

УДК 549.3+553.411 (470.54)

DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-2-1

МИНЕРАЛОГИЯ ВОРОНЦОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРНЫЙ УРАЛ). ЧАСТЬ 3: СУЛЬФОСОЛИ**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.com² Институт геологии и геохимии УрО РАН, ул. Академика Вонсовского 15, Екатеринбург, 620016 Россия³ Минералогический музей «Штуфной кабинет», ул. Ватутина 17а, Североуральск, Свердловская обл., 624480 Россия⁴ Масариков университет, Котлариска 2, Брно, 61137 Чехия⁵ Университет Падуи, Виа Градениго 6, Падуа, 35131 Италия⁶ Институт физики АНЧР, На Слованце 1999/2, Прага, 18221 Чехия⁷ Университет Копенгагена, Остерволдгаде 10, ДК-1350, Копенгаген, Дания⁸ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия

Статья поступила в редакцию 2.05.2021 г., принята к печати 18.05.2021 г.

MINERALOGY OF THE VORONTSOVSKOE GOLD DEPOSIT (NORTHERN URALS). PART 3: SULFOSALTS**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.com² Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, ul. Akademika Vonsovskogo 15, Yekaterinburg, 620016 Russia³ Mineralogical Museum Shtufnoi Kabinet, ul. Vatutina 17a, Severouralsk, Sverdlovsk oblast, 624480 Russia⁴ Masaryk University, Kotlářská 2, Brno, 61137 Czech Republic⁵ University of Padova, Via Gradenigo 6, Padova, 35131 Italy⁶ Institute of Physics ASCR, v.v.i., Na Slovance 1999/2, Prague, 18221 Czech Republic⁷ University of Copenhagen, Østervoldgade 10, DK-1350, Copenhagen, Denmark⁸ South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia

Received 2.05.2021, accepted 2.05.2021

Аннотация. Данная статья продолжает серию публикаций, посвященных минералогии Воронцовского золоторудного месторождения на Северном Урале (Касаткин и др., 2020, 2021). Описаны найденные на месторождении сульфосоли, приведен их химический состав, а для целого ряда минералов – параметры элементарных ячеек, оптические свойства, КР-спектры. Для восьми новых минеральных видов, открытых авторами (ауэрбахит, воронцовит, гладковскийит, гунгерит, люборжакит, походяшинит, ферроворонцовит, цыганкоит), дополнительно приведены данные о плотности и твердости, спектры отражения и краткие сведения о кристаллической структуре. Находки арсиччиолита, бенавидесита, бернардита, боскардинита, веенита, вейссбергита, врбаита, гептасарторита, гетероморфита, геттардита, гиллулиита, дальнегроита, дрехслерита, зихерита, имхофита, кристита, купрополибазита, лаффитита, лорандита, манганоквадратита, новацкиита, ойонита, парапьерротита, ребулита,

рошинита, твиннита, филротита, хатчинсонита, штальдерита, экрансита и эннеасарторита являются первыми в Российской Федерации.

Ключевые слова: Воронцовское месторождение, Северный Урал, сульфосоли, новые минеральные виды, первые находки в России.

Abstract. This paper continues a series of publications devoted to the mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit in the Northern Urals (Kasatkin et al., 2020, 2021). The article reports on sulfosalts of the deposit, their chemical compositions, as well as unit-cell parameters, optical properties and Raman spectra of some minerals. For eight new mineral species discovered by the authors (auerbakhite, vorontsovite, gladkovskyite, gungerite, luboržákite, pokhodyashinite, ferrovorontsovite, tsygankoite), we provide their density, hardness, reflectance spectra and crystal structure. Arsiccioite, benavidesite, bernardite, boscardinite, veenite, weissbergite, vrbaitite, heptasartorite, heteromorphite, guettardite, gillulyite, dalnegroite, drechslerite, sicherite, imhofite, christite, cupropolybasite, laffittite, lorándite, manganocubite, nowackiite, oyonite, parapierrotite, rebulite, roshchinite, twinnite, philrothite, hutchinsonite, stalderite, écrinsite and enneasartorite are found for the first time in Russian Federation.

Keywords: Vorontsovskoe deposit, Northern Urals, sulfosalts, new mineral species, first finds 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 3. Сульфосоли. Минералогия, 7(2), 5–49. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-2-1.

For citation: Kasatkin A.V., Stepanov S.Yu., Tsyganko M.V., Škoda R., Nestola F., Plášil J., Makovicky E., Agakhanov A.A., Palamarchuk R.S. Mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). Part 3: Sulfosalts. Mineralogy, 7(2), 5–49. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-2-1.

Введение

Настоящая статья является третьей в серии публикаций о минералогии Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). В первой части (Касаткин и др., 2020) охарактеризованы история изучения месторождения, его геологическое положение и строение, типы руд, методы исследований. Там же были подробно описаны девять наиболее устойчивых рудных минеральных ассоциаций, а также дан полный минеральный кадастр. Во второй части (Касаткин и др., 2021) содержится описание простых веществ, сульфидов, арсенидов и теллуридов, установленных на месторождении. В этой статье речь пойдет о сульфосолях – группе минералов, несомненно, представляющих наибольший интерес. По количеству минеральных видов (71) сульфосоли уверенно занимают первое место на Воронцовском месторождении. Именно ими представлены все новые минералы, выявленные нами (ауэрбахит, воронцовит, гладковскийит, гунгерит, люборжакит, походяшинит, ферроворонцовит, цыганкоит), а также большинство находок (31) ранее неизвестных на территории Российской Федерации минералов: арсиччиоита, бенавидесита, бернардита,

боскардинита, веенита, вейсбергита, врбаита, гептасарторита, гетероморфита, геттардита, гиллулиита, дальнегроита, дрехслерита, зихерита, имхофита, кристита, купрополибазита, лаффитита, лорандита, марганоквадрата, новацкиита, ойонита, парапьерротита, ребулита, рошинита, твиннита, филротита, хатчинсонита, штальдерита, экрансита и эннеасарторита. Подавляющее большинство сульфосолей найдено в карбонатных брекчиях, отличающихся максимальным разнообразием минералов, в том числе очень редких.

В статье использованы следующие обозначения минералов: Akt – акташит, Alb – алабандин, And – андорит, Ant – антимонит, Apt – фторапатит, Apy – арсенопирит, Au – золото, Bar – барит, Bln – буланжерит, Bnl – бенлеонардит, Bgn – бернардит, Bsc – боскардинит, Cal – кальцит, Csp – халькопирит, Chb – шабурнеит, Chr – кристит, Cln – клинохлор, Clr – клерит, Cnb – киноварь, Cpb – купрополибазит, Dfr – дюффренуазит, Dln – дальнегроит, Dol – доломит, Dps – диопсид, Ecr – экрансит, Fvr – ферроворонцовит, Gal – галенит, Gcr – геокронит, Gil – гиллуллиит, Gld – гладковскийит, Gtr – геттардит, Htr – гетероморфит, Hut – хатчинсонит, Imh – имхофит, Jos – жозеит-А, Lbr – люборжакит, Lft – лаффитит, Log – лорандит, Mgt – магнетит, Orp – аури-

пигмент, Оуп – ойонит, Qtz – кварц, Пав – павонит, Phl – филлотит, Pkd – походяшинит, Plb – полибазит, Plg – плагионит, Prn – пренит, Ppr – парапьерротит, Pyr – пирит, Rbl – ребулит, Rlg – реальгар, Rmd – рамдорит, Rsh – рощинит, Rtr – рутьерит, Sic – зихерит, Sin – зиннерит, Sms – семсейит, Sph – сфалерит, Til – тилазит, Tnt – теннантит, Tsg – цыганкоит, Tsn – цнигриит, Ves – везувиан, Vik – викингит, Vor – воронцовит, Vrb – врбаит, Wkb – вакабаяшилит.

Описание минеральных видов приведено 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), ассоциации с самородным мышьяком (№ 6), цыганкоитом (№ 7) и минералами висмута (№ 8), а также гипергенная ассоциация (№ 9).

Сульфосоли

Акташит $Cu_6Hg_3As_4S_{12}$ на месторождении описан в виде светло-серых выделений неправильной, реже овально-изометричной формы размером до 0.05 мм в межзерновом пространстве в известняке. Минерал диагностирован по оптическим свойствам и химическому составу; в нем установлены изоморфные примеси Zn (до 2.0 мас. %), Cd (до 0.9 мас. %) и Fe (до 0.5 мас. %) (Сазонов и др., 1991). Выделения акташита размером до 0.15 мм в сростании со сфалеритом, баритом, шабурнеитом и сульфосолями Tl встречаются в кремнистых обломках брекчий и их карбонатном цементе. В минерале зафиксирована примесь Zn (до 3.9 мас. %) и Sb (до 2.8 мас. %) (Мурзин, Варламов, 2010). Нами акташит диагностирован в пяти минеральных ассоциациях. Наиболее крупные его выделения (до 0.2 мм) отмечены в ассоциации № 1 на контакте аурипигмента и нерудных минералов (пренит, кальцит) и в сростках со сфалеритом (рис. 1а). В ассоциации № 4 акташит образует включения угловатой формы до 50 мкм в карбонатах (кальцит, доломит) и наблюдается вместе с антимонитом, киноварью, колорадоитом, парапьерротитом, рутьеритом и сфалеритом. В остальных ассоциациях акташит составляет отдельные зерна размером 20–30 мкм в нерудной массе брекчий. В отраженном свете минерал выглядит светло-серым, светлее аурипигмента и сфалерита, но темнее всех остальных соседствующих рудных минералов. Эффекты анизотропии в воз-

духе, в целом, слабые, однако в отдельных зернах акташита из ассоциации № 1 – весьма отчетливые, в коричневатых тонах, в иммерсии – более сильные. В составе акташита (табл. 1, ан. 1–3) установлены примеси Zn, Fe, Mn, а также до 2.6 мас. % Sb (0.35 а.ф.) (груздевитовый компонент). Параметры гексагональной элементарной ячейки (табл. 2, № 1) соответствуют акташиту.

Составы, отвечающие **новацкиту** $Cu_6Zn_3As_4S_{12}$ (Zn-аналогу акташита), установлены в двух образцах из ассоциаций №№ 1 и 4. В первом из них (Вор-СС-6) новацкит образует вкрапленность очень мелких (не более 10 мкм) зерен в диопсиде и пирите и наблюдается совместно с аурипигментом, золотом, парапьерротитом, реальгаром, экранситом, баритом и фторапатитом. Во втором образце (VD-7.1b) участок, отвечающий по составу новацкиту (табл. 1, ан. 72), зафиксирован в 40-микронном включении Zn-обогащенного акташита в прените с парапьерротитом, пиритом и реальгаром. Оптически новацкит неотличим от акташита.

Андорит $AgPbSb_3S_6$ отмечался в составе полиминеральных сульфосольных прожилков до 5 мм в известняке и в виде мелких включений в бурноните. В единственном химическом анализе, приведенном в литературе для этого минерала из Воронцовского месторождения, фиксируется дефицит Ag (9.3 мас. % = 0.73 а.ф.), возможно, обусловленный входением изоморфных примесей Fe (2.8 мас. % = 0.43 а.ф.) и Cu (1.0 мас. % = 0.13 а.ф.) (Викентьев и др., 2016).

Нами андорит установлен в двух ассоциациях №№ 1 и 4. Он слагает мелкие (не более 15 мкм) включения в антимоните с аурипигментом (рис. 1б), а также колорадоитом, реальгаром, теннантитом (Zn), цинкениитом и самородным мышьяком. В отраженном свете андорит белый, практически неотличим от вмещающего антимонита в его наиболее светлом положении, однако при повороте столика на 90° слабо двуотражающий андорит становится хорошо виден на фоне серого антимонита в его наиболее темном положении. В скрещенных николях разница между слабо анизотропным андоритом и очень сильно анизотропным с яркими цветными эффектами антимонитом становится еще более отчетливой. Состав минерала лучше рассчитывается на андорит-VI; в нем установлены примеси Cu, Mn и As (табл. 1, ан. 4).

Ауэрбахит $MnTl_2As_2S_5$ открыт нами на месторождении (Kasatkin et al., 2021a) и назван в честь русского горного инженера, промышленника

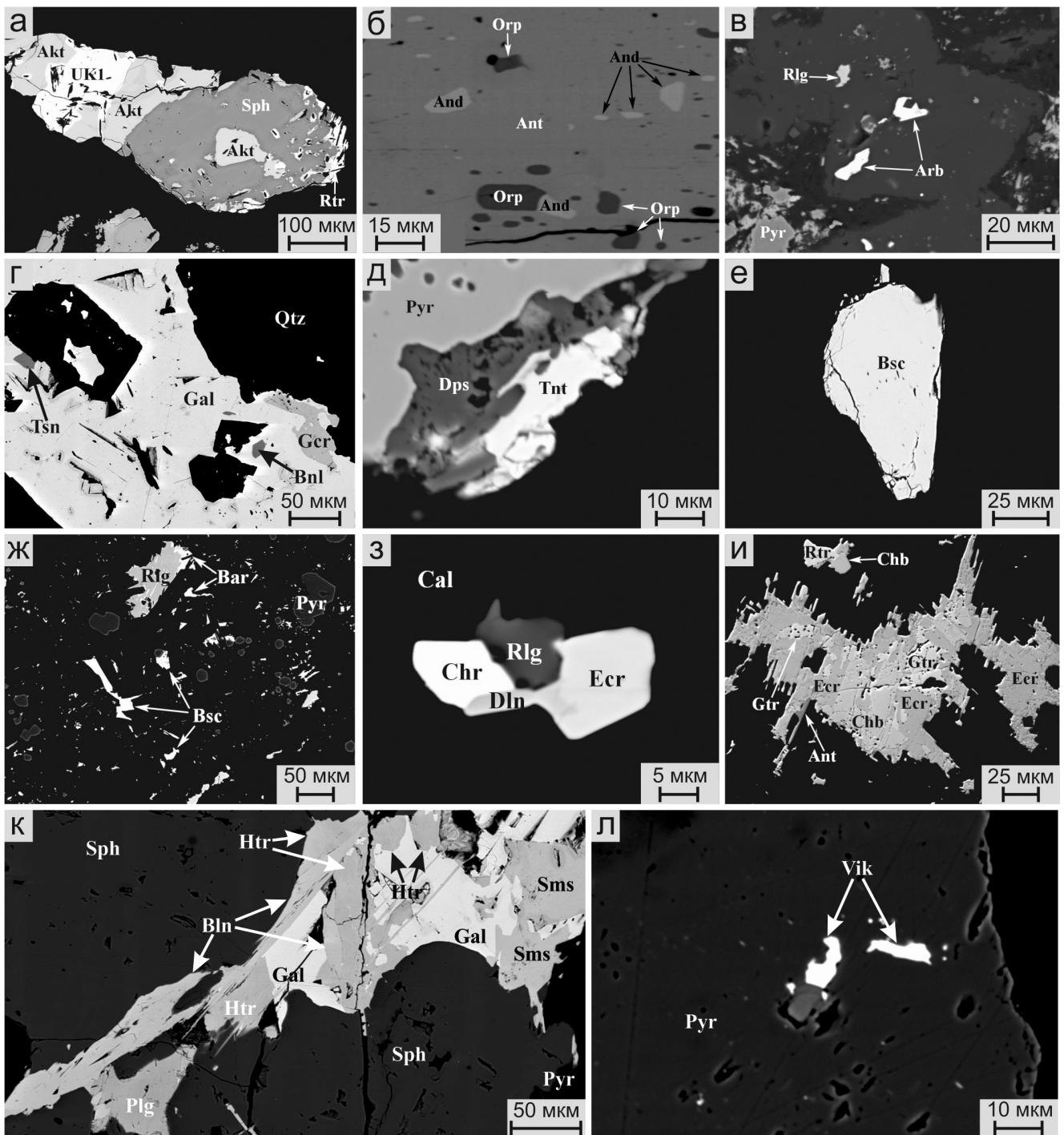


Рис. 1. Сульфосоли Воронцовского месторождения, часть I:

а – акташит в сростании с Mn- и Hg-содержащим сфалеритом, фазой I (UK1) и рутеритом в кальците; б – включения андорита и аурипигмента в антимоните; в – самые крупные из всех включения ауэрбахита в кальците с реальгаром и пиритом (использованы для рентгеноструктурного анализа); г – включения бенлеонардита, геокронита и цнигриита в галените с кварцем; д – кайма из «теннантита-(Mn)» и диопсида вокруг кристалла пирита; е – крупное обособление боскардинита в кальците; ж – кристаллы и зерна боскардинита в кальците (черное) в ассоциации с реальгаром, баритом и пиритом; з, и – сложные сростки экрансита с криститом, дальнегроитом и реальгаром в кальците (з) и шабурнеитом и геттардитом в кальците/доломите в ассоциации с рутеритом и антимонитом (и); к – сросток буланжерита, гетероморфита, плагинита, семсейита и галенита на контакте сфалерита и пирита; л – включения викингита в пирите.

РЭМ фото в отраженных электронах.

Fig. 1. Sulfosalts of the Vorontsovskoe deposit, part I:

а – aktashite intergrown with Mn- and Hg-bearing sphalerite, an unnamed phase I (UK1) and routhierite in calcite; б – andorite and orpiment inclusions in stibnite; в – the largest auebakhite inclusions in calcite with realgar and pyrite (these two grains were used for single-crystal XRD analysis); г – benleonardite, geocronite and tsnigriite inclusions in galena with quartz; д – «tennantite-(Mn)» and diopside rim around pyrite crystal; е – large boscardinite aggregate in calcite; ж – boscardinite crystals and grains in calcite (black) in assemblage with realgar, barite and pyrite; з, и – complex aggregates of écrinsite with christite, dalnegroite and realgar in calcite (з) and with chabournéite and guettardite in calcite/dolomite in assemblage with routhierite and stibnite (и); к – aggregate of boulangerite, heteromorphite, plagionite, semseyite and galena at the contact of sphalerite with pyrite; л – vikingite inclusions in pyrite.

SEM (BSE) images.

и минералог А.А. Ауэрбаха (1844–1916). В конце XIX в. его деятельность была тесно связана с Северным Уралом: в частности, в 1884 г. он основал Турьинское горное училище в Турьинских рудниках, а в 1881–1896 гг. управлял Богословским горным округом, где развил и усовершенствовал медеплавильное производство. А.А. Ауэрбах выполнил несколько монографических описаний минералов, напечатанных в «Горном журнале», а также одним из первых в России применил новый микроскопический метод для исследования минералов.

Ауэрбахит найден в известковых брекчиях, состоящих из кальцита, доломита, барита, клинохлора и кварца и сцементированных аурипигментом, реальгаром и пиритом. Минерал присутствует только в ассоциации № 3 и характеризуется очень малыми размерами короткопризматических кристаллов и зерен, которые не превышают 15×5 мкм, а как правило, еще меньше (рис. 1в). Спутниками ауэрбахита являются алабандин, бернардит, врбаит, гиллулиит, гладковскийит, дальнегроит, золото, имхофит, кристит, киноварь, колорадоит, лорандит, метациннабарит, ребулит, рутьерит, сфалерит, филротит и хатчинсонит.

Ауэрбахит прозрачный, имеет ярко-красный цвет и алмазный блеск. Минерал хрупкий, с неровным изломом. Спайность не наблюдается. Расчетная плотность 5.245 г/см^3 . В отраженном свете ауэрбахит выглядит серовато-белым, двуотражение слабое. В скрещенных николях эффекты анизотропии отчетливые, в светло-серых и коричневых тонах. Внутренние рефлексии обильные, ярко-красного цвета. В проходящем свете ауэрбахит умеренно плеохроирует от оранжево-красного до темно-красного. Дисперсия отражательной способности нормального типа. Спектры отражения ауэрбахита приведены на рис. 2. Коэффициенты отражения для длин волн, рекомендованных Комиссией по рудной минералогии ММА (R_{\min} / R_{\max} , %): 25.2

/ 27.1 (470 нм), 24.0 / 25.2 (546 нм), 23.7 / 24.7 (589 нм), 23.0 / 24.0 (650 нм). Химический состав голотипного образца приведен в табл. 1, ан. 6. Его эмпирическая формула (расчет на сумму 10 атомов): $\text{Mn}_{1.04}\text{Pb}_{1.97}\text{As}_{0.02}\text{S}_{1.95}\text{S}_{5.02}$.

Ауэрбахит кристаллизуется в ромбической сингонии, пространственная группа $Cmce$, $Z = 8$. Параметры элементарной ячейки указаны в табл. 2, № 2. В КР спектре ауэрбахита (рис. 3а) связью с наиболее высокими силовыми характеристиками является связь Mn–S. Полосы M–S-валентных колебаний в КР спектрах соединений MS_2 ($M = \text{Mn, Co, Ni, Cu, Zn}$) с каркасной структурой типа пирита наблюдаются в диапазоне $380\text{--}500 \text{ см}^{-1}$ (Anastassakis,

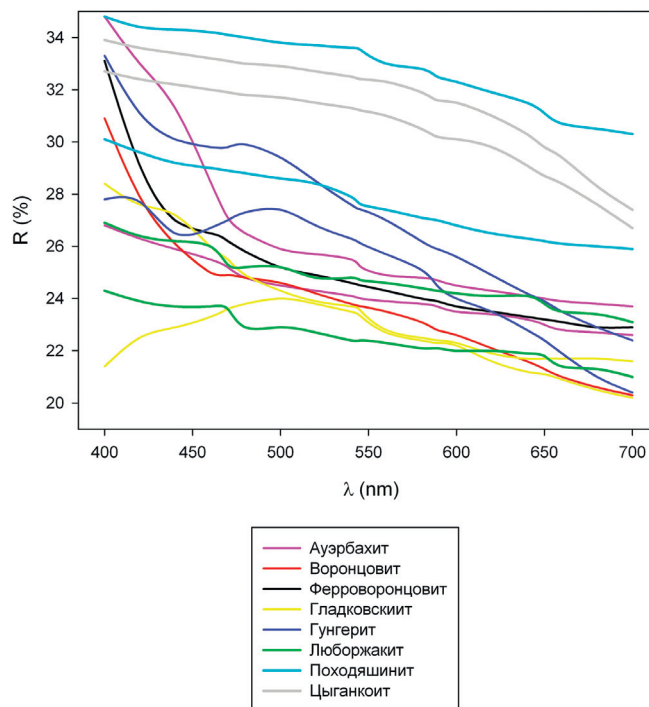


Рис. 2. Спектры отражения новых сульфосолей Воронцовского месторождения.

Fig. 2. Reflectance spectra of new sulfosalts of the Vorontsovskoe deposit.

Таблица 1
Table 1Химический состав (мас. %) сульфосалей Воронцовского месторождения
Chemical composition (wt. %) of sulfosalts of the Vorontsovskoe deposit

