)	ПР	
Арсенаты														
35	Байлдонит	9	Мон.	10.097(4)	5.8954(7)	13.943(2)		104.14(2)		804.9(3)	ПР			
36	Тилазит	7	Мон.	6.701(1)	8.911(1)	7.5411(6)		121.070(9)		385.73(5)	ПР			
Силикаты														
37	Арменит	1	Ромб.	13.727(2)	18.696(2)	10.742(2)				2756.8(5)	МКР			
38	Гемиморфит	9	Ромб.	8.359(12)	10.725(15)	5.111(10)	91.693(9)	101.07(2)	90.01(1)	458(1)	МКР			
39	Галлуазит-7Å		Мон.	5.118(1)	8.907(2)	7.5516(8)				337.82(7)	ПР			
40	Каолинит		Трикл.	5.160(1)	8.943(1)	7.3643(8)				327.52(7)	ПР			
41	Клинохлор	—	Трикл.	5.330(1)	9.235(1)	14.457(3)	90.70(1)	98.26(2)	90.43(2)	704.1(2)	ПР			
42	Ломонтит		Мон.	7.497(1)	13.279(2)	14.589(1)		111.337(8)		1352.6(2)	МКР			
43	Мусковит-2M ₁		Мон.	5.1909(4)	8.949(1)	20.083(2)		95.196(7)		929.12(12)	ПР			
44	Нонпропит-15Å		Гекс.	5.1859(5)		14.928(3)				347.68(8)	ПР			

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
45	Паргасит		Мон.	9.8947(7)	18.0247(12)	5.3010(4)		105.563(7)		910.76(9)	ПР
46	Пишонит		Мон.	9.729(1)	8.957(1)	5.2255(7)		108.56(1)		431.68(6)	ПР
47	Селадонит		Мон.	5.216(1)	9.049(1)	10.161(1)		100.77(2)		471.17(9)	ПР
48	Тальк		Трикл.	5.2966(9)	9.449(1)	5.329(2)	100.08(2)	120.47(2)	84.96(1)	226.31(9)	ПР
49	Тремолит	—	Мон.	9.849(1)	18.136(6)	5.261(1)		104.75(1)		908.7(2)	ПР
50	Хризотил-2O _{rc1}		Ромб.	5.2670(5)	9.203(2)	14.344(2)				695.3(2)	ПР
51	Чапманит		Мон.	5.215(4)	8.998(7)	7.778(8)		101.67(5)		357.4(4)	ПР
52	Шабазит-Са		Трикл.	9.379(3)	9.346(2)	9.352(1)	94.62(2)	94.29(2)	94.07(2)	812.41(21)	МКР
53	Шамозит		Трикл.	5.372(1)	9.301(2)	14.279(3)	90.18(3)	97.28(4)	89.75(3)	707.7(2)	ПР

Примечание. Здесь и в табл. 3, 5, 6: № ас. – номер минеральной ассоциации. ПР – расчет по данным порошковой рентгенографии; МКР – монокристаллическая рентгенография. Прочерк в столбце № ас. означает, что образец не принадлежит ни к одной из установленных минеральных ассоциаций.

Note. Here and in Tables 3, 5 and 6: № ac. – number of mineral assemblage. ПР and МКР – unit-cell parameters calculated from powder and single-crystal X-ray diffraction data, respectively. Dash in column № ac. means that the sample does not belong to any of the mineral assemblages.

альбитом и калиевым полевым шпатом. Кварц является одним из главных минералов кор выветривания, составляя до 90 % их объема (Сазонов и др., 1991). В рудах зоны окисления преобладает тонкозернистый кварц, образующий агрегаты до 3–5 мм с размером зерен 0.01–0.05 мм. Кварцевые агрегаты сцементированы глинистыми минералами и часто окрашены оксидами и гидроксидами Fe в коричневые цвета. Существенно кварцевые метасоматиты (джаспероиды) развиваются на контактах даек с известняками и в самих известняках. Кварц здесь образует микрозернистые и халцедоновидные обособления неправильной формы и рисовидные кристаллы с гексагональным сечением. Участками гранобластовые агрегаты кварца на 80 % замещают брекчию известняка, образуя небольшие залежи и метасоматические жилы мощностью до 7.5 м вдоль контактов даек (Викентьев и др., 2016).

Нами кварц в существенных количествах отмечен в ассоциациях №№ 2, 4 и особенно 1 и 6, где он, наряду с доломитом и кальцитом, является одним из главных породообразующих минералов брекчий. Кварц обычен в зоне окисления (ассоциация № 9). Особенно эффектны образцы халцедона в виде гроздьевидных корок бледно-серовато-фиолетового цвета, встреченные нами в 2018 г. в отвалах Южного карьера (рис. 1и). В 2020 г. там же были найдены крупные (до 30 см) жеоды и щетки с кристаллами мутно-белого кварца размером до 1.5 см (рис. 2а). Прежде кристаллы этого минерала такого размера на месторождении не отмечались.

Минералы группы коронадита в зоне окисления месторождения распространены локально. В образцах из отвалов Южного карьера, найден-

ных в 2018–2020 гг., установлены четыре члена этой группы: голландит, коронадит, криптомелан и манжироит. **Голландит** $\text{Ba}(\text{Mn}^{4+}_6\text{Mn}^{3+}_2)\text{O}_{16}$ вместе с литиофоритом встречен в составе черных матовых тонкозернистых корок площадью до 3×1 см на темно-красном гематите (рис. 1е). **Коронадит** $\text{Pb}(\text{Mn}^{4+}_6\text{Mn}^{3+}_2)\text{O}_{16}$ образует черные дендриты длиной до 4 см на кварце с кальцитом и мелким пиритом (рис. 2б). **Криptomелан** $\text{K}(\text{Mn}^{4+}_7\text{Mn}^{3+})\text{O}_{16}$ слагает эффектные темно-коричневые (до черных) сферолиты диаметром до 1 см на щетке ожелезненного кварца (рис. 2в). **Манжироит** $\text{Na}(\text{Mn}^{4+}_7\text{Mn}^{3+})\text{O}_{16}$ встречен в виде тусклых черных корок на агрегате кварца с красным порошковатым гематитом (рис. 2г). В манжироите заключены микроворстки рутила. Химические составы всех минералов группы коронадита приведены в табл. 3. Порошковые рентгенограммы их весьма сходны. Главные линии $[d, \text{\AA} (I)]$ для голландита: 3.13(s), 2.38(s), 6.96, 3.47, 2.16, 1.87, 1.81, 1.60, 1.55; коронадита: 6.90(40), 3.47(40), 3.12(100), 2.40(80), 2.20(40), 2.12(20), 1.86(10), 1.56(10); криптомелана: 6.93(90), 4.90(50), 3.11(70), 2.39(100), 2.16(40), 1.83(40), 1.54(40), 1.42(20); манжироита: 6.96(90), 4.91(70), 3.48(30), 3.12(100), 2.40(100), 2.15(40), 1.83(40), 1.55(40). Параметры тетрагональных элементарных ячеек этих минералов даны в табл. 2, №№ 8, 10, 11 и 15 соответственно.

Литиофорит $(\text{Al}, \text{Li})(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{3+})\text{O}_2(\text{OH})_2$ обнаружен в образцах из отвалов Южного карьера, отобранных в 2020 г., где он тесно сростается с голландитом в составе черных корок, нарастающих на темно-красный массивный гематит (рис. 1е). Минерал диагностирован по качественному химическому составу (доминирующий Mn и подчинен-

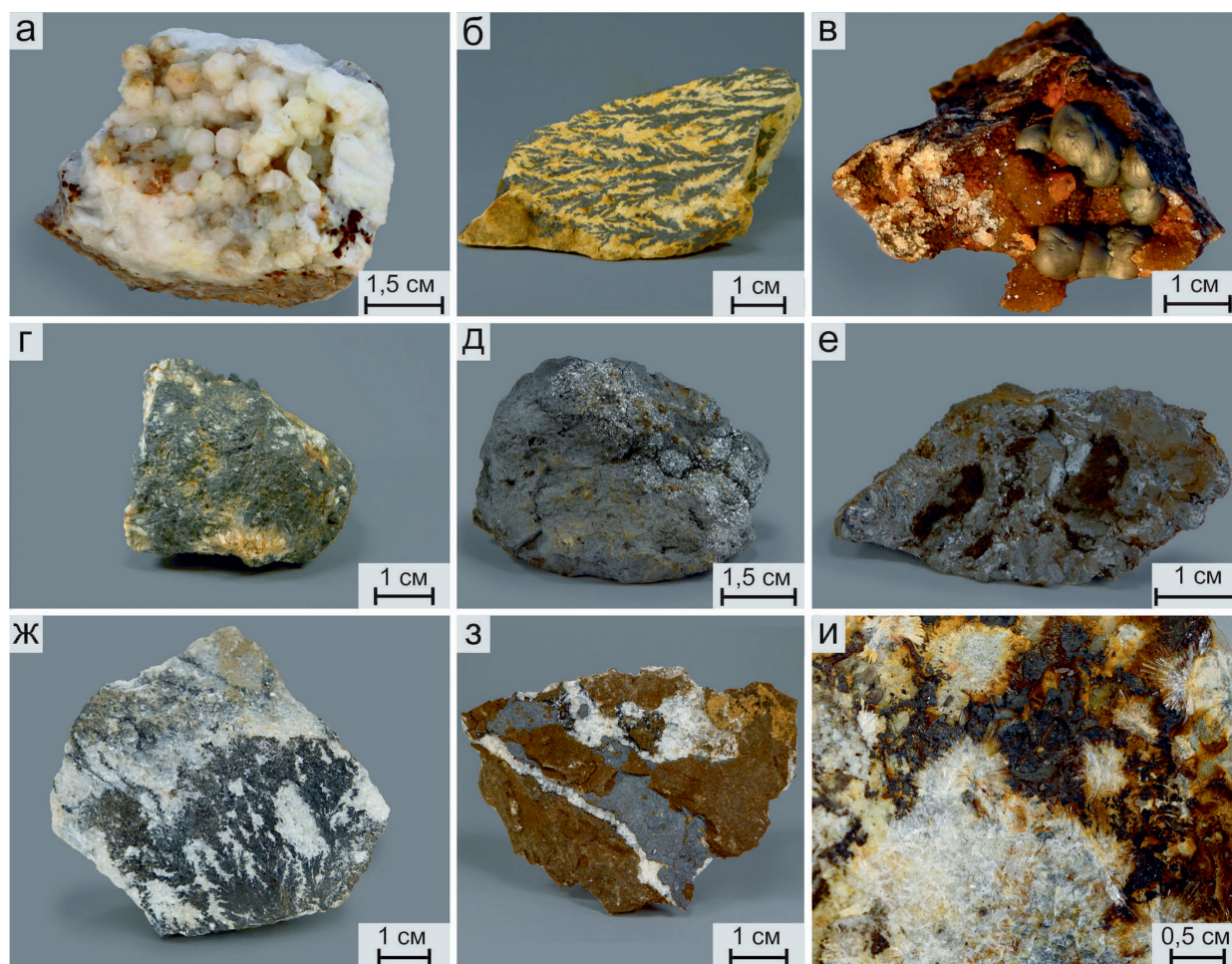


Рис. 2. Оксиды и гидроксиды Воронцовского месторождения, часть II:

а – щетка кристаллов кварца; б – черные дендриты коронадита на кальците; в – черные сферолиты криптомелана на щетке ожелезненного кварца; г – черные корки манжироита (с микровростками рутила) на кварце; д – черные искристые кристаллы пиролюзита в темно-сером массивном агрегате того же пиролюзита; е – черные блестящие искристые кристаллы рамселлита на коричнево-черной массивной корке гётита; ж – черные дендриты тодорокита на кварц-кальцитовом агрегате; з – черная корка романешита на коричневой породе из кальцита и романешита; и – темно-коричневые землистые корки цезаролита на бесцветных радиально-лучистых агрегатах гемиморфита.

Коллекции: музея «Штуфной кабинет», г. Североуральск (а, в), А.В. Касаткина (б, г–и). Фото: М.В. Цыганко (а, в), А.Д. Касаткиной (б, г–и).

Fig. 2. Oxides and hydroxides of the Vorontsovskoe deposit, part II:

а – crust of quartz crystals; б – black coronadite dendrites on calcite; в – black cryptomelane spherulites on quartz; г – black manjiroite crusts (with rutile microinclusions) on quartz; д – black sparkling pyrolusite crystals in dark gray massive pyrolusite aggregate; е – black shiny ramsdellite crystals on brown-black massive goethite crust; ж – black todorokite dendrites on quartz-calcite aggregate; з – black romanèchite crust on brown matrix of calcite and romanèchite; и – dark brown earthy cesàrolite crusts on colorless radial hemimorphite aggregates.

Collections: Museum «Shtufnoi Kabinet», Severouralsk (a, v), A.V. Kasatkin (б, г–и). Photo: M.V. Tsyganko (a, v), A.D. Kasatkina (б, г–и).

ное количество Al) и рентгенограмме (главные линии: 9.48(vs), 4.75(vs), 2.38(s), 3.13, 2.47, 1.87, 1.55, 1.42 Å; параметры гексагональной элементарной ячейки см. в табл. 2, № 12).

Минералы ряда магнезиохромит–хромит являются редкими для метасоматов, наложенных на карбонатные брекчии (ассоциация № 1).

Магнезиохромит MgCr_2O_4 и **хромит** $\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{O}_4$ слагают зерна угловатой формы до 0.15 мм в авгите, прените и армените; их химический состав варьирует, и иногда в пределах одного зерна можно выделить участки, отвечающие обоим минеральным видам. Среди спутников отмечены реальгар, пирит, арсенопирит, акташит, вейсбергит, золото, коло-

Таблица 3

Химический состав минералов группы коронадита (мас. %)

Table 3

Chemical composition of minerals of the coronadite group (wt. %)

№ ан.	№ обр.	№ ас.	Минерал	MnO ₂	Mn ₂ O ₃	BaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Сумма	Эмпирические формулы (расчет на 16 атомов О при Mn + Fe = 8)
1	1214Г		Голландит	60.45	17.30	18.88	2.58	—	0.14	99.35	Ba _{1.04} Ca _{0.02} (Mn ⁴⁺ _{5.88} Mn ³⁺ _{1.83} Fe ³⁺ _{0.27})O ₁₆
2	1721К	9	Коронадит	60.38	12.30	—	4.79	0.20	0.76	99.36	Pb _{0.82} Ca _{0.12} K _{0.04} (Mn ⁴⁺ _{6.10} Mn ³⁺ _{1.37} Fe ³⁺ _{0.33})O ₁₆
3	1808К		Криптомелан	81.20	10.90	1.49	—	5.02	0.64	100.10	K _{0.79} Ca _{0.08} Ba _{0.07} (Mn ⁴⁺ _{6.90} Mn ³⁺ _{1.02} V ³⁺ _{0.08})O ₁₆
4	1316М		Манжироит	86.64	8.89	—	1.58	0.88	—	101.59	Na _{0.82} K _{0.13} (Mn ⁴⁺ _{7.06} Mn ³⁺ _{0.80} Fe ³⁺ _{0.14})O ₁₆

Примечание. Здесь и в табл. 5 и 6: № ан. – номер анализа, № обр. – номер образца; прочерк – содержание компонента ниже предела обнаружения. Отношение Mn⁴⁺/Mn³⁺ вычислено по балансу зарядов. Анализы содержат (мас. %) 20.93 PbO (ан. 2), 0.85 V₂O₃ (ан. 3), 3.60 Na₂O (ан. 4).

