



<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-3-2>

УДК 549 (470.54)

Дополнения к кадастру минералов Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал)

А.В. Касаткин¹, М.В. Цыганко², Р. Шкода³, Я. Плашил⁴, М.Д. Мильшина⁵

¹Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Ленинский пр. 18-2, г. Москва,

119071 Россия; anatoly.kasatkin@gmail.com

²Минералогический музей «Штуфной кабинет», ул. Ватутина 17а, г. Североуральск, Свердловская обл., 624480 Россия

³Кафедра геологических наук, факультет науки, Масариков университет,
Котлариска 2, г. Брно, 61137 Чехия

⁴Институт физики АНЧР, На Слованце 1999/2, г. Прага, 18221 Чехия

⁵г. Москва, Рязанский пр-т 97, 109542 Россия

Статья поступила в редакцию 00.00.2026 г., после доработки 00.00.2026 г., принята к печати 00.00.2026 г

Аннотация. В статье описаны минералы, впервые обнаруженные на Воронцовском золоторудном месторождении на Северном Урале за период 2021–2026 гг., приведены их диагностические характеристики, в частности, химический состав, рентгеновские данные, оптические свойства. Всего за указанный период установлено 13 минералов, включая новый минеральный вид брусницынит. Бернарлоттит, монпельвуксит и хиршит найдены впервые на территории Российской Федерации.

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

Благодарности. Авторы признательны главному геологу Уральского филиала АО «Полиметалл УК» А.А. Готтману за информацию о добыче благородных металлов на месторождении. Авторы также благодарят И.В. Пекова за конструктивные замечания, которые помогли улучшить статью.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. А.В. Касаткин – разработка концепции, оптико-микроскопические исследования, химические (СЭМ-ЭДС) и рентгеновские анализы, написание рукописи; М.В. Цыганко – полевые работы, написание рукописи; Р. Шкода – электронно-зондовый анализ (ВДС) и КР-спектроскопия; Я. Плашил – монокристалльная рентгеновская съёмка; М.Д. Мильшина – оформление иллюстраций, написание рукописи. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Касаткин А.В., Цыганко М.В., Шкода Р., Плашил Я., Мильшина М.Д. Дополнения к кадастру минералов Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Минералогия, 12(3), 28–43. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-3-2>.

Additions to mineral catalogue of the Vorontsovskoe gold deposit (North Urals)

A.V. Kasatkin¹, M.V. Tsyganko², R. Škoda³, J. Plášil⁴, M.D. Milshina⁵

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

²Mineralogical Museum “Shtufnoi Kabinet”, Vatutina 17a, Severouralsk,
Sverdlovsk Oblast', 624480 Russia

³Department of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University,
Kotlářská 2, Brno, 611 37 Czech Republic

⁴Institute of Physics ASCR, v.v.i., Na Slovance 1999/2, Prague, 18221 Czech Republic

⁵Ryazanskiy pr., 97, Moscow, 109542 Russia

Received 00.00.2026, revised 00.00.2026, accepted 00.00.2026

Abstract. The paper describes 13 minerals found for the first time at the Vorontsovskoe gold deposit (North Urals) in 2021–2026 and their main characteristics including chemical composition, X-Ray diffraction data and optical properties. Brusnitsynite is a new mineral species. Bernarlottiite, montpelvouxite and hyršlite are found for the first time in Russia.

Keywords: Vorontsovskoe deposit, North Urals, mineral catalogue, first finds in Russia.

Acknowledgements. We are grateful to A.A. Gottman, chief geologist of the Urals branch of Polymetal OJSC, for the information about the mining at the deposit. We also thank Igor V. Pekov for constructive comments that improved the manuscript.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. A.V. Kasatkin – conceptualization, physical and optical properties, chemical (SEM-EDS) and X-ray analyses, writing of the manuscript; M.V. Tsyganko – fieldworks, writing of the manuscript; R. Škoda – electron microprobe analysis (WDS) and Raman spectroscopy; J. Plášil – single-crystal X-Ray diffraction; M.D. Milshina – preparation of figures, writing of the manuscript. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Kasatkin A.V., Tsyganko M.V., Škoda R., Plášil J., Milshina M.D. Additions to the mineral catalogue of Vorontsovskoe gold deposit (North Urals). *Mineralogy*, 12(3), 28–43. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-3-2>.

ВВЕДЕНИЕ

Воронцовское золоторудное месторождение расположено в Краснотурьинском районе Свердловской области (Северный Урал), в 310 км севернее г. Екатеринбурга, в 13 км южнее г. Краснотурьинска и в 0.5 км к западу от пос. Воронцовка. Оно было открыто в 1985 г., а, начиная с 1999 года, разрабатывалось ЗАО «Золото Северного Урала» компании «Полиметалл» двумя карьерами – Северным и Южным. В 2018 г. был отработан и затоплен Южный карьер. На Северном карьере добычные работы продолжались чуть дольше – до середины 2020 г. Поскольку рудное тело было отработано не полностью, в течение нескольких лет проводились исследования для определения перспектив подземной добычи, которая в итоге была признана экономически нецелесообразной, и Северный карьер к 2025 г. был также частично затоплен (рис. 1). Таким образом, добыча на месторождении завершена, однако до настоящего времени на фабрике перерабатывается руда из ранее сформированных складов забалансовых руд. Всего за время эксплуатации Воронцовского месторождения было добыто (по состоянию на 01.01.2025 г.) в виде руды 101.1 т золота и 120.6 т серебра, а извлечено готового продукта (аффинированных металлов) – 76.9 и 41.2 т, соответственно (А.А. Готтман, устное сообщение). Оставшиеся на складах запасы руды планируется переработать в течение ближайших лет.