| № ан. | № ас. | Минерал | Mn | Fe | Cu | Zn | Ag | Hg | Tl | Pb | As | Sb | S | Сумма | Кристаллохимическая формула |
|-------|-------|--------------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---|
| 1 | 1 | | - | 1.58 | 25.48 | 2.76 | - | 24.29 | - | - | 19.80 | 0.49 | 25.45 | 99.85 | $Cu_{6,06}(Hg_{,83}Zn_{,064}Fe_{,043}Sb_{,22,90}(As_{,3,99}Sb_{,0,06})S_{,11,99})$ |
| 2 | 4 | Акташит | - | - | 23.07 | - | - | 35.13 | - | - | 16.23 | 2.60 | 23.50 | 100.53 | $Cu_{6,01}Hg_{,2,90}(As_{,3,59}Sb_{,0,35})S_{,12,14}$ |
| 3 | 5 | | 1.02 | - | 26.19 | 3.01 | - | 25.75 | - | - | 18.30 | 0.94 | 25.38 | 100.59 | $Cu_{6,25}(Hg_{,1,95}Zn_{,0,70}Mn_{,0,28})S_{,22,93}(As_{,3,70}Sb_{,0,12})S_{,23,82}S_{,12,00}$ |
| 4 | 4 | Андорит | 0.14 | - | 1.00 | - | 11.89 | - | 0.08 | 20.88 | 3.35 | 38.74 | 22.85 | 99.05 | $Pb_{0,85}Ag_{0,93}Cu_{0,13}Mn_{0,02}(Sb_{2,68}As_{0,38})S_{3,06}(S_{6,00}Se_{0,01})S_{6,01}(Ag_{0,51}Cu_{,0,46}Zn_{,0,32}Fe_{,0,56}Mn_{,0,04}S_{,0,02})S_{1,94}Tl_{,1,02}(As_{1,83}Sb_{0,21})S_{2,04}S_{6,02}$ |
| 6 | 3 | Ауэрбахит | 7.34 | - | - | - | - | - | 51.89 | 0.50 | 18.79 | - | 20.70 | 99.22 | $Mn_{1,04}Tl_{1,97}Pb_{0,02}As_{1,95}S_{5,02}$ |
| 7 | 6 | Бенавидесит | 1.57 | 1.11 | - | - | - | - | - | 40.03 | - | 35.83 | 21.97 | 100.51 | $Pb_{3,95}Mn_{0,59}Fe_{,0,41}Sb_{6,02}S_{14,03}$ |
| 8 | 7 | | 2.64 | - | - | - | - | - | - | 40.24 | 1.21 | 33.60 | 22.08 | 99.77 | $Pb_{3,97}Mn_{0,98}(Sb_{5,64}As_{0,33})S_{25,97}S_{14,08}$ |
| 9 | - | Бенлеонардит | - | - | 0.68 | - | 63.07 | - | - | - | 1.12 | 7.12 | 8.47 | 99.50 | $Ag_{15,67}Cu_{0,29}(Sb_{1,57}As_{0,40})S_{19,7}Te_{4,00}S_{7,08}$ |
| 10 | 1 | | - | - | - | - | - | - | 22.80 | 17.82 | 12.19 | 30.86 | 24.22 | 99.70 | $Tl_{1,05}(As_{,2,69}Sb_{,2,29})S_{24,98}S_{7,97}$ |
| 11 | 2 | Бернардит | - | - | - | - | - | - | 21.40 | 0.13 | 25.32 | 25.39 | 27.98 | 100.22 | $Tl_{0,96}Pb_{0,01}(As_{,3,10}Sb_{,1,92})S_{25,02}S_{8,01}$ |
| 12 | 3 | | - | - | - | - | - | - | 25.55 | 0.22 | 42.25 | 1.31 | 30.07 | 99.40 | $Tl_{1,07}Pb_{0,01}(As_{4,82}Sb_{0,09})S_{24,91}S_{8,01}$ |
| 13 | 1 | | - | - | - | - | 2.01 | - | 12.60 | 17.82 | 12.19 | 30.86 | 24.22 | 99.70 | $Ag_{0,85}Tl_{,95}Pb_{4,11}(Sb_{12,12}As_{,7,75})S_{19,90}S_{36,14}$ |
| 14 | 1 | | 0.14 | 0.20 | 0.02 | - | 1.51 | - | 12.60 | 21.32 | 12.19 | 29.16 | 24.52 | 101.71 | $Ag_{0,66}Fe_{0,17}Mn_{0,12}Cu_{0,01}Pb_{2,92}Sb_{4,87}(Sb_{11,33}As_{7,70})S_{19,03}S_{56,19}$ |
| 15 | 1 | | 0.08 | 0.25 | - | - | 1.53 | - | 12.81 | 20.87 | 12.22 | 29.12 | 24.46 | 101.33 | $Ag_{0,67}Fe_{0,21}Mn_{0,29}Tl_{,97}Pb_{,4,78}(Sb_{11,35}As_{,7,74})S_{19,09}S_{36,20}$ |
| 16 | 1 | | - | - | - | - | 1.66 | - | 13.53 | 18.50 | 13.16 | 29.41 | 24.28 | 100.54 | $Ag_{0,73}Tl_{,3,15}Pb_{,4,25}(Sb_{11,49}As_{,8,36})S_{19,85}S_{36,03}$ |
| 17 | 1 | Боскардинит | - | 0.15 | - | - | 1.51 | - | 12.71 | 19.15 | 13.51 | 27.06 | 24.06 | 98.13 | $Ag_{0,68}Fe_{0,13}Pb_{,3,01}(Sb_{10,74}As_{,8,71})S_{19,45}S_{36,27}$ |
| 18 | 1 | | 0.13 | 0.07 | - | - | 1.54 | - | 12.23 | 21.89 | 14.38 | 25.93 | 25.14 | 101.34 | $Ag_{0,67}Mn_{0,11}Fe_{0,06}Tl_{,2,79}Pb_{,4,93}(Sb_{9,93}As_{,8,95})S_{18,88}S_{36,56}S_{6,58}$ |
| 19 | 1 | | 0.15 | 0.05 | 0.02 | - | 1.74 | - | 12.64 | 21.77 | 15.27 | 25.12 | 25.10 | 101.87 | $Ag_{0,75}Mn_{0,13}Fe_{0,04}Cu_{0,02}Tl_{,2,87}Pb_{,4,87}(Sb_{9,57}As_{,9,45})S_{19,02}S_{36,31}$ |
| 20 | 2 | | 0.14 | 0.03 | 0.02 | - | 1.49 | - | 13.23 | 21.53 | 15.44 | 25.13 | 24.75 | 101.77 | $Ag_{0,04}Mn_{0,12}Fe_{0,03}Cu_{0,02}Tl_{,3,02}Pb_{,4,85}(Sb_{9,64}As_{,9,62})S_{19,26}S_{36,05}$ |
| 21 | 5 | | 0.14 | - | 0.02 | - | 1.51 | - | 12.60 | 21.32 | 12.19 | 29.16 | 24.52 | 101.46 | $Ag_{0,66}Mn_{0,12}Cu_{0,01}Tl_{,2,93}Pb_{4,88}(Sb_{11,37}As_{7,72})S_{19,09}S_{36,30}$ |
| 22 | - | Буланжерит | - | - | - | - | - | - | - | 55.53 | - | 25.92 | 19.07 | 100.52 | $Pb_{4,98}Sb_{3,96}S_{11,06}$ |
| 23 | - | | - | - | - | - | - | - | - | 54.84 | - | 26.02 | 18.85 | 99.85 | $Pb_{4,96}Sb_{4,00}S_{11,01}Se_{0,03}$ |
| 24 | - | Бурнонит | - | - | 13.63 | - | - | - | - | 44.30 | 6.60 | 14.78 | 20.49 | 99.80 | $Pb_{1,00}Cu_{1,01}Sb_{0,57}As_{0,41}S_{3,00}$ |
| 25 | 7 | Весенит | - | - | - | - | - | - | 6.77 | 45.99 | 8.72 | 18.39 | 21.32 | 101.19 | $Pb_{1,68}Tl_{0,25}(Sb_{1,14}As_{0,88})S_{22,02}S_{5,04}$ |
| 26 | 1 | Вейсбергерит | - | - | - | - | - | - | 51.12 | 0.69 | 0.47 | 31.08 | 16.53 | 99.89 | $Tl_{0,97}Pb_{0,01}(Sb_{0,99}As_{0,02})S_{1,01}S_{2,00}$ |
| 27 | 1 | | - | - | - | - | - | - | 53.31 | - | 3.42 | 27.81 | 16.61 | 101.15 | $Tl_{0,99}(Sb_{0,87}As_{0,17})S_{1,04}S_{1,97}$ |
| 28 | - | Викингит | - | - | 0.58 | - | 6.07 | - | - | 28.84 | - | - | 17.01 | 99.23 | $Ag_{5,28}Cu_{0,53}Pb_{8,13}Bi_{13,03}S_{30,97}Se_{0,05}$ |
| 29 | 2 | Воронцовит | - | 5.36 | 3.42 | 1.26 | 0.64 | 35.70 | 11.53 | 0.04 | 15.98 | 2.35 | 22.70 | 99.76 | $[(Hg_{3,02}Fe_{,1,65}Zn_{,0,33})S_{24,98}(Cu_{0,91}Ag_{0,10})S_{1,01}](Tl_{0,96}Cu_{0,04})S_{1,00}(As_{5,62}Sb_{0,33}Te_{0,05})S_{24,00}S_{12,01}$ |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---------------------------------------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---|--|
| 100 | 1 | Твиннит | — | — | — | — | — | — | — | 2.80 | 33.43 | 12.23 | 26.63 | 23.58 | 98.67 | $Pb_{0,87}Ti_{0,07}(Sb_{1,18}As_{0,88})_{22,06}S_{3,98}$ |
| 101 | 5 | — | — | — | — | — | — | — | 2.95 | 34.02 | 10.40 | 27.77 | 24.41 | 99.55 | $Pb_{0,88}Ti_{0,08}(Sb_{1,22}As_{0,74})_{21,96}S_{4,08}$ | |
| 102 | 4 | Теннантит-(Zn) | 0.01 | 1.47 | 39.10 | 6.35 | 3.23 | 0.41 | 0.04 | 0.10 | 13.81 | 8.53 | 26.49 | 99.54 | $(Cu_{9,63}Ag_{0,47}Zn_{1,52}Fe_{0,41}Hg_{0,03}Pb_{0,01})_{21,27}S_{9,94}$ | |
| 103 | 1 | «Теннантит-(Mn)» | 2.70 | 1.82 | 35.88 | 0.12 | 5.79 | 6.87 | 0.22 | — | 17.78 | 3.09 | 26.01 | 100.28 | $(Cu_{9,04}Ag_{0,86}Mn_{0,79}Hg_{0,55}Fe_{0,52}Zn_{0,03}Ti_{0,02})_{21,18}S_{12,99}$ | |
| 104 | - | «Тетраэдрит-(Mn)» | 3.20 | 2.62 | 38.80 | 0.17 | 0.07 | — | — | — | 3.25 | 25.68 | 26.01 | 99.80 | $(Cu_{9,92}Ag_{0,01}Mn_{0,95}Fe_{0,76}Zn_{0,04})_{21,18}S_{13,18}$ | |
| 105 | 2 | Ферро-воронцовит | — | 9.89 | 3.95 | 1.16 | 0.45 | 25.13 | 12.93 | 0.04 | 17.83 | 2.15 | 24.91 | 99.28 | $[(Fe_{0,74}Hg_{1,94}Zn_{0,27})_{24,95}(Cu_{0,96}Ag_{0,06})_{21,02}](Ti_{0,98}Cs_{0,05})_{21,03}(As_{3,68}Sb_{0,27}Te_{0,05})_{24,00}S_{12,00}$ | |
| 106 | 3 | Филлотит | — | — | — | — | — | — | 33.17 | 0.59 | 34.40 | 3.94 | 27.06 | 99.16 | $Ti_{0,97}Pb_{0,02}(As_{2,75}Sb_{1,19})_{22,94}S_{5,06}$ | |
| 107 | 1 | — | — | 0.10 | 0.01 | 0.03 | — | — | 18.09 | 18.15 | 29.79 | 6.40 | 25.74 | 98.31 | $Fe_{0,02}Zn_{0,01}Ti_{0,99}Pb_{0,98}(As_{4,44}Sb_{0,59})_{25,03}S_{8,97}$ | |
| 108 | 2 | Хатчинсонит | — | — | — | — | — | — | 18.84 | 18.51 | 30.05 | 5.52 | 25.93 | 98.85 | $Ti_{1,03}Pb_{0,99}(As_{4,47}Sb_{0,50})_{24,97}S_{9,01}$ | |
| 109 | 3 | — | — | — | — | — | — | — | 19.14 | 18.68 | 31.25 | 4.73 | 26.54 | 100.34 | $Ti_{1,02}Pb_{0,98}(As_{4,55}Sb_{0,42})_{24,97}S_{9,03}$ | |
| 110 | - | — | — | — | — | — | — | — | — | 31.87 | — | 45.03 | 22.64 | 99.54 | $Pb_{9,13}Sb_{21,95}S_{41,92}$ | |
| 111 | 1 | Цинкениит | — | — | — | — | — | — | — | 32.91 | 7.55 | 35.07 | 23.90 | 99.43 | $Pb_{8,97}(Sb_{16,26}As_{5,69})_{22,19}S_{42,08}$ | |
| 112 | 4 | — | — | — | — | — | — | — | — | 32.02 | 4.28 | 40.37 | 23.42 | 100.09 | $Pb_{8,86}(Sb_{19,00}As_{3,27})_{22,27}S_{41,87}$ | |
| 113 | - | Цигриит | — | — | — | — | 62.02 | — | — | — | — | 7.32 | 5.94 | 100.09 | $Ag_{0,07}Sb_{0,95}Te_{3,07}S_{2,92}$ | |
| 114 | 7 | Цыганкоит | 6.29 | — | — | — | — | 5.42 | 26.05 | 5.84 | 3.39 | 30.89 | 21.87 | 99.75 | $Mn_{8,06}Ti_{8,00}Hg_{1,90}(Sb_{17,87}As_{3,19}Pb_{1,99}Ti_{10,97})_{22,42}S_{48,03}$ | |
| 115 | 1 | — | — | — | — | — | — | — | 18.47 | 11.15 | 13.89 | 32.97 | 25.22 | 101.70 | $Ti_{3,91}Pb_{2,33}Sb_{11,71}As_{8,02}S_{34,03}$ | |
| 116 | 2 | Шабурнеит | — | — | — | — | — | — | 17.47 | 10.96 | 13.86 | 32.89 | 24.85 | 100.03 | $Ti_{3,75}Pb_{2,32}Sb_{11,84}As_{8,11}S_{33,98}$ | |
| 117 | 5 | — | 0.03 | — | 0.01 | — | 0.07 | — | 18.85 | 10.31 | 16.61 | 29.83 | 25.46 | 101.17 | $Ag_{0,03}Mn_{0,02}Cu_{0,01}Ti_{3,94}Pb_{2,13}Sb_{10,47}As_{9,47}S_{33,93}$ | |
| 118 | 1 | Бесвинцовый член семейства шабурнеита | — | — | — | — | — | — | 23.10 | 0.25 | 16.08 | 35.12 | 26.30 | 100.85 | $Ti_{2,34}Pb_{0,03}Sb_{5,98}As_{4,45}S_{17,00}$ | |
| 119 | 1 | Шгальдерит | 0.10 | — | 4.07 | 8.16 | 4.92 | 20.49 | 22.24 | — | 15.02 | 2.50 | 21.29 | 98.79 | $(Cu_{0,58}Ag_{0,41})_{20,99}(Zn_{1,12}Hg_{0,92})_{0,02}22,06Ti_{0,98}(As_{1,81}Sb_{0,18})_{21,99}S_{5,98}$ | |
| 120 | 2 | Эннеасарторит | — | — | — | — | — | — | 6.69 | 35.05 | 18.94 | 14.83 | 24.08 | 99.59 | $Ti_{6,11}Pb_{31,60}(As_{47,22}Sb_{22,75})_{26,99}S_{140,31}$ | |
| 121 | 1 | — | — | 0.23 | — | — | 1.64 | — | 14.17 | 16.50 | 16.50 | 26.06 | 24.67 | 99.77 | $Ag_{0,71}Fe_{1,19}Ti_{1,23}Pb_{3,71}(As_{10,27}Sb_{9,99})_{22,26}S_{35,89}$ | |
| 122 | 1 | Экрансит | — | 0.25 | — | — | 1.55 | — | 8.72 | 26.04 | 17.84 | 20.78 | 24.28 | 99.62 | $Ag_{0,68}Fe_{0,21}Ti_{2,01}Pb_{3,93}(As_{11,24}Sb_{8,06})_{21,9,30}(S_{35,76}Se_{0,10})_{23,5,86}$ | |
| 123 | 2 | — | 0.30 | — | — | — | 1.21 | — | 8.41 | 30.71 | 15.74 | 19.92 | 24.77 | 101.06 | $Ag_{0,53}Mn_{0,26}Ti_{1,95}Pb_{7,01}(As_{9,94}Sb_{7,74})_{21,74}S_{36,56}$ | |
| 124 | 5 | — | — | — | — | — | 0.18 | 0.27 | 13.77 | 20.03 | 19.83 | 20.70 | 25.79 | 100.57 | $Ag_{0,08}Hg_{0,06}Ti_{3,07}Pb_{4,40}(As_{12,05}Sb_{7,74})_{21,79}S_{36,61}$ | |
| 125 | 1 | Фаза I | 2.38 | — | — | — | 2.53 | 0.47 | 10.52 | 24.48 | 17.98 | 16.76 | 24.96 | 100.08 | $Mn_{1,99}Ag_{1,08}Hg_{0,11}Ti_{2,36}Pb_{5,42}As_{11,01}Sb_{6,32}S_{35,72}$ | |
| 126 | 1 | Фаза II | 3.29 | 0.30 | 0.50 | — | 12.26 | 0.58 | 0.11 | 15.46 | 8.58 | 32.83 | 25.47 | 99.38 | $Mn_{0,91}Ag_{0,73}Cu_{0,12}Fe_{0,08}Hg_{0,04}Ti_{1,14}Pb_{4,11}Sb_{1,75}S_{12,11}$ | |

Примечание. № ан. – номер анализа. № ас. – номер минеральной ассоциации. В сумму анализов включены (мас. %): 0.12 Se (ан. 4), 19.04 Te (ан. 9), 0.14 Se (ан. 23), 0.07 Se, 46.66 Bi (ан. 28), 0.02 Se, 0.41 Te, 0.35 Cs (ан. 29), 4.77 Cs (ан. 32), 0.15 Se (ан. 34), 0.12 Se (ан. 35), 49.20 Bi, 0.91 Se (ан. 66), 66.21 Bi, 0.10 Te, 0.48 Se (ан. 74), 0.09 Se (ан. 77), 0.10 Se (ан. 78), 0.12 Se, 0.17 Bi (ан. 87), 0.15 Se (ан. 89), 0.40 Te, 0.44 Cs (ан. 105), 24.81 Te (ан. 113), 0.16 Se (ан. 122). Пониженная сумма ан. 56 объясняется вычетом малой примеси вмещающего пирита. Анализ № 104 взят из (Мурзин и др., 2011). Прочерк – содержание компонента ниже предела обнаружения. Здесь и в табл. 2, дефис в столбце № ас. означает, что образец не принадлежит ни к одной из минеральной ассоциации.

Образцы: № Vor-8-2 – ан. 1, 27, 53; № Vor-10-8 – ан. 2; № Vor-19-01эмф – ан. 3, 117; № СК-18-19 – ан. 4, 102; № Vor-10/2017-2 – ан. 5, 46, 96, 119; № ВК-27-3 – ан. 6, 106; № Vor-08-18-13 – ан. 7, 51; № Vor-10-6 – ан. 8, 59; № Vor-08/20-20 – ан. 9, 33, 113; № Vor-8-3 – ан. 10; № Vor-03/16-6-3 – ан. 11, 97; № VK-27-4 – ан. 12, 41, 42; № Vor-10/2017-2b – ан. 13; № Vor-10/2017-2в – ан. 14, 18, 19; № Vor-10/2017-2d – ан. 15, 17, 57, 121; № Vor-01/19-16 – ан. 16; № Vor-08/20-7 – ан. 20, 32, 123; № Vor-19-05эмф – ан. 21; № 905Б – ан. 22; № Vor-08/20-22 – ан. 23, 34, 35, 87, 99; № Vor-08/20-14 – ан. 24; № Vor-10bis-3с – ан. 25; № Vor-10/2017-1 – ан. 26, 89; № Vor-08/20-26 – ан. 28; № Vor-03/16-5-4 – ан. 29, 36, 47, 120; № Vor-CC-10 – ан. 30, 91, 103; № VK-27 – ан. 31; № Vor-01/19-23 – ан. 37, 73; № Vor-03/16-3-1 – ан. 38, 116; № Vor-08/18-5 – ан. 39, 94, 95; № VK-27-1-1 – ан. 40; № Vor-03/16-6-6 – ан. 43, 105; № Vor-01/19-15 – ан. 44, 45, 62; № Vor-03/16-3-5 – ан. 48; № ВК-27-4-1 – ан. 49; № ВК-27-3-1 – ан. 50, 109; № Vor-08/20-13 – ан. 52; № Vor-8bis-1 – ан. 54; № Vor-08/20-9 – ан. 55; № Vor-01/19-11 – ан. 56; № VK-27-2 – ан. 58; № Vor-01/19-106 – ан. 60; № Vor-2013-8-7b – ан. 61; № ВК-37 – ан. 63; № Vor-08/20-8 – ан. 64, 88; № Vor-08/18-19 – ан. 65; № Kas172 № 11 – ан. 66, 74; № VK-27-4-new – ан. 67; № Vor-01/19-10г – ан. 68, 69, 124; № Vor-CC-15 – ан. 70; № 1365M – ан. 71; № VD-7.1b – ан. 72; № 1038П – ан. 75; № Vor-9-1 – ан. 76, 77, 78; № VD-20 – ан. 80; № СК-18-4bis – ан. 81; № Vor-CC-1а – ан. 82; № 939П – ан. 83; № Vor-2 – ан. 84; № Vor-01/19-16 – ан. 85, 86; № Vor-08/18-13 – ан. 90; № Vor-01/19-25 – ан. 92; № VK-27-4-2 – ан. 93; № Vor-ЭМФ-6 – ан. 98; № Vor-CC-5 – ан. 100; № Vor-2019-4нф – ан. 101; № Vor-01/19-22 – ан. 107; № Vor-6/н-9 – ан. 108; № 287Ц – ан. 110; № Vor-CC-12 – ан. 111; № Vor-6/н-5 – ан. 112; № Vor-10-3 – ан. 114; № Vor-11 – ан. 115; № ВК-23 – ан. 118; № Vor-CC-07 – ан. 122; № Vor-01/19-3тф – ан. 125; № Vor-CC-9 – ан. 126.

Формулы минералов рассчитаны на сумму атомов, равную 4 (вейсбергит, лорандит), 6 (бурнонит, кристит, лафитит, манганоквартит), 7 (геттардит, клерит, твиннит), 9 (веенит, дюфренуазит, люборжацит, павонит, филротит), 10 (ауэрбахит), 11 (андорит, гладковскийит, лиллианит), 12 (арсиччиоит, зихерит, рутьерит), 14 (бернардит, паральротит), 16 (дрехслерит, люборжацит, вольфрамит), 19 (зиннерит), 20 (буланжерит), 22 (фаза II), 22.8 (гиллулит), 23 (воронцовит, галхаит, гунгерит, ферроворонцовит), 25 (акташит, бенавидесит, джемсонит, новакцит, походяшинит), 29 (бенлеонардит, купрополибазит, полибазит, теннантит-(Zn)), «теннантит-(Mn)», «тетраэдрит-(Mn)», 30 (плагионит), 34 (гетероморфит), 37 (врбаит), 38 (семсейт), 40 (ребулит), 43 (геокронит, иорданит), 44 (ойонит, рамдорит), 45 (менегинит), 47.2 (имхофит), 56 (викингит), 60 (дальнегроит, шабурнеит), 64 (боскардинит, экрансит, фаза I), 73 (цинкениит), 90 (цыганкоит), 176 (рошчинит), 192 (гептасарторит), 248 (эннеасарторит). Формула бесвинцового члена семейства шабурнеита (ан. 118) рассчитана на 17 атомов S.

Note. № ан. – number of analysis, № ас. – number of mineral assemblage. The analytical total includes (wt. %): 0.12 Se (ан. 4), 19.04 Te (ан. 9), 0.14 Se (ан. 23), 0.07 Se, 46.66 Bi (ан. 28), 0.02 Se, 0.41 Te, 0.35 Cs (ан. 29), 4.77 Cs (ан. 32), 0.15 Se (ан. 34), 0.12 Se (ан. 35), 49.20 Bi, 0.91 Se (ан. 66), 66.21 Bi, 0.10 Te, 0.48 Se (ан. 74), 0.09 Se (ан. 77), 0.10 Se (ан. 78), 0.12 Se, 0.17 Bi (ан. 87), 0.15 Se (ан. 99), 0.40 Te, 0.44 Cs (ан. 105), 24.81 Te (ан. 113), 0.16 Se (ан. 122). The low analytical total of an. 56 is due to subtraction of pyrite from the matrix. Analysis 104 was taken from (Murzin et al., 2011). Dash – the content of element is below detection limit. Д Here and in Table 2, hyphen in column № ас. means that the sample does not belong to any mineral assemblages

Samples: № Vor-8-2 – ан. 1, 27, 53; № Vor-10-8 – ан. 2; № Vor-19-01эмф – ан. 3, 117; № СК-18-19 – ан. 4, 102; № Vor-10/2017-2 – ан. 5, 46, 96, 119; № ВК-27-3 – ан. 6, 106; № Vor-08-18-13 – ан. 7, 51; № Vor-10-6 – ан. 8, 59; № Vor-08/20-20 – ан. 9, 33, 113; № Vor-8-3 – ан. 10; № Vor-03/16-6-3 – ан. 11, 97; № VK-27-4 – ан. 12, 41, 42; № Vor-10/2017-2b – ан. 13; № Vor-10/2017-2в – ан. 14, 18, 19; № Vor-10/2017-2d – ан. 15, 17, 57, 121; № Vor-01/19-16 – ан. 16; № Vor-08/20-7 – ан. 20, 32, 123; № Vor-19-05эмф – ан. 21; № 905Б – ан. 22; № Vor-08/20-22 – ан. 23, 34, 35, 87, 99; № Vor-08/20-14 – ан. 24; № Vor-10bis-3с – ан. 25; № Vor-10/2017-1 – ан. 26, 89; № Vor-08/20-26 – ан. 28; № Vor-03/16-5-4 – ан. 29, 36, 47, 120; № Vor-CC-10 – ан. 30, 91, 103; № ВК-27 – ан. 31; № Vor-01/19-23 – ан. 37, 73; № Vor-03/16-3-1 – ан. 38, 116; № Vor-08/18-5 – ан. 39, 94, 95; № VK-27-1-1 – ан. 40; № Vor-03/16-6-6 – ан. 43, 105; № Vor-01/19-15 – ан. 44, 45, 62; № Vor-03/16-3-5 – ан. 48; № ВК-27-4-1 – ан. 49; № ВК-27-3-1 – ан. 50, 109; № Vor-08/20-13 – ан. 52; № Vor-8bis-1 – ан. 54; № Vor-08/20-9 – ан. 55; № Vor-01/19-11 – ан. 56; № VK-27-2 – ан. 58; № Vor-01/19-106 – ан. 60; № Vor-2013-8-7b – ан. 61; № ВК-37 – ан. 63; № Vor-08/20-8 – ан. 64, 88; № Vor-08/18-19 – ан. 65; № Kas172 № 11 – ан. 66, 74; № VK-27-4-new – ан. 67; № Vor-01/19-10г – ан. 68, 69, 124; № Vor-CC-15 – ан. 70; № 1365M – ан. 71; № VD-7.1b – ан. 72; № 1038П – ан. 75; № Vor-9-1 – ан. 76, 77, 78; № Vor-9-2 (940П) – ан. 79; № VD-20 – ан. 80; № СК-18-4bis – ан. 81; № Vor-CC-1а – ан. 82; № 939П – ан. 83; № Vor-2 – ан. 84; № Vor-01/19-16 – ан. 85, 86; № Vor-08/18-13 – ан. 90; № Vor-01/19-25 – ан. 92; № VK-27-4-2 – ан. 93; № Vor-ЭМФ-6 – ан. 98; № Vor-CC-5 – ан. 100; № Vor-2019-4нф – ан. 101; № Vor-01/19-22 – ан. 107; № Vor-6/н-9 – ан. 108; № 287Ц – ан. 110; № Vor-CC-12 – ан. 111; № Vor-6/н-5 – ан. 112; № Vor-10-3 – ан. 114; № Vor-11 – ан. 115; № ВК-23 – ан. 118; № Vor-CC-07 – ан. 122; № Vor-01/19-3тф – ан. 125; № Vor-CC-9 – ан. 126.

The mineral formulas are recalculated to atom sum of 4 (weissbergite, lorandite), 6 (bournonite, christite, laffittite, manganocubite), 7 (guettrite, clerite, twinnite), 9 (veenite, dufrénoyite, luborzhakite, pavonite, philrothite), 10 (auerbachite), 11 (andorite, gladkovskiyite, lillianite), 12 (arsiccioite, sicerite, routhierite), 14 (bernardite, parapirothite), 16 (drechslerite, hutchinsonite, tsnigrite, stalderite), 19 (sinnerite), 20 (boulangerite), 22 (phase II), 22.8 (gillulyite), 23 (vorontsovite, galkhite, gungerite, ferrovorontsovite), 25 (aktashite, benavidesite, jamesonite, novackite, pokhodvashinite), 29 (benleonardite, cupropolybasite, polybasite, tennantite-(Zn)), «tennantite-(Mn)», «tetraedrite-(Mn)», 30 (plagiomite), 34 (heteromorphite), 37 (vrbaite), 38 (semseyite), 40 (rebullite), 43 (geocronite, jordanite), 44 (oyonite, ramdohrite), 45 (meneghinite), 47.2 (imhofite), 56 (vikingite), 60 (dalnegroite, chabournéite), 64 (boscardinite, écrinsite, phase I), 73 (zinkenite), 90 (tsygankoit), 176 (roshchinite), 192 (heptasartorite) and 248 (enneasartorite). The formula of Pb-free end-member of the chabournéite family (ан. 118) is recalculated to 17 S atoms.

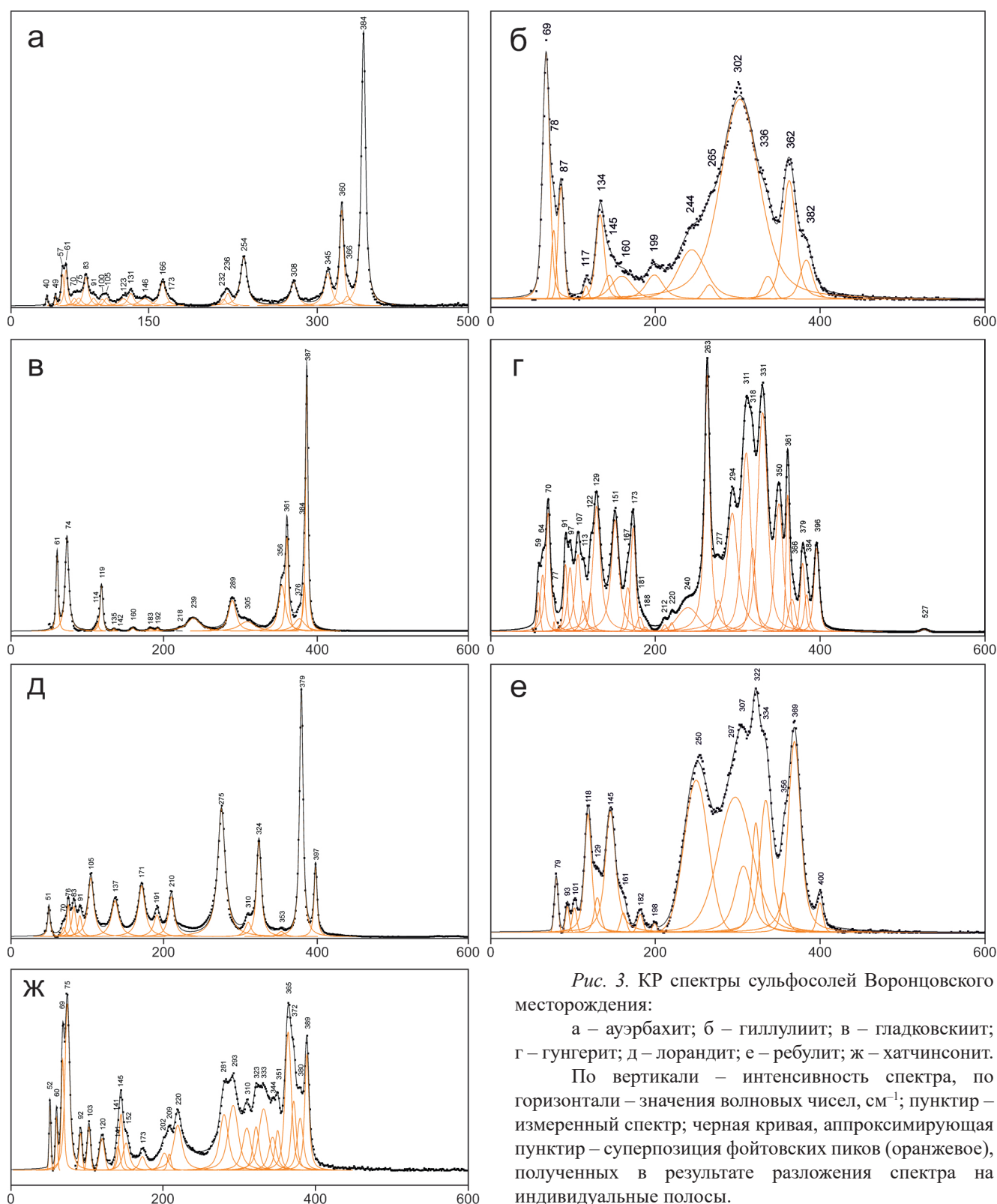


Рис. 3. КР спектры сульфосолей Воронцовского месторождения:

а – ауэрбахит; б – гиллулит; в – гладковскиит; г – гунгерит; д – лорандит; е – ребулит; ж – хатчинсонит.

По вертикали – интенсивность спектра, по горизонтали – значения волновых чисел, см⁻¹; пунктир – измеренный спектр; черная кривая, аппроксимирующая пунктир – суперпозиция фойтговских пиков (оранжевое), полученных в результате разложения спектра на индивидуальные полосы.

Fig. 3. Raman spectra of sulfosalts of the Vorontsovskoe deposit:

a – auerbakhite; б – gillulyite; в – gladkovskiyite; г – gungerite; д – lorandite; е – rebulite; ж – hutchinsonite.

Vertical axis – intensity, horizontal axis – wavenumbers, cm⁻¹; dash – measured spectrum; black curve matching to the dash line – superposition of Voigt peaks (orange) resulted from spectral fit.

Perry, 1976). Для ауэрбахита, в структуре которого присутствует одномерная система октаэдров MnS_6 , полосы $Mn-S$ -валентных колебаний наблюдаются в интервале $350-400\text{ см}^{-1}$. На основании сопоставления с КР спектрами аурипигмента и реалгара (Forneris, 1969; Minceva-Sukarova et al., 2003), полосы КР спектра ауэрбахита в интервале $300-350\text{ см}^{-1}$ отнесены к $As-S$ -валентным колебаниям. По мнению Н.В. Чуканова (устное сообщение), надежное отнесение полос КР спектров таллиевых сульфосолей с рамановскими сдвигами ниже 260 см^{-1} на основании имеющихся данных затруднительно. Предположительно, эти полосы относятся к мягким решеточным модам с участием деформационных колебаний, а также валентных колебаний связей $Pb-As$ и $Pb-S$. Кристаллическая структура ауэрбахита (рис. 4) идентична структуре синтетической фазы $Pb_2MnAs_2S_5$ (Gostojić et al., 1982).

Бенавидесит $Pb_4MnSb_6S_{14}$ впервые встречен в ассоциации № 7 (Kasatkin et al., 2018b) в виде сростков со сфалеритом до 20 мкм в кальците с клинохлором. В ассоциации № 6 он образует зерна овальной формы до 40 мкм в везувиан-диопсидовой породе. В отраженном свете бенавидесит белый со слабым зеленоватым оттенком, намного ярче контактирующего с ним сфалерита. Двухотражение в воздухе отчетливое, в иммерсии – сильное. В скрещенных николях минерал сильно анизотропный, в коричневатых тонах. Химический состав варьирует в зависимости от ассоциации: в ассоциации № 6 установлена существенная изоморфная примесь Fe (табл. 1, ан. 7), в ассоциации № 7 джемсонитового компонента нет, но присутствует небольшая примесь As (табл. 1, ан. 8).

Чаще бенавидесита на месторождении встречается его Fe-аналог **джермонит** $Pb_4FeSb_6S_{14}$. Впервые он идентифицирован по основным линиям дебаеграммы в образце с буланжеритом и бурнонитом (Сазонов и др., 1991). Впоследствии джермонит установлен в сростках с другими сульфосолями (буланжерит, цинкенил, халькостибит) и антимонитом в виде вкрапленности зерен размером менее 0.5 мм в нерудной массе цемента брекчий. Минерал был изучен химически (Викентьев и др., 2016). Нами джермонит обнаружен в 2018 г. в ассоциации № 6 в виде сростков с тетраэдритом (Zn) размером до 50 мкм в карбонатах с везувианом и диопсидом. Также он диагностирован в образцах со склада забалансовых руд № 2, найденных летом 2020 г., где образует включения до 0.1 мм в пирите, сфалерите и карбонатах (доломит, кальцит). По

оптическим свойствам джермонит идентичен бенавидеситу. В химическом составе джермонита из ассоциации № 6 фиксируется примесь Mn (табл. 1, ан. 51) в отличие от образцов со склада забалансовых руд № 2 (табл. 1, ан. 52).

Бенлеонардит $Ag_{15}Cu(Sb,As)_2S_7Te_4$ установлен В.В. Мурзиным на западном фланге месторождения в зоне минерализации небольшой мощности, представленной эпидот-актинолит-хлорит-карбонатными метасоматитами с вкрапленностью галенита, сфалерита, халькопирита и пирротина, развивающимися по известнякам. Бенлеонардит вместе с пираргиритом образует пластинчатые выделения размером до 0.06 мм вдоль плоскостей спайности в галените. Минерал диагностирован по химическому составу и оптическим свойствам. По сравнению с теоретическим составом воронцовская сульфосоль характеризуется практически полным отсутствием Cu (Минералогия..., 1991). Нами бенлеонардит встречен при электронно-микроскопическом исследовании кальцит-доломит-кварцевых агрегатов с галенитом и сфалеритом в образцах, собранных летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2. Бенлеонардит образует мелкие (не более 20 мкм) включения в галените и ассоциирует с геокронитом, гесситом и цнигриитом (рис. 1г). Минерал также отличается дефицитом Cu (табл. 1, ан. 9). Отражательная способность бенлеонардита умеренная, на фоне белого вмещающего галенита он выглядит светло-серым. Эффекты анизотропии в скрещенных николях отчетливые, в коричневатых и голубоватых тонах.