Note. Here and in Tables 5 and 6: № ан. – number of analysis, № обр. – number of sample; dash – the content of element is below detection limit. The Mn⁴⁺/Mn³⁺ ratio is calculated from the charge balance. The analyses contain (wt. %) 20.93 PbO (ан. 2), 0.85 V₂O₃ (ан. 3), 3.60 Na₂O (ан. 4).

радоит, мышьяк. Химический состав хромшпинелидов (мас. %, отношение Fe²⁺/Fe³⁺ вычислено по балансу зарядов; магнезиохромит / хромит): MgO 10.89 / 9.45, FeO 16.65 / 18.45, Al₂O₃ 6.29 / 5.35, Cr₂O₃ 61.72 / 61.97, Fe₂O₃ 4.94 / 5.14, суммы 100.49 / 100.36. Эмпирические формулы (расчет на четыре атома О и три катиона металлов, валентность железа принята исходя из баланса зарядов): (Mg_{0.54}Fe²⁺_{0.46})_{1.00}(Cr_{1.63}Al_{0.25}Fe³⁺_{0.12})_{2.00}O₄ и (Fe²⁺_{0.52}Mg_{0.48})_{1.00}(Cr_{1.66}Al_{0.21}Fe³⁺_{0.13})_{2.00}O₄, соответственно.

Магнетит Fe²⁺Fe³⁺₂O₄ в различных количествах фиксируется практически во всех горных породах месторождения. Он обилён в скарнах, околоскарновых породах и послескарновых минеральных ассоциациях. Пирит и магнетит являются единственными рудными минералами неизменных скарнов, где последний представлен мелкими (0.1–0.2 мм) изометричными кристаллами или включениями в первом. В метасоматитах содержание магнетита не превышает сотых долей процента (Сазонов и др., 1991). В изученных нами магнетит-сульфидных рудах в кальцит-гранат-эпидотовых скарнах на южном фланге месторождения магнетит слагает железо-черные изометричные индивиды до 0.5 см и массивные агрегаты. В них установлена обильная вкрапленность сульфидов, прежде всего, арсенопирита и пирита, реже, сфалерита, халькопирита и галенита, а также редкие микровключения Bi-Te-содержащих сульфидов и сульфосолей (ассоциация № 8). В составе магнетита фиксируются только Fe и О. По порошковой рентгенограмме минерал отвечает магнетиту, параметр кубической элементарной ячейки приведен в табл. 2, № 13.

Манганит Mn³⁺O(OH) в виде мелкодисперсных частиц, окрашивающих корки и сферолиты кутногорита в темно-серый цвет, диагностирован в единственном образце, найденном в 2015 г. в отвалах Южного карьера (рис. 3б). В составе минерала обнаружены только Mn и О. Основные линии дифрактограммы [3.40(s), 2.63, 2.41, 1.80, 1.67 Å] и вычисленные по ней параметры моноклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 14) отвечают манганиту.

Пиролозит MnO₂ встречен в образцах из рудного склада и отвалов Северного карьера в виде черных с сильным металлическим блеском столбчатых кристаллов до 5 мм, сгруппированных в радиально-лучистые агрегаты, которые выполняют прожилки мощностью до 3–4 см и длиной до 10 см, секущие темно-серую марганцевую руду (рис. 2д),

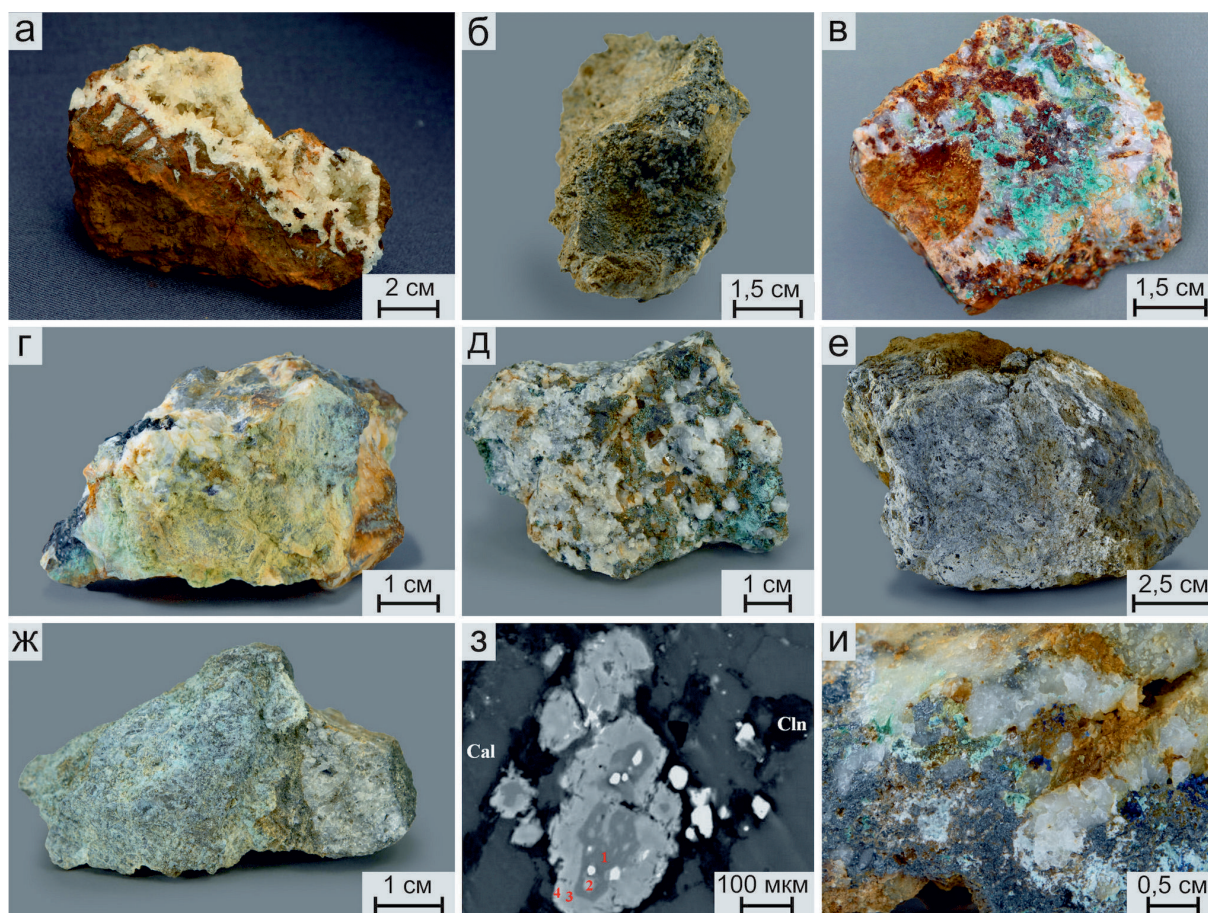


Рис. 3. Карбонаты, сульфаты, фосфаты и арсенаты Воронцовского месторождения:

а – щетка бесцветных кристаллов кальцита; б – серовато-черные сферолиты кутногорита, окрашенные мелкодисперсным манганитом; в – зеленые корки малахита на ожелезненном кварцевом агрегате; г – желтый порошковатый биверит-(Cu) на кварце с малахитом; д – зеленые мелкозернистые агрегаты брошантита на кварце с кальцитом; е – грязно-белые порошковатые корки пентагидрита, старкеита и гипса на породе; ж – бледно-голубые тонкие корки халькантита на кварце с кальцитом и окисленными сульфидами; з – зональные зерна, состоящие из минералов группы апатита, в кальците и клинохлоре с вкрапленностью пирита (белый): 1 – фторапатит; 2 – гидроксилapatит; 3 – хлорапатит; 4 – турнеорит (цифры соответствуют номерам анализов в табл. 7); и – зеленые корки байлдонита на кварце в ассоциации с бледно-голубым и белым гемиморфитом и ярко-синим азуритом.

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

Fig. 3. Carbonates, sulfates, phosphates and arsenates of the Vorontsovskoe deposit:

а – colorless crust of calcite crystals; б – grayish black kutnohorite spherules colored by fine-grained manganite; в – green malachite crusts on limonitized quartz aggregate; г – yellow powdery beaverite-(Cu) on quartz with malachite; д – green fine-grained brochantite aggregates on quartz with calcite; е – dirty white powdery crusts of pentahydrate, starkeyite and gypsum on matrix; ж – pale blue thin chalcantite crusts on quartz with calcite and oxidized sulfides; з – zonal grains of apatite group minerals in calcite and clinocllore with pyrite (white): 1 – fluorapatite; 2 – hydroxylapatite; 3 – chlorapatite; 4 – turneaurite (numbers correspond to the analyses in Table 7); и – green bayldonite crusts on quartz in assemblage with pale blue and white hemimorphite and bright blue azurite.

Collections: Museum «Shtufnoi Kabinet», Severouralsk (а, в), A.V. Kasatkin (б, г–и). Photo: M.V. Tsyganko (а, в), A.D. Kasatkina (б, г–ж, и), SEM (BSE) image (з).

на 95 об.% сложенную массивным пиролюзитом. В составе минерала установлены только Mn и O. Параметры тетрагональной элементарной ячейки (табл. 2, № 16) соответствуют пиролюзиту.

Рамсделлит MnO_2 найден в 2018 г. в отвалах Южного карьера в виде черных сильно блестящих чечевицепоподобных кристаллов до 0.5 мм, сгруппированных в участки площадью до 1 cm^2 , на корич-

нево-черной радиально-волокнистой корке гётита (рис. 2е). В составе минерала присутствуют только Mn и O. Параметры ромбической элементарной ячейки (табл. 2, № 17) отвечают рамсделлиту. Ранее в России этот минерал без диагностических сведений отмечался в марганцевых объектах Приполярного Урала: Пачвожском рудопроявлении (Литошко, 1996) и Парнокском месторождении (Герасимов и др., 1999). Таким образом, с точки зрения надежности диагностики наша находка, вероятно, является первой в Российской Федерации.

Рансьеит $(\text{Ca}, \text{Mn}^{2+})_{0.2}(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{3+})\text{O}_2 \times 0.6\text{H}_2\text{O}$ в тесном срастании с **тодорокитом** $(\text{Na}, \text{Ca}, \text{K}, \text{Ba}, \text{Sr})_{1-x}(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Al})_6\text{O}_{12} \times 3-4\text{H}_2\text{O}$ встречаются в образцах из отвалов Южного карьера, собранных в 2017 г. Оба оксида в подчиненном количестве присутствуют в массивном невзрачном агрегате каолинита и кальцита, окрашивая его в коричневый цвет. В составе минералов качественно установлены резко доминирующий Mn с подчиненным Ca и малой примесью Na. На рентгенограмме минеральной смеси рансьеиту отвечают линии с $d = 7.51(\text{vs})$, $3.75(\text{s})$, 2.48 , 2.07 и 1.42 \AA , а тодорокиту – $9.55(\text{vs})$, $4.81(\text{m})$, $2.44(\text{s})$, $2.35(\text{s})$ и 1.90 \AA . Параметры элементарных ячеек обоих оксидов приведены в табл. 2, №№ 18, 20. Образцы с тодорокитом были также найдены нами в 2020 г. на складе забалансовых руд № 2. Здесь минерал слагает дендриты черного цвета длиной до 3 см на кварц-кальцитовых агрегатах (рис. 2ж) и ассоциирует с более ранними диопсидом, тальком, фторапатитом и пиритом. Диагностирован по качественному химическому составу (Mn и O с резко подчиненными Ca, Mg, Na, K) и рентгенограмме (пики на 9.66 , 4.82 , 3.06 , 2.48 и 1.90 \AA).

Романешит $(\text{Ba}, \text{H}_2\text{O})_2(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{3+})_5\text{O}_{10}$ встречен нами в 2018 г. в образцах из отвалов Южного карьера в виде темно-серых и черных матовых тонкозернистых корок площадью до $3 \times 1 \text{ см}$ на кальците (рис. 2з). Минерал диагностирован по качественному химическому составу (только Ba, Mn и O) и дифрактограмме (сильные линии [d , \AA (I): $9.66(30)$, $6.96(50)$, $5.58(40)$, $3.48(60)$, $3.29(60)$, $2.89(50)$, $2.40(100)$, $2.18(80)$]; параметры моноклинной элементарной ячейки см. в табл. 2, № 19).

Рутил TiO_2 присутствует в малых количествах в карбонатно-тальковом цементе брекчий и содержит до $0.75 \text{ мас. \% } \text{WO}_3$ (Мурзин, Варламов, 2010). Он редко встречается среди нерудных минералов ассоциаций №№ 1, 4 и 6, а также в виде микроворостков в манжироите в ассоциации № 9. Рутил идентифицирован по химическому составу (только

Ti и O), а также по пикам на 3.25 , 2.49 и 1.69 \AA в порошковых рентгенограммах минеральных смесей.

Ферберит $\text{Fe}^{2+}(\text{WO}_4)$ встречен в виде редких короткопризматических кристаллов размером до $20 \times 15 \text{ мкм}$ в кварце с кальцитом и мусковитом (обр. Vor-08/16-3-1, ассоциация № 4). Спутниками ферберита являются барит, пирит, реальгар, антимонит, аурипигмент, киноварь, колорадоит, мышьяк, парапьерротит, сфалерит и фторапатит. В отраженном свете на фоне вмещающего кварца ферберит имеет серовато-белый цвет, двуотражение слабое. В скрещенных николях отчетливо анизотропный. В иммерсии наблюдаются редкие темно-коричнево-красные внутренние рефлексy. В составе минерала присутствует небольшая доля гюбнеритового компонента. Состав ферберита (мас. %): MnO 2.31, FeO 21.15, WO_3 75.98, сумма 99.44. Эмпирическая формула (расчет на четыре атома O): $(\text{Fe}_{0.90}\text{Mn}_{0.10})_{1.00}\text{W}_{1.00}\text{O}_4$.