Бернардит $PbAs_5S_8$ установлен в четырех ассоциациях (№№ 1–4) в виде очень редких и мелких (до 50 мкм) зерен неправильной формы в нерудных минералах брекчий (кальцит, барит, клинохлор), а также в единичных сростках с парапирротитом и воронцовитом. В отраженном свете бернардит светло-серый. Двухотражение слабое. В скрещенных николях эффекты анизотропии очень сильные, в белых и коричневатых тонах; внутренние рефлексы оранжево-красного цвета. Химически минерал неоднороден: содержание примесной Sb колеблется от 1.3 мас. % в ассоциации № 3 до 29.6 мас. % в ассоциации № 1 (табл. 1, ан. 10–12). Параметры моноклинной элементарной ячейки наиболее близкого в химическом отношении к идеальному $PbAs_5S_8$ бернардита из ассоциации № 3 даны в табл. 2, № 3. Не исключено, что таллиевая сульфосоль, диагностированная В.Н. Сазоновым с соавторами (1991) как «пирротит» (см. ниже), является бернардитом.

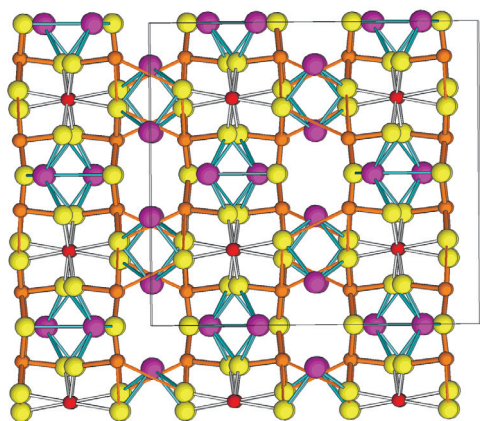


Рис. 4. Кристаллическая структура ауэрбахита в проекции вдоль [010].

Ось a ориентирована вертикально, ось c – горизонтально. Колонки Mn-центрированных октаэдров (направлены перпендикулярно плоскости проекции; красные сферы) чередуется с координационными полиэдрами T11 (большие лиловые сферы) в слоях, параллельных плоскости (001). Катионы T12 (большие лиловые сферы) расположены в межслоевом пространстве. Атомы As и S пирамид AsS_3 показаны как оранжевые и лимонно-желтые сферы, соответственно.

Fig. 4. Crystal structure of auerbakhite along [010].

Axes a and c are vertical and horizontal, respectively. Columns of Mn-coordinated octahedra (are perpendicular to the projection plane; red spheres) are alternated with T11 polyhedra (large mauve spheres) in layers parallel to plane (001). The T12 coordination polyhedra (large mauve spheres) are located in interlayers. The As and S atoms of AsS_3 pyramids are depicted as orange and lemon yellow spheres, respectively.

Бернарлоттит $Pb_6(As_5Sb_3)S_{18}$ указан среди фаз золото-пирит-реальгаровой ассоциации как минерал, сростающийся со сфалеритом и цементирующий энаргит (Викентьев и др., 2016), однако приведенный в указанной работе электронно-зондовый анализ по стехиометрии не соответствует этой сульфосоли.

Блеклые руды на месторождении впервые установлены В.Н. Сазоновым с соавторами (1991). Они образуют скопления округлых зерен размером до 0.1–0.3 мм в карбонатах, часто сростаются с антимонитом, цинкенимом и пиритом. Обогащенные Ag разности этих минералов образуют каймы вокруг бурнонита, буланжерита, халькопирита и сфалерита. Мелкие (до 0.05 мм) кристаллы иногда заключены в сфалерит. Приведенные в указанной работе химические анализы демонстрируют широкий изо-

морфизм как между формально одновалентными (Cu и Ag), так и между формально двухвалентными (Fe и Zn) компонентами. Их пересчет дает составы, отвечающие семи членам группы тетраэдрита, согласно современной номенклатуре блеклых руд (Biagioni et al., 2020): **теннантиту-(Fe)** $Cu_6(Cu_4Fe_2)As_4S_{13}$, **теннантиту-(Zn)** $Cu_6(Cu_4Zn_2)As_4S_{13}$, **тетраэдриту-(Fe)** $Cu_6(Cu_4Fe_2)Sb_4S_{13}$, **тетраэдриту-(Zn)** $Cu_6(Cu_4Zn_2)Sb_4S_{13}$, **аргентотетраэдриту-(Fe)** $Ag_6(Cu_4Fe_2)Sb_4S_{13}$, **аргентотетраэдриту-(Zn)** $Ag_6(Cu_4Zn_2)Sb_4S_{13}$ и **кеноаргентотетраэдриту-(Zn)** $Ag_6(Cu_4Zn_2)Sb_4S_{12}\square$, причем последний из них в настоящее время рассматривается только как гипотетический член группы, т. е. эта блеклая руда может быть потенциально новым минеральным видом.

Позднее блеклые руды переменного состава были встречены в виде вrostков округлой или овальной формы размером до 50–70 мкм в самородном мышьяке и арсенопирите из материала добычи 2007 г. Несмотря на отчетливо мышьяковую специализацию рудных минералов данного парагенезиса, среди блеклых руд зафиксирован не только теннантит, но и тетраэдрит (Мурзин и др., 2011). Пересчет приведенных в данной статье анализов дает составы, отвечающие теннантиту-(Zn), тетраэдриту-(Zn), а также еще одному потенциально новому минералу – «**тетраэдриту-(Mn)**» $Cu_6(Cu_4Mn_2)Sb_4S_{13}$ (табл. 1, ан. 104). Нами в этой же ассоциации встречены и железистые представители группы – теннантит-(Fe) и тетраэдрит-(Fe). Теннантит-(Zn) в качестве редкого акцессорного минерала встречен нами и в других минеральных ассоциациях: №№ 1, 4, 5, 7 и 9. В образцах из ассоциации № 4 он слагает зерна неправильной формы и вытянутые включения до 80 мкм в антимоните с самородным мышьяком, андоритом, аурипигментом, колорадоитом, реальгаром и цинкенимом. В ассоциации № 9 встречены наиболее крупные (до 2 × 2 см) стально-серые выделения теннантита-(Zn) в пустотах кварца с байлдонитом, гемиморфитом, малахитом и пиритом. В составе такого теннантита-(Zn) установлены небольшие примеси Fe и Ag (табл. 1, ан. 102), а параметр его кубической элементарной ячейки (табл. 2, № 31) отвечает структурному типу блеклых руд. В образце № ВорСС-10 (ассоциация № 1) в краевой части кристалла пирита и обрастающего его диопсида нами обнаружено вытянутое зерно размером 40 × 15 мкм, которое по составу отвечает «**теннантиту-(Mn)**» $Cu_6(Cu_4Mn_2)As_4S_{13}$ (рис. 1д; табл. 1, ан. 103). Таким

Таблица 2

Table 2

Параметры элементарных ячеек сульфосолей Воронцовского месторождения

Unit-cell parameters of sulfosalts from the Vorontsovskoe deposit

| № | Минерал | № ас. | Синг- ония | Параметры элементарной ячейки | | | | | | γ, ° | V, Å ³ | Метод |
|----|--|-------|---------------|-------------------------------|-------------|-------------|------|-------------|-----------|------------|-------------------|-------|
| | | | | a, Å | b, Å | c, Å | α, ° | β, ° | | | | |
| 1 | Акташит | 5 | Триг. | 13.639(4) | | 9.303(7) | | | | | 1499(1) | МКР |
| 2 | Ауэрбахит | 3 | Ромб. | 15.3280(15) | 7.662(7) | 16.6330(14) | | | | | 1953.40(18) | МКР |
| 3 | Бернардит | 3 | Мон. | 15.72(2) | 8.18(2) | 10.76(4) | | 91.54(6) | | | 1383.1(2) | МКР |
| 4 | Боскардинит | 1 | Трикл. | 8.080(1) | 8.730(2) | 22.474(4) | | 97.08(1) | | | 1572.8(3) | ПР |
| 5 | Буланжерит | - | Мон. | 21.592(6) | 23.489(15) | 8.0758(13) | | 100.640(19) | | | 4025(3) | МКР |
| 6 | Бурнонит | - | Ромб. | 8.173(4) | 8.704(4) | 7.795(10) | | | | | 554.5(8) | МКР |
| 7 | Вейсбертит | 1 | Трикл. | 6.11(3) | 6.30(6) | 12.00(4) | | 102.3(4) | | 104.4(6) | 423(5) | МКР |
| 8 | Воронцовит | 2 | Куб. | 10.2956(6) | | | | | | | 1091.3(1) | МКР |
| 9 | Врбаит | 3 | Ромб. | 13.391(5) | 23.426(15) | 11.294(7) | | | | | 3543(3) | МКР |
| 10 | Гиллулит | 3 | Мон. | 9.594(2) | 5.677(2) | 21.401(7) | | 100.34(3) | | | 1146.5(4) | МКР |
| 11 | Гладковскийит | 3 | Триг. | 9.6392(2) | | 6.4560(15) | | | | | 519.49(12) | МКР |
| 12 | Гунгерит | 2 | Ромб. | 20.1958(3) | 11.5258(2) | 20.1430(2) | | | | | 4688.74(12) | МКР |
| 13 | Дальнегроит | 1 | Трикл. | 16.33(2) | 42.49(3) | 8.564(5) | | 95.32(4) | | 96.43(6) | 5878(3) | ПР |
| 14 | Дальнегроит? («прогодопальнегроит») | 3 | Трикл. | 8.53(5) | 9.16(3) | 21.10(2) | | 93.09(17) | | 117.90(5) | 1440(10) | МКР |
| 15 | Имхофит | 3 | Мон. | 8.776(5) | 24.430(3) | 5.755(2) | | | 108.40(2) | | 1170.8(2) | МКР |
| 16 | Клерит | 5 | Ромб. | 11.4021(12) | 14.3790(15) | 3.7908(4) | | | | | 621.50(11) | МКР |
| 17 | Крестит | 3 | Мон. | 6.11(5) | 16.2(2) | 6.11(4) | | 96.7(6) | | | 600(10) | МКР |
| 18 | Лорандит | 3 | Мон. | 12.282(2) | 11.240(3) | 6.106(2) | | 104.04(2) | | | 817.8(3) | ПР |
| 19 | Люборжакит | 5 | Мон. | 12.5077(6) | 3.8034(2) | 16.0517(8) | | 94.190(4) | | | 761.57(6) | МКР |
| 20 | Менегинит | - | Ромб. | 11.320(1) | 24.026(3) | 4.1435(7) | | | | | 1127.0(2) | ПР |
| 21 | Парапьерротит (2.0 мас. % As) | 4 | Мон. | 8.0832(5) | 19.4057(11) | 9.0465(5) | | 91.908(6) | | | 1418.25(1) | МКР |
| 22 | Парапьерротит (3.7 мас. % As) | 4 | Мон. | 8.066(6) | 19.21(4) | 9.123(16) | | 91.81(7) | | | 1412(4) | МКР |
| 23 | Парапьерротит (8.6 мас. % As) | 2 | Мон. | 8.104(17) | 19.20(3) | 9.05(4) | | 91.7(2) | | | 1408(7) | МКР |
| 24 | Парапьерротит (15.7 мас. % As) | 2 | Мон. | 8.05(5) | 19.39(12) | 8.84(6) | | 92.5(5) | | | 1380(16) | МКР |
| 25 | Походяшинит | 1 | Трикл. | 7.9958(16) | 11.882(2) | 14.061(3) | | 109.805(19) | | 99.683(17) | 1236.5(4) | МКР |
| 26 | Ребулит | 3 | Мон. | 17.35(3) | 7.36(2) | 31.94(4) | | 105.12(2) | | | 3937.4(2) | МКР |
| 27 | Рутьерит | 1 | Тетр. | 9.9724(8) | | 11.295(2) | | | | | 1123.2(2) | МКР |
| 28 | | 5 | Тетр. | 9.967(5) | | 11.382(10) | | | | | 1131(1) | МКР |

| | | | | | | | | | |
|----|---|---|--------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-----|
| 29 | Твиннит | 1 | Мон. | 7.9941(14) | 19.507(15) | 8.6316(15) | 91.066(17) | 1346(1) | МКР |
| 30 | | 5 | Мон. | 7.9846(13) | 19.472(2) | 8.6127(17) | 90.817(17) | 1338.9(4) | МКР |
| 31 | Теннантит-(Zn) | 9 | Куб. | 10.2302(15) | | | | 1070.7(3) | МКР |
| 32 | Ферроворонцовит | 2 | Куб. | 10.2390(7) | | | | 1073.43(22) | МКР |
| 33 | Филротит | 3 | Мон. | 8.102(2) | 24.845(5) | 11.785(4) | 132.65(2) | 1744.8(2) | МКР |
| 34 | Хатчинсонит | 3 | Ромб. | 10.82(4) | 35.39(2) | 8.22(2) | | 3147.6(2) | МКР |
| 35 | Цинкнит | - | Гекс. | 22.13(5) | | 4.328(9) | | 1840(7) | МКР |
| 36 | Цыганкоит | 7 | Мон. | 21.362(4) | 3.8579(10) | 27.135(4) | 106.944(14) | 2139.19(17) | МКР |
| 37 | Шабурнеит (Pb-содерж.) | 1 | Трикл. | 16.327(7) | 42.677(17) | 8.559(9) | 89.11(6) | 5892(7) | МКР |
| 38 | Бесвищновский член семейства шабурнеита | 1 | Трикл. | 8.63253(19) | 16.3055(7) | 21.8196(8) | 83.631(2) | 2949.18(18) | МКР |
| 39 | Экрансит | 1 | Трикл. | 8.034(8) | 8.533(4) | 22.320(9) | 96.96(8) | 1519(2) | МКР |

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

образом, на Воронцовском месторождении не только установлен практически весь спектр цинкисто-железистых антимон- и арсеносульфидов группы блеклых руд, но также и два потенциально новых марганцовистых ее представителя. Оптические свойства всех изученных нами минералов группы тетраэдрита, в целом, практически идентичны.

Боскардинит и его As-доминантный изоструктурный аналог **экрансит** установлены в ассоциациях №№ 1, 2 и 5. Боскардинит изначально описан на месторождении Монте Арсиччио (Тоскана, Италия) как минерал с формулой $TlPb_4(Sb_7As_2)_9S_{18}$ (Orlandi et al., 2012), однако последующие структурные исследования нового материала из того же объекта (Biagioni, Moëlo, 2017) выявили широкие вариации его химического состава, вплоть до $AgTl_3Pb_4(Sb_{14}As_6)_{20}S_{36}$, и разное заселение Sb и As десяти позиций в его структуре. В частности, если в голотипе As доминировал только в одной позиции из десяти, то в новом материале уже в трех. Несмотря на указанные химические и структурные различия (включая разные содержание и распределение по структурным позициям Pb и Tl), речь идет об одном и том же минерале, видообразующим признаком которого является $Sb_{tot} > As_{tot}$ (Biagioni, Moëlo, 2017). В том же году на французском месторождении Жа-Пу был описан экрансит с формулой $AgTl_3Pb_4As_{11}Sb_9S_{36}$ – As-доминантный изоструктурный аналог боскардинита (Tora et al., 2017a).

На Воронцовском месторождении боскардинит и экрансит демонстрируют необычайно широкое замещение $Sb \leftrightarrow As$. В ассоциации № 1 они образуют ряд твердых растворов, простирающийся от $Bsc_{74}Ecr_{26}$ до $Bsc_{17}Ecr_{83}$ с разрывом в поле экрансита от $Bsc_{18}Ecr_{82}$ до $Bsc_{39}Ecr_{61}$ (рис. 5). При этом составы, соответствующие боскардиниту, попадают примерно в два раза чаще, чем экранситовые. Минералы образуют вкрапленность мелких зерен (обычно не более 50 мкм, но отдельные обособления достигают почти 0.2 мм) в карбонатах и кварце, каймы по периметру зерен пирита, сложные сростки с реальгаром и другими сульфосолями Tl (дальнегроит, кристит и др.) (рис. 1е–з). В одном из образцов в ассоциации № 1 экрансит образует сложный почти 0.3 мм сросток с шабурнеитом, геттардитом и антимонитом (рис. 1и). В ассоциациях №№ 2 и 5 боскардинит и экрансит встречаются существенно реже – в обособлениях до 50 мкм, заключенных в Mn-содержащих карбонатах и реальгаре, а в ассоциации № 5 – также в сложных сростках с люборжакитом и реальга-

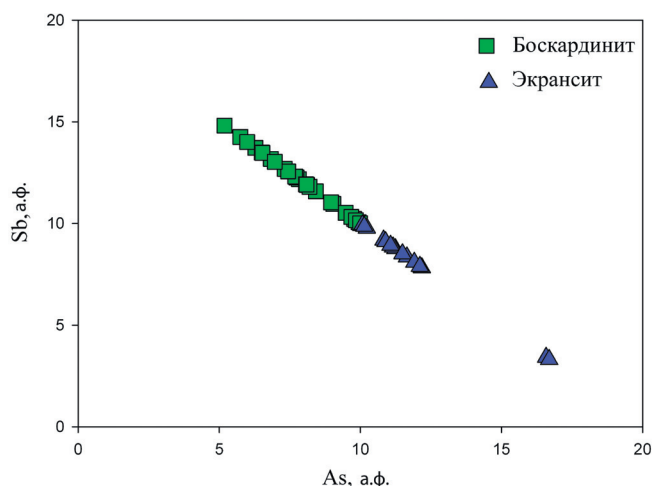


Рис. 5. Соотношение между Sb и As в боскардините (33 анализа) и экрансите (16 анализов).

Fig. 5. Correlation between Sb and As in boscardinite (33 analyses) and ecrinsite (16 analyses).

ром (рис. 14б). В отраженном свете оба минерала белые, однако на контакте с пиритом выглядят светло-серыми, что соответствует оригинальным данным об их отражательной способности (при $\lambda = 546$ нм $R = 32.1\text{--}38.0\%$ у боскардинита (Orlandi et al., 2012), $35.2\text{--}36.7\%$ у экрансита (Тора et al., 2017а)). Двухотражение заметно только у боскардинита, причем в наиболее обогащенных Sb зернах. В скрещенных николях оба минерала отчетливо анизотропные, в разных оттенках серого. Внутренние рефлексы не наблюдаются. Химический состав минералов из разных ассоциаций дан в табл. 1, ан. 13–21 и 121–124. Сильные линии рентгенограммы боскардинита [d , Å (I): 3.74(40), 3.55(50), 3.46(40), 2.98(40), 2.81(100), 2.71(90), 2.32(50), 2.18(40)]. Параметры его триклинной элементарной ячейки даны в табл. 2, № 4. Параметры триклинной ячейки экрансита получены монокристалльным методом (табл. 2, № 39).

Буланжерит $\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$ установлен в виде игольчатых кристаллов длиной до 1 мм, рассеянных в карбонатной массе брекчий, или в виде скоплений до 1 см в участках породы. Он тесно сростается с бурнонитом, джемсонитом и блёклыми рудами. Минерал определен по химическому составу и оптическим свойствам (Сазонов и др., 1991; Викентьев и др., 2016). Отметим, что один из анализов т. н. As-буланжерита содержит 3.05 мас. % As, в результате чего приведенная авторами эмпирическая формула такого минерала $\text{Pb}_{5.07}\text{Bi}_{0.1}\text{Sb}_{2.94}\text{As}_{0.76}\text{Se}_{0.07}\text{S}_{11.04}$ формально отвечает гомеотипу буланже-

рита – **лопаткаиту** $\text{Pb}_5\text{Sb}_3\text{AsS}_{11}$ (Тора et al., 2013). Однако без рентгенографических исследований соответствие воронцовского «As-буланжерита» лопаткаиту нельзя считать полностью доказанным. Нами буланжерит найден в 2016 г. в образцах с отвалов Северного карьера в виде свинцово-серых волосовидных и игольчатых кристаллов длиной до 2 см в полостях кальцит-доломитовых брекчий в ассоциации с мелкими кристаллами арсенопирита и халькопирита (рис. 6а). Буланжерит диагностирован по химическому составу (табл. 1, ан. 22) и монокристалльным рентгеновским данным (табл. 2, № 5). Эта сульфосоле также установлена в составе сложного сростка антимонсульфидов и галенита при электронно-микроскопическом исследовании образца № Vor-08/20-22, отобранного летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2. Минерал образует прожилки до 0.5 мм на контакте сфалерита и пирита, а также сростки с галенитом, гетероморфитом и плагионитом (рис. 1к). В его составе имеется малая примесь Se (табл. 1, ан. 23).

Бурнонит PbCuSbS_3 образует ксеноморфные выделения или игольчатые кристаллы длиной до 1 мм в нерудных минералах брекчий, часто сростается с буланжеритом и содержит мелкие включения андорита. Минерал идентифицирован по химическому составу и оптическим свойствам (Сазонов и др., 1991; Викентьев и др., 2016). Нами он встречен в виде редких включений в самородном мышьяке в образцах, собранных в 2007 г. Кроме того, летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2 были отобраны образцы, в которых этот минерал диагностирован в виде свинцово-серых зерен до 5 мм в кальцит-доломитовом мраморе в ассоциации с галенитом, пиритом и тетраэдритом-(Zn). Бурнонит представлен мышьяковой разновидностью: примесь As в отдельных анализах достигает 6.6 мас. %, что отвечает 0.41 а.ф. (табл. 1, ан. 24). Диагностика подтверждена монокристалльными рентгеновскими данными (табл. 2, № 6).

Веенит $\text{Pb}_2(\text{Sb,As})_2\text{S}_5$ отмечен нами в единственном образце № Vor-10bis-3 из ассоциации № 7. Минерал образует очень редкие 30 мкм включения в нерудной массе брекчий (кальцит, доломит, клинохлор) с пиритом, арсенопиритом, сфалеритом, мышьяком, цыганкоитом и др. В отраженном свете веенит выглядит белым, в скрещенных николях – отчетливо анизотропный в темно-серых тонах. В его химическом составе зафиксирована существенная примесь Tl (табл. 1, ан. 25), что харак-

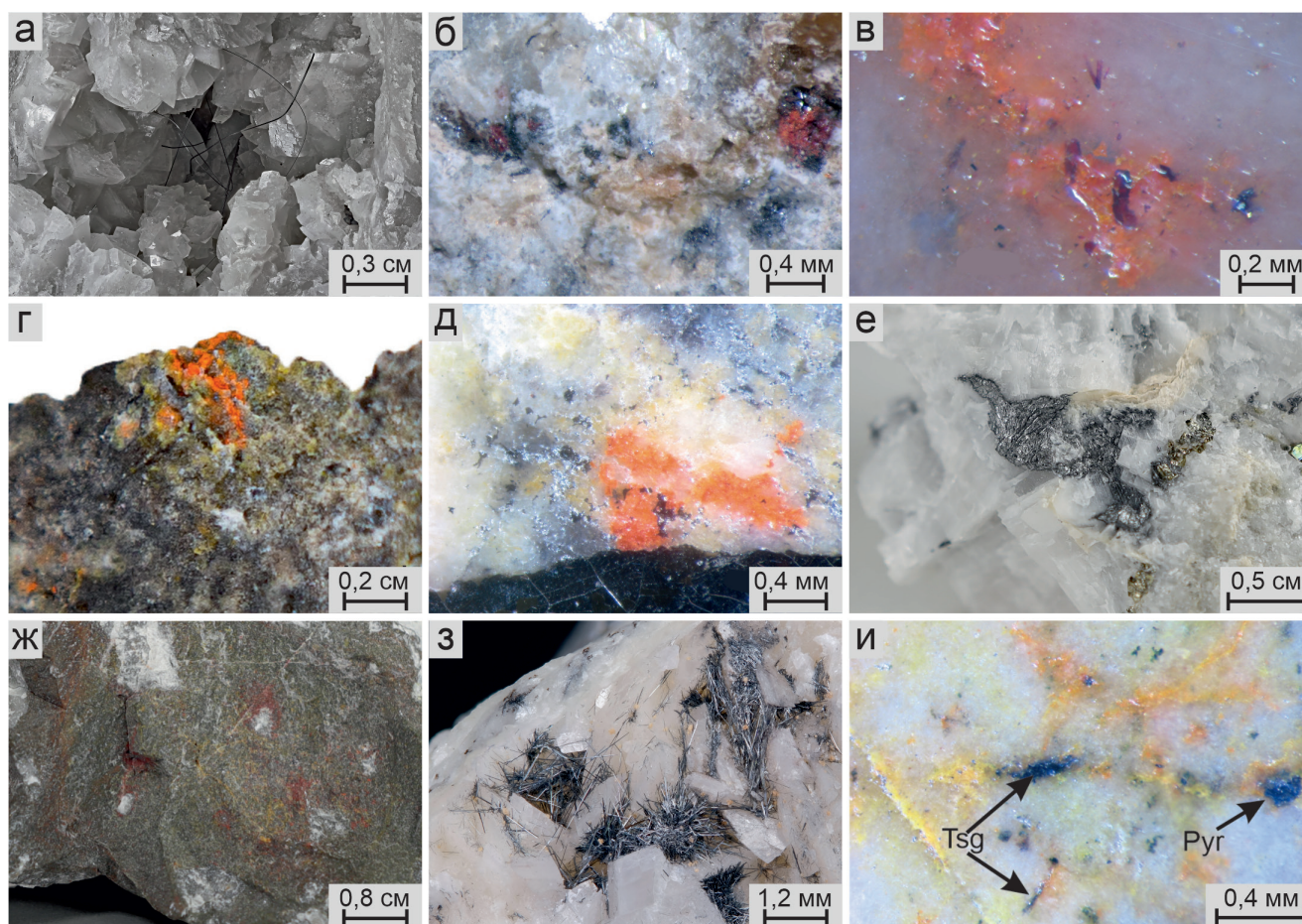


Рис. 6. Сульфосоли Воронцовского месторождения, часть II:

а – свинцово-серые волосовидные кристаллы буланжерита в полости кальцит-доломитовой брекчии; б – черные зерна воронцовита-ферроворонцовита с металлическим блеском в кальците и доломите с красной киноварью; в – темно-вишневые призматические кристаллы гладковскиита в агрегатах карбонатов с оранжевым реальгаром; г – ярко-оранжевые выделения гунгерита на поверхности карбонатной брекчии, покрытой пленкой черного грейгита; д – ярко-оранжевый гунгерит в кальците и доломите; е – свинцово-серые гнезда менегинита в кальците с пиритом; ж – темно-красные скопления рутьерита в доломит-кальцитовой породе; з – свинцово-серые игольчатые кристаллы цинкениита в кальците; и – удлиненные досковидные кристаллы цыганкоита в белом доломите/кальците с прожилками оранжевого аурипигмента/реальгара и пиритом.

Образцы из коллекции А.В. Касаткина. Фото: Т.В. Пашко (а), А.В. Касаткина (б, в, д, и), А.Д. Касаткиной (г, е, ж), М.Д. Мильшиной (з).

Fig. 6. Sulfosalts of the Vorontsovskoe deposit, part II:

а – lead-gray hair-like boulderite crystals in cavity of calcite-dolomite breccia; б – black grains of vorontsovite-ferrovorontsovite with metallic luster in calcite and dolomite with red cinnabar; в – dark cherry-red prismatic gladkovskiyite crystals in aggregates of carbonates with orange realgar; г – bright orange gungerite aggregates on the surface of carbonate breccia covered by a film of black greigite; д – bright orange gungerite in calcite and dolomite; е – lead gray pockets of meneghinite in calcite with pyrite; ж – dark red aggregates of routhierite in dolomite-calcite matrix; з – lead gray acicular zinkenite crystals in calcite; и – elongated lath-like tsyankoite crystals in white dolomite/calcite with veinlets of orange orpiment/realgar and pyrite.

Samples are from collection of A.V. Kasatkin. Photo: T.V. Pashko (a), A.V. Kasatkin (б, в, д, и), A.D. Kasatkina (г, е, ж), M.D. Milshina (з).

терно для всех переизученных в последние годы членов группы сарторита (Тора et al., 2017b; Тора, Kolitsch, 2018). В монографии (Викентьев и др., 2016) приведены два химических состава «веенита

с Cu и Hg», однако As в них присутствует лишь в следовых количествах (0.38 и 0.18 мас. %). Между тем, расшифровка кристаллической структуры веенита показывает, что As в нем играет видоо-

бразующую роль (Тора, Makovicky, 2017). В этой связи очевидно, что приведенные анализы относятся не к вееуниту, а к другой сульфосоли. Хорошие результаты, например, достигаются при попытке пересчета указанных анализов на рухселит $\text{Cu}_2\text{HgPb}_{22}\text{Sb}_{28}\text{S}_{64}(\text{O},\text{S})_2$, однако для подтверждения такой диагностики требуются оптические и рентгенографические исследования. В России вееунит отмечался в «карбонатитах» Крестовоздвиженского рудника на Южном Урале в виде серых таблитчатых кристаллов до 0.3 мм в ассоциации с теннантитом и иорданитом (Попов, Колисниченко, 2008). Между тем, в составе южноуральского минерала установлено более чем двукратное доминирование As над Sb, вследствие чего авторы назвали его «арсеновееунитом», но не исключили и возможной принадлежности к дюфренуазиту. Мы полагаем, что эта сульфосоли нуждается в доизучении, но в любом случае данные химического состава не позволяют отнести ее к вееуниту.

Вейсбергит PbSbS_2 установлен в минеральной ассоциации № 1, где образует удлиненные зерна до 50 мкм в агрегатах карбонатов брекчий и включения в арсенипирите, обрастает тонкими каймами агрегаты реальгара и сростается с зернами походяшинита (рис. 14ж). Среди спутников вейсбергита отмечены акташит, бернардит, боскардинит, дальнегроит, золото, парапьерротит, пирит, рутьерит и шабурнеит. В отраженном свете вейсбергит серовато-белый, но на контакте с арсенипиритом выглядит отчетливо серым. Двухотражение в воздухе слабое, в иммерсии заметное, от белого до светло-серого. В скрещенных николях минерал сильно анизотропный, в голубоватых, коричневых и бежеватых тонах. Внутренние рефлексы редкие, оранжево-красные, в иммерсии более густые. По химическому составу большая часть зерен фактически соответствует конечному члену PbSbS_2 (табл. 1, ан. 26), однако в некоторых образцах нами зафиксирована примесь As (табл. 1, ан. 27), причем составы с $\text{As} > 1$ а.ф. (при расчете на $\text{S} = 8$) ложатся в поле **дрехслерита** $\text{Pb}_4(\text{Sb}_{4-x}\text{As}_x)\text{S}_8$ – недавно открытого минерала, изоструктурного с вейсбергитом (Тора et al., 2019) и занимающего промежуточное место в системе вейсбергит–лорандит (табл. 1, ан. 53, 54). Оптически дрехслерит и вейсбергит очень похожи, но у первого двухотражение в воздухе более заметно. Диагностика вейсбергита подтверждена монокристалльными рентгеновскими данными (табл. 2, № 7).

Викингит $\text{Ag}_5\text{Pb}_8\text{Bi}_{13}\text{S}_{30}$, предположительно, отмечен нами при электронно-микроскопическом исследовании образца № Вор-08/20-26, отобранного летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2 и состоящего в основном из кварца и простых сульфидов (пирит, галенит, сфалерит, халькопирит). Викингит образует редкие и мелкие (не более 15 мкм) включения в пирите (рис. 1л). По сравнению с идеальной формулой викингита, в составе изученной нами сульфосоли установлен дефицит Ag (табл. 1, ан. 28), однако в литературе ранее уже отмечались подобные составы (Moëlo et al., 1987). Оптические свойства не противоречат викингиту: в отраженном свете минерал выглядит серовато-белым, чуть темнее вмещающего пирита; в скрещенных николях он слабо анизотропный, в сероватых тонах.

Воронцовит и **ферроворонцовит** – минералы, открытые авторами на Воронцовском месторождении (Kasatkin et al., 2018a), изоструктурны друг другу и галхаиту. Воронцовит назван по месту находки, а также в честь горного инженера В.В. Воронцова (1842 – после 1908 г.), который в конце XIX в. был главным управляющим Богословского горного округа и развивал геологоразведочное и горнорудное дело на Северном Урале. При нем открыто железорудное месторождение, и для его разработки в 1894 г. основан горняцкий поселок. Оба объекта впоследствии названы в его честь: Воронцовское и Воронцовка, соответственно. Золоторудное месторождение, открытое в 1985 г. по соседству с железорудным, также получило название по близлежащему поселку Воронцовка. Ферроворонцовит назван как Fe аналог воронцовита. Воронцовит $(\text{Hg}_5\text{Cu})_{26}\text{PbAs}_4\text{S}_{12}$ является Pb аналогом, а ферроворонцовит $(\text{Fe}_5\text{Cu})_{26}\text{PbAs}_4\text{S}_{12}$ – Pb–Fe аналогом галхаита $(\text{Hg}_5\text{Cu})_{26}\text{CsAs}_4\text{S}_{12}$.

Минералы слагают многочисленные ксеноморфные зерна до 0.5 мм (воронцовит) и 0.2 мм (ферроворонцовит) в нерудной массе брекчий (кальцит, доломит, клинохлор) (рис. 6б), образуют вроски в антимоните, аурипигменте и реальгаре. Воронцовит и ферроворонцовит тесно сростаются друг с другом, а также с киноварью, парапьерротитом, рутьеритом и минералами ряда дальнегроит–шабурнеит в составе полиминеральных агрегатов, достигающих в размере 0.2 мм (рис. 7а). Воронцовит, в отличие от ферроворонцовита, найден также в ассоциации № 1 в виде очень редких и мелких (не более 10 мкм) обособлений в кальците и барите. Оба минерала непрозрачные,

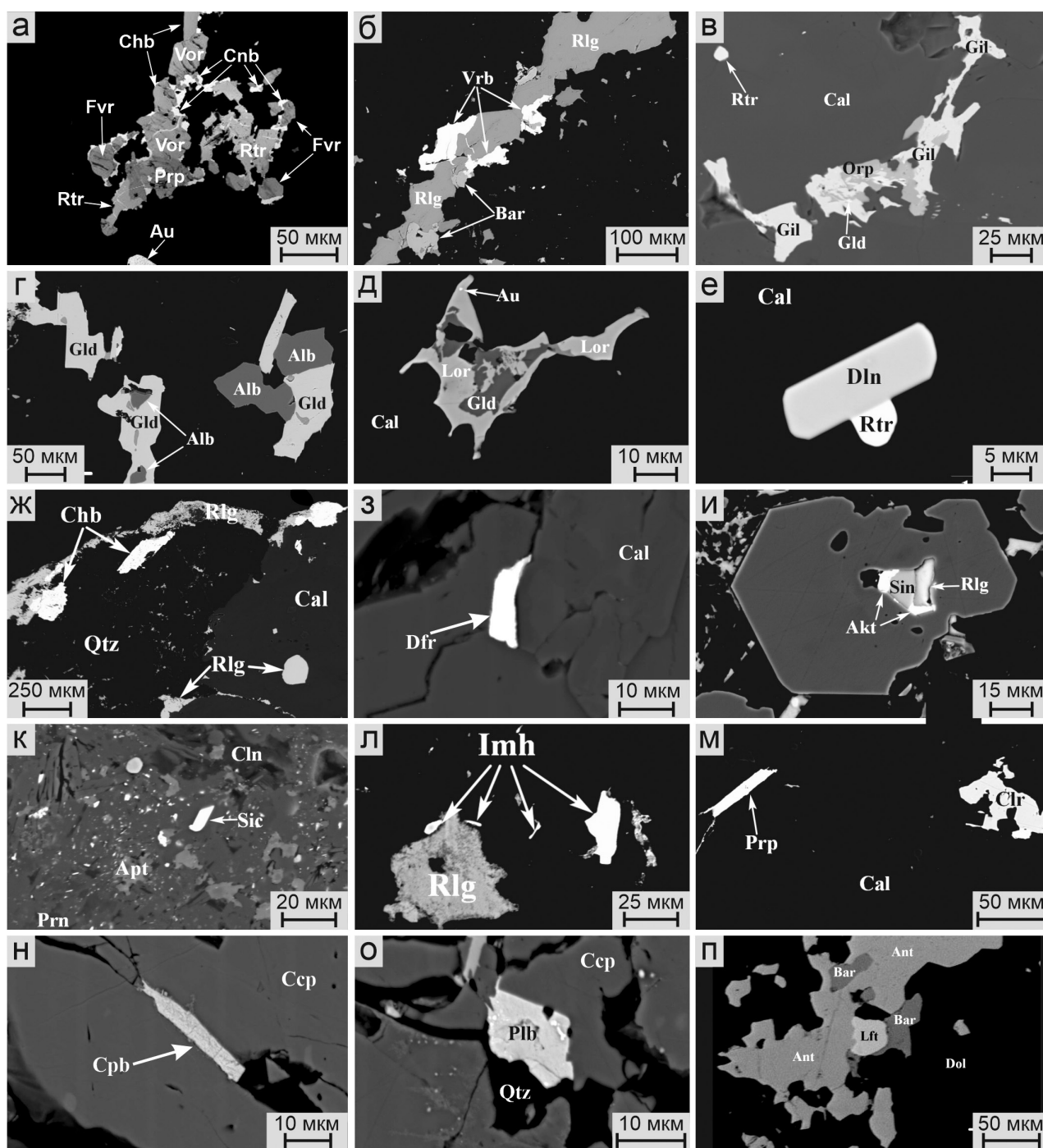


Рис. 7. Сульфосоли Воронцовского месторождения, часть III:

а – сложный сросток воронцовита, ферроворонцовита, шабурнеита, парапьерротита и киновари в кальците с золотом; б – сростки врбаита с реальгаром и баритом в кальците; в – выделения гиллулиита в сростании с аурипигментом и гладковскимитом в кальците с мелким зерном рутьерита; г – псевдоморфозы гладковскиита по алабандину в кальците; д – сросток гладковскиита и лорандита в кальците; е – короткопризматический кристалл дальнегроита в сростании с рутьеритом в кальците; ж – кристаллы и зерна бессвинцового шабурнеита в кварце и кальците с реальгаром (крупный кристалл в центре был извлечен для структурных исследований); з – короткопризматический кристалл дюфренуазита в кальците; и – сросток зиннерита с акташитом и реальгаром в кристалле пирита (темно-серый) в кальците (черный); к – включение зихерита в прените с As-содержащим фторапатитом, Mn-содержащим клинохлором и пиритом (светло-серые округлые зерна); л – зерна имхофита с реальгаром в кальците; м – зерна клерита и парапьерротита в кальците; н – призматический кристалл купрополибазита в халькопирите; о – зерно полибазита на контакте халькопирита и кварца; п – зерно лаффитита на контакте антимонита и барита в доломите.

РЭМ фото в отраженных электронах.

Fig. 7. Sulfosalts of the Vorontsovskoe deposit, part III:

а – complex intergrowth of vorontsovite, ferrovorontsovite, chabournéite, parapierrrotite and cinnabar in calcite with gold; б – aggregates of vrbaitite with realgar and barite in calcite; в – intergrowths of gillulyite with orpiment and gladkovskyite in calcite with a small routhierite grain; г – pseudomorphs of gladkovskyite after alabandite in calcite; д – aggregate of gladkovskyite and lorándite in calcite; е – short-prismatic dalnegroite crystal intergrown with routhiérite in calcite; ж – Pb-free chabournéite crystals and grains in quartz and calcite with realgar (large crystal in the center was used for X-ray analysis); з – short-prismatic dufrénoysite crystal in calcite; и – intergrowth of sinnerite with aktashite and realgar included in pyrite crystal (dark gray) and calcite (black); к – sicherite inclusion in prehnite with As-bearing fluorapatite, Mn-bearing clinocllore and pyrite (light gray rounded grains); л – imhofite grains with realgar in calcite; м – clerite and parapierrrotite grains in calcite; н – prismatic cupropolybasite crystal in chalcopyrite; о – polybasite grain at the contact between chalcopyrite and quartz; п – laffittite grain at the contact of stibnite with barite in dolomite.

SEM (BSE) images.

имеют черный цвет, темно-красную черту и металлический блеск. Они хрупкие, с неровным изломом. Микротвердость по Виккерсу 172 кг/мм² для воронцовита и 170 кг/мм² для ферроворонцовита, что соответствует ~ 3½ по шкале Мооса. Расчетная плотность этих минералов 5.140 и 4.744 г/см³, соответственно. Их оптические свойства подробно описаны в статье (Касаткин, Паутов, 2020). В отраженном свете обе сульфосоли светло-серые с голубоватым оттенком, в скрещенных николях – изотропные с обильными внутренними рефлексами, отчетливыми на воздухе и сильными в иммерсии. Цвет рефлексов у воронцовита темно-красный до ярко-красного; у ферроворонцовита темно-красный до темно-коричневого. Минералы имеют умеренную отражательную способность и дисперсию нормального типа, когда отражательная способность с увеличением длины волны света убывает. Спектры отражения приведены на рис. 2. Коэффициенты отражения для длин волн, рекомендованных Комиссией по рудной минералогии ММА (*R*, %; воронцовит/ферроворонцовит): 24.9/26.2 (470 нм), 23.7/24.5 (546 нм), 22.8/23.9 (589 нм), 21.3/23.2 (650 нм).

Химический состав голотипных образцов обоих минералов приведен в табл. 1, ан. 29 и 105. Их эмпирические формулы (расчет на 23 атома): воронцовит – [(Hg_{3.02}Fe_{1.63}Zn_{0.33})_{Σ4.98}(Cu_{0.91}Ag_{0.10})_{Σ1.01}](Tl_{0.96}Cs_{0.04})_{Σ1.00}(As_{3.62}Sb_{0.33}Te_{0.05})_{Σ4.00}S_{12.01} и ферроворонцовит – [(Fe_{2.74}Hg_{1.94}Zn_{0.27})_{Σ4.95}(Cu_{0.96}Ag_{0.06})_{Σ1.02}](Tl_{0.98}Cs_{0.05})_{Σ1.03}(As_{3.68}Sb_{0.27}Te_{0.05})_{Σ4.00}S_{12.00}. Оба минерала кристаллизуются в кубической сингонии, пространственная группа *I*-43*m*, *Z* = 2. Параметры элементарных ячеек даны в табл. 2, №№ 8 и 32, соответственно. Главные линии рентгенограммы [*d*, Å (*I*, %) (*hkl*); воронцовит/ферроворонцовит]: 4.198(79) / 4.175(93)(211), 2.970(100) / 2.952(100)

(222), 2.749(66) / 2.735(57)(321), 1.818(49) / 1.810(40)(440), 1.550(31) / 1.543(24)(622).

Все три минерала (воронцовит, ферроворонцовит и галхаит) объединены нами в группу галхаита. В структурах воронцовита и ферроворонцовита (рис. 8), как и в галхаите, выделены три независимых кристаллографических позиции. Одна из них заселена атомами металлов в тетраэдрической координации: Hg (доминирует в воронцовите и галхаите), Fe (доминирует в ферроворонцовите), Zn, Cu и Ag. Вторую позицию заселяют атомы Tl (Cs в галхаите) в 12-вершинной координации, центрирующие лавесовские полиэдры TlS₁₂ (CsS₁₂ в галхаите). Наконец, полиэдр вокруг As – это тригональная пирамида AsS₃.

Наши анализы демонстрируют, что в воронцовите и ферроворонцовите существенно проявлен изоморфизм в каждой из трех позиций. Результатом чрезвычайно широкого замещения по схеме Hg ↔ Fe является непрерывный ряд твердых растворов, простирающийся от одного конечного члена – ртутистого воронцовита – до другого – железистого ферроворонцовита. При этом составы, соответствующие воронцовиту, установлены в 89 анализах, а ферроворонцовиту – в 77 (рис. 9). Содержание Zn не превышает 1.4 мас. % = 0.34 а.ф. в воронцовите и 1.4 мас. % = 0.33 а.ф. в ферроворонцовите. Замещение мышьяка сурьмой носит крайне ограниченный характер. Аналогичный вывод был в свое время сделан нами и в отношении третьего типа замещения – Tl на Cs, т. к. максимальное содержание Cs, установленное в воронцовите, составляло всего 0.7 мас. % = 0.09 а.ф., а в ферроворонцовите – 0.8 мас. % = 0.08 а.ф. (Kasatkin et al., 2018a). Однако летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2 нами найдены фрагменты карбонатных брекчий с многочисленными включениями во-

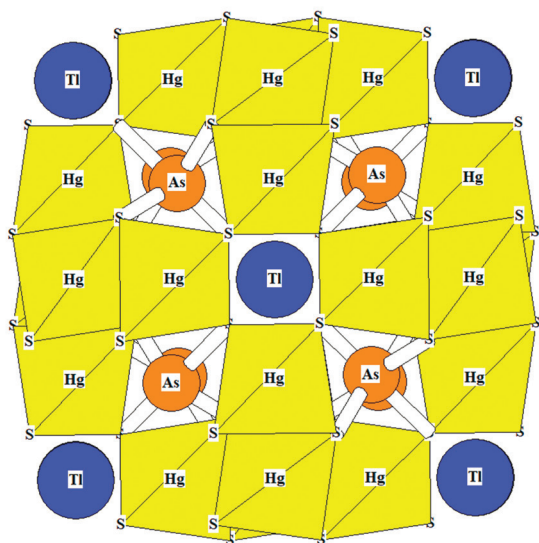


Рис. 8. Кристаллическая структура воронцовита/ферроворонцовита в проекции на [001].

Позиции, заселенные (Hg, Fe, Zn, Cu, Ag), (Tl, Cs) и (As, Sb) для упрощения обозначены как Hg, Tl и As, соответственно.

Fig. 8. Crystal structure of vorontsovite/ferrovorontsovite along direction [001].

For simplicity, the sites occupied by (Hg, Fe, Zn, Cu, Ag), (Tl, Cs) and (As, Sb) are indicated as Hg, Tl and As, respectively.

ронцовита и ферроворонцовита, содержание Cs в которых оказалось существенно выше, чем в ранее изученных образцах (рис. 10). Более того, в одном из сростков зерен Cs-обогащенного воронцовита нами были установлены зоны с Cs > Tl, формально отвечающие галхаиту (табл. 1, ан. 32; рис. 10). Это первый минерал с видообразующим Cs, найденный нами на Воронцовском месторождении. На территории же России находка галхаита является второй после месторождения Гал-Хая в Восточной Якутии, где он был открыт (Груздев и др., 1972). Максимальное содержание Cs в ферроворонцовите достигает 0.38 а.ф., однако составы с Cs > Tl, которые могли бы отвечать потенциально новому минералу «феррогалхаиту», нами пока не выявлены.

Врбаит $Hg_3Tl_4As_8Sb_2S_{20}$ встречается в ассоциациях № 1 и 3 в виде заключенных в карбонатах ксеноморфных сростаний с реальгаром и баритом до 0.2 мм и мелких вростков в ребулите (рис. 76, 196). Минерал имеет оранжево-красный цвет, в шлифах прозрачный, блеск металлический. В отраженном свете врбаит серовато-белый, двуотражение в воздухе слабое, в иммерсии заметное. Минерал

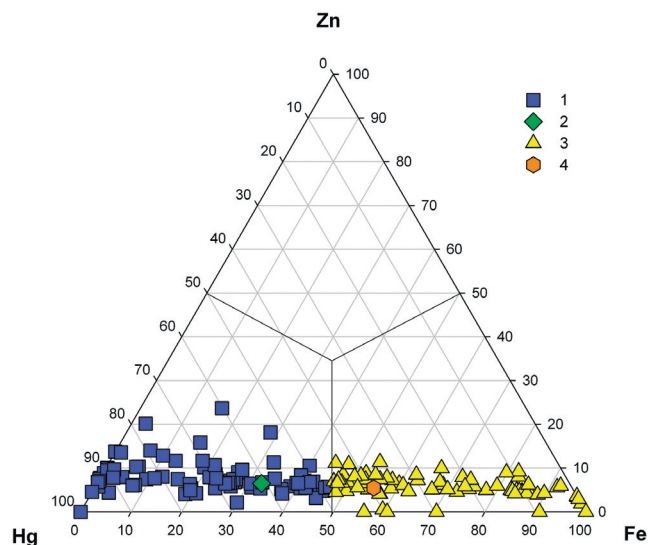


Рис. 9. Соотношения Hg, Fe и Zn, заселяющих тетраэдрические позиции в воронцовите (89 анализов) и ферроворонцовите (77 анализов).

1 – воронцовит, 2 – голотип воронцовита, 3 – ферроворонцовит, 4 – голотип ферроворонцовита.

Fig. 9. Hg : Fe : Zn ratios for tetrahedral sites in vorontsovite (89 analyses) and ferrovorontsovite (77 analyses).

1 – vorontsovite, 2 – vorontsovite holotype, 3 – ferrovorontsovite, 4 – ferrovorontsovite holotype.

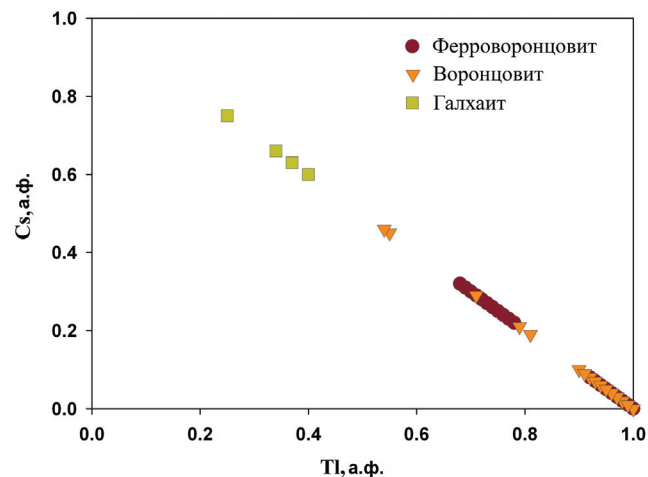


Рис. 10. Соотношение Tl и Cs в минералах группы галхаита: ферроворонцовите, воронцовите и галхаите.

Fig. 10. Tl–Cs correlation in minerals of the galkhaite group: ferrovorontsovite, vorontsovite and galkhaite.

отчетливо анизотропен с блеклыми цветными эффектами. Наблюдаются многочисленные внутренние рефлексы оранжево-красного цвета, особенно в иммерсии. Химический состав минерала стехиометричен (табл. 1, ан. 30, 31). Параметры ромбической элементарной ячейки приведены в табл. 2, № 9.

В России врбаит отмечался в списке минералов, ассоциирующих с лермонтовитом из Бештаугорского уранового месторождения на Северном Кавказе (Мелков и др., 1983). К сожалению, никакие диагностические данные для бештаугорского врбаита не приведены, другие публикации не обнаружены.

Геокронит $Pb_{14}(Sb,As)_6S_{23}$ впервые упомянут В.Н. Сазоновым с соавторами (1991). Он образует самостоятельные выделения размером менее 0.1 мм в агрегатах нерудных минералов брекчий или в сростках с галенитом и арсенопиритом. В связи с тем, что методические трудности определения одновременно присутствующих Pb и As не позволили выполнить кондиционного количественного анализа, минерал отнесен к геокрониту по соотношению основных компонентов и оптическим свойствам, что сами авторы указанной монографии признали недостаточно надежной диагностикой. В более поздней работе (Викентьев и др., 2016) приводятся химические анализы, свидетельствующие о наличии в составе минерала существенной примеси As (до 3.8 мас. % = 2.21 а.ф.). Нами As-обогащенный геокронит встречен при электронно-микроскопическом исследовании образцов с кальцит-доломит-кварцевыми агрегатами, галенитом и сфалеритом, отобранных летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2. Он образует зерна неправильной формы до 0.1 мм, заключенные в галените или на контакте последнего с кварцем, и ассоциирует с бенлеонардитом, гесситом и цнигриитом (рис. 1г). Содержание As в составе минерала достигает 4.4 мас. % (табл. 1, ан. 33).

Иорданит $Pb_{14}(As,Sb)_6S_{23}$ – As-аналог геокронита – предположительно установлен нами в образце № Vor-10-6 (ассоциация № 7) только на основании химического состава (табл. 1, ан. 59). Минерал образует очень редкие и мелкие (не более 7 мкм) зерна в доломите и кальците, а его спутниками являются цыганкоит, алабандин и тилазит. Несмотря на то, что минералы геокронит-иорданитового ряда в природе часто образуют непрерывную серию твердых растворов (Moëlo et al., 2008), на Воронцовском месторождении геокронит и иорданит находятся изолированно друг от друга в разных ассоциациях и не демонстрируют промежуточных по величине Sb : As-отношения составов.

Гептасарторит $Tl_7Pb_{22}As_{55}S_{108}$ и **эннеасарторит** $Tl_6Pb_{32}As_{70}S_{140}$ идентифицированы нами по химическому составу (табл. 1, ан. 34, 120) в образце № Vor-03/16-5-4 (ассоциация № 2), где они слагают редкие призматические кристаллы и зерна до

20 мкм в кальцит-доломитовой породе и наблюдаются совместно с антимонитом, минералами рядов воронцовит–ферроворонцовит и дальнегроит–шабурнеит, киноварью, парапьерротитом, пиритом и рутьеритом. Оптические свойства (белый цвет при одном николе, отчетливая анизотропия) не противоречат минералам группы сарторита.

Гетероморфит $Pb_7Sb_8S_{19}$ установлен в составе сложного сростка антимонсульфидов и галенита при электронно-микроскопическом исследовании образца № Vor-08/20-22, отобранного летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2. Минерал образует зерна до 0.12 мм, сростающиеся с галенитом и буланжеритом, в сфалерите (рис. 1к), и ассоциирует с плагионитом, семсейитом и пиритом. В его составе установлены небольшие примеси As и Se (табл. 1, ан. 35, 36), а атомное отношение Pb к (Sb + As) колеблется от 0.91 до 0.935, что укладывается в пределы вариаций Pb / Sb (0.86–0.96) для гетероморфита из разных месторождений (Мозгова и др., 1971).

При одном николе гетероморфит белый, по отражательной способности практически идентичен галениту и буланжериту, чуть темнее пирита, но существенно ярче сфалерита. Двухотражение сильное. Гетероморфит хорошо отличается от контактирующих с ним минералов в скрещенных николях по сильным эффектам анизотропии в коричневато-желтоватых и зеленоватых тонах. В Российской Федерации эта сульфосоль отмечалась в составе рудной минерализации благороднометалльного проявления Пякюля в Карелии (Ивашенко и др., 2004) и в виде кристаллов до 5 мкм в рудах Албазинского золоторудного месторождения (Кемкина и др., 2018), однако приведенные в указанных работах химические анализы, скорее всего, относятся к минеральным смесям. Упоминания о находках гетероморфита на Дарасунском (Брызгалов и др., 2011) и Средне-Голготайском (Гвоздев и др., 2020) золоторудных месторождениях в Забайкалье не сопровождаются диагностическими данными.

Геттардит $PbAsSbS_4$ достоверно установлен нами в пяти минеральных ассоциациях. Он образует редкие и мелкие (обычно не более 10 мкм) включения в нерудных минералах брекчий (кальцит, доломит, барит, кварц, клинохлор, фторапатит), а также в антимоните и аурипигменте и наблюдается совместно с акташитом, золотом, киноварью, колорадоитом, лаффититом, метациннабаритом, пиритом, реальгаром, рутьеритом, сфалеритом и другими минералами. В одном из образцов ассоциации № 1 установлены включения геттардита до

30 мкм в экрансите и шабурнеите (рис. 1и), а в ассоциации № 4 – 15-мкм сростки геттардита с рошинитом (рис. 19в). При одном никеле геттардит белый с голубоватым оттенком, двуотражение отчетливое; в скрещенных николях – сильно анизотропный, в коричневатых тонах. В некоторых наиболее крупных зернах наблюдаются слабые внутренние рефлексы красноватого цвета. Химический состав минерала близок к стехиометричному (табл. 1, ан. 37–39). «Твиннит» (см.), описанный в монографии (Викентьев и др., 2016), вероятно, также является геттардитом.

Гиллулиит $\text{Pb}_{1.2}\text{As}_{7.5}\text{Sb}_{0.3}\text{S}_{13}$ установлен в ассоциации № 3 в виде отдельных зерен неправильной формы до 80 мкм и сростков до 0.2 мм с гладковскиитом и аурипигментом в кальците (рис. 7в). Минерал имеет темно-красный цвет, в шлифах просвечивает, блеск алмазный. Наблюдается совершенная спайность по {001}. В отраженном свете гиллулиит светло-серый, двуотражение в воздухе заметное, в иммерсии усиливается, в бледно-розовых тонах. В скрещенных николях минерал выглядит темно-красным за счет обильных внутренних рефлексов ярко-красного цвета, отчетливо анизотропен в серых и коричневатых тонах. Химический состав гиллулиита приведен в табл. 1, ан. 40, параметры моноклинной элементарной ячейки – в табл. 2, № 10. В КР спектре (рис. 3б) диапазон 240–400 см^{-1} отвечает валентным колебаниям связей As–S. Более низкочастотные пики связаны со смешанными решеточными модами с участием деформационных колебаний системы As,Sb,S связей, а также валентных колебаний связей Pb–As и Pb–S. В отличие от ауэрбахита и гладковскиита, в спектрах которых самые сильные пики наблюдаются при 384–387 см^{-1} из-за вклада колебаний связи Mn–S, в гиллулиите (как и в хатчинсоните) самые сильные пики наблюдаются в более низкочастотной области.

Ранее гиллулиит был описан на американском золоторудном месторождении Mercier в штате Юта (Wilson et al., 1991) и до настоящего времени считался его эндемиком. Помимо типичного гиллулиита, содержащего, как и голотип из США, всего 0.2–0.3 а.ф. Sb, в одном из образцов (№ ВК-27-4) нами встречены редкие мелкие (до 20 × 20 мкм) зерна минерала, условно отнесенного к обогащенной Sb разновидности гиллулиита (до 3.43 а.ф. Sb, табл. 1, ан. 41). По стехиометрии и оптическим свойствам данный минерал не противоречит гиллулииту, однако его рентгенографическое исследование в силу мелкого размера выделений не производилось.

Гладковскиит $\text{MnPbAs}_3\text{S}_6$ – новый минерал, описанный нами на Воронцовском месторождении (Kasatkin et al., 2019). Он назван в честь первооткрывателя Воронцовского золоторудного месторождения Б.А. Гладковского (1937–1990 г.г.). Минерал найден в известняковых брекчиях, сцементированных обильными аурипигментом, реальгаром и пиритом. В нерудной массе преобладают кальцит, барит, доломит, клинохлор и фторапатит с подчиненными кварцем и тальком. Гладковскиит образует длиннопризматические кристаллы и зерна до 0.2 мм в реальгаре и аурипигменте (рис. 6в), нередко – частичные псевдоморфозы по алабандину (рис. 7г) и сростки с лорандитом (рис. 7д) или гиллулиитом. Уже после выхода в свет статьи (Kasatkin et al., 2019) с описанием гладковскиита в образце № ВК 27-4-пшш был обнаружен рекордный по размерам прожилок этого минерала в кальците длиной около 2 мм и мощностью до 0.3 мм.

Минерал прозрачный, имеет темно-вишневый цвет, красную черту, алмазный блеск. Гладковскиит хрупкий, с неровным изломом. Микротвердость по Виккерсу 94 кг/мм^2 , что соответствует 2–2½ по шкале Мооса. Расчетная плотность 4.356 г/см^3 . В отраженном свете минерал выглядит светло-серым, чуть темнее лорандита ($R = 28\text{--}33\%$ при $\lambda = 550\text{ нм}$; здесь и далее, если не указано иное, коэффициенты отражения в белом свете для известных минералов взяты из справочника (Чвилёва и др., 1988)) и гиллулиита ($R = 28.53\text{--}31.85\%$ при $\lambda = 546\text{ нм}$ (Wilson et al., 1991)) и приблизительно равным по отражательной способности алабандину ($R = 23\%$). Двуотражение почти не заметно. В скрещенных николях гладковскиит сильно анизотропный, цветные эффекты ясные, в темно-серых, светло-серых и коричневатых тонах. Некоторые зерна выглядят темно-красными за счет обильных внутренних рефлексов ярко-красного цвета, особенно густых в иммерсии. В проходящем свете минерал сильно плеохроирует от оранжево-красного до темно-красного. Дисперсия отражательной способности смешанного типа. Спектры отражения гладковскиита приведены на рис. 2. Коэффициенты отражения для длин волн, рекомендованных Комиссией по рудной минералогии ММА ($R_{\text{min}} / R_{\text{max}}$, %): 23.6/25.5 (470 нм), 23.3 / 23.5 (546 нм), 22.3 / 22.4 (589 нм), 21.1 / 21.7 (650 нм).

Химический состав голотипного образца приведен в табл. 1, ан. 42. Его эмпирическая формула (расчет на сумму 11 атомов): $\text{Mn}_{1.01}\text{Pb}_{0.99}\text{As}_{3.00}\text{S}_{6.00}$. Гладковскиит кристаллизуется в

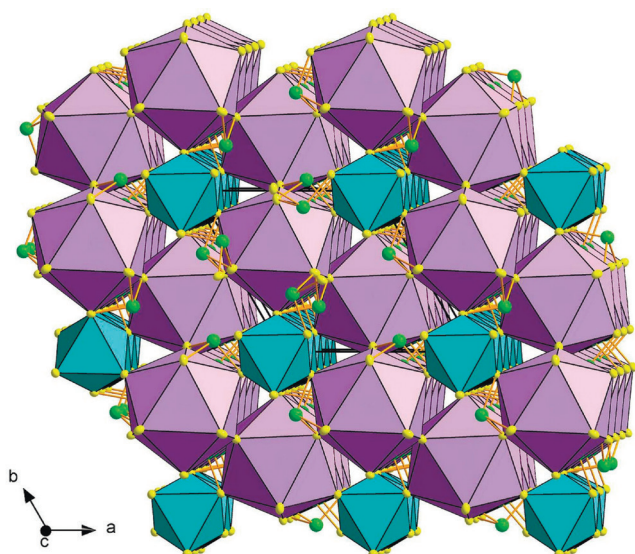


Рис. 11. Кристаллическая структура гладковскиита.

Сиреневое – полиэдры TlS_9 (КЧ = 9), бирюзовое – Mn-центрированные октаэдры, шаро-стержневая модель (As – зеленый, S – желтый) – пирамиды AsS_3 . Все атомы S показаны в анизотропном приближении, эллипсоиды тепловых колебаний изображены на уровне вероятности 50 %.

Fig. 11. Crystal structure of gladkovskyite.

Purple – TlS_9 polyhedra, turquoise – Mn-centered octahedra, ball-and-stick model representation (green As and yellow S atoms) – AsS_3 pyramids. All S atoms are shown as thermal ellipsoids.