Фергусонит-(Y) YNbO_4 предположительно установлен в обр. Vor-2018/10-4, отобранном в 2018 г. на рудном складе месторождения. Минерал образует очень редкие и мелкие (не более 7 мкм) включения в доломит-кальцитовый породе и ассоциирует с баритом, вакабаяшилитом, Cr-содержащим магнетитом, пиритом, реальгаром, рутьеритом, хинганитом-(Y) и хинганитом-(Nd). Химический состав минерала (мас. %): CaO 0.40, Y_2O_3 27.13, Ce_2O_3 0.57, Nd_2O_3 1.61, Sm_2O_3 1.56, Gd_2O_3 4.03, Tb_2O_3 0.57, Dy_2O_3 4.70, Er_2O_3 3.44, Tm_2O_3 0.71, Yb_2O_3 2.57, Lu_2O_3 0.39, TiO_2 0.48, ThO_2 0.78, Nb_2O_5 47.63, Ta_2O_5 0.56, WO_3 2.32, сумма 99.45. Эмпирическая формула (расчет на четыре атома O): $(\text{Y}_{0.65}\text{Dy}_{0.07}\text{Gd}_{0.06}\text{Er}_{0.05}\text{Yb}_{0.04}\text{Nd}_{0.03}\text{Sm}_{0.02}\text{Ce}_{0.01}\text{Tb}_{0.01}\text{Tm}_{0.01}\text{Lu}_{0.01}\text{Ca}_{0.02}\text{Th}_{0.01})_{0.99}(\text{Nb}_{0.97}\text{W}_{0.03}\text{Ti}_{0.02}\text{Ta}_{0.01})_{1.03}\text{O}_4$. Помимо фергусонита-(Y) в рудных брекчиях месторождения нами найдены еще четыре минерала с видообразующими РЗЭ: **гаспарит-(La)**, **черновит-(Y)**, **хинганит-(Y)** и **хинганит-(Nd)**. Стоит отметить, что изучение рудных брекчий месторождения с помощью масс-спектрометрии выявило их обогащенность РЗЭ, причем с преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми. Суммарное содержание РЗЭ варьирует от 3.7 до 54.8 г/т , обнаруживая тенденцию к росту с увеличением интенсивности процессов брекчирования пород (Мурзин и др., 2010; Степанов и др., 2017).

Цезаролит $\text{PbMn}^{4+}_3\text{O}_6(\text{OH})_2$ образует темно-коричневые землистые агрегаты, обрастающие кристаллы гемиморфита в образцах из отвалов Южного карьера, собранных в 2018 г. (рис. 2и).

Химический состав минерала (мас. %, содержание H_2O рассчитано по стехиометрии): PbO 45.55; Fe_2O_3 4.25; MnO_2 46.07; H_2O 3.45; сумма 99.32. Эмпирическая формула (расчет на восемь атомов O , из которых два отнесены к гидроксильным группам): $Pb_{1.06}(Mn_{2.76}^{4+}Fe_{0.28}^{3+})_{3.04}O_6(OH)_2$. Главные линии дифрактограммы [d , Å (I , %): 3.41(40), 2.21(100), 2.11(50), 1.88(20), 1.77(40), 1.58(50), 1.49(10), 1.42(20)] и вычисленные по ней параметры гексагональной элементарной ячейки (табл. 2, № 21) соответствуют цезаролиту. В России этот минерал известен в зоне окисления месторождений Дукат и Арылах в Магаданской области в виде рыхлых масс и коллоидно-зональных агрегатов, где он диагностирован по оптическим свойствам и химическому составу (Двуреченская, 2001). Наша находка является первой в Уральском регионе.

Карбонаты

Азурит $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$ обнаружен в нескольких образцах из отвалов Южного карьера, отобранных в 2020 г., в виде темно-синих зерен до 5 мм и тонких примазок на ожелезненном кварце в ассоциации с байлдонитом, малахитом, гемиморфитом и первичными теннантитом-(Zn), пиритом, сфалеритом и галенитом (рис. 3и). Азурит диагностирован качественно по химическому составу (только Cu в катионном составе) и рентгенографически (табл. 2, № 22).

Доломит $CaMg(CO_3)_2$ является одним из главных жильных минералов Воронцовского месторождения наряду с кальцитом и кварцем. Он широко распространен в карбонатных и карбонатизированных породах, обычен в волластонитовых метасоматитах, березитизированных-лиственитизированных породах, метасоматитах джаспероидной формации. Минерал подробно описан и изучен комплексом методов (Сазонов и др., 1991; Викентьев и др., 2016; Сорока и др., 2017, 2018). Нами доломит отмечен во всех минеральных ассоциациях в качестве главного жильного минерала карбонатных брекчий. В.Н. Сазоновым с соавторами (1991) в джаспероидах описана сосуществующая с кальцитом разновидность доломита с изоморфной примесью Fe и Mn . Анализ образцов с самым высоким содержанием Fe пересчитываются на составы, отвечающие высокожелезистому доломиту, поэтому присутствие анкерита (в его сегодняшнем минералогическом понимании) не подтверждается анализами. Нами в ассоциации № 5 встречен доломит, содержащий до 11.1 мас. % MnO .

Кальцит $CaCO_3$ является главным жильным карбонатом месторождения. Он чрезвычайно широко распространен в карбонатных и карбонатизированных породах (известняки, в т. ч. мраморизованные, карбонатсодержащие туффиты, эруптивные брекчии – известняковые обломки, вулканогенный цемент), развит в скарнах в послерудных ассоциациях. В равных объемах с доломитом кальцит распространен в волластонитовых метасоматитах, березитизированных и лиственитизированных породах, метасоматитах джаспероидной формации. Нами в отвалах Южного карьера в 2019 г. встречены эффектные щетки бесцветных скаленоэдров кальцита, достигающих 3 см (рис. 3а). Минерал детально описан в целом ряде работ и подробно изучен разными методами (Сазонов и др., 1991; Мурзин, Варламов, 2010; Викентьев и др., 2016; Степанов и др., 2017; Сорока и др., 2017, 2018). В.Н. Сазоновым с соавторами (1991) в джаспероидах описана разновидность кальцита, содержащая изоморфную примесь Mg , Mn и Fe , а В.В. Мурзиным и Д.А. Варламовым (2010) – обогащенная Mn разновидность кальцита цемента брекчий (до 6.9 мас. % MnO). Еще более богатая марганцем разновидность, содержащая до 9.35 мас. % MnO , встречена нами в ассоциации № 5.

Кутногорит $CaMn^{2+}(CO_3)_2$ установлен в единственном образце, найденном в 2015 г. в отвалах Южного карьера в виде корок и мелких сферолитов серовато-белой, а местами темно-серой окраски из-за «пропитки» мелкодисперсным манганитом (рис. 3б). Химический состав минерала (мас. %, содержание CO_2 вычислено по стехиометрии): CaO 24.24; MnO 31.53; FeO 3.29; CO_2 40.54; сумма 99.60. Он отвечает эмпирической формуле (расчет на шесть атомов O): $Ca_{0.94}(Mn_{0.96}Fe_{0.10})_{1.06}(CO_3)_2$. Главные линии дифрактограммы [d , Å (I): 3.72(50), 2.90(100), 2.41(40), 2.20(30), 2.02(30), 1.85(10), 1.80(40), 1.47(10)] и рассчитанные по ней параметры элементарной ячейки (табл. 2, № 23) отвечают кутногориту.

Малахит $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ – слабо распространенный минерал зоны окисления месторождения, встреченный в отвалах Южного карьера. В отобранных нами образцах в 2018 г. он образует зеленые волокнистые кристаллы и зерна до 0.5 см, а также примазки преимущественно кварцевых агрегатах (рис. 3в). В катионном составе минерала установлена только Cu . Параметры моноклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 24) отвечают малахиту.

Родохрозит $Mn(CO_3)$ обнаружен в образцах, собранных в отвалах Южного карьера в 2018 г. Он

слагает основной объем темно-серых тонких корок в тесном срастании с каолинитом, криптомеланом и тодорокитом и в ассоциации с золотисто-желтыми кристаллами пирита. В химическом составе минерала обнаружены только Mn, S и O. Параметры элементарной ячейки (табл. 2, № 25) соответствуют родохрозиту.

Сидерит $\text{Fe}(\text{CO}_3)$ экзогенного происхождения встречен в коре выветривания, где он представлен, в основном, мелко- и микроглобулярными агрегатами размером до десятых долей миллиметра. Он содержит многочисленные микровключения силикатов и других минералов. В карстовых образованиях обычен тонкодисперсный сидерит, ассоциирующий с тонкодисперсными гематитом, гётитом и, иногда, вивианитом. Сидерит идентифицирован в полиминеральных пробах по химическому составу и рентгенографически (Сазонов и др., 1991).

Церуссит $\text{Pb}(\text{CO}_3)$ обнаружен в образцах из отвалов Южного карьера в виде бесцветных с алмазным блеском корок размером до 1×0.5 мм, замещающих галенит в кварц-сульфидном агрегате (ассоциация № 9). Спутники церуссита – англезит, пирит и сфалерит. Минерал диагностирован качественно (Pb, S и O), рентгенографически (табл. 2, № 26) и по КР спектру. В последнем присутствуют все полосы, характерные для церуссита (Martens et al., 2004): очень сильная полоса при 1051 см^{-1} , соответствующая ν_1 (симметричные валентные колебания анионов CO_3^{2-}), слабые полосы при 834 см^{-1} (антисимметричные валентные колебания ν_2 группы CO_3^{2-}), 693 и 673 см^{-1} (антисимметричные деформационные колебания ν_4 анионов CO_3^{2-}), полосы средней интенсивности при 141 и 103 см^{-1} (решеточные моды).

Сульфаты

Англезит $\text{Pb}(\text{SO}_4)$ в тесном срастании с церусситом образует бесцветные до бледно-зеленых (из-за примеси минералов Cu) тонкие корки на кварце с галенитом, пиритом и сфалеритом в образцах из отвалов Южного карьера, собранных в 2020 г. (ассоциация № 9). В составе англезита установлены Pb и S в отношении, близком к $1 : 1$, а также O. Параметры ромбической элементарной ячейки приведены в табл. 2, № 27.

Барит $\text{Ba}(\text{SO}_4)$ является одним из наиболее поздних минералов в цементе брекчий. Его выделения размером $1\text{--}2$ мм цементируют пространство между зернами всех порообразующих минералов,

а также пирита. Барит содержит до 1.5 мас. % SrO (Викентьев и др., 2016). Нами барит встречен во всех семи ассоциациях, приуроченных к карбонатным брекчиям, причем в ассоциациях №№ 1, 3 и 5 он входит в число главных жильных минералов. Барит найден также в образцах из отвалов Южного карьера (ассоциация № 9) и склада забалансовых руд № 2 – в трещинах вулканитов в виде белых с сильным стекляннным блеском радиально-лучистых выделений до 1 см. Его химический состав близок к стехиометрическому.

Биверит-(Cu) $\text{Pb}(\text{Fe}^{3+}_2\text{Cu})(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ обнаружен нами в 2020 г. в зоне окисления месторождения. В образцах из отвалов Южного карьера (ассоциация № 9) он слагает желтые порошковатые корки, развивающиеся по ожелезненному кварцевому агрегату с галенитом, джарлеитом, ковеллином и малахитом (рис. 3г). Химический состав минерала (мас. %, содержание H_2O вычислено по стехиометрии): K_2O 1.41, CuO 13.18, PbO 27.97, Fe_2O_3 23.93, As_2O_5 3.06, SO_3 22.45, H_2O 8.18, сумма 100.18. Эмпирическая формула (расчет на 14 атомов O): $(\text{Pb}_{0.83}\text{K}_{0.20})_{1.03}(\text{Fe}^{3+}_{1.98}\text{Cu}_{1.10})_{3.08}(\text{S}_{1.85}\text{As}_{0.18})_{2.03}\text{O}_8(\text{OH})_6$. Главные линии порошковой рентгенограммы и параметры элементарной ячейки (табл. 2, № 28) соответствуют структурному типу алунита.

Брошантит $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$ найден в 2020 г. в отвалах Южного карьера (ассоциация № 9) в виде светло-зеленых мелкозернистых агрегатов размером до 2×1 см на кварце с кальцитом, малахитом, пиритом, теннантитом-(Zn), халькопиритом, галенитом и борнитом (рис. 3д). В составе минерала установлены только Cu и S в соотношении около $4 : 1$. Главные линии рентгенограммы и параметры моноклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 29) соответствуют брошантиту.

Гипс $\text{Ca}(\text{SO}_4) \times 2\text{H}_2\text{O}$, **пентагидрит** $\text{Mg}(\text{SO}_4) \times 5\text{H}_2\text{O}$, **старкеит** $\text{Mg}(\text{SO}_4) \times 4\text{H}_2\text{O}$ и **эпсомит** $\text{Mg}(\text{SO}_4) \times 7\text{H}_2\text{O}$ являются продуктами процессов современного минералообразования. Они встречены нами в 2018 г. в образцах из отвалов Южного карьера. Первые три сульфата тесно сростаются между собой в составе полиминеральных корок грязно-белого цвета, развивающихся по агрегату кварца, кальцита и фторапатита с подчиненными количествами пирита, сфалерита, галенита и тетраэдрита-(Zn) (рис. 3е). Эпсомит слагает мономинеральные корки белого цвета на кварц-кальцитовых агрегатах. В составе гипса установлены Ca и S, а в составе остальных сульфатов – Mg и S в соотношении около $1 : 1$. Дифрактограмма

образца 1091П, содержащего смесь пентагидрита, старкеита и гипса, приведена в табл. 4. Сильные линии порошковой рентгенограммы эпсомита [d , Å (I): 5.95(30), 5.32(40), 4.46(20), 4.19(100), 3.42(20), 2.97(20), 2.87(30), 2.65(50)]. Вычисленные по дифрактограммам параметры элементарных ячеек всех сульфатов приведены в табл. 2, №№ 30–32 и 34.

Халькантит $\text{Cu}(\text{SO}_4) \times 5\text{H}_2\text{O}$ изредка встречается в образцах из отвалов Южного карьера (ассоциация № 9), где он слагает бледно-голубые со стекляннм блеском тонкие корки на кварце с кальцитом и частично окисленными сульфидами (пирит, халькопирит, галенит, сфалерит) (рис. 3ж). В составе минерала установлены Cu и S в соотношении, близком к 1 : 1. Главные линии рентгенограммы и параметры триклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 33) отвечают структурному типу халькантита.

Вольфраматы

Шеелит $\text{Ca}(\text{WO}_4)$ является малораспространенным минералом ассоциации № 1. Он образует тетрагональные в сечении кристаллы размером до 30×10 мкм в кальците. Шеелит содержит мелкие включения реальгара. В составе минерала установлена ошутимая примесь As (мас. %): CaO 20.52, As_2O_5 5.08, WO_3 73.62, сумма 99.22. Эмпирическая формула (расчет на четыре атома O): $\text{Ca}_{1.02}(\text{W}_{0.89}\text{As}_{0.12})_{1.01}\text{O}_4$.