тригональной сингонии, пространственная группа $R\bar{3}1c$, $Z = 2$. Параметры элементарной ячейки даны в табл. 2, № 11. Главные линии дифрактограммы [d , Å (I , %) (hkl): 5.11(80)(101), 4.83(70)(110), 3.49(50)(201), 3.23(30)(002), 2.86(100)(–2–11, 211), 2.68(30)(112), 2.55(60)(301, 202). КР спектр гладковскиита (рис. 3в) сходен с таковым для ауэрбахита и, соответственно, их интерпретация аналогична. Полосы Mn–S-валентных колебаний в КР спектре гладковскиита наблюдаются в интервале 350–400 cm^{-1} . Полосы при 289 и 305 cm^{-1} отнесены к As–S-валентным колебаниям. Полосы с частотами ниже 250 cm^{-1} , предположительно, относятся к мягким решеточным модам с участием деформационных колебаний, а также валентных колебаний связей Tl–As и Tl–S. Кристаллическая структура гладковскиита (рис. 11) основана на бесконечных цепочках из связанных через общие грани октаэдров MnS_6 , полиэдров TlS_9 и пирамид AsS_3 . Минерал относится к довольно редкому типу кольцевых сульфоселей.

Гунгерит $TlAs_5Sb_4S_{13}$ – новый минерал, открытый нами на Воронцовском месторождении

(Kasatkin et al., 2021b) и названный в честь горного инженера, краеведа и историка Северного Урала, бывшего директора Геологического музея им. Е.С. Федорова в г. Краснотурьинске Ю.В. Гунгера (1961 г. р.). Минерал найден в карбонатных брекчиях, сложенных кальцитом и доломитом с подчиненными количествами барита и кварца и сцементированных антимонитом, аурипигментом, пиритом, реальгаром и пиритом. Спутниками гунгерита являются бернардит, минералы рядов воронцовит–ферроворонцовит и дальнегроит–шабурнеит, грейгит, золото, парапьерротит, рутьерит и хатчинсонит. Из всех новых минералов, открытых на Воронцовском месторождении, гунгерит – единственный, который образует макроскопические тонкозернистые агрегаты ярко-оранжевого цвета, выполняющие участки до 0.5×0.2 см на поверхности брекчий (рис. 6г, д).

Минерал имеет оранжевую черту, жирный блеск и совершенную спайность по $\{010\}$; в шлифах просвечивает. Гунгерит хрупкий, с неровным изломом. Микротвердость по Виккерсу 84 kg/mm^2 , что соответствует 2–2½ по шкале Мооса. Расчетная плотность 4.173 g/cm^3 . В отраженном свете гунгерит выглядит желтовато-белым, а в контакте с антимонитом – светло-серым со слабым голубоватым оттенком. Двухотражение очень слабое. Минерал отчетливо анизотропный, но наблюдению эффектов анизотропии мешают внутренние рефлексы ярко-оранжевого цвета. Они заметны даже при одном никеле, а в скрещенных николях в воздухе и, особенно, иммерсии чрезвычайно обильны и интенсивны. Спектры отражения гунгерита приведены на рис. 2. Коэффициенты отражения для длин волн, рекомендованных Комиссией по рудной минералогии ММА (R_{min} / R_{max} , %): 27.0 / 29.8 (470 нм), 26.1 / 27.4 (546 нм), 24.5 / 25.9 (589 нм), 22.4 / 23.9 (650 нм). Химический состав для голотипного образца приведен в табл. 1, ан. 43. Его эмпирическая формула (расчет на сумму 23 атомов): $Tl_{0.99}As_{5.29}Sb_{3.77}S_{12.95}$. Гунгерит кристаллизуется в ромбической сингонии, пространственная группа $Pbcn$, $Z = 8$. Параметры элементарной ячейки указаны в табл. 2, № 12. Сильнейшие линии рентгенограммы [d , Å (I , %) (hkl): 5.755(100)(020), 3.030(10)(424), 2.901(10)(620), 2.878(14)(040), 2.821(10)(141).

В соответствии с действующей номенклатурой сульфоселей (Moëlo et al., 2008) гунгерит относится к весьма редкому классу субхалькогенидов, т. е. соединений, имеющих дефицит S по сравнению

с «нормальными» сульфосолями и вызванный этим избыток положительных зарядов. Кристаллическая структура гунгерита (рис. 12) является уникальной по сложности среди всех открытых на месторождении сульфосолей. Она содержит 23 кристаллографически неэквивалентных позиции: одна позиция полностью заселена атомами Tl, одна позиция – атомами Sb, три позиции – атомами As и еще три позиции Sb и две As имеют смешанную заселенность; оставшиеся тринадцать позиций заселены атомами S. Подробное описание структуры дано нами в работе (Kasatkin et al., 2021b).

В КР спектре гунгерита (рис. 3г) волновые числа в интервале 280–370 см⁻¹ относятся к As–S валентным колебаниям. Сильная полоса при 294 см⁻¹ с плечом при 240 см⁻¹ соответствует деформационной моде группы SbS₃ (Frost et al., 2010). Полосы в диапазоне 302–310 см⁻¹ отнесены к антисимметричной, а полоса при 334 см⁻¹ – к симметричной валентной моде SbS₃, слабые полосы при 282 и 270 см⁻¹ – соответственно, к симметричной и антисимметричной деформационной моде SbS₃ (Kharbish et al., 2009). Важно отметить, что в диапазоне 250–265 см⁻¹ в литературных (Kharbish, 2011; Makreski et al., 2014) и полученных нами КР спектрах таллиевых сульфосолей, за исключением гунгерита, сильные полосы отсутствуют. На основании этого интенсивная полоса при 263 см⁻¹ в КР спектре гунгерита отнесена к As–As валентным колебаниям. Это отнесение хорошо согласуется с КР спектром арсеноламприта – одной из структурных модификаций As (Thomas, Davidson, 2010), в котором наиболее сильная полоса наблюдается при 253 см⁻¹. Полосы с частотами ниже 250 см⁻¹ предположительно относятся к мягким решеточным модам с участием деформационных колебаний связей As–S–As и валентных колебаний связей Tl–S.

Дальнегроит Tl₄Pb₂(As,Sb)₂₀S₃₄ и его Sb-доминантный изоструктурный аналог **шабурнеит** Tl₄Pb₂(Sb,As)₂₀S₃₄ встречаются на месторождении часто в четырех ассоциациях, однако размер их обособлений обычно не превышает 0.1 мм. Оба минерала образуют ксеноморфные зерна, гораздо реже – короткопризматические кристаллы до 50 мкм, рассеянные в рудной массе брекчий (рис. 7е, 19г). Они часто срastaются с боскардинитом–эксанситом, геттардитом, киноварью, криститом, парашьерротитом, реальгаром, рутьеритом или образуют включения в них (рис. 1з, и), а также эпитактически нарастают на антимонит. Дальнегроит и шабурнеит непрозрачны, имеют черный цвет и

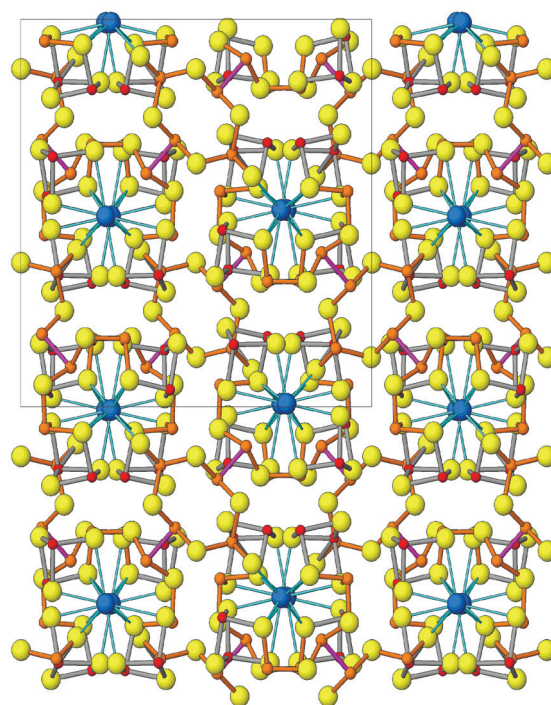


Рис. 12. Фрагмент структуры гунгерита.

Желтое, синее, красное и коричневое – атомы S, Tl, Sb и As, соответственно; лиловое – ковалентные As–As связи.

Fig. 12. Fragment of crystal structure of gungerite.

Yellow, blue, red and brown – S, Tl, Sb and As, respectively; lilac – covalent As–As bonds.

металлический блеск. В отраженном свете белые, однако у дальнегроита отражательная способность выше. Двухотражение у обоих минералов отчетливое. В скрещенных николях сильно анизотропные в коричневатых и серо-голубоватых тонах, с красными внутренними рефлексами, особенно отчетливыми в иммерсии.

Химические составы дальнегроита и шабурнеита из разных минеральных ассоциаций приведены в табл. 1, ан. 44–48, 115–117. В ассоциации № 2 дальнегроит и шабурнеит образуют протяженный ряд твердых растворов (данные по 61 анализу), часто переходя друг в друга даже в пределах одного зерна. Этот ряд простирается от Dln₆₃Chb₃₇ до Dln₂₆Chb₇₄ с двумя разрывами смесимости в поле шабурнеита в интервалах Dln₂₇Chb₇₃–Dln₃₃Chb₆₇ и Dln₄₃Chb₅₇–Dln₄₆Chb₅₄ (рис. 13). Главные линии рентгенограммы дальнегроита из ассоциации № 1 [*d*, Å (*I*)]: 3.918(100), 3.774(50), 3.614(50), 3.128(50), 2.932(40), 2.869(60), 2.572(30), 2.101(60). Вычисленные по ней параметры его триклинной элементарной ячейки и полученные монокристалльным методом параметры триклинной ячейки шабурнеита указаны в табл. 2, №№ 13 и 37, соответственно.

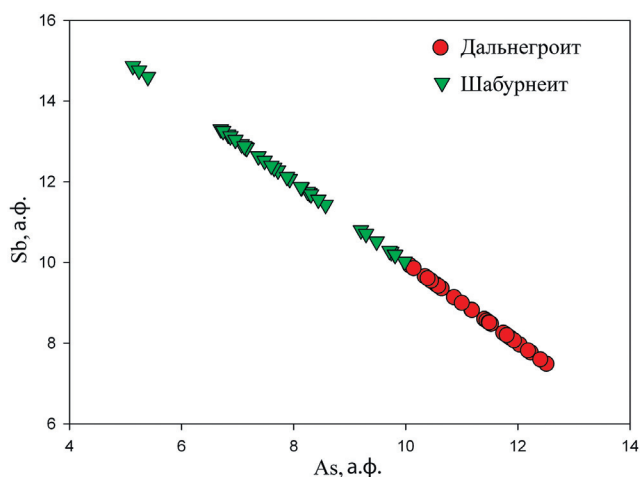


Рис. 13. Соотношение As и Sb в дальнегроите (27 анализов) и шабурнеите (34 анализа).

Fig. 13. As–Sb correlation in dalnegroite (27 analyses) and chabourneite (34 analyses).

Шабурнеит впервые отмечен в статье (Мурзин, Варламов, 2010) среди мышьяково-сурьмяных сульфосолей таллия, распространенных в карбонатных брекчиях месторождения. Минерал был условно отнесен к шабурнеиту по соотношениям компонентов сульфосоли. Позднее шабурнеит отмечался наряду с другими таллиевыми сульфосолями в поздних гидротермальных парагенезисах карбонатных брекчий (Викентьев и др., 2016). Судя по РЭМ фотографии в указанной работе, его ксеноморфные зерна размером до 0.5 мм заключены в агрегатах нерудных минералов. Они срastaются с акташитом, сфалеритом и баритом. В составе минерала установлен дефицит Pb и S по сравнению с идеальной формулой.

В одном из образцов ассоциации № 1 (№ ВК-23) нами обнаружены крупные (до 0.4×0.1 мм) призматические кристаллы и зерна шабурнеитоподобного минерала в кальците с кварцем и релльгаром (рис. 7ж), а также с акташитом, антимонитом, аурипигментом, баритом, золотом, колорадоитом, парапьерротитом, пиритом, пренитом и рутьеритом. Особенностью данного минерала является практически полное отсутствие в его составе Pb и повышенные содержания Tl и Sb (табл. 1, ан. 118). Несмотря на то, что в шабурнеите часто реализуется замещение по схеме $2\text{Pb}^{2+} \leftrightarrow \text{Tl}^+ + \text{Sb}^{3+}$, полностью бессвинцовая разновидность до настоящего времени описана всего один раз на французском месторождении Жа-Ру (Johan et al., 1981), причем ее структурные исследования, в отличие от обогащенного Pb шабурнеита (Biagioni et al., 2015),

не проводились. Кристаллическая структура бессвинцового конечного члена гомеотипного семейства шабурнеита впервые решена нами на воронцовском материале (образец № ВК-23: Makovicky et al., 2021). Бессвинцовый минерал является триклинным (табл. 2, № 38), однако объем его элементарной ячейки в два раза меньше, чем у Pb-содержащего шабурнеита (табл. 2, № 37; Biagioni et al., 2015). Кроме того, в отличие от предыдущих описаний минерала (Johan et al., 1981; Biagioni et al., 2015), наши данные монокристалльного рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о центросимметричной пространственной группе $P-1$.

В ассоциации № 3 широко распространена фаза, по химическому составу близкая к дальнегроиту. Она образует короткопризматические кристаллы размером до 60×5 мкм, а также гипидиоморфные и ксеноморфные зерна размером до 0.15 мм в кальците, аурипигменте и релльгаре и часто срastaются с пиритом и рутьеритом. Макроскопически эта фаза имеет черный цвет и металлический блеск, непрозрачная, хрупкая, с неровным изломом. Спайность отсутствует. В отраженном свете она белая со слабым розоватым оттенком, отражательная способность ниже, чем у пирита ($R = 54\%$), но выше, чем у рутьерита ($R = 28-30\%$), двуотражение отчетливое. В скрещенных николях фаза сильно анизотропная в голубовато-серых и коричневатых тонах.

Ее химический состав характеризуется широкими вариациями содержания Pb: установлены как практически бессвинцовые разности (табл. 1, ан. 49), так и те, в которых содержание Pb достигает почти 8 мас. % (табл. 1, ан. 50). Чаще всего встречаются составы с содержанием Pb в диапазоне 4.0–4.5 мас. %. Полученные монокристалльным методом параметры триклинной элементарной ячейки бессвинцовой разновидности данной фазы (табл. 2, № 14) позволяют отнести ее к гомеотипной серии шабурнеита. Если сурьмяная ветвь серии представлена в настоящий момент двумя минералами – шабурнеитом (Johan et al., 1981; Biagioni et al., 2015; Makovicky et al., 2021) и протошабурнеитом $\text{Tl}_2\text{Pb}(\text{Sb,As})_{10}\text{S}_{17}$ (Orlandi et al., 2013), то в мышьяковой ветви имеется только дальнегроит (Nestola et al., 2009; Bindi et al., 2010). Последний имеет такую же сверхструктуру, как и Pb-содержащий шабурнеит (Biagioni et al., 2015), и является его As-доминантным аналогом. Что касается протошабурнеита, то он обладает примитивной элементарной ячейкой с объемом, вчетверо меньшим по сравнению

нию с шабурнеитом. Полученные нами параметры ячейки и данные химического состава для описанной фазы из ассоциации № 3 свидетельствуют о том, что она, возможно, является недостающим звеном в шабурнеитовой серии, представляя собой As-аналог протошабурнеита («протодалнегроит»). Однако для этого требуются дополнительные рентгеноструктурные исследования.

Дюфренуазит $Pb_2As_2S_3$, предположительно, идентифицирован при электронно-микроскопическом исследовании образца № Вор-08/20-9, отобранного летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2, в виде редких включений до 15 мкм в кальците (рис. 7з) в ассоциации с золотом, пиритом, диопсидом и фторапатитом. В химическом составе минерала фиксируется до 6.9 мас. % Sb (табл. 1, ан. 55). Оптические свойства соответствуют таковым дюфренуазита: в отраженном свете на фоне вмещающего кальцита минерал выглядит белым, в скрещенных николях анизотропный в серовато-фиолетовых тонах. В Российской Федерации дюфренуазит отмечался (по результатам химических анализов) в виде единичных микроскопических выделений (не более 30 мкм) в золото-кварц-сульфидных рудах месторождения Березитовое в Амурской области (Вах и др., 2019). Указания на находки дюфренуазита в Ново-Чагирском руднике на Алтае (Минералы..., 1940) и в тяжелых фракциях материала из грязевых вулканов Керченского полуострова в Крыму (Шнюков и др., 1986) не сопровождаются какими-либо диагностическими данными. Таким образом, наша находка, вероятно, является второй на территории России и первой на Урале, хотя не исключено, что упомянутый выше (см. очерк о вените) минерал из Крестовоздвиженского рудника на Южном Урале (Попов, Колисниченко, 2008) также является дюфренуазитом.

Зиннерит $Cu_6As_4S_9$, предположительно, установлен в образце № Вор-01/19-11 (ассоциация № 1), в виде единственного сростка с акташитом и реальгаром в кристалле пирита, заключенном в кальците. Размер зерна зиннерита 13×9 мкм, сростка – 20×20 мкм (рис. 7и). Минерал ассоциирует с аурипигментом, дальнегроитом–шабурнеитом, золотом, колорадоитом, рутьеритом, баритом, Ва-содержащим ортоклазом (гиалофаном), фторапатитом и церусситом. Оптические свойства соответствуют таковым зиннерита. В отраженном свете минерал выглядит светло-серым и не отличается от акташита, но при этом он существенно темнее вмещающего пирита и светлее реальгара, что со-

ответствует справочным значениям отражательной способности для всех четырех минералов в белом свете ($R = 29\%$ у зиннерита, 30% у акташита, 54% у пирита и $19\text{--}21\%$ у реальгара). Несмотря на малые размеры зерна, его химический состав рассчитывается на формулу зиннерита (табл. 1, ан. 56). Сумма анализа оказывается слегка заниженной после вычитания малой примеси вмещающего пирита. На территории Российской Федерации зиннерит был ранее установлен в образцах из Эльбрусского полиметаллического месторождения на Северном Кавказе в виде оторочек до 0.1 мм на контакте с халькопиритом и блеклыми рудами (Безсмертная и др., 1973). Наша находка, вероятно, является второй в России и первой на Урале.

Зихерит $PtAg_2(As,Sb)_3S_6$ идентифицирован электронно-зондовым методом в образце № Вор-10/2017-2d (ассоциация № 1). Этот редчайший минерал (табл. 1, ан. 57) установлен в виде единственного зерна размерами 10×5 мкм, заключенного в прените в ассоциации с пиритом, баритом, боскардинитом–экранситом, вейсбергитом, парашьеротитом, рутьеритом, сфалеритом, шабурнеитом, As-содержащим фторапатитом и Mn-содержащим клинохлором (рис. 7к). В отраженном свете при одном никеле минерал выглядит белым. Другие оптические характеристики при таком размере зерна получить не удалось. До настоящего времени зихерит считался эндемиком знаменитого швейцарского месторождения Ленгенбах (Graeser et al., 2001).

Имхофит $Pt_{5,8}As_{15,4}S_{26}$ установлен в ассоциациях №№ 1 и 3, где он слагает редкие ксеноморфные зерна до 30 мкм в кальците с реальгаром (рис. 7л). Цвет минерала ярко-красный, в тонких сколах он просвечивает. В отраженном свете имхофит светло-серый, двуотражение в воздухе слабое, в иммерсии – отчетливое. Наблюдается сильная анизотропия в серовато-коричневатых тонах; внутренние рефлексы красного цвета. Химический состав минерала и параметры его моноклинной элементарной ячейки приведены в табл. 1, ан. 58 и табл. 2, № 15, соответственно. Имхофит был открыт в Ленгенбахе (Burri et al., 1965), а впоследствии обнаружен в китайском месторождении Шимен (Roth et al., 2017).

Клерит $MnSb_2S_4$ – первый из новых минералов, описанных на Воронцовском месторождении (Мурзин и др., 1996). Этот марганцевый аналог бертьерита $FeSb_2S_4$ обнаружен в двух образцах окварцованного известняка с прожилково-гнездовой вкрапленностью реальгара и других сульфидов из

керна скважины, пробуренной в центральной части месторождения. Обособления клерита здесь имеют изометричную форму и размеры 0.01–0.2 мм и в большинстве случаев находятся в виде вростков в реальгаре, часто в сростаниях с акташитом и алабандином. В состав данной ассоциации также входят мышьяковистый пирит, аурипигмент, антимонит, киноварь, грейгит, сфалерит, блеклые руды (теннантит, тетраэдрит), цинкениит, халькостибит, рутьерит и самородное золото. Дополнительные химические анализы клерита приведены в статье (Мурзин, Варламов, 2010). В составе минерала постоянно присутствует примесь As – до 5 мас. %.

Нами клерит установлен в ассоциации № 5 в виде вкрапленности зерен неправильной формы до 80 мкм в Mn-содержащих кальците и доломите (рис. 7м) и в виде более мелких включений в барите. Среди постоянных спутников клерита отмечены люборжакит, акташит, алабандин, антимонит, аурипигмент, боскардинит, золото, парапьерротит, пирит, реальгар, рутьерит, Hg-Mn-содержащий сфалерит, твиннит, шабурнеит. В отраженном свете клерит белый со слабым желтоватым оттенком, двуотражение в воздухе отчетливое, в иммерсии сильное. Цветные эффекты анизотропии сильные, в желто-коричневых тонах. В химическом составе клерита фиксируется до 4.6 мас. % As (табл. 1, ан. 60). Параметры ромбической элементарной ячейки, полученные монокристалльным методом (табл. 2, № 16), близки к тем, которые рассчитаны по дебаеграмме (Мурзин и др., 1996).

Кристит $TlHgAsS_3$ установлен в ассоциациях №№ 1, 3 и 4. Он образует редкую вкрапленность мелких (не более 20 мкм) округлых зерен в нерудном цементе брекчий (карбонаты, арменит, барит, клинохлор, мусковит, пренит) (рис. 1з). Спутниками кристита обычно являются все распространенные рудные минералы названных ассоциаций, а также другие таллиевые и ртутные сульфосоли. Зерна кристита насыщенно-ярко-оранжевые до темно-оранжевых, полупрозрачные, с алмазным блеском. Спайность по {010} совершенная. В отраженном свете минерал серовато-белый с голубоватым оттенком, в скрещенных николях отчетливо анизотропный, в коричневатых тонах. Наблюдаются внутренние рефлексы оранжево-красного цвета. Минерал стехиометричен, во всех трех ассоциациях его химический состав близок к идеальному $TlHgAsS_3$ (табл. 1, ан. 61–63). Диагностика подтверждена монокристалльными рентгеновскими данными (табл. 2, № 17).

Купрополибазит $[Cu_6Sb_2S_7][Ag_9CuS_4]$ и **полибазит** $[Ag_9CuS_4][(Ag,Cu)_6(Sb,As)_2S_7]$, два структурных минерала серии полибазита, обнаружены в образце, состоящем, в основном, из кальцита, кварца и простых сульфидов (халькопирит, пирит, галенит, сфалерит), отобранном летом 2020 г. на складе забалансовых руд № 2. Купрополибазит слагает длиннопризматические кристаллы до 30×5 мкм, заключенные в халькопирите (рис. 7н), а полибазит – таблитчатые кристаллы и зерна до 15×10 мкм на контакте халькопирита и кварца (рис. 7о) или же пирита и кварца. Помимо указанных минералов в образце встречены тетраэдрит-(Fe) и ялпайт. Воронцовские купрополибазит и полибазит характеризуются широким изоморфизмом между Cu и Ag. В таблице 1 приведены химические составы наиболее высокомедистого купрополибазита и наиболее богатого Ag полибазита (ан. 64 и 88, соответственно). Оптические свойства обоих минералов практически идентичны. Их отражательная способность существенно ниже, чем у вмещающих халькопирита и пирита, поэтому на контакте с ними они выглядят серыми. Двуотражение и эффекты анизотропии в зеленоватых и сиреневатых тонах хорошо заметны в иммерсии. При большом увеличении, особенно в иммерсии, у купрополибазита наблюдаются внутренние рефлексы темно-красного цвета.

Лаффитит $AgHgAsS_3$ обнаружен в ассоциации № 4 в виде отдельных зерен до 30 мкм в доломите и барите или в сростках с антимонитом (рис. 7п). Среди его спутников отмечены аурипигмент, геттардит, колорадоит, парапьерротит и рощинит. Лаффитит имеет темно-красный цвет, прозрачен, блеск алмазный. В отраженном свете минерал голубовато-белый, в скрещенных николях – умеренно анизотропный, от голубовато-серого до темно-серого; эффекты анизотропии резко усиливаются в иммерсии. Внутренние рефлексы отчетливые, красного цвета. Химический состав минерала близок к теоретическому (табл. 1, ан. 65).

Лиллианит $Pb_{3-2x}Ag_xBi_{2+x}S_6$ образует в магнетите редкие включения до 20 мкм и сростки такого же размера с Te-содержащим икунолитом (ассоциация № 8). В отраженном свете минерал кремово-белый, в скрещенных николях отчетливо анизотропный с более сильными эффектами, чем у сростающегося с ним икунолита. В нашем лиллианите (табл. 1, ан. 66) установлено весьма типичное для этой сульфосоли т. н. «густавитовое» изоморфное замещение по схеме $2Pb^{2+} \leftrightarrow Ag^+ + Bi^{3+}$ (Makovicky, 2019); доля лиллианитового минала $L \% = 72.3$.

Лорандит $TlAsS_2$ установлен в ассоциации № 3 в виде отдельных включений до 20 мкм в кальците, а также сростков до 50 мкм с гладковскиитом (рис. 7д) и до 0.1 мм с филротитом и аурипигментом. Минерал ярко-красного цвета, прозрачный, с алмазным блеском, очень хрупкий. Спайность совершенная по {100} и отчетливая по {001} и {201}. В отраженном свете лорандит серовато-белый, чуть светлее гладковскиита и филротита; двуотражение в воздухе практически не наблюдается, но заметно в иммерсии. В скрещенных николях лорандит демонстрирует сильную анизотропию в желтовато-коричневатых тонах, однако в отдельных зернах она маскируется обильными внутренними рефлексами красного цвета. Химический состав минерала стехиометричен (табл. 1, ан. 67). Главные линии рентгенограммы [d , Å (I): 5.25(20), 3.80(20), 3.57(100), 2.99(20), 2.88(90), 2.63(30), 2.37(10), 1.85(10)]. По параметрам моноклинной элементарной ячейки (табл. 2, № 18) наш минерал практически идентичен лорандиту из первого местонахождения – месторождения Алшар в Северной Македонии (Fleet, 1973). Полученный нами КР спектр (рис. 3д) соответствует ранее публиковавшимся литературным спектрам (Kharbish, 2011; Makreski et al., 2014). Все полосы в диапазоне 250–400 cm^{-1} обусловлены колебаниями As–S связей: сильная полоса при 397 cm^{-1} отнесена к ν_1 (симметричным валентным колебаниям), а наиболее интенсивная полоса при 379 cm^{-1} , как и слабая при 353 cm^{-1} – к ν_3 (антисимметричным валентным колебаниям); сильная полоса при 324 cm^{-1} с плечом при 310 cm^{-1} – к ν_2 (симметричным деформационным колебаниям), а сильная полоса при 275 cm^{-1} – ν_4 (антисимметричным деформационным колебаниям). Волновые числа в диапазоне от 210 cm^{-1} соответствуют смешанным решеточным модам.

Аналогично врбаиту, лорандит без каких-либо диагностических признаков и аналитических данных упомянут в перечне минералов Бештаугорского уранового месторождения, ассоциирующих с лермонтовитом (Мелков и др., 1983).

Люборжакит Mn_2AsSbS_5 – второй после клерита новый минерал без видообразующего Tl, открытый на месторождении (Kasatkin et al., 2020a). Он назван в честь известного чешского кристаллографа и минералога XX века, специалиста по сульфосолям, профессора Карлова Университета в Праге Любора Жака (1925–2008 г.г.). Люборжакит образует длиннопризматические кристаллы и зерна до 70 × 20 мкм в Mn-содержащих доломи-

те и кальците (рис. 14а), а в редких случаях образует частичные псевдоморфозы по алабандину. Люборжакит ассоциирует также с акташитом, боскардинитом, золотом, клеритом, колорадоитом, рутьеритом, Mn-содержащим сфалеритом, твиннитом, шабурнеитом и экранситом, а из оксисолей – с баритом, диопсидом, Ва-содержащим ортоклазом (гиалофаном), мусковитом, пренитом, фторапатитом и черновитом-(Y). Люборжакит имеет черные цвет и черту, непрозрачен, блеск металлический. Минерал хрупкий, с неровным изломом.

Микротвердость по Виккерсу 242 кг/мм², что соответствует 4–4½ по шкале Мооса. Расчетная плотность 4.181 г/см³. В отраженном свете он белый, двуотражение отчетливое, в скрещенных николях – отчетливо анизотропный, в светло-серых и коричневатых тонах. В оригинальном описании минерала отмечалось отсутствие у него видимых внутренних рефлексов (Kasatkin et al., 2020a), однако в некоторых, более крупных (до 80 × 50 мкм) зернах, найденных нами недавно, удалось обнаружить внутренние рефлексы красного цвета, особенно отчетливые в иммерсии. Спектры отражения люборжакита приведены на рис. 2. Дисперсия отражательной способности нормального типа. Коэффициенты отражения для длин волн, рекомендованных Комиссией по рудной минералогии ММА (R_{min} / R_{max} , %): 23.6 / 25.3 (470 нм), 22.4 / 24.7 (546 нм), 22.1 / 24.3 (589 нм), 21.8 / 23.8 (650 нм).

Химический состав голотипного образца минерала приведен в табл. 1, ан. 68. Его эмпирическая формула (расчет на сумму девять атомов): $Mn_{1.86}Pb_{0.04}Ag_{0.03}Cu_{0.02}As_{0.98}Sb_{1.07}S_{5.00}$. Люборжакит кристаллизуется в моноклинной сингонии, пространственная группа $C2 / m$, $Z = 4$. Параметры элементарной ячейки указаны в табл. 2, №. 19. Кристаллическая структура люборжакита (рис. 15) содержит 10 кристаллографически неэквивалентных позиций: одна позиция полностью заселена атомами Sb, одна позиция – атомами Mn, пять позиций – атомами S, а три позиции имеют смешанную заселенность (две As / Mn позиции и одна Mn / Sb). Люборжакит является новым членом гомологической серии павонита.