Фосфаты, арсенаты

Минералы группы апатита представлены гидроксилапатитом, свабитом, турноритом, фторапатитом и хлорапатитом. Из них только **фторапатит** $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ широко распространен на месторождении. Он встречается в виде изометричных выделений размером 10–12 мкм в Mn-содержащем кальците цемента брекчий. По химическому составу фторапатит необычен: он представлен обогащенной As разновидностью (6.3–7.2 мас. % As_2O_5 ¹ и 2.4–2.6 мас. % F) (Мурзин, Варламов, 2010). Фторапатит в кристаллах до 20 мкм присутствует среди нерудных минералов метасоматита, наложенных на парагенезис самородного мышьяка и арсенопирита из образцов 2007 г. Он принадлежит к Sr-Mn-

As-Cl-содержащей разновидности (до 0.7 мас. % SrO, до 0.6 мас. % MnO, до 0.2 мас. % As_2O_5 ¹ и до 1.6 мас. % Cl). В некоторых зернах обнаружены существенные примеси РЗЭ (до 6.4 мас. % Ce_2O_3 , до 3.2 мас. % La_2O_3 и до 2.0 мас. % Nd_2O_3). Судя по пониженным значениям концентраций галогенов и суммы всех измеренных компонентов (93.5 мас. %), РЗЭ-содержащий апатит содержит карбонат- и/или гидроксил-ионы (Мурзин и др., 2011). Нами фторапатит встречается во всех ассоциациях, кроме №№ 2 и 8. В одних (№№ 1, 4, 5) он отмечен в качестве редкого минерала, в других же является распространенным. Наиболее интересным представляется зональный фторапатит из ассоциации № 7. В нем широко проявлен изоморфизм между Р и As и между F, Cl и OH, вплоть до появления участков, отвечающих по составу **гидроксилапатиту** $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, **хлорапатиту** $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ и **турнориту** $\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$. Все четыре члена группы апатита присутствуют в зональных зернах овальной формы размером до 40 мкм, заключенных в кальците и клинохлоре и содержащих микровкрапленность пирита (рис. 3з). Содержание Cl и As увеличивается от центра зерна к краям, поэтому ядро всегда отвечает фторапатиту, а краевые зоны иногда соответствуют турнориту. В ассоциации № 1 встречается **свабит** $\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{F}$ в виде включений до 30 мкм в барите с кальцитом. Интересно, что он не содержит Р при низких содержаниях изоморфных Si и S. Химический состав всех минералов группы апатита приведен в табл. 5.

Байлдонит $\text{PbCu}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2$ – редкий гипергенный минерал, найденный в 2020 г. в образцах из отвалов Южного карьера (ассоциация № 9) в виде мелких зеленых корок на кварце с азуритом, гемиморфитом и реликтами теннантита-(Zn) (рис. 3и). Химический состав минерала (мас. %, содержание H_2O вычислено по стехиометрии): CuO 30.82, ZnO 2.09, PbO 31.63, As_2O_5 30.58, SO_3 0.37, H_2O 4.94, сумма 100.43. Эмпирическая формула (расчет на десять атомов O): $\text{Pb}_{1.03}(\text{Cu}_{2.83}\text{Zn}_{0.19})_{3.02}(\text{As}_{1.94}\text{S}_{0.03})_{1.97}\text{O}_7(\text{OH})_4$. Главные линии порошковой рентгенограммы [d , Å (I): 4.90(40), 4.52(40), 3.18(100), 2.93(50), 2.68(50), 2.50(40), 2.27(30)] и вычисленные по ней параметры моноклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 35) соответствуют байлдониту.

Вивианит $\text{Fe}^{2+}_3(\text{PO}_4)_2 \times 8\text{H}_2\text{O}$ встречается в богатых железом существенно окристо-монтмориллонитовых участках карстовых образований. Он образует мелкие трещиноватые линзы длиной до 3 мм и мощностью до 1 мм от серо-голубой до ин-

¹ Приведенные авторами (Мурзин, Варламов, 2010; Мурзин и др., 2011) значения в As_2O_3 пересчитаны нами на As_2O_5 .

Таблица 4

Результаты расчета порошковой дифрактограммы образца 1091П с пентагидритом, старкеитом и гипсом

Table 4

Powder XRD data of sample 1091P with pentahydrate, starkeyite and gypsum

$d, \text{\AA}$ ($I, \%$) обр. 1091П	Пентагидрит [JCPDS-ICDD, 25-0532]	Старкеит [JCPDS-ICDD, 24-0720]	Гипс [JCPDS-ICDD, 33-0311]
10.358(5)	10.31(5)		
7.682(10)			7.63(100)
6.896(25)		6.83(45)	
5.853(15)	5.84(20)		
5.648(10)	5.62(10)		
5.470(60)		5.43(75)	
5.160(15)	5.15(30)	5.15(8)	
4.966(30)	4.93(100)		
4.828(5)	4.83(5)		
4.735(30)		4.70(35)	
4.491(100)		4.46(100)	
4.351(10)	4.34(5)		
4.283(5)			4.283(100)
3.974(60)		3.951(65)	
3.817(10)		3.794(8)	3.799(17)
3.667(20)	3.65(30)		
3.616(10)		3.598(12)	
3.475(10)	3.46(15)		
3.415(50)		3.398(45)	
3.272(15)	3.26(40)	3.263(6)	
3.231(40)		3.216(40)	
3.165(5)	3.15(10)		
3.078(5)			3.065(75)
3.043(15)	3.03(20)		
3.019(5)	3.00(20)		
3.007(5)			
2.989(20)	2.99(5)	2.978(20)	
2.958(70)	2.95(30)	2.946(55)	
2.907(5)	2.90(5)	2.892(8)	2.873(45)
2.800(10)	2.79(25)		
2.779(25)		2.769(25)	2.789(10)
2.765(20)		2.755(14)	
2.707(10)	2.69(15)	2.702(6)	
2.685(20)	2.68(25)		2.685(35)
2.564(25)		2.555(20)	
2.546(10)	2.537(20)		
2.485(10)	2.489(5)	2.478(8)	2.495(11)
2.465(20)	2.466(5)	2.458(14)	
2.430(25)		2.422(20)	
2.406(5)	2.407(15)		
2.361(15)	2.360(5)	2.351(14)	
2.285(15)	2.280(5)	2.279(10)	
2.273(20)		2.266(25)	
2.228(5)			2.219(15)
2.186(5)	2.182(5)		
1.998(5)	1.995(35)	1.965(8)	
1.882(10)	1.880(5)	1.877(8)	
1.799(10)		1.795(10)	
1.721(5)	1.729(10)	1.718(6)	

Примечание. Приведены только линии с $I_{\text{rel.}} \geq 5\%$.

Note. Only reflections with $I_{\text{rel.}} \geq 5\%$ are included.

Таблица 5

Table 5

Химический состав минералов группы апатита (мас. %)

Chemical composition of minerals of the apatite group (wt. %)

№ ан.	№ обр.	№ ас.	Минерал	CaO	P ₂ O ₅	As ₂ O ₅	F	Cl	H ₂ O	—O≡F/Cl	Сумма	Эмпирические формулы (расчет на 13 анионов)
1	Vor-10bis-3с		Фторапатит	54.75	41.35	0.67	2.62	0.52	0.41	-1.22	99.10	Ca _{4,98} (P _{2,97} As _{0,03}) _{3,00} O ₁₂ [F _{0,70} (OH) _{0,23} Cl _{0,07}] _{1,00}
2	Vor-10bis-3с	7	Гидроксилapatит	50.91	27.21	19.31	0.56	1.45	1.03	-0.56	99.91	Ca _{4,96} (P _{2,10} As _{0,92}) _{3,02} O ₁₂ [(OH) _{0,62} Cl _{0,22} F _{0,16}] _{1,00}
3	Vor-10bis-3с		Хлорапатит	50.72	27.66	17.56	1.29	3.03	0.25	-1.23	99.28	Ca _{5,00} (P _{2,15} As _{0,84}) _{2,99} O ₁₂ [Cl _{0,47} F _{0,38} (OH) _{0,15}] _{1,00}
4	Vor-10bis-3с		Турнорит	47.30	17.33	30.54	0.75	2.93	0.43	-0.98	98.30	Ca _{4,98} (As _{1,57} P _{1,44}) _{3,01} O ₁₂ [Cl _{0,49} (OH) _{0,28} F _{0,23}] _{1,00}
5	Vor-01/19-1трф	1	Свабит	44.18	—	50.90	1.60	1.98	0.14	-1.12	99.54	Ca _{5,02} (As _{2,82} Si _{0,11} S _{0,07}) _{3,00} O ₁₂ [F _{0,54} Cl _{0,36} (OH) _{0,10}] _{1,00}

Примечание. Содержание H₂O вычислено по стехиометрии. Анализ № 5 содержит 1.02 мас. % SiO₂ и 0.84 мас. % SO₃.

Note. The H₂O content is calculated by stoichiometry. Analysis no. 5 contains 1.02 wt. % SiO₂ and 0.84 wt. % SO₃.

дигово-синей окраски. Вивианит установлен в полиминеральных пробах по химическому составу и рентгенограмме (Сазонов и др., 1991).

Гаспарит-(La) La(AsO₄) в единственном зерне размером 20 × 10 мкм (обр. Vor-10-6, ассоциация № 7) установлен на контакте с алабандином в кальцит-доломитовой породе. Среди спутников гаспарита-(La) отмечены цыганкоит и арсениопирит. Химический состав минерала (мас. %): CaO 2.23, La₂O₃ 36.73, Ce₂O₃ 14.70, Pr₂O₃ 1.37, Nd₂O₃ 2.39, As₂O₅ 41.98, сумма 99.40. Эмпирическая формула (расчет на четыре атома O): (La_{0,62}Ce_{0,25}Nd_{0,04}Pr_{0,02}Ca_{0,11})_{1,04}As_{1,00}O₄.

Тилазит CaMg(AsO₄)F встречается в ассоциации № 7, где образует выделения размером до 0.2 мм в доломите и кальците, тесно срастаясь с дюранозитом, цыганкоитом, аурипигментом и реальгаром. Химический состав минерала (мас. %): MgO 18.02, CaO 24.97, As₂O₅ 50.85, F 9.21, O ≡ F₂ = -3.88, сумма 99.17. Эмпирическая формула (расчет на пять анионов O + F): Ca_{0,99}Mg_{1,00}(As_{0,99}O_{3,92})_{4,91}F_{1,08}. Главные линии рентгенограммы и параметры моноклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 36) соответствуют тилазиту.

Черновит-(Y) Y(AsO₄) найден в единственном образце Вор-01/19-10в (ассоциация № 5) в виде очень редких тетрагональных в сечении кристаллов до 30 мкм, рассеянных в Mn-содержащем доломите. В составе минерала присутствуют существенная доля ксенотимового (0.30 а.ф.) и небольшая – уэксилдитового (0.04 а.ф.) минералов. Черновит-(Y) содержит (мас. %): CaO 1.23, Y₂O₃ 41.06, La₂O₃ 0.44, Ce₂O₃ 0.74, Nd₂O₃ 2.25, Sm₂O₃ 1.01, Gd₂O₃ 2.36, Dy₂O₃ 4.09, Er₂O₃ 2.09, Yb₂O₃ 1.93, P₂O₅ 9.36, V₂O₅ 1.45, As₂O₅ 32.72, сумма 100.73. Эмпирическая формула (расчет на четыре атома O): (Y_{0,82}Dy_{0,05}Nd_{0,03}Gd_{0,03}Er_{0,02}Yb_{0,02}La_{0,01}Ce_{0,01}Sm_{0,01}Ca_{0,05})_{1,05}(As_{0,64}P_{0,30}V_{0,04})_{0,98}O₄.

Силикаты

Амфиболы установлены в пропилитизированных породах месторождения (Сазонов и др., 1991). К их числу отнесены обыкновенная роговая обманка, а также амфибол ряда актинолит–тремолит. В соответствии с современной номенклатурой состав «актинолитизированной обыкновенной роговой обманки» (Сазонов и др., 1991) отвечает **магнезиоферригорнблендиту** □Ca₂(Mg₄Fe³⁺)(AlSi₇O₂₂)(OH)₂. **Тремолит** □Ca₂(Mg_{5,0-4,5}Fe²⁺_{0,0-0,5})Si₈O₂₂(OH)₂ в виде бесцветных игольчатых кристаллов отмечен в поздних минеральных ассоциациях скарнов, а

также в приразломных волластонитовых метасоматитах. Он определен по данным оптических констант. Химически изученный тремолит установлен в качестве редкого минерала цемента карбонатных брекчий (Мурзин, Варламов, 2010).

Нами тремолит найден в 2019 г. в виде кремово-белых радиальных агрегатов тонковолокнистых кристаллов длиной до 0.5 см в белом мраморе (рис. 4а) в ассоциации с коричневатым массивным тальком. Химический состав минерала показан в табл. 6, ан. 18. Диагностика минерала подтверждена рентгенографически. Параметры моноклинной элементарной ячейки приведены в табл. 2, № 49.

Еще одним амфиболом, достоверно установленным нами на месторождении, является **паргасит** $\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, найденный в 2014 г. в образцах из отвалов Северного карьера. Минерал слагает черные призматические со стекляннным блеском кристаллы размером до 1×0.5 см в лампрофире (рис. 4б). Химический состав показан в табл. 6, ан. 12. Параметры моноклинной элементарной ячейки паргасита приведены в табл. 2, № 45.

Арменит $\text{BaCa}_2(\text{Al}_6\text{Si}_9)\text{O}_{30} \times 2\text{H}_2\text{O}$ достоверно установлен в образцах, отобранных на рудном складе (Касаткин, 2019) среди минералов ассоциации № 1. Он образует белые со стекляннным блеском обособления размером до 1 мм в метасоматитах пропиловитового типа, наложенных на карбонатные брекчии, и тесно сростается с клинохлором, мусковитом, пиритом, кальцитом и доломитом (рис. 4в). Рудные минералы в этой породе представлены боскардинитом, дальнегроитом, золотом, киноварью, колорадоитом, криститом, метациннабаритом, парапьерротитом, рутьеритом, шабурнеитом. Отражательная способность арменита существенно выше, чем у ассоциирующих жильных минералов. На фоне темно-серых клинохлора, мусковита, кальцита и белого пирита он выглядит светло-серым. В иммерсии отражательная способность арменита резко понижается – он приобретает темно-серую окраску, а остальные жильные минералы выглядят почти черными. Двухотражение и анизотропия отчетливые, в серых тонах, более интенсивные в иммерсии. Химический состав арменита и параметры его ромбической элементарной ячейки приведены в табл. 6, ан. 3 и табл. 2, № 37, соответственно. Это первая находка минерала на территории Российской Федерации.

Везувиан $(\text{Ca}, \text{Na})_{19}(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_{13}(\text{SiO}_4)_{10}(\text{Si}_2\text{O}_7)_4(\text{OH}, \text{F}, \text{O})_{10}$ встречен нами в ассоциации № 6 в тесном сростании с диопсидом и фторапатитом в ка-

честве малораспространенного минерала метасоматитов. Он содержит многочисленные включения рудных минералов – самородного мышьяка, арсениопирита, тетраэдрита-(Fe), тетраэдрита-(Zn), аурипигмента, пирита, реальгара, галенита, бенавидесита, рамдорита. Химический состав везувиана приведен в табл. 6, ан. 4.

Волластонит CaSiO_3 встречается в биметасоматических скарнах и волластонитовых приразломных метасоматитах (Сазонов и др., 1991). В скарнах этот силикат слагает почти мономинеральные каймы, а также входит в состав гранат-пироксен-волластонитовых оторочек между зонами гранатовых скарнов и мраморизованных известняков. Кристаллы волластонита образуют бесцветные сноповидные агрегаты. Минерал диагностирован по химическому составу, дебаеграмме и показателям преломления.

Гемиморфит $\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \times \text{H}_2\text{O}$ – редкий минерал зоны окисления, встреченный нами в образцах из отвалов Южного карьера в виде радиально-лучистых агрегатов бесцветных со стекляннным блеском призматических кристаллов размером до 0.7 см на кварце в ассоциации с цезаролитом, галенитом, халькопиритом и малахитом (рис. 4г). Также гемиморфит установлен в виде мелких белых и бледно-голубых (вероятно, из-за малой примеси Cu) сферолитов на кварце с байлдонитом, малахитом, пиритом и теннантитом-(Zn) (рис. 3и). В составе минерала установлены Zn и Si в соотношении около 2 : 1. Параметры ромбической элементарной ячейки приведены в табл. 2, № 38.

Гранаты Воронцовского месторождения представлены андрадитом иgrossуляром. **Андрадит** $\text{Ca}_3\text{Fe}^{3+}_2(\text{SiO}_4)_3$ встречен в образцах из отвалов Южного карьера, отобранных в 2018 г. Он присутствует в кальцит-гранат-эпидотовых скарнах с наложенной магнетит-сульфидной минерализацией. Весьма эффектно вытравленные кислотой из кальцита щетки темно-красных непрозрачных тетрагонтриоктаэдров размером до 1 см (рис. 4д). С андрадитом ассоциируют халькопирит, сфалерит, пирит, магнетит, эпидот. В составе минерала присутствует существенная доля grossулярового минерала (табл. 6, ан. 2).

Grossуляр $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ описан в тонкозернистых слюдисто-кальцит-хлоритовых и в среднезернистых пирит-кальцит-grossуляровых метасоматитах. Он образует тончайшую вкрапленность, реже жилки и прослои мощностью до нескольких миллиметров. Окраска grossуляра светло-желтая,

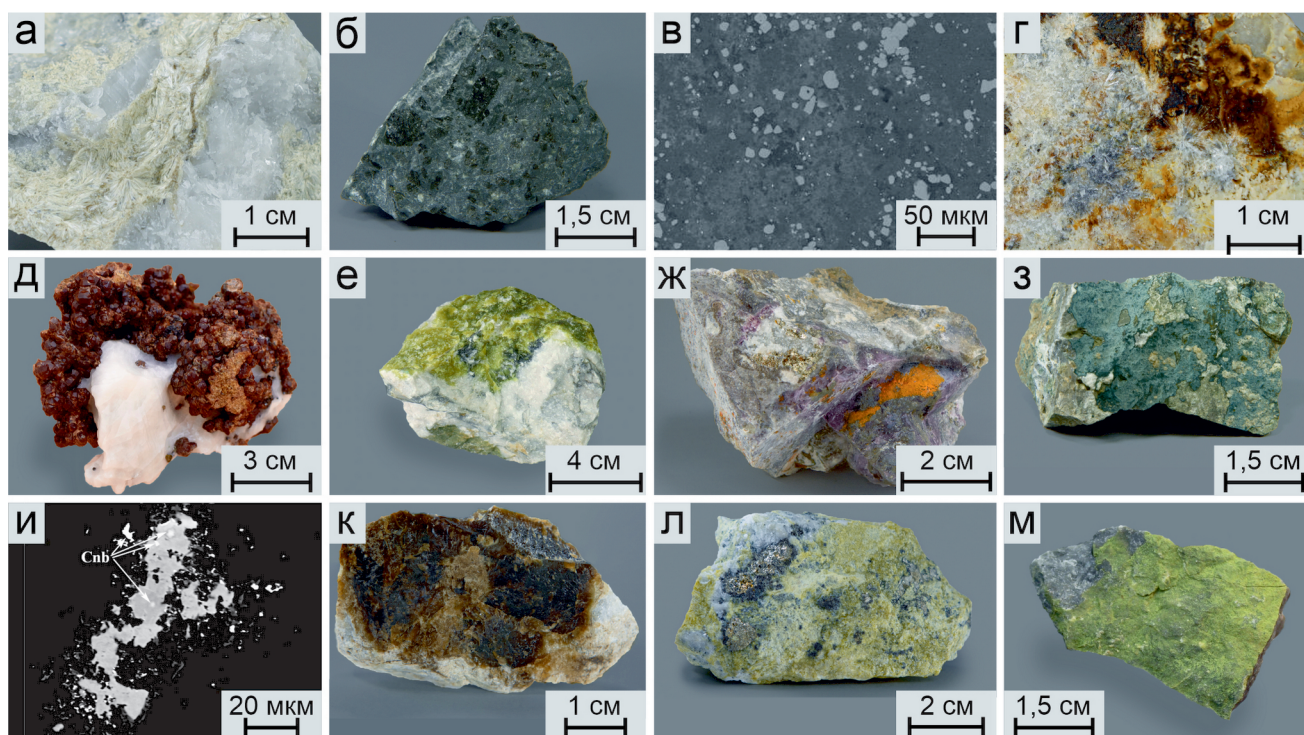


Рис. 4. Силикаты Воронцовского месторождения:

а – прожилок кремово-белого волокнистого тремолита в белом мраморе; б – черные призматические кристаллы паргасита в лампрофире; в – обильный арменит (серый) в тесном сростании с мусковитом и клинохлором (темно-серые зоны) и пиритом (многочисленные округлые светло-серые зерна); г – радиально-лучистые агрегаты бесцветных призматических кристаллов гемиморфита на кварце в ассоциации с темно-коричневыми землистыми корками цезаролита; д – щетка кристаллов андрадита на кальците; е – желто-зеленый массивный пижонит в тесном сростании с хризотилом- $2Or_{cl}$ в белом мраморе; ж – фиолетовый Ba,Mg,Mn-содержащий мусковит в доломит-кальцитовом мраморе с пиритом и оранжевым реальгаром; з – зеленовато-голубая корка минералов ряда селадонит-ферроселадонит на карбонатной породе; и – торит с включениями киновари в микроклине; к – темно-коричневый массивный хризотил- $2Or_{cl}$ на кальците; л – желтый хризотил- $2Or_{cl}$ на доломите с пиритом и магнетитом; м – зеленовато-желтый порошковатый чапманит на кальците с кварцем и антимонитом.

Коллекции: А.В. Касаткина (а–г, ж–л), музея «Штуфной кабинет», г. Североуральск (д, е, м). Фото: А.Д. Касаткиной (а, б, г, ж, з, к, л), М.В. Цыганко (д, е, м); РЭМ-фото в отраженных электронах (в, и).

Fig. 4. Silicates of the Vorontsovskoe deposit:

а – veinlet of creamy white radial fibrous tremolite aggregates in white marble; б – black prismatic pargasite crystals in lamprophyre; в – abundant armenite (moderate gray) intimately intergrown with muscovite, clinochlore (dark gray zones) and pyrite (numerous light gray rounded grains); г – radial aggregates of colorless prismatic hemimorphite crystals on quartz in assemblage with dark brown earthy cesàrolite crusts; д – crust of andradite crystals on calcite; е – light green massive pigeonite intimately intergrown with chrysotile- $2Or_{cl}$ in dark matrix; ж – violet Ba-, Mg-, Mn-bearing muscovite in dolomite-calcite marble with pyrite and orange realgar; з – greenish blue crust of celadonite-ferrocaldonite on carbonate rock; и – thorite with cinnabar inclusions in microcline; к – dark brown massive chrysotile- $2Or_{cl}$ on calcite; л – yellow chrysotile- $2Or_{cl}$ on dolomite with pyrite and magnetite; м – greenish yellow powdery chapmanite on calcite with quartz and stibnite.

Collections: A.V. Kasatkin (а–г, ж–л), Museum «Shtufnoi Kabinet», Severouralsk (д, е, м). Photo: A.D. Kasatkina (а, б, г, ж, з, к, л), M.V. Tsyganko (д, е, м); SEM (BSE) images (в, и).

иногда белая, оливково-зеленая или зеленая. Он диагностирован по химическому составу и рентгенограмме (Сазонов и др., 1991). Намиgrossуляр встречается в тех же кальцит-гранат-эпидотовых скар-нах, что и андрадит, в виде существенно более мелких (не более 0.5 мм) редких прозрачных кристал-

лов зеленовато-желтого цвета. Химический состав указан в табл. 6, ан. 6.

Группа **каолинита-серпентина** представлена на месторождении четырьмя минеральными видами. Три члена подгруппы каолинита, являющиеся полиморфами, – галлуазит, диккит и каолинит

Таблица 6
 Table 6

Химический состав силикатов (мас. %)
 Chemical composition of silicates (wt. %)

№ ан.	№ обр.	Минерал	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	BaO	MgO	MnO	FeO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	H ₂ O*	Сумма	Эмпирические формулы
1	Вор-8bis-1	Авгит	—	—	15.14	—	19.41	1.80	0.96	7.67	—	—	55.07	—	100.05	(Mg _{1.01} Ca _{0.57} Al _{0.32} Mn _{0.03} Fe ²⁺ _{0.03}) _{1.98} Si _{1.93} O ₆
2	1044A	Андрадит	—	—	35.20	—	—	—	—	8.11	18.94	1.49	37.94	—	101.68	Ca _{2.99} Fe ³⁺ _{1.13} Al _{0.76} Ti _{0.09} Si _{3.00} O ₁₂
3	928A	Арменит	—	—	9.85	13.09	—	—	—	26.72	—	—	47.08	3.14	99.88	Ba _{0.98} Ca _{2.02} Al _{0.01} Si _{8.99} O ₃₀ ·2H ₂ O
4	Вор-08/18-13	Везувиан	—	—	36.37	—	0.25	3.04	1.51	19.76	—	—	36.52	2.55	100.00	Ca ₁₉ (Al _{11.36} Mn _{1.26} Fe _{0.62} Mg _{0.18}) _{13.42} Si _{169.56} O ₇₄ (OH) _{8.29}
5	Vor-2013new-1	Гармотом	—	1.28	0.36	21.82	—	—	—	15.62	—	—	45.68	14.48	99.24	(Ba _{2.13} K _{0.41} Ca _{0.10}) _{2.64} (Al _{4.58} Si _{11.36})O ₃₂ ·12H ₂ O
6	Вор-05/18-9	Гроссуляр	—	—	36.56	—	—	—	—	14.40	11.17	0.83	39.45	—	102.41	Ca _{2.99} Al _{1.29} Fe ³⁺ _{0.64} Ti _{0.05} Si _{3.01} O ₁₂
7	Vor-CC-1b	Диопсид	—	—	25.99	—	17.19	—	1.64	—	—	—	54.44	—	99.22	Ca _{1.02} Mg _{0.94} Fe ²⁺ _{0.05} Si _{2.00} O ₆
8	Вор-08/20-9	Йохансенит	—	—	23.38	—	1.79	25.25	0.88	0.55	—	—	47.58	—	99.43	Ca _{1.03} Mn _{0.88} Mg _{0.11} Fe ²⁺ _{0.03} Al _{0.03} Si _{1.96} O ₆
9	Vor-10/2017-1	Клинохлор	—	—	—	—	39.15	—	—	13.47	—	—	33.86	12.84	99.32	Mg _{5.45} Al _{1.48} Si _{3.16} O ₁₀ (OH) ₈
10	535Л	Ломонтит	—	0.87	11.78	—	—	—	—	22.02	—	—	51.44	15.50	101.61	(Ca _{0.98} K _{0.09}) _{1.07} Al _{2.01} Si _{3.98} O ₁₂ ·4H ₂ O
11	1374M	Мусковит-2M ₁	—	9.39	1.74	0.95	5.99	0.92	—	28.96	—	1.79	45.73	4.45	99.92	(K _{0.81} Ca _{0.13} Ba _{0.03}) _{0.97} (Al _{2.30} Mg _{0.60} Ti _{0.09} Mn _{0.05}) _{3.04} Si _{3.08} O ₁₀ (OH) ₂
12	920П	Паргасит	2.43	0.90	12.71	—	14.20	—	8.32	15.64	—	0.66	42.55	2.07	99.48	(Na _{0.66} K _{0.17})(Na _{0.02} Ca) _{2.00} (Mg _{0.07} Fe ²⁺ _{1.01} Al _{0.86} Ti _{0.07}) _{5.01} (Si _{6.18} Al _{1.82} O ₂₂)(OH) ₂
13	1073П	Пижонит	—	—	5.50	—	34.08	—	1.71	3.15	—	—	55.17	—	99.61	(Mg _{1.75} Ca _{0.20} Fe ²⁺ _{0.05}) _{2.00} (Si _{1.90} Al _{0.13}) _{2.03} O ₆
14	Вор-01/19-22	Пренит	—	—	27.02	—	—	—	—	24.17	—	—	44.55	4.38	100.12	Ca _{1.98} Al _{1.95} Si _{3.05} O ₁₀ (OH) ₂
15	Vor-2013-8-1	Пумпеллиит-Mg	—	—	23.49	—	4.47	0.38	0.08	23.70	—	—	37.81	6.81	100.00	Ca _{2.00} (Al _{1.22} Mg _{0.53} V ³⁺ _{0.21} Mn _{0.02} Fe ²⁺ _{0.01}) _{2.99} Si _{3.00} O _{11.40} (OH) ₂ ·H ₂ O
16	1002C	Селадонит	—	11.01	—	—	5.34	—	8.12	4.98	10.78	—	56.79	4.26	101.28	K _{0.99} Mg _{0.56} Fe ²⁺ _{0.48} Fe ³⁺ _{0.57} Al _{0.41} Si _{4.00} O ₁₀ (OH) ₂
17	661Т	Тальк	—	—	—	—	28.02	1.10	4.21	—	—	—	62.23	4.65	100.21	(Mg _{2.69} Mn _{0.23} Fe _{0.06}) _{2.98} Si _{4.01} O ₁₀ (OH) ₂
18	795Т	Тремолит	0.16	0.25	13.23	—	21.69	0.27	3.35	1.29	—	—	57.10	2.17	99.51	K _{0.04} (Na _{0.04} Ca) _{1.96}) _{2.00} (Mg _{4.47} Fe ²⁺ _{0.39} Al _{0.11} Mn _{0.03}) _{5.00} (Si _{7.90} Al _{0.10}) _{2.02} (OH) ₂
19	1002C	Ферроселадонит	—	10.45	—	—	4.08	—	9.46	5.16	11.17	—	56.69	4.24	101.25	K _{0.94} Fe ²⁺ _{0.56} Mg _{0.43} Al _{0.43} Si _{4.00} O ₁₀ (OH) ₂
20	547X	Хризотил-донит	—	—	—	—	40.65	—	3.81	—	—	—	43.24	12.88	100.58	(Mg _{2.82} Fe ²⁺ _{0.15}) _{2.97} Si _{4.01} O ₅ (OH) ₄
21	312Ш	Шабазит-Sa	—	1.75	7.56	2.57	—	—	—	18.56	—	—	47.16	22.32	99.92	(Ca _{1.42} K _{0.39} Ba _{0.18}) _{1.99} Al _{3.82} Si _{8.24} O ₂₄ ·13H ₂ O
22	Вор-08/18-15	Шамозит	—	—	—	—	9.14	—	34.43	16.16	—	—	27.86	10.86	98.45	Fe ²⁺ _{3.18} Mg _{1.51} Al _{2.10} Si _{3.08} O ₁₀ (OH) ₈