В образце № Вор-01/19-10г в одном из сложноустроенных сростков длиной около 0.2 мм, состоящем из люборжакита, экрансита и реальгара, встречена похожая на люборжакит по оптическим свойствам фаза с существенной примесью Pb, пониженным содержанием Mn и иным соотношением Sb / As (табл. 1, ан. 69). Из-за тесного срастания с другими минералами (рис. 14б) фаза рентгено-

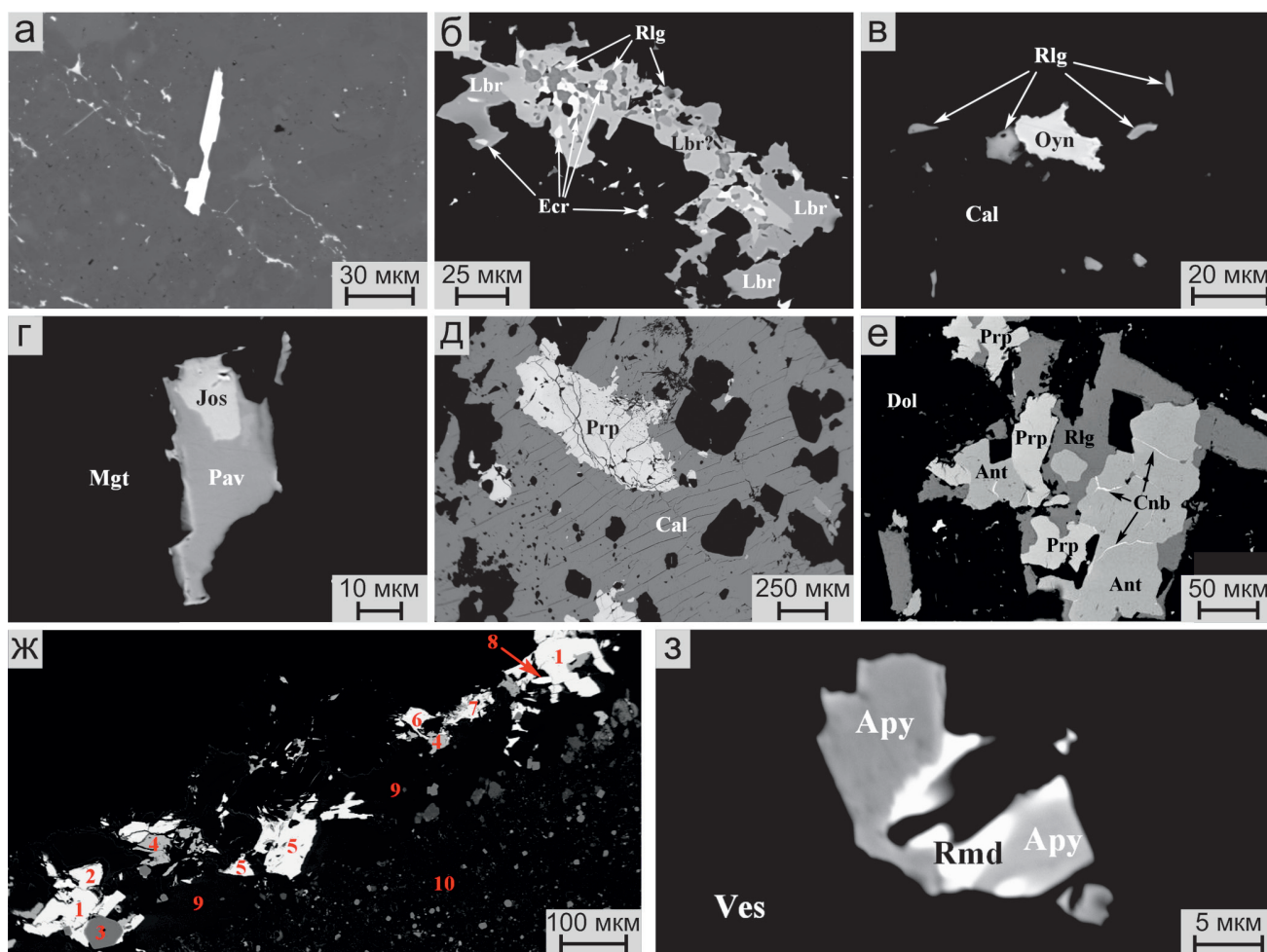


Рис. 14. Сульфосоли Воронцовского месторождения, часть IV:

а – длиннопризматический кристалл люборжакита (белый) в агрегате карбонатов (был извлечен для рентгеноструктурного исследования); б – сложный сросток люборжакита, его Pb-обогащенной разновидности (Lbr?), экрансита и рельгара в Mn-содержащих кальците и доломите; в – зерно ойонита в кальците с реальгаром; г – сросток павонита и жозеита-А в магнетите; д – кристаллы парапьерротита в кальците (крупный кристалл в центре был извлечен для структурных исследований); е – сложный сросток парапьерротита с антимонитом, реальгаром и киноварью в доломите; ж – походяшинит (1) с парапьерротитом (2), пиритом (3), сфалеритом (4), дальнегроитом (5), рутьеритом (6), реальгаром (7), вейсбергитом (8) в кальците (9) с клинохлором (10); з – вrostки рамдорита в арсенопирите, заключенном в везувиане.

РЭМ фото в отраженных электронах.

Fig. 14. Sulfosalts of the Vorontsovskoe deposit, part IV:

а – long-prismatic crystal of luborzhakite (white) in carbonate aggregate (was used for single-crystal XRD study); б – complex intergrowth of luborzhakite, its Pb-rich variety (Lbr?), écrinsite and realgar in Mn-bearing calcite and dolomite; в – oyonite grain in calcite with realgar; г – aggregate of pavonite and joseite-A in magnetite; д – parapierrrotite crystals in calcite (large crystal in the center was used for X-ray analysis); е – complex aggregate of parapierrrotite, stibnite, realgar and cinnabar in dolomite; ж – pokhodyashinite (1) with parapierrrotite (2), pyrite (3), sphalerite (4), dalnegroite (5), routhierite (6), realgar (7), weissbergite (8) in calcite (9) with clinocllore (10); з – ramdohrite inclusions in arsenopyrite embedded in vesuvianite.

SEM (BSE) images.

графически не изучена, поэтому на данный момент нам не удалось установить, является ли она Pb-содержащей разновидностью люборжакита или потенциально новым минералом.

Ранее в ассоциации с клеритом отмечалась недостаточно изученная клеритоподобная фаза с формулой $Mn(Sb,As)S_4$ (Мурзин, Варламов, 2010). В сравнении с люборжакитом она беднее Mn и существенно богаче Sb, поэтому нам представляется,

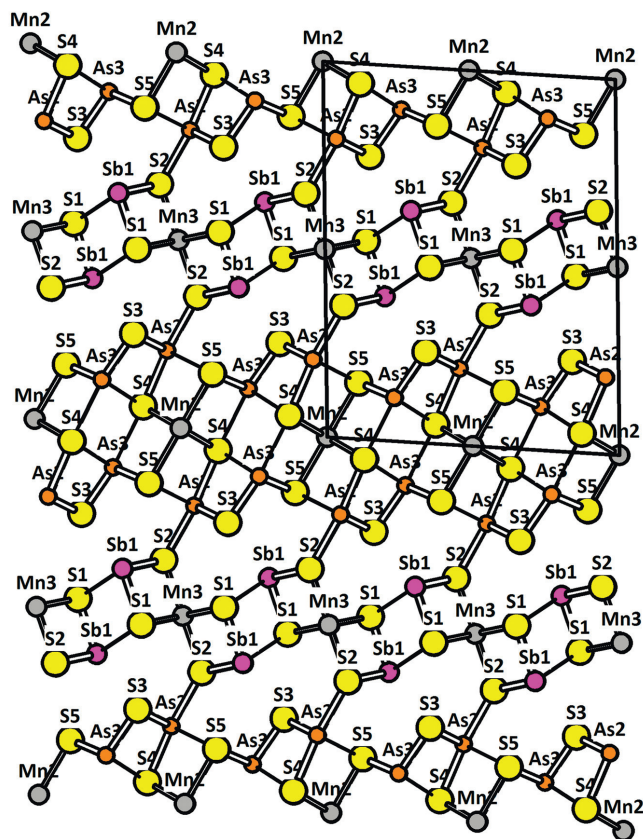


Рис. 15. Кристаллическая структура люборжакита в проекции вдоль оси *b*.

Показаны только короткие сильные межатомные связи.

Fig. 15. Crystal structure of luboržákitite along axis *b*. Only short strong bonds are indicated.

что это скорее всего еще один потенциально новый минерал системы Mn–Sb–As–S.

Манганоквадратит AgMnAsS_3 идентифицирован по химическому составу (табл. 1, ан. 70) в виде единственного включения размером около 10 мкм в сфалерите (образец № Вор-СС-15, ассоциация № 1). В отраженном свете при одном николе минерал выглядит светло-серым, заметно светлее вмещающего сфалерита, что соответствует литературным данным об отражательной способности этих минералов: для манганоквадратита $R = 28.1\text{--}30.5\%$ при $\lambda = 548$ нм (Bonazzi et al., 2012), для сфалерита $R = 18\%$. Другие оптические характеристики при таком размере зерна получить не удалось. До настоящего времени минерал был известен в руднике Учукчакуа в Перу (Bonazzi et al., 2012) и на месторождении Сэкэрымб в Румынии (Dincă, Popescu, 2019).

Менегинит $\text{Pb}_{13}\text{CuSb}_7\text{S}_{24}$ найден в образцах с отвалов Южного карьера. Он слагает свинцово-

серые гнезда до 1×0.5 см в кальците в ассоциации с кубическими кристаллами пирита и белыми пленками талька (рис. 6е). В отраженном свете менегинит белый, в скрещенных николях – сильно анизотропен в зеленоватых тонах. Химический состав минерала стехиометричен (табл. 1, ан. 71). Сильные линии рентгенограммы [d , Å (I): 5.81(30), 3.87(40), 3.70(50), 3.48(70), 3.27(90), 2.93(100), 2.73(70), 2.54(10), 2.08(60)]. Параметры ромбической элементарной ячейки (табл. 2, № 20) соответствуют менегиниту.

Ойонит $\text{Ag}_3\text{Mn}_2\text{Pb}_4\text{Sb}_7\text{As}_4\text{S}_{24}$ определен электронно-зондовым методом в образце № Вор-01/19-23 (ассоциация № 1) (табл. 1, ан. 73). Он установлен в виде единственного зерна размерами 30×15 мкм, заключенного в кальците с реальгаром, антимонитом, боскардинитом, колорадоитом, пиритом, сфалеритом и твиннитом (рис. 14в). В отраженном свете ойонит серовато-белый, существенно светлее контактирующего с ним реальгара, что соответствует литературным данным об отражательной способности этих минералов: для ойонита $R = 32.5\text{--}38.9\%$ при $\lambda = 548$ нм (Bindi et al., 2018), для реальгара $R = 19\text{--}21\%$. В скрещенных николях наблюдается отчетливая анизотропия в сероватых и коричневатых тонах. До настоящего времени ойонит считался эндемиком серебряного рудника Учукчакуа в Перу (Bindi et al., 2018).

Павонит AgBi_3S_5 образует включения до 30 мкм и сростки с жозеитом-А до 50 мкм в магнетите из ассоциации № 8 (рис. 14г). В отраженном свете на контакте с магнетитом павонит белый, с жозеитом-А – белый со слабым розовато-кремовым оттенком. Эффекты анизотропии у павонита существенно более интенсивные, чем у жозеита-А, в голубовато-серых тонах. В воздухе наблюдается слабое двуотражение, существенно усиливающееся в иммерсии. Минерал содержит небольшую примесь Pb (табл. 1, ан. 74). В Российской Федерации павонит был достоверно установлен в Харбейском месторождении на Полярном Урале (Минералогия Урала, 1990) и в Sn-W месторождении Аляскинское в Восточной Якутии (Ефимов, 1993).

Парапьерротит TlSb_5S_8 является одним из пяти наиболее часто встречающихся таллиевых минералов месторождения, наряду с воронцовитом, дальнегроитом, рутьеритом и шабурнеитом. В статье (Мурзин, Варламов, 2010) приведены химические составы таллиевой сульфосоли, условно отнесенной авторами к пьерротиту с оговоркой, что они могут принадлежать и парапьерротиту.

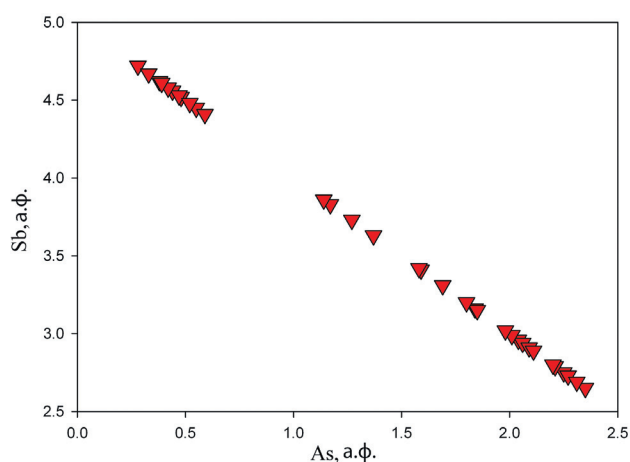


Рис. 16. Соотношение Sb и As в парапьерротите (40 анализов).

Fig. 16. Sb-As correlation in parapierrrotite (40 analyses).

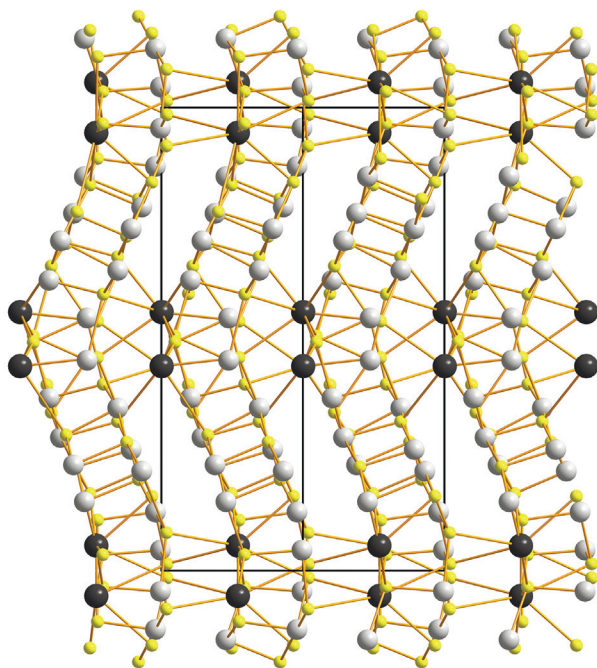


Рис. 17. Кристаллическая структура парапьерротита в проекции $[-101]$.

Черное – атомы Tl, светло-серое – позиции Sb и As, желтое – атомы S. Показана элементарная ячейка.

Fig. 17. Crystal structure of parapierrrotite along $[-101]$.

Black – Tl atoms, light gray – Sb and As sites, yellow – S atoms. Black lines – unit-cell edges.

Нами парапьерротит установлен в пяти ассоциациях. В ассоциациях №№ 2 и 4 он обилён, слагает короткопризматические черные с металлическим блеском кристаллы и зерна неправильной формы в нерудной массе брекчий (кальцит, доло-

мит, барит, кварц, клинохлор, пренит, диопсид и др.) и обычно наблюдается вместе с аурипигментом, пиритом, реальгаром, рутьеритом, киноварью, минералами рядов воронцовит–ферроворонцовит и дальнегроит–шабурнеит. Наиболее крупные индивиды парапьерротита, достигающие 1 мм, установлены в ассоциации № 4 (рис. 14д). На одном из таких крупных кристаллов нам удалось впервые расшифровать структуру этого минерала (Plášil et al., 2018). Более мелкие зерна парапьерротита часто образуют включения в пирите и сростки с антимонитом, реальгаром и киноварью (рис. 14е). Более редкие спутники парапьерротита – акташит, арсенопирит, бернардит, геттардит, колорадоит, кристит, лаффитит, метациннабарит, хатчинсонит. В отраженном свете минерал белый с легким сероватым оттенком, двуотражение умеренное. В скрещенных николях он отчетливо анизотропный в серо-коричневатых и серо-голубоватых тонах, внутренние рефлексы редкие, красного цвета. В составе минерала фиксируются широкие вариации примесного содержания As – от 2.0 мас. % (0.28 а.ф.) до 17.6 мас. % (2.23 а.ф.) (табл. 1, ан. 75–86). Изоморфное замещение Sb на As варьирует от $Sb_{94}As_6$ до $Sb_{53}As_{47}$ при очевидном разрыве смесимости между $Sb_{88}As_{12}$ и $Sb_{77}As_{23}$ (рис. 16).

Кристаллическая структура природного парапьерротита (рис. 17) идентична описанной ранее структуре синтетической фазы $TlSb_5S_8$ (Engel, 1980), в которой две позиции заняты таллием, десять – сурьмой и шестнадцать – серой. Расшифровка структуры уральского минерала показывает, что As изоморфно замещает Sb не во всех десяти позициях, а только в половине из них (Plášil et al., 2018). Причины, по которой атомы Sb и As частично упорядочиваются, связаны со стереохимическим поведением Sb^{3+} и тенденцией As^{3+} по сравнению с Sb^{3+} к образованию более правильных пирамид AsS_3 . Замещение части атомов Sb^{3+} на менее крупные атомы As^{3+} закономерно приводит к уменьшению объема элементарной ячейки минерала, тем более значительному, чем больше содержание As^{3+} в его составе (табл. 2, №№ 21–24). Кроме того, проведенные нами монокристалльные рентгеновские эксперименты с зернами парапьерротита разного химического состава показывают, что от соотношения Sb / As в минерале также напрямую зависит качество рентгеновской дифракции: чем больше примесь As, тем хуже дифрактограмма. В итоге, структурные данные наилучшего качества были получены для кристалла с минимальным содержанием As (2.0 мас. %).

В ассоциации № 5 парапьерротит редок. Он слагает призматические кристаллы до 50 мкм в агрегатах Mn-содержащих карбонатов и ассоциирует с клеритом (рис. 7м), люборжакитом, алабандином, пиритом и реальгаром. Интересной особенностью является присутствие в нем Mn до 1.6 мас. % (0.28 а.ф.), и одновременный дефицит в Sb и As-позициях: 4.71–4.74 а.ф. Sb + As (табл. 1, ан. 85, 86). Мы предполагаем, по аналогии с люборжакитом, что этот дефицит восполняется как раз изоморфным вхождением примесного Mn в некоторые из этих позиций.

Плагинит $Pb_5Sb_8S_{17}$ образует призматические кристаллы или ксеноморфные выделения размером менее 0.1 мм в кварце или карбонате брекчий. Реже он фиксируется в центральных частях сложных зональных сростаний с другими сульфидами. Плагинит определен по химическому составу и оптическим свойствам (Сазонов и др., 1991). Нами минерал установлен в составе сложного сростка антимонсульфидов и галенита при электронно-микроскопическом исследовании образца Вор-08/20-22, найденного на складе забалансовых руд № 2. Плагинит слагает зерна до 50 микрон в сфалерите или на контакте галенита и пирита (рис. 1к) и ассоциирует с буланжеритом, гетероморфитом и семсейитом. В составе минерала установлены небольшие примеси Bi и Se (табл. 1, ан. 87). В отраженном свете плагинит кремово-белый, в воздухе незначительно, а в иммерсии заметно темнее галенита. Двуотражение отчетливое. Эффекты анизотропии в скрещенных николях сильные, особенно в иммерсии, в серых, розоватых и коричневатых тонах. Также в иммерсии наблюдаются красно-коричневые внутренние рефлексы.

Походяшинит $Cu_2Tl_3Sb_5As_2S_{13}$ – самый редких из новых минералов, открытых нами на Воронцовском месторождении (Kasatkin et al., 2020b). Он обнаружен всего в двух аншлифах, изготовленных из фрагмента карбонатной брекчий с рудного склада. Минерал получил свое название в честь русского купца и горнозаводчика М.М. Походяшина (1708–1780), основателя знаменитых Турбинских рудников и Богословского горного округа, владельца нескольких медеплавильных заводов на Северном Урале. Походяшинит слагает ксеноморфные зерна до 0.1×0.05 мм в кальците и наблюдается совместно с пиритом, реальгаром, золотом, арсиччионитом, боскардинитом, вейсбергитом, дальнегроитом, парапьерротитом, рутьеритом, сфалеритом, шабурнеитом, экранситом и др. (рис.

14ж). Минерал непрозрачен, имеет черный цвет, металлический блеск, черную черту. Походяшинит хрупкий, с неровным изломом. Наблюдается несовершенная спайность по $\{010\}$. Микротвердость по Виккерсу 55 кг/мм^2 , что соответствует 2 по шкале Мооса. Расчетная плотность 4.996 г/см^3 .

В отраженном свете походяшинит серовато-белый, двуотражение отчетливое. В скрещенных николях минерал сильно анизотропный в темно-коричнево-серых и голубовато-серых тонах. Внутренние рефлексы не наблюдаются. Дисперсия отражательной способности нормального типа. Спектры отражения походяшинита приведены на рис. 2. Коэффициенты отражения для длин волн, рекомендованных Комиссией по рудной минералогии ММА (R_{\min} / R_{\max} , %): 28.9 / 34.1 (470 нм), 27.6 / 33.5 (546 нм), 27.0 / 32.5 (589 нм), 26.2 / 31.1 (650 нм).

Химический состав голотипного образца дан в табл. 1, ан. 89. Его эмпирическая формула (расчет на сумму 25 атомов): $Cu_{1.35}Ag_{0.66}Tl_{2.54}Pb_{0.04}As_{2.21}Sb_{5.02}S_{13.17}$. Походяшинит кристаллизуется в триклинной сингонии, пространственная группа $P, Z = 2$. Параметры элементарной ячейки даны в табл. 2, № 25. Кристаллическая структура походяшинита (рис. 18) содержит 25 кристаллографически неэквивалентных позиций: две позиции полностью заселены атомами Tl, четыре – атомами Sb, две – атомами As, тринадцать – атомами S, а четыре позиции имеют смешанную заселенность (две Sb / Tl позиции и две Cu / Ag). Структурная формула минерала может быть записана как $(Cu,Ag)_2Tl_2(Sb,Tl)_2(Sb_4As_2)_{\Sigma 6}S_{13}$.

Пьерротит $Tl_2(Sb,As)_{10}S_{16}$ отмечен в виде округлых или неправильной формы включений размером до 60×30 мкм в крупных (до 3 мм) выделениях реальгара. В отраженном свете он белый с зеленоватым или голубоватым оттенком, анизотропия проявлена отчетливо. Минерал прозрачный, внутренние рефлексы темно-красные (Сазонов и др., 1991). Приведенная в данной монографии химическая формула $(Tl_{1.86}Ag_{0.01}Cu_{0.11}Fe_{0.02})_{\Sigma 2.00}(As_{7.20}Sb_{3.72})_{\Sigma 10.92}S_{16.08}$ не может относиться к пьерротиту, т. к. последний является Sb-доминантным минералом. Мы полагаем, что из всех известных сульфосолей указанные оптические и химические данные могли бы ближе всего относиться к бернардиту, однако отсутствие рентгеновских характеристик не позволяет однозначно диагностировать этот минерал. Химические составы таллиевой сульфосоли, условно отнесенной к пьерротиту, указаны в статье (Мурзин, Варламов, 2010). Вместе с тем, авторы считают, что сульфосоли может принадлежать также и к парапьерротиту.

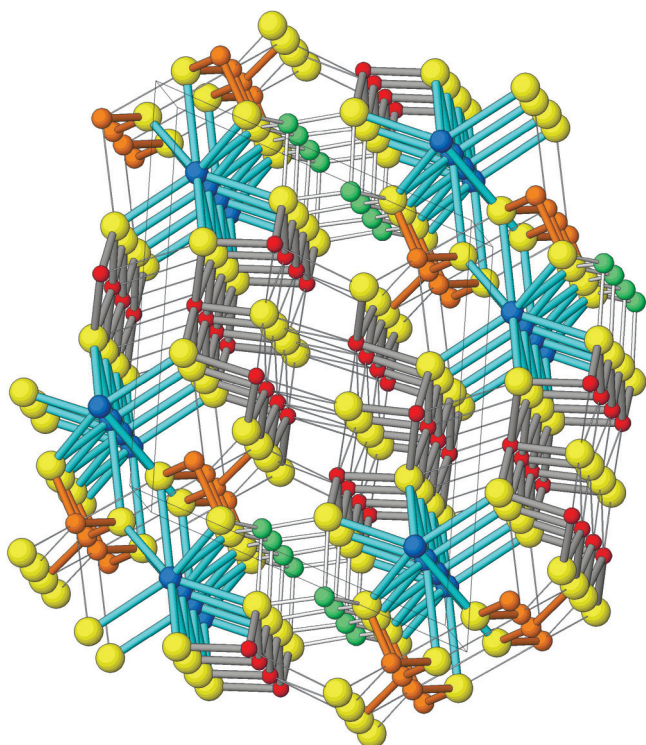


Рис. 18. Кристаллическая структура походяшинита в проекции приблизительно вдоль оси *a*.

Синие, зеленое, коричневое, красное и желтое – атомы Tl, Cu, Sb, As и S, соответственно.

Fig. 18. Crystal structure of pokhodyashinite along axis *a* (slightly inclined).

Blue, green, brown, red and yellow – atoms of Tl, Cu, Sb, As and S, respectively.

Мы не исключаем присутствия пьерротита в рудах Воронцовского месторождения, тем более что множество проанализированных нами образцов по своему химическому составу и оптическим свойствам могут быть в равной степени отнесены и к пьерротиту, и к диморфному с ним парапьерротиту. Тем не менее, все 15 зерен из разных минеральных ассоциаций, изученных нами рентгенометрически, оказались парапьерротитом, поэтому можно сказать, что на настоящий момент достоверный пьерротит на Воронцовском месторождении не установлен.

Рамдорит $Pb_{5.9}Fe_{0.1}Mn_{0.1}In_{0.1}Cd_{0.2}Ag_{2.8}Sb_{10.8}S_{24}$, предположительно, встречен в ассоциации № 6, где находится в виде единичных вростков до 8 мкм в зерне арсениопирита, в свою очередь, заключенного в везувиане (рис. 14з). В составе минерала установлены примеси Mn, Cu, Fe и Zn, возможно, замещающих Ag (табл. 1, ан. 90).

Ребулит $Tl_5Sb_5As_8S_{22}$ установлен в двух ассоциациях – №№ 1 и 3. Минерал слагает редкие

призматические индивиды длиной до 20 мкм и угловатые зерна размером до 40×30 мкм в кальцит-кварцевой массе. Он наблюдается совместно с аурипигментом, пиритом, реальгаром, боскардинитом, парапьерротитом, рутьеритом, Mn- и Hg-содержащим сфалеритом, шабурнеитом, баритом, диопсидом, пренитом и фторапатитом (рис. 19а). В образце № Вор-СС-10 из ассоциации № 1 было обнаружено рекордное по размерам (0.2×0.1 мм) зерно ребулита с небольшим включением врбаита (рис. 19б). Воронцовский ребулит имеет темно-красный цвет и блеск от металлического до алмазного. В отраженном свете он серовато-белый, в скрещенных николях отчетливо анизотропен в сероватых и коричневатых тонах с красными внутренними рефлексамии. Химический состав минерала приведен в табл. 1, ан. 91–93, а параметры моноклинной элементарной ячейки – в табл. 2, № 26.

КР спектр (рис. 3е) ребулита идентичен литературному (Makreski et al., 2014). Полосы с максимумами в интервале $330\text{--}400\text{ см}^{-1}$ отнесены к As–S и Sb–S валентным ($\nu_1 + \nu_3$) колебаниям, а полосы с максимумами при 322 и 250 см^{-1} обусловлены деформационными ($\nu_2 + \nu_4$) колебаниями коротких ($2.2\text{--}2.6\text{ \AA}$) и длинных ($2.9\text{--}3.9\text{ \AA}$) связей Sb–S, соответственно. Полосы ниже 205 см^{-1} связаны со смешанными решеточными модами. Впервые ребулит описан на месторождении Алшар (Balić-Žunić et al., 1982) и долгое время оставался его эндемиком. В конце 2010-х гг. он был обнаружен также на As-месторождении Шимен в китайской провинции Хунань (Roth et al., 2017).

Рощинит $(Ag,Cu)_{19}Pb_{10}Sb_{51}S_{96}$, предположительно, установлен в единственном образце № Вор-08/18-5 (ассоциация № 4), сложенном доломитом, баритом и крупными (до 3 мм) агрегатами антимонита. Рощинит образует рассеянные включения в антимоните и сростки с геттардитом (рис. 19в). Размер включений не превышает 20 мкм, сростков – 15 мкм. В этом же образце присутствуют аурипигмент, колорадоит, лаффитит и парапьерротит. В составе рощинита содержатся примеси Mn (до 0.2 мас. %), Hg (до 3.0 мас. %) и As (до 11.4 мас. %) (табл. 1, ан. 94, 95). Эти же элементы-примеси, но в меньших количествах (до 0.04, 0.9 и 5.6 мас. %, соответственно) присутствуют и в рощините из места его первой находки – месторождения Кварцитовые Горки в Северном Казахстане (Спиридонов и др., 1990). По оптическим свойствам изученный нами минерал соответствует рощиниту: серовато-белый со слабым голубоватым оттенком в отраженном

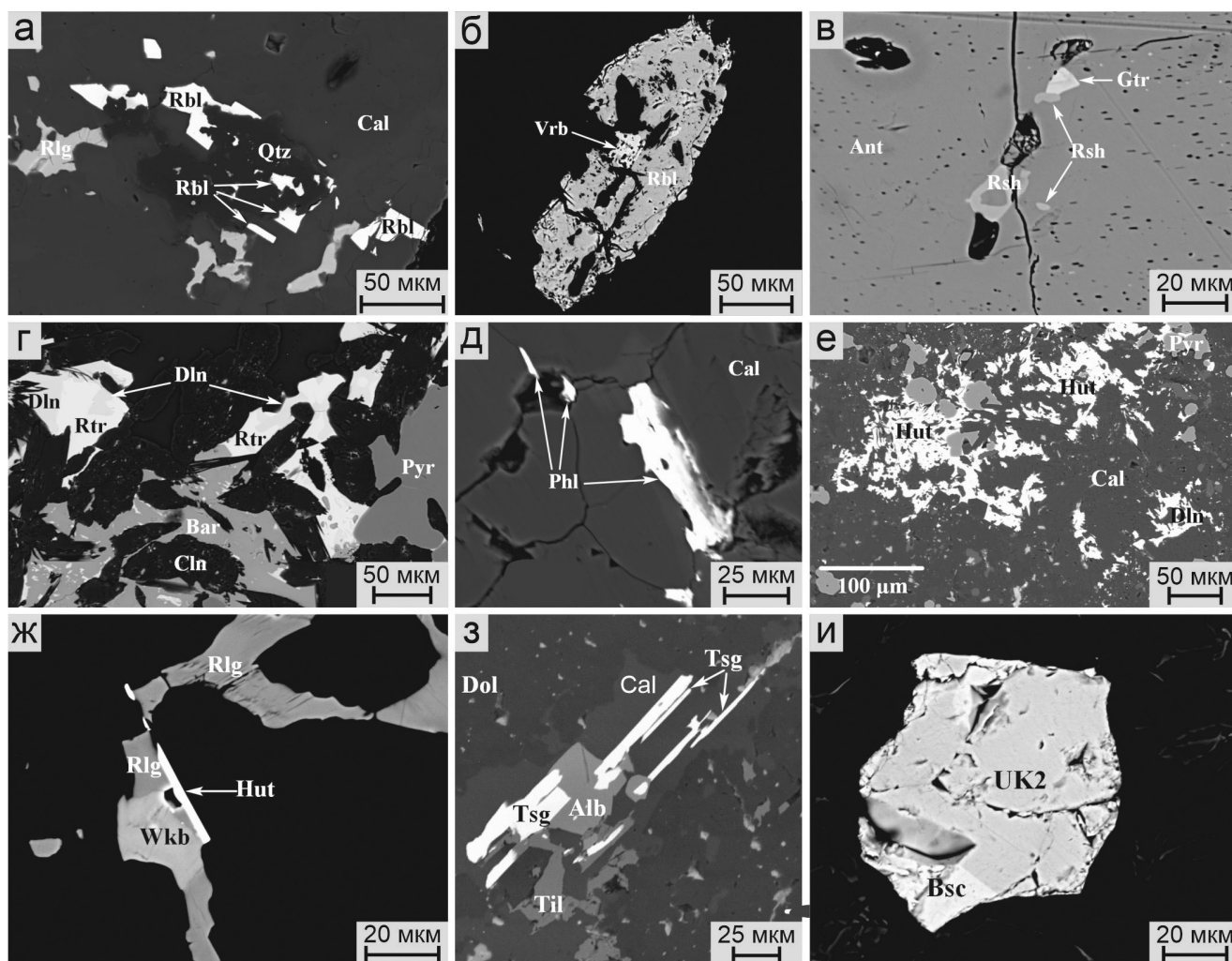


Рис. 19. Сульфосоли Воронцовского месторождения, часть V:

а – кристаллы и зерна ребулита в кальците и кварце в ассоциации с реальгаром; б – зерно ребулита с вроском врбайта; в – мелкие вроски рощинита и геттардита в антимоните; г – Ag-обогащенный рутьерит в сростании с дальнегроитом в клинохлоре с баритом и пиритом; д – призматические кристаллы филротита в кальците; е – кустовидные агрегаты хатчинсонита в кальците в ассоциации с дальнегроитом и пиритом; ж – игольчатый кристалл хатчинсонита на контакте вакабаяшилита и реальгара с кальцитом; з – псевдоморфозы кристаллов цыганкоита по алабандину в ассоциации с тилазитом в доломите и кальците; и – фаза II (UK2) в сростании с боскардинитом.

РЭМ фото в отраженных электронах.

Fig. 19. Sulfosalts of the Vorontsovskoe deposit, part V:

а – rebulite crystals and grains in calcite and quartz in assemblage with realgar; б – rebulite grain with vrbaitite inclusion; в – small roshchinite and guettardite inclusions in stibnite; г – Ag-rich routhierite intergrown with dalnegroite in clinoclone with barite and pyrite; д – prismatic philrothite crystals in calcite; е – dendrite hutchinsonite aggregates in calcite with dalnegroite and pyrite; ж – acicular hutchinsonite crystal at the contact with wakabayashilite and realgar in calcite; з – pseudomorphs of tsyganckoite crystals after alabandite in assemblage with tilasite in dolomite and calcite; и – an unknown phase II (UK2) intergrown with boscardinite.

SEM (BSE) images.

свете, умеренно анизотропный в скрещенных николях без цветных эффектов. По отражательной способности рощинит близок к сростающемуся с ним геттардиту и вмещающему антимониту, но отличается от них существенно более слабым, практически незаметным двуотражением и гораздо менее

интенсивной анизотропией. Рентгенографические исследования рощинита в силу очень мелкого размера зерен не проводились.

Рутьерит $TiCuHg_2As_2S_6$, наряду с воронцовитом, дальнегроитом, паральферротитом и шабурнеитом, относится к числу наиболее распростра-

ненных таллиевых сульфосолей месторождения. Впервые он установлен В.Н. Сазоновым с соавторами (1991) в виде выделений неправильной формы размером до 0.5 мм, выполняющих интерстициальные пространства между зернами карбоната. Более мелкие выделения представлены изометричными кристаллами – вростками в реальгаре или Pb-Tl-сульфосолях. Рутьерит диагностирован комплексом методов: приведены его оптические свойства, включая спектры отражения, микротвердость, химический состав, основные линии дебаеграммы и рассчитанные по ней параметры элементарной ячейки минерала. В его химическом составе установлены примеси Zn (до 1 мас. %), Ag (до 0.3 мас. %) и Sb (4.3 мас. %). В.В. Мурзин и Д.А. Варламов (2010), обнаружили рутьерит с рекордным содержанием Sb – до 7.15 мас. %.

Нами рутьерит обнаружен в шести минеральных ассоциациях, обычно в виде вкрапленности в карбонатах брекчий, участками до 0.5×0.5 см (рис. бж). Цвет минерала ярко-красный до темно-красного, блеск металлоидный до алмазного, в тонких сколах минерал просвечивает. В отраженном свете рутьерит светло-серый, в скрещенных николях обычно отчетливо анизотропный в серых и коричневых тонах, однако в рутьерите из цыганкоитовой ассоциации эффекты анизотропии выражены весьма слабо. Внутренние рефлексии обильные ярко-красного цвета, особенно сильные в иммерсии. Параметры тетрагональной элементарной ячейки рутьерита из ассоциаций №№ 1 и 5 приведены в табл. 2, №№ 27, 28.

В составе подавляющего большинства изученных зерен рутьерита фиксируются лишь невысокие изоморфные примеси Ag (до 0.06 а.ф.) и Zn (до 0.16 а.ф.) при практически полном отсутствии Fe (табл. 1, ан. 96–98). Интересное исключение составляет образец Vor-10/2017-2 (ассоциация № 1), где обнаружены зерна Ag- и Zn-обогащенного рутьерита до 80 мкм в тесном сростании с дальнегритом (рис. 19r). Подробное электронно-зондовое изучение этих зерен выявило в них широко проявленные замещения по схемам $Ag \rightarrow Cu$ и $Zn \rightarrow Hg$ вплоть до появления составов, отвечающих двум другим членам группы рутьерита – **арсиччиониту** $AgHg_2TiAs_2S_6$ (с $Ag > Cu$ и $Hg > Zn$) и **штальдериту** $TiCu(Zn,Fe,Hg)_2As_2S_6$ (с $Cu > Ag$ и $Zn > Hg$) (табл. 1, ан. 5 и 119, соответственно). Составы, отвечающие еще одному члену группы – ральфканониту (с $Ag > Cu$ при $Zn > Hg$), не обнаружены. Арсиччионит был описан до этого только в руднике

Монте Арсиччио (Тоскана, Италия) (Biagioni et al., 2014), а штальдерит известен только в знаменитом месторождении Ленгенбах (Graeser et al., 1995).

Семсейит $Pb_9Sb_8S_{21}$ установлен в составе сложного сростка антимонсульфидов и галенита при электронно-зондовом исследовании образца № Vor-08/20-22, найденного на складе забалансовых руд № 2. Минерал образует зерна до 70 мкм, сростающиеся с галенитом (рис. 1к) на контакте сфалерита и пирита, и ассоциирует с буланжеритом, гетероморфитом и плагионитом. В его составе установлена небольшая примесь Se (табл. 1, ан. 99). В отраженном свете семсейит серовато-белый, чуть темнее пирита, но существенно светлее сфалерита. На контакте с близким по отражательной способности галенитом выглядит слегка зеленоватым. В иммерсии разница между этими минералами становится более заметной: семсейит значительно темнее. Двухотражение отчетливое. В скрещенных николях эффекты анизотропии сильные и в воздухе, и в иммерсии.

Твиннит $Pb(Sb_{0.63}As_{0.37})_2S_4$ отмечен в рудах, насыщенных реальгаром, в виде вкрапленности ксеноморфных микрозерен, в сростании с акташитом и отдельно от него (Викентьев и др., 2016). Между тем, приведенные авторами этой работы три химических анализа минерала по стехиометрии отвечают другой сульфосоли – геттардиту; кроме того, суммы анализов завышены: до 105 мас. %. Рентгенометрически минерал не изучен. Нами достоверный твиннит установлен в ассоциациях №№ 1 и 5 в виде ксеноморфных зерен до 0.3 мм. В некоторых случаях он образует сростки с боскардинитом по периметру зерен пирита. Наблюдается совместно с минералами ряда боскардинит–экрансит, акташитом, аурипигментом, золотом, реальгаром, рутьеритом, шабурнеитом и др. Минерал черный, непрозрачный, блеск металлический. Наблюдается совершенная спайность по $\{100\}$. В отраженном свете твиннит белый, иногда с зеленоватым или голубоватым оттенками, двухотражение в воздухе отчетливое, резко усиливается в иммерсии. В скрещенных николях твиннит умеренно анизотропный, без цветовых эффектов. Химический состав минерала приведен в табл. 1, ан. 100, 101, а параметры моноклинной элементарной ячейки – в табл. 2, №№ 29, 30.

Ранее твиннит отмечался в составе рудных минералов благороднометалльного проявления Пякюля в Карелии (Ивашенко и др., 2004), однако приведенные авторами два химических анали-

за, к сожалению, не лучшего качества, и принадлежность этого минерала к твинниту вызывает сомнение. Без указания диагностической информации твиннит упомянут в списке сульфосолей Дарасунского золоторудного месторождения в Забайкалье (Брызгалов и др., 2011).

Филротит PbAs_3S_5 установлен в карбонатных брекчиях (ассоциации №№ 1 и 3), где слагает редкие короткопризматические кристаллы до 70×15 мкм в кальците и доломите (рис. 19д). В редких случаях филротит сростается с лорандитом, реальгаром и округлыми зернами золота. Минерал имеет черный цвет, непрозрачен. Отражательная способность умеренная ($R = 25.4\text{--}27.2\%$ при $\lambda = 548.3$ нм (Bindi et al., 2014)), при одном николе он выглядит светло-серым, чуть темнее лорандита ($R = 28\text{--}33\%$), но светлее реальгара ($R = 19\text{--}21\%$). Двухотражение в воздухе заметное. В скрещенных николях минерал сильно анизотропен в светло-серых и коричневых тонах. Химический состав филротита приведен в табл. 1, ан. 106; параметры моноклинной элементарной ячейки – в табл. 2, № 33. Ранее минерал был известен в рудах месторождения Ленгенбах.

Халькостибит CuSbS_2 установлен В.Н. Сазиновым с соавторами (1991) в виде выделений размером $0.05\text{--}0.2$ мм, нарастающих на крупные (до 5 мм) агрегаты антимонита в известняковых брекчиях. Химический состав минерала строго стехиометричен.

Хатчинсонит PbAs_3S_9 – редкий минерал, установленный нами в ассоциациях №№ 1, 2 и 3, причем в каждой из них он морфологически индивидуален. В первой из них минерал слагает кустовидные агрегаты размером до 0.2×0.1 мм в кальцит-пренитовой породе и наблюдается совместно с пиритом, реальгаром, дальнегроитом, золотом, рутьеритом, сфалеритом, баритом и фторapatитом (рис. 19е). Во второй ассоциации хатчинсонит образует длиннопризматические до игольчатых кристаллы размером до 50×5 мкм в кальците, иногда в сростках с реальгаром и вакабаяшилито (рис. 19ж). В ассоциации № 3 хатчинсонит образует вкрапленность очень мелких зерен (не более 15 мкм) в кальците.

Минерал вишнево-красного цвета, с алмазным блеском, в шлифах просвечивает. Наблюдается отчетливая спайность по $\{010\}$. В отраженном свете хатчинсонит голубовато-серый, двухотражение отчетливое; в скрещенных николях – сильно анизотропен в голубоватых и буроватых тонах.

Внутренние рефлексы карминно-красного цвета, особенно хорошо заметны в иммерсии. В составе хатчинсонита из всех ассоциаций фиксируется небольшая примесь Sb (табл. 1, ан. 107–109). Параметры ромбической элементарной ячейки даны в табл. 2, № 34. В КР спектре (рис. 3ж) диапазон $280\text{--}400$ см^{-1} отвечает валентным колебаниям связей As–S. Более низкочастотные полосы не имеют однозначного отнесения и связаны со смешанными решеточными модами с участием деформационных колебаний связей As–S, а также валентных колебаний координационных полиэдров Pb и Pb (эти колебания могут резонировать друг с другом и охватывать большие области в кристалле).

Цинкениит $\text{Pb}_9\text{Sb}_{22}\text{S}_{42}$ впервые описан В.Н. Сазиновым с соавторами (1991) в виде игольчатых кристаллов или ксеноморфных агрегатов размером до $0.2\text{--}0.3$ мм в карбонатных брекчиях. Он часто сростается с антимонитом, выполняет микротрещины в арсенопирите, содержит вросстки реальгара. Минерал диагностирован по химическому составу и оптическим свойствам. Позднее цинкениит отмечался в виде угловатых частиц и игольчатых кристаллов размером менее 1 мм и гнезд до 2 см, сложенных спутанно-волоконистыми агрегатами в мраморизованных известняках, на которые наложено скарирование и окварцевание. Иногда он содержит изоморфную примесь As до 7.6 мас. % (Викентьев и др., 2016).

В коллекции первого автора настоящей работы находится изученный образец воронцовского цинкениита (№ 287Ц) из сборов начала 1990-х г., соответствующий приведенному выше описанию и, по всей видимости, происходящий из той же ассоциации (рис. 6з). Химический состав этого образца и параметры его гексагональной элементарной ячейки даны в табл. 1 (ан. 110) и 2 (№ 35), соответственно. Кроме того, As-содержащий цинкениит установлен в ассоциации № 1 (табл. 1, ан. 111) в виде округлых зерен размером до 0.2 мм в карбонатах и в ассоциации № 4 (табл. 1, ан. 112) в виде игольчатых кристаллов до 1 мм в кварц-карбонатной породе, включений овальной формы до 0.1 мм в реальгаре и самородном мышьяке, мелких сростков с колорадоитом и пиритом. В первом случае цинкениит ассоциирует с акташитом, антимонитом, аурипигментом, минералами ряда боскардинит–эксансит, парапьерротитом, рутьеритом, хатчинсонитом, шабурнеитом, пиритом, магнетитом, баритом и др. Во второй ассоциации спутниками цинкениита являются акташит, андорит, киноварь, рутьерит,

Hg-содержащий сфалерит и теннантит-(Zn). В отраженном свете цинкениит белый, двуотражение и анизотропия отчетливые, особенно в иммерсии. Внутренние рефлексии красного цвета.

Цнигриит $\text{Ag}_9\text{SbTe}_3\text{S}_3$ установлен при электронно-зондовом исследовании кальцит-доломит-кварцевых агрегатов с галенитом и сфалеритом в образцах, отобранных на складе забалансовых руд № 2. Цнигриит образует включения до 30 мкм в галените и ассоциирует с бенлеонардитом, геокронитом и гесситом (рис. 1г). Химический состав его близок к идеальному (табл. 1, ан. 113). Отражательная способность цнигриита ниже, чем у вмещающего галенита и примерно равна таковой у бенлеонардита, что соответствует справочным литературным данным для этих минералов ($R = 32.2\text{--}36.6\%$ (при $\lambda = 546\text{ нм}$) у цнигриита (Сандомирская и др., 1992), $32.3\text{--}33.6\%$ (при $\lambda = 550\text{ нм}$) у бенлеонардита (Stanley et al., 1986) и 44% у галенита). На фоне белого галенита цнигриит выглядит светло-серым со слабым зеленовато-голубым оттенком. В скрещенных николях он анизотропен, в коричневых и сероватых тонах. В Российской Федерации цнигриит отмечался в виде единичных микровключений в галените из руд золото-полиметаллического месторождения Березитовое в Амурской области (Vakh et al., 2016; Вах и др., 2019).

Цыганкоит $\text{Mn}_8\text{Tl}_8\text{Hg}_2(\text{Sb}_{21}\text{Pb}_2\text{Tl})\text{S}_{48}$ – открытый нами новый минерал с уникальным набором видообразующих элементов – Mn, Tl, Hg, Sb, Pb и S (Kasatkin et al., 2018b). Он назван в честь минералога-любителя, коллекционера из Североуральска, создателя минералогического музея «Штуфной кабинет» и одного из авторов данной работы М.В. Цыганко (1979 г. р.). Множество описанных нами редких минеральных видов, включая цыганкоит, были обнаружены в собранных им образцах. Минерал слагает удлиненные дощковидные кристаллы до 0.2 мм в нерудной массе карбонатных брекчий (доломит, кальцит, клинохлор), сцементированных арсенопиритом, пиритом, реальгаром и аурипигментом (рис. би), нередко образует частичные псевдоморфозы по алабандину (рис. 19з) и сростки с рутьеритом и сфалеритом.

Цыганкоит непрозрачный, имеет черные цвет и черту, металлический блеск; минерал хрупкий, с неровным изломом. Спайность отсутствует. Микротвердость по Виккерсу 144 кг/мм^2 , что соответствует ~ 3 по шкале Мооса. Расчетная плотность 5.450 г/см^3 . Дисперсия отражательной способности нормального типа. Спектры отражения приведе-

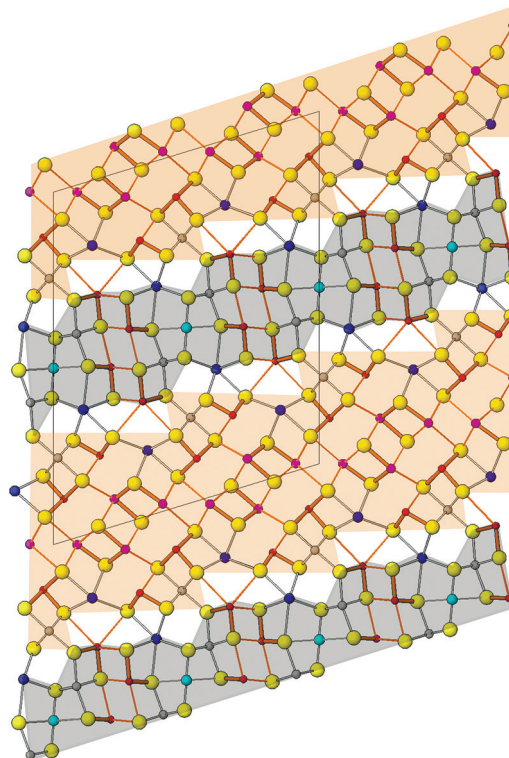


Рис. 20. Кристаллическая структура цыганкоита в проекции на плоскость (010).

Желтое, синие, бирюзовое, красное, лиловое и серое – атомы S, Tl, Hg, Sb и (Sb,As), (Sb,Pb,Tl) и Mn, соответственно. Широкие оранжевые линии – короткие прочные Sb–S связи, тонкие линии – более длинные межатомные связи. Остальные катион-анионные связи соответствуют расстояниям, определяющим завершённый координационный полиэдр. Ось *c* ориентирована вертикально и слегка наклонена.

Fig. 20. Crystal structure of tsygankoite in projection on plane (010).

Yellow, blue, turquoise, red, lilac and gray – atoms of S, Tl, Hg, Sb and (Sb,As), (Sb,Pb,Tl) and Mn, respectively. Thick orange lines – short strong Sb–S bonds, thin lines – longer distances. Other cation-anion bonds correspond to distances defining the complete coordination polyhedron. Axis *c* is vertical and slightly inclined.

ны на рис. 2. Коэффициенты отражения для длин волн, рекомендованных Комиссией по рудной минералогии ММА ($R_{\min} / R_{\max}, \%$): $31.9 / 33.1$ (470 нм), $31.2 / 32.4$ (546 нм), $30.2 / 31.6$ (589 нм), $28.7 / 29.8$ (650 нм). При одном никеле минерал выглядит белым на фоне замещающего алабандина ($R = 23\%$), но светло-серым на контакте с пиритом ($R = 54\%$) и арсенопиритом ($R = 52\text{--}53\%$). В сростках с рутьеритом ($R = 28\text{--}30\%$) и сфалеритом ($R = 18\%$) цыганкоит белый, чуть светлее первого и существенно светлее второго. Двуотражение в воздухе слабое, от

белого к бледно-желтому; в иммерсии отчетливое. В скрещенных николях минерал обладает сильной анизотропией в серовато-белых и розовато-серых тонах; внутренние рефлексы редкие, светло-серой окраски.

Химический состав голотипа приведен в табл. 1, ан. 114. Его эмпирическая формула (расчет на сумму 90 атомов): $Mn_{8.06}Pb_{8.00}Hg_{1.90}(Sb_{17.87}As_{3.19}Pb_{1.99}Tl_{0.97})_{\Sigma 24.02}S_{48.03}$. Цыганкоит кристаллизуется в моноклинной сингонии, пространственная группа $C2/m$, $Z = 1$. Параметры элементарной ячейки даны в табл. 2, № 36. Главные линии рентгенограммы [d , Å (I , %) (hkl): 3.587(100)(112), 3.353(70)(-114), 3.204(88)(405), 2.841(72)(-513) и 2.786(99)(-514). Кристаллическая структура цыганкоита (рис. 20) содержит 11 кристаллографически неэквивалентных позиций атомов металлов и полуметаллов (четыре из которых являются смешанно-заселенными) и 12 неэквивалентных позиций атомов S.

Энардит Cu_3AsS_4 отмечен в золото-пирит-реальгаровой ассоциации (Викентьев и др., 2016). Приведенные авторами этой работы химические анализы, однако, могут характеризовать минеральную смесь.

Недостаточно изученные сульфосоли

Фаза I состава Mn-Ag-Pb-Tl-As-Sb-S (табл. 1, ан. 125) встречается в ассоциациях №№ 1 и 2. В первой из них она образует сростки с акташитом и зерна на контакте акташита и Mn-Hg-содержащего сфалерита. Максимальный размер выделений составляет 0.18×0.1 мм (рис. 1а). Во второй ассоциации эта фаза слагает мелкие включения (до 10 мкм) в реальгаре и агрегатах карбонатов. Возможно, фаза I является Mn,Ag-содержащей разновидностью экрансита.

Фаза II приблизительного состава $MnPbAg_2Sb_4As_2S_{12}$ (табл. 1, ан. 126) установлена нами в ассоциациях №№ 1 и 5 в виде 100-мкм сростков с боскардинитом (рис. 19и) и изометричных зерен до 20 мкм, заключенных в пирите. Цвет черный, блеск металлический. В отраженном свете фаза белая, двуотражение очень слабое; в скрещенных николях – сильно анизотропная в светло-серых и розовато-коричневых тонах. Внутренние рефлексы не наблюдаются. Коэффициенты отражения для длин волн, рекомендованных Комиссией по рудной минералогии ММА (R_{min}/R_{max} , %) : 33.8 / 34.4 (470 нм), 32.8 / 33.6 (546 нм), 32.0 / 32.9 (589 нм), 30.5/31.5 (650 нм). По химическому со-

ставу и стехиометрии имеет определенное сходство с ойонитом, но содержит почти вдвое меньше Pb.

Заключение

Таким образом, к настоящему времени на Воронцовском золоторудном месторождении на Северном Урале установлен 71 минеральный вид класса сульфосолов, из которых восемь минеральных видов открыты впервые (ауэрбахит, воронцовит, гладковскийит, гунгерит, люборжакит, походяшинит, ферроворонцовит, цыганкоит) и 31 вид охарактеризован впервые для Российской Федерации: арсиччиоит, бенавидесит, бернардит, боскардинит, веенит, вейсбергит, врбаит, гептасарторит, гетероморфит, геттардит, гиллулит, дальнегроит, дрехслерит, зихерит, имхофит, кристит, купрополибазит, лаффитит, лорандит, манганоквадратит, новацкиит, ойонит, парапьерротит, ребулит, рощинит, твиннит, филротит, хатчинсонит, штальдерит, экрансит и эннеасарторит.

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

Литература

Безмертная М.С., Козеренко С.В., Колпакова Н.Н. (1973) Зелигманит и синнерит из Эльбрусского полиметаллического месторождения. Исследования в области рудной минералогии. Москва, Наука, 5–14.

Брызгалов И.А., Кривицкая Н.Н., Спиридонов Э.М. (2011) Первая находка минералов ряда иорданит-геокронит-шульцит на одном месторождении (Дарасун, Восточное Забайкалье). *Доклады Академии наук*, **438**(5), 635–638.

Вах А.С., Авченко О.В., Гвоздев В.И., Горячев Н.А., Карабцов А.А., Вах Е.А. (2019) Минералы Pb-As-Sb-S и Cu-Pb-As-Sb-S систем в рудах золото-полиметаллического месторождения Березитовое (Верхнее Приамурье, Россия). *Геология рудных месторождений*, **61**(3), 64–84.

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.

Гвоздев В.И., Гребенникова А.А., Вах А.С., Горячев Н.А., Федосеев Д.Г. (2020) Эволюция процессов минералообразования при формировании золото-редкометалльных руд Средне-Голготайского месторождения (Восточное Забайкалье). *Тихоокеанская геология*, **39**(1), 70–91.

- Груздев В.С., Степанов В.И., Шумкова Н.Г., Черницова М.М., Юдин Р.Н., Брызгалов И.А.** (1972) Галхаит $HgAsS_2$ – новый минерал из мышьяково-сурьмяно-ртутных месторождений СССР. *Доклады АН СССР*, **205**(5), 1194–1197.
- Ефимов А.В.** (1993) Висмутовая минерализация оловянных и вольфрамовых месторождений (на примере месторождений Аляскитового, Невского и Акчатау). *Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук*. Москва, 25 с.
- Иващенко В.И., Ручьев А.М., Лавров О.Б., Кондрашова Н.И., Терновой А.Н.** (2004) Эндогенная золоторудная система Суйстамского plutонического комплекса (Северное Приладожье). *Геология и полезные ископаемые Карелии*, **7**, 127–146.
- Касаткин А.В., Паутов Л.А.** (2020) Оптические свойства воронцовита и ферроворонцовита: новые данные. *Новые данные о минералах*, **54**(2), 69–72.
- 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.** (2021) Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 2: Простые вещества, сульфиды, арсениды, теллуриды. *Минералогия*, **7**(1), 5–22.
- Кемкина Р.А., Кемкин И.В., Ханчук А.И., Иванов В.В.** (2018) Первая находка минералов редкометалльных элементов на Албазинском золоторудном месторождении. *Доклады Академии наук*, **481**(3), 300–304.
- Мелков В.Г., Белова Л.Н., Горшков А.И., Иванова О.А., Сивцов А.В., Боронихин В.А.** (1983) Новые данные о лермонтовите. *Минералогический журнал*, **55**(1), 82–87.
- Минералогия Урала (1990) Элементы. Карбиды. Сульфиды. Свердловск, УрО АН СССР, 390 с.
- Минералогия Урала (1991) Арсениды и стибниды. Теллуриды. Селениды. Фториды. Хлориды и бромиды. Свердловск, УрО АН СССР, 215 с.
- Минералы СССР (1940). Том II. Сульфиды, сульфосоли и подобные им соединения. Москва–Ленинград, АН СССР, 748 с.
- Мозгова Н.Н., Бородаев Ю.С., Сендерова В.М., Ронами Г.Н., Яковлевская Т.А.** (1971) О находке гетероморфита в коллекции Минералогического музея АН СССР. *Труды Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана*, **20**, 114–119.
- Мурзин В.В., Бушмакин А.Ф., Суставов С.Г., Щербачев Д.К.** (1996) Клерит $MnSb_2S_4$ – новый минерал из Воронцовского золоторудного месторождения (Урал). *Записки ВМО*, **125**(3), 95–101.
- Мурзин В.В., Варламов Д.А.** (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 арсениопирита на Воронцовском золоторудном месторождении (Северный Урал). *Вестник Уральского отделения РМО*, **8**, 80–87.
- Попов В.А., Колисниченко С.В.** (2008) К минералогии карбонатитов Русской Бразилии на Южном Урале. *Уральский минералогический сборник*, **15**, 75–84.
- Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А., Гладковский Б.А.** (1991) Эндогенное оруденение девонского андезитовидного вулканоплутонического комплекса (Урал). Свердловск, УрО АН СССР, 184 с.
- Сандомирская С.М., Арифулов Ч.Х., Ботова М.М., Мозгова Н.Н., Ненашева С.Н., Цепин А.И., Сивцов А.В.** (1992) Цнигриит $Ag_9SbTe_3(S,Se)_3$ – новый минерал. *Записки ВМО*, **121**(5), 95–101.
- Спиридонов Э.М., Петрова И.В., Дашевская Д.М., Балашов Е.П., Климова Л.М.** (1990) Рошинит $Ag_{19}Pb_{10}Sb_{51}S_{96}$ – новый минерал группы андрита. *Записки ВМО*, **119**(5), 32–43.
- Чвилева Т.Н., Безсмертная М.С., Спиридонов Э.М., Агроскин А.С., Папаян Г.В., Виноградова Р.А., Лебедева С.И., Завьялов Е.Н., Филимонова А.А., Петров В.К., Раутиан Л.П., Свешникова О.Л.** (1988) Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете. М., Недра, 504 с.
- Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И., Науменко П.И., Кутний В.А.** (1986) Грязевые вулканы Керченско-Таманской области (атлас). Киев, Наукова думка, 152 с.
- Anastassakis E., Perry C.H.** (1976) Light scattering and IR measurements in XS_2 pyrite-type compounds. *The Journal of Chemical Physics*, **64**, 3604–3609.
- Balić-Zunić T., Šćavnićar S., Engel P.** (1982) The crystal structure of rebulite, $Tl_5As_8Sb_5S_{22}$. *Zeitschrift für Kristallographie*, **160**, 109–125.
- Biagioni C., Bonaccorsi E., Moëlo Y., Orlandi P., Bindi L., D’Orazio M., Vezzoni S.** (2014) Mercury-arsenic sulfosalts from Apuan Alps (Tuscany, Italy). III. Arsiccioite, $AgHg_2TlAs_2S_6$, a new mineral from the Monte Arsiccio mine: occurrence, crystal structure, and crystal chemistry of the routhierite isotopic series. *Mineralogical Magazine*, **78**, 101–117.
- Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moëlo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F.** (2020) The tetrahedrite group: nomenclature and classification. *American Mineralogist*, **105**, 109–122.
- Biagioni C., Moëlo Y.** (2017) Lead-antimony sulfosalts from Tuscany (Italy). XVIII. New data on the crystal-chemistry of boscardinite. *Mineralogical Magazine*, **81**, 47–60.