Примечание. Содержание H₂O во всех анализах, кроме №№ 4 и 15, вычислено по стехиометрии; в анализах №№ 4 и 15 – по дефициту суммы анализа. Отношение Fe²⁺ / Fe³⁺ в анализах №№ 16 и 19 рассчитано по балансу зарядов. Анализ № 15 содержит 3.26 мас. % V₂O₅. Формулы минералов рассчитаны на четыре атома Si и 12 атомов O (селадонит, ферроселадонит), шесть атомов O (авгит, диопсид, йохансенит, пижонит), девять атомов O (хризотил-2Or_c), 12 атомов O (андрадит, гроссуляр, мусковит-2M₁, пренит, тальк), 12 атомов O и четыре молекулы H₂O (ломонтит), 13 атомов O и одну молекулу H₂O (пумпеллиит-Mg), 18 атомов O (клинохлор), 19 атомов Ca (везувиан), 24 атома O (паргасит, тремолит), 24 атома O и 13 молекул H₂O (шабазит-Sa), 30 атомов O и две молекулы H₂O (арменит), 32 атома O и 12 молекул H₂O (гармотом).

Note. The H₂O content is calculated by stoichiometry in all analyses except analyses nos. 4 and 15, where it is calculated by total deficiency. The Fe²⁺ / Fe³⁺ ratio in analyses nos. 16 and 19 is calculated from the charge balance. The analysis no. 15 contains 3.26 wt. % V₂O₅. The mineral formulas are recalculated to four Si and 12 O atoms (celadonite, ferroseladonite), six O atoms (augite, diopside, johannsenite, pigeonite), 9 O atoms (chrysotile-2Or_c), 12 O atoms (andradite, grossular, muscovite-2M₁, prehnite, talc), 12 O atoms and 4 H₂O molecules (laumontite), 13 O atoms and one H₂O molecule (pumpellyite-Mg), 18 O atoms (clinocllore), 19 Ca atoms (vesuvianite), 24 O atoms (pargasite, tremolite), 24 O atoms and 13 H₂O molecules (chabazite-Sa), 30 O atoms and 2 H₂O molecules (armenite) and 32 O atoms and 12 H₂O molecules (harmotome).

$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ – и единственный член подгруппы серпентина хризотил- 2Or_{cl} (ортохризотил) изучены нами на образцах, отобранных в 2017–2018 гг. в отвалах Южного карьера (ассоциация № 9).

Галлуазит отмечался в зоне окисления месторождения (Кабанов, 2001). Он присутствует в резко подчиненном количестве в составе порошковатой полиминеральной корки, окрашенной в коричневые и черные цвета гипергенными оксидами Mn, вместе с каолинитом, кальцитом, кварцем и родохрозитом. Минерал диагностирован качественно по химическому составу (Al и Si в приблизительном соотношении 1:1), рентгенограмме (главные линии $[d, \text{\AA} (I)]$: 7.27(100), 4.44(80), 3.65(50), 2.57(20), 1.70(10), 1.48(10)) и ИК спектру. Параметры моноклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 39) соответствуют **галлуазиту-7Å**.

Диккит установлен в подчиненном количестве в смеси с преобладающим каолинитом в желто-белых порошковатых агрегатах. Он диагностирован по химическому составу (Al:Si ~1 : 1) и ИК спектру (основные полосы при 430, 470, 537, 695, 797, 912, 1007, 1031, 1625, 3650 cm^{-1}). От каолинита диккит отличается характерной полосой около 3650 cm^{-1} в области ОН групп.

Каолинит распространен широко, но везде, за исключением зоны гипергенеза, является второстепенным минералом. Он определен рентгенометрически в составе полиминеральных проб, отобранных из разных пород месторождения (Сазонов и др., 1991). Нами каолинит идентифицирован в образцах из отвалов Южного карьера, где он является одним из основных породообразующих минералов. В некоторых образцах он составляет до 80 % объема, цементируя мелкозернистый кварц. Каолинит часто окрашен лимонитом, гематитом или оксидами Mn в коричневые цвета. В химическом составе минерала установлены только Al и Si в приблизительном соотношении 1:1. Главные линии рентгенограммы $[(d, \text{\AA} (I))$: 7.12(100), 4.39(40), 4.17(30), 3.54(50), 2.55(30), 1.97(10), 1.66(10), 1.49(20)], параметры триклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 40) и основные полосы ИК спектра (при 432, 469, 536, 691, 796, 912, 1008, 1031, 1627, 3620, 3697 cm^{-1}) отвечают каолиниту. Характерной особенностью минерала является дублет в области ОН групп, состоящий из двух узких полос при 3620 и 3697 cm^{-1} , который отсутствует у диккита и галлуазита.

Хризотил- 2Or_{cl} $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ образует темно-коричневые и желтые мономинеральные выделе-

ления на кальците и доломите с пиритом и магнетитом (рис. 4к, л), а также тесно сростается с пиритом в составе светло-зеленых массивных агрегатов в темно-серой породе, состоящей в основном из клинохлора, Fe-содержащего гроссуляра, фторпатита, сфена, барита, пирита, халькопирита (рис. 4е). В составе хризотила установлена небольшая примесь Fe (табл. 6, ан. 20). Параметры ромбической элементарной ячейки соответствуют политипу 2Or_{cl} (табл. 2, № 50). Характеристические полосы в ИК спектре – 384, 404, 438, 564, 613, 960, 1025, 1074, 3687 cm^{-1} .

Пироксены на месторождении распространены локально. **Авгит** $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ редко встречается в метасоматитах, наложенных на карбонатные брекчии с минералами ассоциации № 1. **Диопсид** $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ широко распространен в нерудной массе образцов, представляющих ассоциацию № 5, и более редок в ассоциациях №№ 1, 4 и 6. В образце Вор 08/20-9 со склада забалансовых руд № 2 нами установлена обогащенная Mn разновидность диопсида вплоть до появления участков, отвечающих по составу **йохансениту** $\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$. Химический состав пироксенов показан в табл. 6, ан. 1, 7 и 8. В 2018 г. нами были найдены образцы **пижонита** $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ca})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ в отвалах Южного карьера. Он тесно сростается с ромбическим хризотилом, образуя крупные (до 5 × 3 см) желто-зеленые массивные выделения в светлом мраморе, состоящим из кальцита и доломита (рис. 4е). Химический состав пироксена приведен в табл. 6, ан. 13. Параметры моноклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 46) соответствуют пижониту.

Полевые шпаты представлены альбитом, микроклином и ортоклазом. **Альбит** (включая олигоклаз) $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ – редкий минерал метасоматитов, образует агрегаты зерен размерами в десятки микрометров, содержащие микровключения других минералов. Калиевый полевой шпат представлен нерешетчатым **микроклином** $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ в зонах калишпатизации пород интрузивного диорит-гранодиоритового комплекса и сопряженных с ним андезитов. **Ортоклаз** $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ встречается в метасоматитах зон развития прожилково-вкрапленного золотого оруденения в виде мельчайших (десятки микрометров) зерен с микроворостками хлоритов и других минералов. Все полевые шпаты диагностированы по химическому составу и рентгенограммам (Сазонов и др., 1991). Полевые шпаты отмечены в составе нерудных минералов зоны окисления, однако их состав не изучен, видовая

принадлежность не установлена (Кабанов, 2001). В более поздней работе (Ровнушкин и др., 2010) микроклин и ортоклаз из магматитов диорит-гранодиоритового состава и вулканогенно-осадочных пород (туффитов, туфоалевролитов и туфопесчаников) изучены микрорентгеноспектральным, рентгенофазовым и термическим методами. В карбонатных брекчиях полевые шпаты крайне редки. Нами в нерудной массе брекчий (ассоциация № 1) встречены редкие зерна альбита и Ba-содержащего ортоклаза с содержанием BaO до 9.6 мас. %.

Пренит $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ упомянут среди минералов пропиловитовой формации (Сазонов и др., 1991). По нашим наблюдениям, пренит является породообразующим минералом пропиловитов, наложенных на карбонатные брекчии (ассоциация № 1). Он также встречен в составе нерудных минералов брекчий в ассоциациях №№ 4 и 5. Химический состав близок к идеальному (табл. 6, ан. 14).

Пумпеллиит отмечался среди продуктов метасоматоза пропиловитового типа (Сазонов и др., 1991; Викентьев и др., 2016). Нами в ассоциации № 1 в метасоматических образованиях, наложенных на карбонатные брекчии, встречены 50–70-мкм выделения **пумпеллиита-(Mg)** $\text{Ca}_2\text{MgAl}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_2 \times \text{H}_2\text{O}$, тесно сростающегося с арменитом, баритом, мусковитом, кальцитом, фторапатитом. Рудные минералы здесь представлены золотом, киноварью, криститом, пиритом, рутиритом, сфалеритом, шабурнеитом. В составе пумпеллиита-(Mg) зафиксирована небольшая примесь V, крайне нехарактерного для минералов Воронцовского месторождения (табл. 6, ан. 15).

Группа **слюд** на месторождении представлена прежде всего **мусковитом** $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, широко развитым в метасоматитах кварц-серицитовой формации, в меньшей степени – в метасоматитах березит-лиственитовой формации. Кроме того, мусковит отмечен в пропиловитах по вулканитам средне-основного состава и породам диорит-гранодиоритового интрузивного комплекса. Мусковит слагает листочки размером до 1 мм, рассеянные среди частиц других минералов. Он идентифицирован по химическому составу и рентгенограмме (Сазонов и др., 1991). Мусковит («серицит») модификации $2M_1$ составляет вместе с кварцем основную массу нерудного метасоматита, наложенного на парагенезис самородного мышьяка и арсенопирита, наблюдающегося в образцах из материала 2007 г. В его химическом составе фиксируется примесь MgO (до 6.5 мас. %) и

небольшие количества MnO (до 0.3 мас. %), FeO (до 0.3 мас. %), Cr_2O_3 (до 0.1 мас. %) и TiO_2 (до 0.9 мас. %) (Мурзин и др., 2011). Нами мусковит встречен в четырех ассоциациях, причем в ассоциации № 1 он является породообразующим совместно с клинохлором и относительно крупными выделениями арменита. На рудном складе в 2018 г. собраны образцы с необычными фиолетовыми выделениями Ba, Ca, Mg, Mn, Ti-содержащего мусковита (табл. 6, ан. 11) в доломит-кальцитовом мраморе с пиритом и реальгаром (рис. 4ж). Параметры его моноклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 43) соответствуют политутипу $2M_1$.

Помимо мусковита, нами на месторождении установлены еще две диоктаэдрические слюды – **селадонит** $\text{KMgFe}^{3+}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ и **ферроселадонит** $\text{KFe}^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Они обнаружены в образцах, собранных в отвалах Северного карьера в 2015 г. Эти слюды тесно срстаются с кальцитом в составе бледно-зеленовато-голубых корок, на которых растут бесцветные кристаллы кальцита поздней генерации (рис. 4з). Селадонит и ферроселадонит визуально неразличимы и переходят друг в друга по составу в пределах даже одного зерна размером в несколько десятков микрометров. Химический состав минералов приведен в табл. 6, ан. 16 и 19. Параметры моноклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 47) отвечают высококремнистой диоктаэдрической слюде.

Смектиты обычны в зоне окисления месторождения, но встречаются в незначительных количествах. **Бейделлит** $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \times n\text{H}_2\text{O}$, **монтмориллонит** $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ и **нонтронит** $\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ идентифицированы по химическому составу и рентгенограммам в нескольких полиминеральных пробах (Сазонов и др., 1991). Нами в 2017 г. в отвалах Северного карьера отобран образец мелкозернистого кальцита с выделениями желтого порошковатого минерала, оказавшегося **нонтронитом-15Å**. Его диагностика подтверждена данными качественного химического состава (Fe, Si, O, небольшие примеси Na и Ca), рентгенограммой (главные линии $[d, \text{Å} (I)]$: 15.20(100), 4.50(20), 3.04(50), 2.58(10), 2.28(20), 1.71(5), 1.52(20) и 1.34(5) Å, параметры гексагональной элементарной ячейки см. в табл. 2, № 44) и ИК спектром (основные полосы при 428, 490, 682, 818, 1017, 1100 (плечо), 1636, 3419, 3560 cm^{-1}).

Тальк $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ слагает листоватые агрегаты, прорастающие карбонатную массу це-

мента брекчий (Мурзин, Варламов, 2010). Нами тальк встречен в образцах с рудного склада. Он находится в виде синевато-зеленых массивных выделений в доломите в ассоциации с кристаллами арсенопирита. В некоторых образцах тальк образует белые и коричневатые пленки на кальците, а также тесно сростается с клинохлором и мусковитом. Тальк отмечен в качестве редкого минерала метасоматитов в ассоциации № 3. В химическом составе талька из Воронцовского месторождения присутствует небольшая, но устойчивая примесь MnO до 1.1 мас. % (табл. 6, ан. 17). Параметры триклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 48) соответствуют тальку.

Титанит $\text{CaTi}(\text{SiO}_4)\text{O}$ образует редкие кристаллы до 20 мкм в кремнистых обломках брекчий. Он содержит до 1.3 мас. % Al_2O_3 и 0.9 мас. % V_2O_5 (Мурзин, Варламов, 2010). Нами титанит обнаружен в качестве редкого аксессуара минеральных ассоциаций №№ 1 и 6. Чаше он встречается в нерудной массе брекчий (ассоциация № 7).

Торит ThSiO_4 встречен в обр. Vor-CC-2a (ассоциация № 1) в виде единственного обособления размером 0.1×0.03 мм в Ва-содержащем ортоклазе с диопсидом. Он содержит мелкие включения киновари (рис. 4и). В составе минерала установлены только Th и Si в соотношении около 1:1. Минерал не дает рентгенограммы в результате метамиктизации.

Хинганит-(Y) $\text{Y}_2\text{Be}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$ и **хинганит-(Nd)** $\text{Nd}_2\text{Be}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$ установлены в обр. Вор-2018/10-4, отобранном в 2018 г. на рудном складе месторождения. Минералы слагают зерна до 10 мкм в доломит-кальцитовый породе, где ассоциируют с баритом, вакабаяшилитом, Сг-содержащим магнетитом, пиритом, реальгаром, рутьеритом и фергусонитом-(Y). Эти зерна химически неоднородны, в них наблюдаются участки с преобладанием Y или Nd среди РЗЭ. Хинганит-(Y)/хинганит-(Nd) содержат (мас. %, содержания BeO и H_2O вычислены по стехиометрии): BeO 10.10 / 10.43, CaO 1.21 / 1.78, FeO 4.19 / 2.60, Y_2O_3 12.71 / 11.03, La_2O_3 1.05 / 0.99, Ce_2O_3 8.45 / 7.36, Pr_2O_3 2.34 / 2.15, Nd_2O_3 14.17 / 17.89, Sm_2O_3 5.84 / 5.86, Eu_2O_3 1.05 / 1.14, Gd_2O_3 5.92 / 6.12, Tb_2O_3 0.52 / 0.48, Dy_2O_3 2.98 / 2.87, Ho_2O_3 0.44 / 0.34, Er_2O_3 1.19 / 1.09, Tm_2O_3 0.75 / 0.88, Yb_2O_3 0.58 / 0.52, SiO_2 24.46 / 24.66, H_2O 3.24 / 3.25, суммы 101.19 / 101.44; эмпирические формулы (расчет на два атома Si и сумму $\text{O} + \text{OH} = 10$ а.ф.): $(\text{Y}_{0.55}\text{Nd}_{0.41}\text{Ce}_{0.25}\text{Sm}_{0.16}\text{Gd}_{0.16}\text{Dy}_{0.08}\text{Pr}_{0.07}\text{La}_{0.03}\text{Eu}_{0.03}\text{Er}_{0.03}\text{Tm}_{0.02}\text{Tb}_{0.01}\text{Ho}_{0.01}\text{Yb}_{0.01}\text{Ca}_{0.11})_{\Sigma 1.93}(\square_{0.71}\text{Fe}^{2+}_{0.29})_{\Sigma 1.00}\text{Be}_{2.00}\text{Si}_{2.00}\text{O}_{8.24}(\text{OH})_{1.76}$ и $(\text{Nd}_{0.52}\text{Y}_{0.48}$

$\text{Ce}_{0.22}\text{Sm}_{0.16}\text{Gd}_{0.16}\text{Dy}_{0.08}\text{Pr}_{0.06}\text{La}_{0.03}\text{Eu}_{0.03}\text{Er}_{0.03}\text{Tm}_{0.02}\text{Tb}_{0.01}\text{Ho}_{0.01}\text{Yb}_{0.01}\text{Ca}_{0.15})_{\Sigma 1.97}(\square_{0.82}\text{Fe}^{2+}_{0.18})_{\Sigma 1.00}\text{Be}_{2.00}\text{Si}_{2.00}\text{O}_{8.24}(\text{OH})_{1.76}$ соответственно. В связи с мелким размером зерен их рентгенографическое исследование не проводилось, однако принадлежность этих минералов к серии хинганита доказывается данными химического состава. Во-первых, дефицит сумм анализов коррелирует с расчетным содержанием BeO. Во-вторых, в составе обоих минералов фиксируется Fe в количествах, типичных для хинганита из разных объектов (для других силикатов с атомным отношением РЗЭ : Si, близким к 1:1, железо нехарактерно). В-третьих, в хинганите-(Nd) горы Заги (Пакистан) отмечалась химическая неоднородность изученных кристаллов похожего типа, с преобладанием в разных участках Y или Nd среди РЗЭ (Kasatkin et al., 2020). Учитывая это, представляется обоснованным отнесение этих воронцовских минералов к хинганиту, причем находка хинганита-(Nd) является первой в Российской Федерации.

Хлориты являются самыми распространенными минералами метасоматически измененных пород месторождения. Они широко представлены в скарнах, продуктах пропилитизации, березитизации и лиственитизации пород, метасоматитах кварц-мусковитовой и кварц-хлорит-кальцитовый формаций, отмечены в мраморизованных известняках, метасоматических колонках, сформировавшихся при развитии джаспероидов на контакте магматитов с известняками, в виде каевок около рудных минералов. Хлориты представлены обильным **клинохлором** $\text{Mg}_3\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ и существенно более редким **шамозитом** $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{O})_8$. Они слагают листочки в сотые доли миллиметра и мельче с окраской, варьирующей от почти бесцветной (в известняках) до серовато-зеленой и зеленой (в метасоматитах). Интенсивность зеленого цвета нарастает по мере увеличения железистости минерала. Хлориты диагностированы по химическому составу, рентгенограммам и оптическим параметрам (Сазонов и др., 1991). Нами клинохлор встречен в большинстве минеральных ассоциаций, причем в ассоциациях №№ 1, 2 и 7 он является порообразующим. Интересной особенностью бесцветного клинохлора из ассоциации № 4 является отсутствие в его составе Fe на уровне чувствительности электронно-зондового метода (табл. 6, ан. 9). Достоверный шамозит (табл. 6, ан. 22) отмечен лишь в образце Вор-08/18-15. Вычисленные по порошкограммам параметры

триклинных элементарных ячеек хлоритов приведены в табл. 2, №№ 41 и 53.

Цеолиты на месторождении представлены гармотомом, ломонтином и шабазитом-Са. **Гармотом** $\text{Ba}_2(\text{Si}_{12}\text{Al}_4)\text{O}_{32} \times 12\text{H}_2\text{O}$ обнаружен нами в образцах Вор-10/2017-2б и Вор-10/2017-2с (ассоциация № 1) в виде зерен неправильной формы размером до 0.2×0.1 мм в кальците с пиритом, реальгаром, аурипигментом, вейсбергитом, парапьерротитом, рутьеритом, шабурнеитом и Ag-содержащим золотом. Минерал диагностирован химически (табл. 6, ан. 5). **Ломонит** $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \times 4\text{H}_2\text{O}$ впервые обнаружен в зоне прожилково-вкрапленного золотого оруденения в ассоциации сgrossуляром, калиевым полевым шпатом и кварцем. Он диагностирован по химическому составу и рентгенограмме (Сазонов и др., 1991). Нами ломонит установлен в образцах из отвалов Северного карьера в виде гнезд размером до 5×5 мм кремового цвета в белом кальците с кристаллами золотисто-желтого пирита. В отличие от минерала, описанного ранее (Сазонов и др., 1991), в составе ломонита из Северного карьера отсутствуют Na и Fe, но имеется небольшая примесь K (табл. 6, ан. 10). Параметры моноклинной элементарной ячейки отвечают ломониту (табл. 2, № 42).

Шабазит отмечался в качестве широко распространенного минерала, образующего прожилки в пропилизированных андезитах, андезит-базальтах, дайках основного состава, породах диорит-гранодиоритового интрузивного комплекса, в скарнах и эпидозитах (Сазонов и др., 1991). Нами минерал, отвечающий по химическому составу **шабазиту-Са** $\text{Ca}_2[\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}] \times 13\text{H}_2\text{O}$ (табл. 6, ан. 21), обнаружен в 2018 г. в образце из отвалов Южного карьера в виде тонких мелкокристаллических корок розоватого цвета на мраморизованном известняке в ассоциации с мелкими (до 0.3 мм) кристаллами пирита. Параметры триклинной элементарной ячейки отвечают минералу серии шабазита (табл. 2, № 52).

Циркон $\text{Zr}(\text{SiO}_4)$ является редким минералом метасоматов, наложенных на карбонатные брекчии с минеральной ассоциацией № 1. Химический состав его близок к стехиометрическому.

Чапманит $\text{Fe}^{3+}_2\text{Sb}^{3+}(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})$ достоверно установлен в материале, отобранном в 2015 г. на рудном складе (Касаткин, 2019). Минерал образует тонкие корки и порошковатые налеты светло-зеленого цвета на брекчированной породе, сложенной кальцитом, кварцем и антимонитом (рис. 4м).

Химический состав чапманита (мас. %, содержание H_2O рассчитано по стехиометрии): Al_2O_3 2.04; Fe_2O_3 32.90; Sb_2O_3 35.06; SiO_2 27.45, H_2O 2.06, сумма 99.51. Эмпирическая формула (расчет на девять атомов O): $(\text{Fe}^{3+}_{1.79}\text{Al}_{0.17})_{\Sigma 1.96}(\text{Sb}^{3+}_{1.05}\text{Si}_{1.99}\text{O}_8(\text{OH}))$. Главные линии дифрактограммы [d , Å (I): 7.614(100), 4.168(20), 3.874(40), 3.573(60), 3.182(40), 2.908(20), 2.587(30)]. Рассчитанные по ней параметры моноклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 51) соответствуют чапманиту. Это первая находка данного минерального вида на территории Российской Федерации.

Эпидот $\text{Ca}_2(\text{AlFe}^{3+})[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]\text{O}(\text{OH})$ широко распространен в различных метасоматитах месторождения. В.Н. Сазонов с соавторами (1991) описывают три формы выделения минерала: изометричные зерна до 2 мм, ветвящиеся прожилки мощностью до 3 мм и «землистые» скопления. Минерал диагностирован по химическому составу. В кальцит-гранат-эпидотовых скарнах с наложенной магнетит-сульфидной минерализацией (отвалы Южного карьера) нами встречена редкая висмут-теллуридная ассоциация минералов № 8 с эпидотом.

Особенности минералогии Воронцовского золоторудного месторождения

Большинство исследователей Воронцовского месторождения сходятся во мнении, что минералообразование здесь характеризуется многостадийностью. Последовательное наложение друг на друга минеральных ассоциаций, порожденных различными процессами – от высокотемпературного скарнирования до низкотемпературной аргиллизации – привело к тому, что Воронцовское месторождение обладает уникальной и сложной минералогией, не имеет аналогов не только на Урале и в России, но и вообще в мире.

В ряде работ (Степанов и др., 2017, Stepanov et al., 2021, Murzin et al., 2017, Vikentyev et al., 2019) указано, что ранние типы руд (скарны и вкрапленные руды) месторождений Воронцовского рудного узла характеризуются арсенопирит-пирит-халькопирит-сфалерит-галенитовой специализацией. В туфогенных породах она сменяется пирит-арсенопиритовой с блеклой рудой, самородным мышьяком и реальгаром, что является признаком увеличения фугитивности серы. Наконец, карбонатные брекчии с карбонатно-туфовым цементом содержат золото-пирит-реальгаровые руды с богатым набором сульфосолей, разнообразие которых,

главным образом, и делает Воронцовское месторождение минералогически уникальным.

Оценка условий образования сульфосольных ассоциаций Воронцовского месторождения осложняется не только малым размером зерен рудных минералов, но и тем, что зачастую тесно ассоциируют между собой в массивных рудах минералы, образованные, очевидно, в разное время и из разных порций гидротермальных растворов. Не имея возможности подробно описать последовательность образования сульфосолей, мы, тем не менее, смогли установить наиболее типичные для месторождения рудные ассоциации. Они подробно охарактеризованы в первой статье настоящей серии (Касаткин и др., 2020).

С одной стороны, целый ряд сульфосолей Воронцовского месторождения, включая новые минералы, имеют уникальные химический состав и структуру. С другой стороны, многие из них принадлежат к гомологическим рядам, типичным для геохимических обстановок, подобных той, что мы наблюдаем на Воронцовском месторождении. Одиннадцать Pb-Tl-As-Sb-сульфосолей (боскардинит, всенит, гептасарторит, геттардит, дюфренуазит, парапьерротит, твиннит, шабурнеит, экрансит, эннеасарторит) представляют гомологический ряд сарторита. Пять Pb-Ag-Bi-Sb-сульфосолей (андорит-VI, викингит, лиллианит, рамдорит, рощинит) относятся к гомологическому ряду лиллианита. При этом сам лиллианит приурочен к магнетит-гранат-эпидотовым скарнам, тогда как четыре других минерала – к карбонатным брекчиям. Гомологический ряд павонита представлен самим павонитом, крайне редко встречающимся на месторождении, и новым безвисмутовым As-Sb-Mn-содержащим членом – люборжакитом. Эти два минерала также принадлежат к совершенно разным породам: люборжакит приурочен к карбонатным брекчиям, тогда как павонит, подобно большинству других минералов Bi, обнаруженных на месторождении – к магнетит-гранат-эпидотовым скарнам. Гомологический ряд плагионита представлен тремя Pb-Sb-содержащими членами – это гетероморфит, плагионит и семсейит. В гомологическом ряду иорданита установлены собственно иорданит и его Sb-аналог – геокронит. Ряд полибазита представлен бенлеонардитом, купрополибазитом и полибазитом. Надгруппа тетраэдрита-воронцовита, объединяющая минералы как с идеальными, так и с дефектными тетраэдритоподобными структурами, на Воронцовском месторождении включает, с одной стороны, целый ряд членов группы блеклых руд –

аргентотетраэдрит-(Fe), аргентотетраэдрит-(Zn), теннантит-(Fe), теннантит-(Zn), тетраэдрит-(Fe), тетраэдрит-(Zn), а с другой стороны – минералы, содержащие Tl в крупных полостях – арсиччиоит, воронцовит, галхаит, рутьерит, ферроворонцовит и штальдерит. Химически и структурно этим минералам родственны акташит, зиннерит, лаффитит и новаккиит.

Присутствие на Воронцовском месторождении сульфосолей разных гомологических рядов и разных структурных типов свидетельствует о том, что эти минералы смогли успешно «адаптироваться» к изменению химических и, возможно, физических условий минералообразования. Механизмом такой адаптации являются, например, катионные замещения по схемам $(\text{Sb,Bi}) + \text{Ag} \leftrightarrow 2\text{Pb}$ и/или $\text{As}(\text{Sb}) + \text{Tl} \leftrightarrow 2\text{Pb}$ при сохранении структурного мотива сульфосолей, в которых эти замещения реализуются (Moëlo et al., 2008). Примерами минералов с широким катионным замещением являются андорит, боскардинит, рамдорит, филротит, экрансит и др.

Воронцовское месторождение обладает ярко выраженной мышьяковой геохимической специализацией. Сурьма в больших концентрациях присутствует лишь локально, а висмут встречается почти исключительно в следовых количествах. Однозначные объяснения таких особенностей геохимии в имеющейся литературе отсутствуют. Изотопный состав серы, углерода и кислорода (Murzin et al., 2017) указывает на два источника вещества – глубинный магматический (возможно, мантийный) и осадочный.