- Biagioni C., Moëlo Y., Favreau G., Bourgoïn V., Boulliard J.-C.** (2015) Crystal structure of Pb-rich chabournéite from Jas Roux, France. *Acta Crystallographica*, **71**, 81–88.
- Bindi L., Biagioni C., Keutsch F.N.** (2018) Oyonite, $\text{Ag}_3\text{Mn}_2\text{Pb}_4\text{Sb}_7\text{As}_4\text{S}_{24}$, a new member of the lillianite homologous series from the Uchucchacua base-metal deposit, Oyon district, Peru. *Minerals*, **8**, 192.
- Bindi L., Nestola F., Guastoni A., Secco L.** (2010) The crystal structure of dalnegroite, $\text{Tl}_{5-x}\text{Pb}_{2x}(\text{As},\text{Sb})_{21-x}\text{S}_{34}$: a masterpiece of structural complexity. *Mineralogical Magazine*, **74**, 999–1012.
- Bindi L., Nestola F., Makovicky E., Guastoni A., de Battisti L.** (2014) Tl-bearing sulfosalts from the Lengenbach quarry, Binn valley, Switzerland: philrothite, TlAs_3S_5 . *Mineralogical Magazine*, **78**, 1–9.
- Bonazzi P., Bindi L., Keutsch F.N.** (2012) Manganocubite, AgMnAsS_3 , a new manganese-bearing sulfosalts from the Uchucchacua polymetallic deposit, Lima Department, Peru: description and crystal structure. *American Mineralogist*, **97**, 1199–1205.
- Burri G., Graeser S., Marumo F., Nowacki W.** (1965) Imhofit, ein neues Thallium-arsensulfosalz aus dem Lengenbach (Binnental, Kanton Wallis). *Chimia*, **19**, 499–500. (in German)
- Dincă G., Popescu G.C.** (2019) Manganocubite and Cd-manganocubite from Săcărâmb Au-Ag-Te ore deposit, Metaliferi Mountains, Romania. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, **14**(1), 131–136.
- Engel P.** (1980) Die Kristallstruktur von synthetischem Parapirotit, TlSb_5S_8 . *Zeitschrift für Kristallographie*, **151**, 203–216. (in German)
- Fleet M.E.** (1973) The crystal structure and bonding of lorandite, $\text{Tl}_2\text{As}_2\text{S}_4$. *Zeitschrift für Kristallographie*, **138**, 147–160.
- Forneris R.** (1969) Infrared and Raman spectra of realgar and orpiment. *American Mineralogist*, **54**(7–8), 1062–1074.
- Frost R.L., Bahfenne S., Keeffe E.C.** (2010) Raman spectroscopic study of the mineral gerstleyite $\text{Na}_2(\text{Sb},\text{As})_8\text{S}_{13} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and comparison with some heavy-metal sulfides. *Journal of Raman Spectroscopy*, **41**(12), 1779–1783.
- Gostojić M., Edenharter A., Nowacki W., Engel P.** (1982) The crystal structure of synthetic $\text{Tl}_2\text{MnAs}_2\text{S}_5$. *Zeitschrift für Kristallographie*, **158**, 43–51.
- Graeser S., Berlepsch P., Makovicky E., Balić-Zunić T.** (2001) Sicherite, $\text{TlAg}_2(\text{As},\text{Sb})_3\text{S}_6$, a new sulfosalts mineral from Lengenbach (Binnental, Switzerland): description and structure determination. *American Mineralogist*, **86**, 1087–1093.
- Graeser S., Schwander H., Wulf R.** (1995) Stalderite $\text{TlCu}(\text{Zn},\text{Fe},\text{Hg})_2\text{As}_2\text{S}_6$ – a new mineral related to routhierite: description and crystal structure determination. *Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen*, **75**, 337–345.
- Johan Z., Mantienne J., Picot P.** (1981) La chabournéite, un nouveau minéral thallifère. *Bulletin de Minéralogie*, **104**, 10–15 (in French).
- Kasatkin A.V., Nestola F., Agakhanov A.A., Škoda R., Karpenko V.Y., Tsyganko M.V., Plášil J.** (2018a) Vorontsovite, $(\text{Hg}_5\text{Cu})_{\Sigma 6}\text{TlAs}_4\text{S}_{12}$, and ferrovorontsovite, $(\text{Fe}_5\text{Cu})_{\Sigma 6}\text{TlAs}_4\text{S}_{12}$: The Tl- and Tl-Fe-analogues of galkhaite from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Minerals*, **8**, paper 185.
- Kasatkin A.V., Makovicky E., Plášil J., Škoda R., Agakhanov A.A., Karpenko V.Y., Nestola F.** (2018b) Tsygankoite, $\text{Mn}_8\text{Tl}_8\text{Hg}_2(\text{Sb}_{21}\text{Pb}_2\text{Tl})_{\Sigma 24}\text{S}_{48}$, a new sulfosalts from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Minerals*, **8**, paper 218.
- Kasatkin A.V., Makovicky E., Plášil J., Škoda R., Chukanov N.V., Stepanov S.Y., Agakhanov A.A., Nestola F.** (2019) Gladkovskyite, $\text{MnTlAs}_3\text{S}_6$, a new thallium sulfosalts from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Journal of Geosciences*, **64**(3), 207–218.
- Kasatkin A.V., Makovicky E., Plášil J., Škoda R., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y., Palamarchuk R.S.** (2020a) Luboržákite, $\text{Mn}_2\text{AsSbS}_5$, a new member of pavonite homologous series from Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Mineralogical Magazine*, **84**(5), 738–745.
- Kasatkin A.V., Makovicky E., Plášil J., Škoda R., Agakhanov A.A., Tsyganko M.V.** (2020b) Pokhodyashinite, IMA 2019–130. CNMNC Newsletter No. 55. *Mineralogical Magazine*, **84**(3), 485–488.
- Kasatkin A.V., Plášil J., Makovicky E., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y., Palamarchuk R.S.** (2021a) Auerbachite, $\text{MnTl}_2\text{As}_2\text{S}_5$, a new thallium sulfosalts from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Journal of Geosciences*, **66**(2), DOI: 10.3190/jgeosci.321.
- Kasatkin A.V., Plášil J., Makovicky E., Hornfeck W., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Tsyganko M.V.** (2021b) Gungerite, $\text{TlAs}_5\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, a new thallium sulfosalts with a giant structure containing covalent As–As bonds. *American Mineralogist*, accepted
- Kharbish S.** (2011) Raman spectroscopic investigations of some Tl-sulfosalts minerals containing pyramidal $(\text{As},\text{Sb})\text{S}_3$ groups. *American Mineralogist*, **96**(4), 609–616.
- Kharbish S., Libowitzky E., Beran A.** (2009) Raman spectra of isolated and interconnected pyramidal XS_3 groups (X = Sb, Bi) in stibnite, bismuthinite, kermesite, stephanite and bournonite. *European Journal of Mineralogy*, **21**(2), 325–333.
- Makovicky E.** (2019) Algorithms for calculations of homologue order N in the homologous series of sulfosalts. *European Journal of Mineralogy*, **31**, 83–97.
- Makovicky E., Plášil J., Kasatkin A.V., Škoda R.** (2021) The crystal structure of $\text{Tl}_{2.355}\text{Sb}_{5.984}\text{As}_{4.591}\text{S}_{17}$, the lead-free end-member of the chabournéite homeotypic family. *The Canadian Mineralogist*, in press.

- Makreski P., Jovanovski G., Boev B.** (2014) Micro-Raman spectra of extremely rare and endemic Tl-sulfosalts from Allchar deposit. *Journal of Raman Spectroscopy*, **45**(7), 610–617.
- Minceva-Sukarova B., Jovanovski G., Makreski P., Soptrajanov B., Griffith W., Willis R., Grzetic I.** (2003) Vibrational spectra of $M^I M^{III} S_2$ type synthetic minerals ($M^I = \text{Tl}$ or Ag and $M^{III} = \text{As}$ or Sb). *Journal of Molecular Structure*, **651–653**, 181–189.
- Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N.N., Jambor J.L., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel E.H., Graeser S., Karup-Möller 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 sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. *European Journal of Mineralogy*, **20**, 7–46.
- Moëlo Y., Marcoux E., Makovicky E., Karup-Möller S., Legendre O.** (1987) Homologues de la lillianite (gustavite, vikingite, heyrovskyite riche en Ag et Bi...) de l'indice à W-As-(Pb,Bi,Ag) de La Roche-Baluc (Loire Atlantique, France). *Bulletin de Minéralogie*, **110**, 43–64. (in French)
- Nestola F., Guastoni A., Bindi L., Secco L.** (2009) Dalnegroite, $\text{Tl}_{5-x}\text{Pb}_{2x}(\text{As,Sb})_{21-x}\text{S}_{34}$, a new thallium sulfosalt from Lengenbach quarry, Binntal, Switzerland. *Mineralogical Magazine*, **73**(6), 1027–1032.
- Orlandi P., Biagioni C., Bonaccorsi E., Moëlo Y., Paar W.H.** (2012) Lead-antimony sulfosalts from Tuscany (Italy). XII. Boscandinite, $\text{TlPb}_4(\text{Sb}_7\text{As}_2)_{\Sigma 9}\text{S}_{18}$, a new species from Monte Arsiccio mine: occurrence and crystal structure. *Canadian Mineralogist*, **50**, 235–251.
- Orlandi P., Biagioni C., Moëlo Y., Bonaccorsi E., Paar W.H.** (2013) Lead-antimony sulfosalts from Tuscany (Italy). XIII. Protochabournéite, $\sim \text{Tl}_2\text{Pb}(\text{Sb}_{9-8}\text{As}_{1-2})_{\Sigma 10}\text{S}_{17}$, from the Monte Arsiccio mine: occurrence, crystal structure and relationship with chabournéite. *Canadian Mineralogist*, **51**, 475–494.
- Plášil J., Kasatkin A. V., Škoda R., Stepanov S. Yu.** (2018) Parapirotite from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia: crystal structure and chemical composition. *Записки ПМО*, **147**(1), 68–78.
- Roth P., Raber T., Favreau G., Meisser N.** (2017) Thallium sulfosalts from the Shimen As-deposit, Hunan, China. *Mineral Up*, **4**(6), 8–22.
- Stanley C.J., Criddle A.J., Chisholm J.E.** (1986) Benleonardite, a new mineral from the Bambolla mine, Moctezuma, Sonora, Mexico. *Mineralogical Magazine*, **50**, 681–686.
- Thomas R., Davidson P.** (2010) Hambergite-rich melt inclusions in morganite crystals from the Muiane pegmatite, Mozambique and some remarks on the paragenesis of hambergite. *Mineralogy and Petrology*, **100**(3–4), 227–239.
- Topa D., Graeser S., Stoeger B., Raber T., Stanley C.** (2019) Drechslerite, IMA 2019-061. CNMNC Newsletter No. 52. *Mineralogical Magazine*, **83**(6), 887–893.
- Topa D., Kolitsch U.** (2018) The crystal chemistry of rathite based on new electron-microprobe data and single-crystal structure refinements: the role of thallium. *Minerals*, **8**, 466.
- Topa D., Kolitsch U., Makovicky E., Stanley C.** (2017a) Écrinsite, $\text{AgTl}_3\text{Pb}_4\text{As}_{11}\text{Sb}_9\text{S}_{36}$, a new thallium-rich homeotype of baumhauerite from the Jas Roux sulphosalt deposit, Parc national des Écrins, Hautes-Alpes, France. *European Journal of Mineralogy*, **29**, 689–700.
- Topa D., Makovicky E.** (2017) The crystal structure of veenite. *Mineralogical Magazine*, **81**, 355–368.
- Topa D., Makovicky E., Putz H., Zagler G.** (2013) Lopatkaite, IMA 2012–083. CNMNC Newsletter No. 15, February 2013, page 11. *Mineralogical Magazine*, **77**, 1–12.
- Topa D., Makovicky E., Stöger B., Stanley C.** (2017b) Heptasartorite, $\text{Tl}_7\text{Pb}_{22}\text{As}_{55}\text{S}_{108}$, enneasartorite, $\text{Tl}_6\text{Pb}_{32}\text{As}_{70}\text{S}_{140}$ and hendekasartorite, $\text{Tl}_2\text{Pb}_{48}\text{As}_{82}\text{S}_{172}$, three members of the anion-omission series of «sartorites» from the Lengenbach quarry at Binntal, Wallis, Switzerland. *European Journal of Mineralogy*, **29**, 701–712.
- Vakh A.S., Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M.** (2016) The Berezitovoe gold-polymetallic deposit (Upper Amur region, Russia): Structure, mineralogy and genetic aspects. *Geoscience Frontiers*, **7**(3), 483–494.
- Wilson J.R., Robinson P.D., Wilson P.N., Stanger L.W., Salmon G.L.** (1991) Gillulyite, $\text{Tl}_2(\text{As,Sb})_8\text{S}_{13}$, a new thallium arsenic sulfosalt from the Mercur gold deposit, Utah. *American Mineralogist*, **76**, 653–656.

References

- Anastassakis E., Perry C.H.** (1976) Light scattering and IR measurements in XS_2 pyrite-type compounds. *The Journal of Chemical Physics*, **64**, 3604–3609.
- Balic-Žunic T., Šćavničar S., Engel P.** (1982) The crystal structure of rebulite, $\text{Tl}_5\text{As}_8\text{Sb}_5\text{S}_{22}$. *Zeitschrift für Kristallographie*, **160**, 109–125.
- Bezsmertnaya M.S., Kozerenko S.V., Kolkpaka N.N.** (1973) [Seligmannite and sinnerite from the Elbruss polymetallic deposit]. In: *Issledovaniya v oblasti rudnoy mineralogii [Researches in Area of Ore Mineralogy]*. Moscow, Nauka, 5–14. (in Russian)
- Biagioni C., Bonaccorsi E., Moëlo Y., Orlandi P., Bindi L., D'Orazio M., Vezzoni S.** (2014) Mercury-arsenic sulfosalts from Apuan Alps (Tuscany, Italy). III. Arsiccioite, $\text{AgHg}_2\text{TlAs}_2\text{S}_6$, a new mineral from the Monte Arsiccio mine: occurrence, crystal structure, and crystal chemistry of the routhierite isotypic series. *Mineralogical Magazine*, **78**, 101–117.
- Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moëlo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F.** (2020) The tetrahedrite group: nomenclature and classification. *American Mineralogist*, **105**, 109–122.

- Biagioni C., Moëlo Y.** (2017) Lead-antimony sulfosalts from Tuscany (Italy). XVIII. New data on the crystal–chemistry of boscardinite. *Mineralogical Magazine*, **81**, 47–60.
- Biagioni C., Moëlo Y., Favreau G., Bourgoïn V., Boulliard J.-C.** (2015) Crystal structure of Pb-rich chabournéite from Jas Roux, France. *Acta Crystallographica*, **71**, 81–88.
- Bindi L., Biagioni C., Keutsch F.N.** (2018) Oyonite, $\text{Ag}_3\text{Mn}_2\text{Pb}_4\text{Sb}_7\text{As}_4\text{S}_{24}$, a new member of the lillianite homologous series from the Uchucchacua base-metal deposit, Oyon district, Peru. *Minerals*, **8**, 192.
- Bindi L., Nestola F., Guastoni A., Secco L.** (2010) The crystal structure of dalnegroite, $\text{Tl}_{5-x}\text{Pb}_{2x}(\text{As,Sb})_{21-x}\text{S}_{34}$: a masterpiece of structural complexity. *Mineralogical Magazine*, **74**, 999–1012.
- Bindi L., Nestola F., Makovicky E., Guastoni A., de Battisti L.** (2014) Tl-bearing sulfosalt from the Lengenbach quarry, Binn valley, Switzerland: philrothite, TlAs_3S_5 . *Mineralogical Magazine*, **78**, 1–9.
- Bonazzi P., Bindi L., Keutsch F.N.** (2012) Manganocubite, AgMnAsS_3 , a new manganese-bearing sulfosalt from the Uchucchacua polymetallic deposit, Lima Department, Peru: description and crystal structure. *American Mineralogist*, **97**, 1199–1205.
- Bryzgalov I.A., Krivitskaya N.N., Spiridonov E.M.** (2011) [First find of the minerals of jordanite-geocronite-schulzite in one deposit (Darasun, Eastern Transbaikalia)]. *Doklady Academi of Sciences*, **438**, 815–818.
- Burri G., Graeser S., Marumo F., Nowacki W.** (1965) Imhofit, ein neues Thallium–arsensulfosalz aus dem Lengenbach (Binnatal, Kanton Wallis). *Chimia*, **19**, 499–500. (in German)
- Chvileva T.N., Bezmertnaya M.S., Spiridonov E.M., Agroskin A.S., Papayan G.V., Vinogradova R.A., Lebedeva S.I., Zav’yalov E.N., Filimonova A.A., Petrov V.K., Rautian L.P., Sveschnikova O.L.** (1988) [Handbook of ore minerals in reflected light]. M., Nedra, 504 p. (in Russian).
- Dincă G., Popescu G.C.** (2019) Manganocubite and Cd-manganocubite from Săcărâmb Au-Ag-Te ore deposit, Metaliferi Mountains, Romania. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, **14**(1), 131–136.
- Engel P.** (1980) Die Kristallstruktur von synthetischem Parapierrotit, TlSb_5S_8 . *Zeitschrift für Kristallographie*, **151**, 203–216. (in German)
- Efimov A.V.** (1993) [Bismuth mineralization of tin and tungsten deposits (Alyaskitovoe, Nevskoe, Akchatau)]. *Abstract of PhD Thesis*. Moscow, 25 p. (in Russian)
- Fleet M.E.** (1973) The crystal structure and bonding of lorandite, $\text{Tl}_2\text{As}_2\text{S}_4$. *Zeitschrift für Kristallographie*, **138**, 147–160.
- Forneris R.** (1969) Infrared and Raman spectra of realgar and orpiment. *American Mineralogist*, **54**(7–8), 1062–1074.
- Frost R.L., Bahfenne S., Keeffe E.C.** (2010) Raman spectroscopic study of the mineral gerstleyite $\text{Na}_2(\text{Sb,As})_8\text{S}_{13} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and comparison with some heavy-metal sulfides. *Journal of Raman Spectroscopy*, **41**(12), 1779–1783.
- Gostojić M., Edenharter A., Nowacki W., Engel P.** (1982) The crystal structure of synthetic $\text{Tl}_2\text{MnAs}_2\text{S}_5$. *Zeitschrift für Kristallographie*, **158**, 43–51.
- Graeser S., Berlepsch P., Makovicky E., Balić-Zunić T.** (2001) Sicherite, $\text{TlAg}_2(\text{As,Sb})_3\text{S}_6$, a new sulfosalt mineral from Lengenbach (Binnatal, Switzerland): description and structure determination. *American Mineralogist*, **86**, 1087–1093.
- Graeser S., Schwander H., Wulf R.** (1995) Stalderite $\text{TlCu}(\text{Zn,Fe,Hg})_2\text{As}_2\text{S}_6$ – a new mineral related to routhierite: description and crystal structure determination. *Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen*, **75**, 337–345.
- Gruzdev V.S., Stepanov V.I., Shumkova N.G., Chernitsova M.M., Yudin R.N., Bryzgalov I.A.** (1972) [Galkhaite, HgAsS_2 , a new mineral from arsenic-antimony-mercury deposits of the USSR]. *Doklady AN SSSR [Doklady Academy of Sciences of the USSR]*, **205**(5), 1194–1197. (in Russian)
- Gvozdev V.I., Grebennikova A.A., Vakh A.S., Goryachev N.A., Fedoseev D.G.** (2020) [Mineral evolution during formation of gold-rare-metal ores of Sredne-Golgotay deposit (Eastern Transbaikalia)]. *Russian Journal of Pacific Geology*, **39**(1), 66–86.
- Ivashchenko V.I., Ruch’ev A.M., Lavrov O.B., Kondrashova N.I., Ternovoy A.N.** (2004) [Endogene gold system of Suystam plutonic complex (North Ladoga Region)]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii [Geology and Mineral Deposits of Karelia]*, **7**, 127–146. (in Russian)
- Johan Z., Mantienne J., Picot P.** (1981) La chabournéite, un nouveau minéral thallifère. *Bulletin de Minéralogie*, **104**, 10–15 (in French).
- Kasatkin A.V., Nestola F., Agakhanov A.A., Škoda R., Karpenko V.Y., Tsyganko M.V., Plášil J.** (2018a) Vorontsovite, $(\text{Hg}_5\text{Cu})_{26}\text{TlAs}_4\text{S}_{12}$, and ferrovorontsovite, $(\text{Fe}_5\text{Cu})_{26}\text{TlAs}_4\text{S}_{12}$: The Tl- and Tl-Fe-analogues of galkhaite from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Minerals*, **8**, paper 185.
- Kasatkin A.V., Makovicky E., Plášil J., Škoda R., Agakhanov A.A., Karpenko V.Y., Nestola F.** (2018b) Tsygankoite, $\text{Mn}_8\text{Tl}_8\text{Hg}_2(\text{Sb}_{21}\text{Pb}_2\text{Tl})_{224}\text{S}_{48}$, a new sulfosalt from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Minerals*, **8**, paper 218.
- Kasatkin A.V., Makovicky E., Plášil J., Škoda R., Chukanov N.V., Stepanov S.Y., Agakhanov A.A., Nestola F.** (2019) Gladkovskyite, $\text{MnTlAs}_3\text{S}_6$, a new thallium sulfosalt from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Journal of Geosciences*, **64**(3), 207–218.
- Kasatkin A.V., Makovicky E., Plášil J., Škoda R., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y., Palamarchuk**

- R.S.** (2020a) Luboržákitite, Mn_2AsSbS_5 , a new member of pavonite homologous series from Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Mineralogical Magazine*, **84**(5), 738–745.
- Kasatkin A.V., Makovicky E., Plášil J., Škoda R., Agakhanov A.A., Tsyganko M.V.** (2020b) Pokhodyashinite, IMA 2019–130. CNMNC Newsletter No. 55. *Mineralogical Magazine*, **84**(3), 485–488.
- Kasatkin A.V., Pautov L.A.** (2020) [Optical properties of vorontsovite and ferrovorontsovite: new data]. *Novye dannye o mineralakh [New Data on Minerals]*, **54**(2), 69–72. (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.** (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.** (2021) [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., Plášil J., Makovicky E., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y., Palamarchuk R.S.** (2021a) Auerbakhite, $MnTl_2As_2S_5$, a new thallium sulfosalts from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Journal of Geosciences*, **66**(2), DOI: 10.3190/jgeosci.321.
- Kasatkin A.V., Plášil J., Makovicky E., Hornfeck W., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Tsyganko M.V.** (2021b) Gungerite, $TlAs_5Sb_4S_{13}$, a new thallium sulfosalts with a giant structure containing covalent As–As bonds. *American Mineralogist*, accepted.
- Kemkina R.A., Kemkin I.V., Khanchuk A.I., Ivanov V.V.** (2018) [First find of trace metal minerals at the Albaza gold deposit]. *Doklady Academy of Sciences*, **481**, 943–947.
- Kharbish S.** (2011) Raman spectroscopic investigations of some Tl–sulfosalts minerals containing pyramidal (As,Sb) S_3 groups. *American Mineralogist*, **96**(4), 609–616.
- Kharbish S., Libowitzky E., Beran A.** (2009) Raman spectra of isolated and interconnected pyramidal XS_3 groups (X = Sb, Bi) in stibnite, bismuthinite, kermesite, stephanite and bournonite. *European Journal of Mineralogy*, **21**(2), 325–333.
- Makovicky E.** (2019) Algorithms for calculations of homologue order N in the homologous series of sulfosalts. *European Journal of Mineralogy*, **31**, 83–97.
- Makovicky E., Plášil J., Kasatkin A.V., Škoda R.** (2021) The crystal structure of $Tl_{2.355}Sb_{5.984}As_{4.591}S_{17}$, the lead-free end-member of the chabournéite homeotypic family. *The Canadian Mineralogist*, in press.
- Makreski P., Jovanovski G., Boev B.** (2014) Micro-Raman spectra of extremely rare and endemic Tl-sulfosalts from Allchar deposit. *Journal of Raman Spectroscopy*, **45**(7), 610–617.
- Melkov V.G., Belova L.N., Gorshkov A.I., Ivanova O.A., Sivtsov A.V., Boronikhin V. A.** (1983) [New data on lermontovite]. *Mineralogichesky zhurnal [Mineralogical Journal]*, **55**(1), 82–87. (in Russian)
- Minceva-Sukarova B., Jovanovski G., Makreski P., Soptrajanov B., Griffith W., Willis R., Grzetic I.** (2003) Vibrational spectra of $M^I M^{III} S_2$ type synthetic minerals ($M^I = Tl$ or Ag and $M^{III} = As$ or Sb). *Journal of Molecular Structure*, **651–653**, 181–189.
- [Mineralogy of the Urals: Elements. Carbides. Sulfides]. (1990) Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 390 p. (in Russian)
- [Mineralogy of the Urals: Arsenides and Stibnides. Tellurides. Selenides. Fluorides. Chlorides and bromides]. (1991) Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 215 p. (in Russian)
- [Minerals of the USSR. Volume II. Sulphides, sulphosalts and similar compounds]. (1940). Moscow–Leningrad, AN SSSR, 748 p. (in Russian)
- Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N.N., Jambor J.L., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel E.H., Graeser S., Karup-Möller S., Balic-Žunic T., Mumme W.G., Vurro F., Topa D., Bindi L., Bente K., Shimizu M.** (2008) Sulfosalts systematics: a review. Report of the sulfosalts subcommittee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. *European Journal of Mineralogy*, **20**, 7–46.
- Moëlo Y., Marcoux E., Makovicky E., Karup-Möller S., Legendre O.** (1987) Homologues de la lillianite (gustavite, vikingite, heyrovskyite riche en Ag et Bi...) de l'indice à W-As-(Pb,Bi,Ag) de La Roche-Baluc (Loire Atlantique, France). *Bulletin de Minéralogie*, **110**, 43–64. (in French)
- Mozgova N.N., Borodaev Yu.S., Senderova V.M., Ronami G.N., Yakovlevskaya T.A.** (1971) [The find of heteromorphite in collection of the Mineralogical Museum of the AS USSR]. *Trudy Mineralogicheskogo Muzeia im. Fersmana [Proceedings of the Fersman Mineralogical Museum]*, **20**, 114–119. (in Russian)
- Murzin V.V., Bushmakin A.F., Sustavov S.G., Shcherbachov D.K.** (1996) [Clerite $MnSb_2S_4$ – a new mineral from the Vorontsovskoe gold deposit in the Urals]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **125**(3), 95–101. (in Russian)
- Murzin V.V., Varlamov D.A.** (2010) [Gold-sulfide-sulfosalts mineral assemblage in breccias with siliceous clasts of the Vorontsovskoe deposit (Central Urals)]. *Vestnik Uralskogo otdeleniya RMO [Bulletin of the Urals Branch of the Russian Mineralogical Society]*, **7**, 92–100 (in Russian)
- Murzin V.V., Varlamov D.A., Rovnushkin M.Yu.** (2011) [Assemblage of native arsenic and arsenopyrite in the Vorontsovskoe gold deposit (North Urals)]. *Vestnik Uralskogo otdeleniya RMO [Bulletin of the Urals Branch of the Russian Mineralogical Society]*, **8**, 80–87. (in Russian)

- Nestola F., Guastoni A., Bindi L., Secco L.** (2009) Dalnegroite, $Tl_{5-x}Pb_{2x}(As,Sb)_{21-x}S_{34}$, a new thallium sulphosalt from Lengenbach quarry, Binntal, Switzerland. *Mineralogical Magazine*, **73**(6), 1027–1032.
- Orlandi P., Biagioni C., Bonaccorsi E., Moëlo Y., Paar W.H.** (2012) Lead-antimony sulfosalts from Tuscany (Italy). XII. Boscandinite, $TlPb_4(Sb_7As_2)_{29}S_{18}$, a new species from Monte Arsiccio mine: occurrence and crystal structure. *Canadian Mineralogist*, **50**, 235–251.
- Orlandi P., Biagioni C., Moëlo Y., Bonaccorsi E., Paar W.H.** (2013) Lead-antimony sulfosalts from Tuscany (Italy). XIII. Protochabournéite, $\sim Tl_2Pb(Sb_{9-8}As_{1-2})_{210}S_{17}$, from the Monte Arsiccio mine: occurrence, crystal structure and relationship with chabournéite. *Canadian Mineralogist*, **51**, 475–494.
- Plášil J., Kasatkin A. V., Škoda R., Stepanov S. Yu.** (2018) Parapierrotite from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia: crystal structure and chemical composition. *Zanucku PMO*, **147**(1), 68–78.
- Popov V.A., Kolisnichenko S.V.** (2008) [Mineralogy of carbonatites of the Russian Brazil in the South Urals]. *Ural'sky mineralogicheskij sbornik [Urals Mineralogical Collection]*, **15**, 75–84. (in Russian)
- Roth P., Raber T., Favreau G., Meisser N.** (2017) Thallium sulfosalts from the Shimen As-deposit, Hunan, China. *Mineral Up*, **4**(6), 8–22.
- Sandomirskaya S.M., Arifulov Ch.Kh., Botova M.M., Mozgova N.N., Nenasheva S.N., Tsepin A.I., Sivtsov A.V.** (1992) [Tsnigriite $Ag_9SbTe_3(S,Se)_3$ – a new mineral]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **121**(5), 95–101. (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)
- Shnyukov E.F., Sobolevsky Y.V., Gnatenko G.I., Naumenko P.I., Kutny V.A.** (1986) [Mud volcanoes of Kertch-Taman area (atlas)]. Kiev, Naukova dumka, 152 p. (in Russian)
- Spiridonov E.M., Petrova I.V., Dashevskaya D.M., Balashov E.P., Klimova L.M.** (1990) [Roshchinite $Ag_{19}Pb_{10}Sb_{51}S_{96}$ – new mineral of the andorite group]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **119**(5), 32–43. (in Russian)
- Stanley C.J., Criddle A.J., Chisholm J.E.** (1986) Benleonardite, a new mineral from the Bambolla mine, Moctezuma, Sonora, Mexico. *Mineralogical Magazine*, **50**, 681–686.
- Thomas R., Davidson P.** (2010) Hambergite-rich melt inclusions in morganite crystals from the Muiane pegmatite, Mozambique and some remarks on the paragenesis of hambergite. *Mineralogy and Petrology*, **100**(3–4), 227–239.
- Topa D., Graeser S., Stoeger B., Raber T., Stanley C.** (2019) Drechslerite, IMA 2019-061. CNMNC Newsletter No. 52. *Mineralogical Magazine*, **83**(6), 887–893.
- Topa D., Kolitsch U.** (2018) The crystal chemistry of rathite based on new electron–microprobe data and single-crystal structure refinements: the role of thallium. *Minerals*, **8**, 466.
- Topa D., Kolitsch U., Makovicky E., Stanley C.** (2017a) Écrinsite, $AgTl_3Pb_4As_{11}Sb_9S_{36}$, a new thallium-rich homeotype of baumhauerite from the Jas Roux sulphosalt deposit, Parc national des Écrins, Hautes-Alpes, France. *European Journal of Mineralogy*, **29**, 689–700.
- Topa D., Makovicky E.** (2017) The crystal structure of veenite. *Mineralogical Magazine*, **81**, 355–368.
- Topa D., Makovicky E., Putz H., Zagler G.** (2013) Lopatkaite, IMA 2012–083. CNMNC Newsletter No. 15, February 2013, page 11. *Mineralogical Magazine*, **77**, 1–12.
- Topa D., Makovicky E., Stöger B., Stanley C.** (2017b) Heptasartorite, $Tl_7Pb_{22}As_{55}S_{108}$, enneasartorite, $Tl_6Pb_{32}As_{70}S_{140}$ and hendekasartorite, $Tl_2Pb_{48}As_{82}S_{172}$, three members of the anion-omission series of «sartorites» from the Lengenbach quarry at Binntal, Wallis, Switzerland. *European Journal of Mineralogy*, **29**, 701–712.
- Vakh A.S., Avtchenko O.V., Gvozdev V.I., Goryachev N.A., Karabtsov A.A., Vakh E.A.** (2019) [Minerals of Pb-As-Sb-S and Cu-Pb-As-Sb-S systems in ores of the Berezitovoe gold-polymetallic deposit, Upper Amur region, Russia]. *Geology of Ore Deposits*, **61**(3), 256–273.
- Vakh A.S., Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M.** (2016) The Berezitovoe gold-polymetallic deposit (Upper Amur region, Russia): Structure, mineralogy and genetic aspects. *Geoscience Frontiers*, **7**(3), 483–494.
- Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Murzin V.V., Vikent'eva O.V., Pavlov L.G.** (2016) [Vorontsovskoe gold deposit. Geology, modes of occurrence of gold, genesis]. Yekaterinburg, Fort Dialog-Iset, 204 p. (in Russian)
- Wilson J.R., Robinson P.D., Wilson P.N., Stanger L.W., Salmon G.L.** (1991) Gillulyite, $Tl_2(As,Sb)_8S_{13}$, a new thallium arsenic sulfosalt from the Mercur gold deposit, Utah. *American Mineralogist*, **76**, 653–656.