Что касается рудообразующих элементов – Mn, Ag, Bi, Te и Se, то в отношении них выявлены следующие закономерности. Как уже отмечалось выше, обогащенность рудообразующей системы Mn является особенностью Воронцовского месторождения, которая отличает его от схожих месторождений Ленгенбах (Швейцария) и Алшар (Северная Македония). Марганец в качестве видообразующего элемента входит в состав различных классов минералов: сульфидов (алабандин), сульфосолей (бенавидесит, клерит, люборжакит, цыганкоит и др.), оксидов, гидроксидов, карбонатов, силикатов. В качестве примеси он часто присутствует в сфалерите, различных сульфосолях, а также породообразующих карбонатах – доломите, кальците. Последние, скорее всего, и являются источником Mn для сложных сульфосолей.

Серебро на Воронцовском месторождении в качестве видообразующего элемента обнаружено

в 23 минералах, но большинство из них представлено единичными находками, например, акантит, арсиччиоит, зихерит, лаффитит, манганоквадратит, ойонит, павонит, рамдорит, цнигриит, ялпаит. Только два минерала (боскардинит и экрансит) можно отнести к относительно распространенным, но содержание Ag в них невелико. Таким образом, можно говорить об общей обедненности рудообразующей системы этим элементом, что является еще одним важным отличием геохимии и минералогии Воронцовского месторождения и Ленгенбаха.

Висмут присутствует, главным образом, в минералах ассоциации № 8, приуроченной к скарнам, и практически отсутствует в минералах брекчий. На Воронцовском месторождении установлены восемь минералов Bi, из которых в брекчиях обнаружены только викингит и гипергенный бисмоклит.

Теллур не играет в рудах месторождения сколь-либо значительной роли. Из его минералов лишь колорадоит распространен повсеместно, но в мелких выделениях. Помимо него, нами диагностировано пять минералов с видообразующим Te, и все они приурочены к скарнам, а не к брекчиям.

Селен собственных минералов на Воронцовском месторождении не образует. Он обнаружен только в примесных количествах в киновари из ассоциации № 2.

Телескопирование различных геологических процессов и развитие метасоматических пород по различному субстрату стали причиной появления столь богатого и пестрого набора как рудных, так и жильных минералов в рудах Воронцовского месторождения. Формирование различных ассоциаций кислородных соединений обусловлено закономерным развитием рудообразующей системы от наиболее высокотемпературных скарнов до низкотемпературных аргиллизитов. Скарны – это наиболее ранние метасоматические образования. Главными породообразующими минералами из них являются гранатgrossуляр-андрадитового ряда, диопсид, клинохлор, сульфатсодержащий скаполит, везувиян, волластонит.

При закономерном снижении температуры в минералообразующей среде на смену скарнам пришли среднетемпературные кварц-серицитовые метасоматиты, а затем низкотемпературные – аргиллизиты. Главными породообразующими минералами в этих породах являются кварц и мусковит. В кварц-серицитовых метасоматитах в подчиненном количестве присутствуют карбонаты, среди которых преобладает железистый доломит. Шеелит встречается в виде акцессорного минерала. В ка-

честве интересной особенности аргиллизитов отметим присутствие Ba-содержащего ортоклаза и барита. В низкотемпературных рудах в качестве жильных минералов обнаружены также пренит, пумпеллиит-(Mg) и тальк, но эти минералы имеют ограниченное распространение. Большое разнообразие жильных минералов в брекчиях обусловлено как наложением друг на друга продуктов нескольких рудообразующих процессов, так и механической контаминацией брекчий породообразующими минералами вмещающих пород. Петрографические исследования связующей массы и цемента брекчий (Степанов и др., 2017) позволили установить, что в некоторых разновидностях этих пород проявлены две или, реже, три ассоциации метасоматических минералов, последовательно накладывающиеся друг на друга. Хромшпинелиды, ильменит, авгит, моноклинные амфиболы, ортоклаз, плагиоклаз и некоторые другие были захвачены в связующую массу брекчий механически при формировании их в ходе гидротермально-эксплозивных процессов.

Заключение

Несмотря на то, что к настоящему времени добыча золота открытым способом на Воронцовском месторождении завершена, рудный потенциал объекта еще далеко не исчерпан. Разведочное бурение 2017–2019 гг. выявило существенную золотую минерализацию под Северным карьером, поэтому в 2020 г. компанией ОАО «Полиметалл» проводились исследования для определения перспектив подземной добычи, а также открытой отработки окисленных руд в западном борту карьера. Кроме того, в 2021 г. компания планировала продолжить разведку перспективных участков в ближайшем окружении месторождения. Все сказанное дает надежду на появление в будущем свежего минералогического материала из новых участков, а, следовательно, изучение богатой минералогии Воронцовского месторождения, как мы надеемся, будет продолжено и принесет новые интересные находки.

Авторы искренне благодарят И.В. Пекова, В.В. Гуржия, Е.В. Белогуб и И.Ю. Мелекесцеву за редакторскую правку текста и обсуждение, А.Д. Касаткину – за фотографирование образцов.

Литература

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.

Герасимов Н.Н., Наседкина В.Х., Онищенко С.А., Шишкин М.А. (1999) Минеральный состав руд Парнокского железо-марганцевого месторождения. *Геология рудных месторождений*, **41**(1), 84–96.

Двуреченская С.С. (2001) Гипергенные минералы серебряных месторождений. Москва, ЦНИГРИ, 258 с.

Кабанов А.А. (2001) Окисленные руды – новый геолого-промышленный тип гипергенных месторождений золота (на примере Воронцовского месторождения на Урале). *Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук*. Санкт-Петербург, 142 с.

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.

Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. (2021a) Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 2: Простые вещества, сульфиды, арсениды, теллуриды. *Минералогия*, **7**(1), 5–22.

Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. (2021b) Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 3: Сульфосоли. *Минералогия*, **7**(2), 5–49.

Литовко Д.Н. (1996) Минералогическая изученность Полярного Урала. Сыктывкар, Геопринт, 39 с.

Минералогия Урала (2007) Оксиды и гидроксиды. Часть 2. Екатеринбург–Миасс, УрО РАН, 288 с.

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

Мурзин В.В., Сазонов В.Н., Ронкин Ю.Л. (2010) Модель формирования Воронцовского золоторудного месторождения на Урале (Карлинский тип): новые данные и проблемы. *Литосфера*, **6**, 66–73.

Ровнушкин М.Ю., Гуляева Т.Я., Галахова О.Л. (2010) Проявление калишпатового метасоматоза в пределах Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). *Ежегодник–2009. Труды ИГГ УрО РАН*, **57**, 241–244.

Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А., Гладковский Б.А. (1991) Эндогенное оруденение де-

вонского андезитоидного вулканоплутонического комплекса (Урал). Свердловск, УрО АН СССР, 184 с.

Сорока Е.И., Притчин М.Е., Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Лютов В.П., Смолева И.В. (2018) Физико-химические исследования жильных карбонатов Воронцовского золоторудного месторождения. *Вестник Пермского университета*, **17**(1), 41–51.

Сорока Е.И., Притчин М.Е., Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Смолева И.В., Галахова О.Л. (2017) Жильные карбонаты рудовмещающих пород Воронцовского золоторудного месторождения. *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского*, **20**, 242–248.

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

Турчкова А.Г., Пеков И.В., Япаскурт В.О., Сидоров Е.Г., Бритвин С.Н. (2018) Марганцевая минерализация в фумарольных экскаляциях вулкана Толбачик (Камчатка, Россия). *Минеральное разнообразие: исследование и сохранение*, **9**, 31–35.

Kasatkin A.V., Nestola F., Škoda R., Chukanov N.V., Agakhanov A.A., Belakovskiy D.I. (2020) Hingganite-(Nd), $\text{Nd}_2\text{Be}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$, a new gadolinite-supergroup mineral from Zagi Mountain, Pakistan. *The Canadian Mineralogist*, **58**, 549–562.

Martens W.N., Rintoul L., Klopogge J.T., Frost R.L. (2004) Single crystal Raman spectroscopy of cerussite. *American Mineralogist*, **89**, 352–358.

Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N.N., Jambor J.L., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel E.H., Graessner, S., Karup-Møller S., Balic-Žunic T., Mumme W.G., Vurro F., Topa D., Bindi L., Bente K., Shimizu M. (2008) Sulfosalt systematics: a review. Report of the sulfosalt subcommittee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. *European Journal of Mineralogy*, **20**, 7–46.

Murzin V.V., Naumov E.A., Azovskova O.B., Varlamov D.A., Rovnushkin M.Yu., Pirajno F. (2017) The Vorontsovskoe Au–Hg–As ore deposit (Northern Urals, Russia): Geological setting, ore mineralogy, geochemistry, geochronology and genetic model. *Ore Geology Reviews*, **85**, 271–298.

Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S., Varlamov D.A., Kiseleva D.V., Sharpyonok L.N., Škoda R., Kasatkin A.V. (2021) The features of native gold in ore-bearing breccias with realgar-orpiment cement of the Vorontsovskoe deposit (Northern Urals, Russia). *Minerals*, **11**, paper 541.

Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Vikent'eva O.V., Chugaeva A.V., Dubinina E.O., Prokofiev V.Yu., Murzin V.V. (2019) Vorontsovka Carlin-style gold deposit in the North Urals: Mineralogy, fluid inclusion and isotope data for genetic model. *Chemical Geology*, **508**, 144–166.

References

Dvurechenskaya S.S. (2001) [Supergene minerals of ore deposits]. Moscow, TSNIGRI, 258 p. (in Russian)

- Gerasimov N.N., Nasedkina V.Kh., Onishchenko S.A., Schischkin M.A. (1999) [Mineral composition of ores of the Parnok iron-manganese deposit]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, **41**(1), 84–96. (in Russian)
- Kabanov A.A. (2001) [Oxidized ores as a new geological and industrial type of supergene gold deposits: example of the Vorontsovskoe deposit in the Urals]. *PhD thesis*. St. Petersburg, 142 p. (in Russian)
- Kasatkin A.V. (2019) New findings of rare minerals from former Soviet Union countries. *Mineralogical Almanac*, **24**(2), 4–47.
- Kasatkin A.V., Nestola F., Škoda R., Chukanov N.V., Agakhanov A.A., Belakovskiy D.I. (2020) Hingganite-(Nd), $\text{Nd}_2\text{Be}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$, a new gadolinite-supergrout mineral from Zagi Mountain, Pakistan. *The Canadian Mineralogist*, **58**, 549–562.
- Kasatkin A.V., Stepanov S.Yu., Tsyganko M.V., Škoda R., Nestola F., Plášil J., Makovicky 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)
- Kasatkin A.V., Stepanov S.Yu., Tsyganko M.V., Škoda R., Nestola F., Plášil J., Makovicky E., Agakhanov A.A., Palamarchuk R.S. (2021a) [Mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). Part 2: Native elements, sulfides, arsenides, tellurides]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **7**(1), 5–22. (in Russian)
- Kasatkin A.V., Stepanov S.Yu., Tsyganko M.V., Škoda R., Nestola F., Plášil J., Makovicky E., Agakhanov A.A., Palamarchuk R.S. (2021b) [Mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). Part 3: Sulfosalts]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **7**(2), 5–49. (in Russian)
- Litoshko D.N. (1996) [Mineralogical study of the Polar Urals]. Syktyvkar, Geoprint, 39 p. (in Russian)
- Martens W.N., Rintoul L., Klopogge J.T., Frost R.L. (2004) Single crystal Raman spectroscopy of cerussite. *American Mineralogist*, **89**, 352–358.
- [Mineralogy of the Urals: oxides and hydroxides. Part 2] (2007) Yekaterinburg–Miass, UrO RAN, 288 p. (in Russian)
- Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N.N., Jambor J.L., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel E.H., Graessner, S., Karup-Møller S., Balic-Žunic T., Mumme W.G., Vurro F., Topa D., Bindi L., Bente K., Shimizu M. (2008) Sulfosalt systematics: a review. Report of the sulfosalt subcommittee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. *European Journal of Mineralogy*, **20**, 7–46.
- Murzin V.V., Sazonov V.N., Ronkin Yu.L. (2010) [Formation model of the Vorontsovskoe gold deposit in the Urals (Carlin type): new data and problems]. *Litosfera [Lithosphere]*, **6**, 66–73. (in Russian)
- Murzin V.V., Varlamov D.A. (2010) [Gold-sulfide-sulfosalt assemblage of minerals from breccias with siliceous fragments from 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., Varlamov D.A., Rovnushkin M.Yu. (2011) [Assemblage of native arsenic and arsenopyrite at 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)
- Murzin V.V., Naumov E.A., Azovskova O.B., Varlamov D.A., Rovnushkin M.Yu., Pirajno F. (2017) The Vorontsovskoe Au–Hg–As ore deposit (Northern Urals, Russia): geological setting, ore mineralogy, geochemistry, geochronology and genetic model. *Ore Geology Reviews*, **85**, 271–298.
- Rovnushkin M.Yu., Gulyaeva T.Ya., Galakhova O.L. (2010) [Potassic feldspar metasomatism at the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals)]. *Ezhegodnik-2009. Trudy IGG UrO RAN [Yearbook-2009. Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS]*, **57**, 241–244. (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)
- Soroka E.I., Pritchinn M.E., Azovskova O.B., Rovnushkin M.Yu., Lyutov V.P., Smoleva I.V. (2018) [Physico-chemical studies of vein carbonates of the Vorontsovskoe gold deposit]. *Vestnik Permskogo universiteta [Bulletin of the Perm University]*, **17**(1), 41–51. (in Russian)
- Soroka E.I., Pritchinn M.E., Azovskova O.B., Rovnushkin M.Yu., Smoleva I.V., Galakhova O.L. (2017) [Vein carbonates of ore-bearing rocks of the Vorontsovskoe gold deposit]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky]*, **20**, 242–248. (in Russian)
- Stepanov S.Yu., Sharpenok L.N., Antonov A.V. (2017) [Fluid-explosive breccias of the Vorontsovskoe gold deposit (the North Urals)]. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **146**(1), 29–43. (in Russian)
- Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S., Varlamov D.A., Kiseleva D.V., Sharpyonok L.N., Škoda R., Kasatkin A.V. (2021) The features of native gold in ore-bearing breccias with realgar-orpiment cement of the Vorontsovskoe deposit (Northern Urals, Russia). *Minerals*, **11**, paper 541.
- Turchkova A.G., Pekov I.V., Yapaskurt V.O., Sidorov E.G., Britvin S.N. (2018) [Manganese mineralization of fumaroles of the Tolbachik volcano (Kamchatka, Russia)]. *Mineral'noe raznoobrazie: issledovanie i sokhranenie [Mineral diversity: research and preservation]*, **9**, 31–35. (in Russian)
- 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, 206 p. (in Russian)
- Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Vikent'eva O.V., Chugaeva A.V., Dubinina E.O., Prokofiev V.Yu., Murzin V.V. (2019) Vorontsovka Carlin-style gold deposit in the North Urals: mineralogy, fluid inclusion and isotope data for genetic model. *Chemical Geology*, **508**, 144–166.