В минералогическом аспекте Воронцовское месторождение получило известность не только в России, но и во всем мире благодаря своей чрезвычайно богатой и разнообразной Tl-Hg-Mn-As-Sb-S

минерализации с широким спектром редких сульфидов и особенно сульфосолей. В результате полевых сборов и лабораторных исследований, проведенных авторами этой статьи в сотрудничестве с коллегами из России, Чехии, Италии и Дании в 2013–2020 гг., установлен ряд минеральных ассоциаций с уникальным набором минералов, прежде всего, сульфосолей (антимон- и арсеносульфидов) с видообразующими Tl, Hg, Pb, Cu и/или Mn. Эти минеральные ассоциации и типы руд, к которым они приурочены, подробно охарактеризованы нами в статье (Касаткин и др., 2020), открывающей серию публикаций, посвященных минералогии Воронцовского месторождения. Там же приведены история изучения месторождения, его геологическое положение и строение, а также максимально полный на тот момент кадастр минеральных видов Воронцовского месторождения, в 2020 г. включавший 209 минералов. Все они с разной степенью подробности описаны нами в последующих статьях этой серии (Касаткин и др., 2021а, б, в), а также в англоязычном специальном выпуске журнала «Минералогия» (Kasatkin et al., 2022). В последней из процитированных работ перечень минералов месторождения был расширен до 210 наименований. Среди них девять представляют собой новые минеральные виды (клерит, воронцовит, ферроворонцовит, цыганкоит, гладковскиит, люборжакит, походяшинит, гунгерит, ауэрбахит) и еще 41 минерал найден впервые на территории Российской Федерации.

В заключительной статье серии (Касаткин и др., 2021в) мы высказали надежду на появление в будущем свежего минералогического материала из новых участков, разведка которых тогда планирова-



Рис. 1. Северный карьер Воронцовского месторождения. Апрель 2026 г. Фото М.В. Цыганко.
Fig. 1. Northern open pit of the Vorontsovskoe deposit. April 2026. Photo by M.V. Tsyganko.

лась компанией «Полиметалл УК», и продолжение изучения богатой минералогии месторождения. К сожалению, ни отработка этих новых участков, ни подземная добыча так и не начались, и поэтому, начиная с 2021 г., поступление новых образцов резко замедлилось. Тем не менее, за истекшие пять лет кадастр минералов месторождения удалось расширить на 13 видов, а именно 6 сульфосолей, по 2 сульфата и силиката, по одному антимонсульфиду, оксиду и молибдату (табл. 1). Брусницынит представляет собой новый минеральный вид; еще три редких сульфосоли (бернарлоттиит, монпельвуксит и хиршлит) найдены впервые на территории Российской Федерации. Ниже приводится описание этих минералов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Все образцы, если не указано иное, были отобраны М.В. Цыганко на складах забалансовых руд в 2021–2026 гг. Визуально определяемые физические свойства минералов описаны по результатам наблюдений под стереомикроскопом Zeiss Discovery V8. Оптические свойства рудных минералов в отраженном свете исследованы под поляризационными микроскопами ПОЛАР-3 и ПОЛАМ-215. Спектры отражения измерены в воздухе по стандарту

Si на микроскопе-спектрофотометре МСФ-Р фирмы ЛОМО (диаметр фотометрической диафрагмы 0.3 мм, размер выходной щели монохроматора 0.1 мм, спектральный интервал 6 нм; аналитик А.В. Касаткин).

Микроморфология и химический состав минералов изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi FlexSEM 1000 с ЭДС-детектором Xplore Contact 30 и системой анализа Oxford AZtecLive STD при ускоряющем напряжении 20 кВ, диаметре зонда 2 мкм и поглощенном токе 5 нА на металлическом кобальте (аналитик А.В. Касаткин). Определявшиеся элементы, аналитические рентгеновские линии и стандарты: MgK α – Mg₂SiO₄; AlK α – кианит; SiK α – SiO₂; CaK α – волластонит; SK α и FeK α – FeS₂; MnK α – Mn₂SiO₄; NiK α – Ni; CuK α – ламмерит; ZnK α – Zn; SeL β – TlInSe₂; MoL α – Mo; AgL α – Ag₃AsS₃; SbL β – Sb; PbM α – PbTe; BiM β – Bi. Содержания остальных элементов с атомными номерами выше, чем у бериллия, оказались ниже пределов обнаружения методом ЭДС анализа.

Количественный анализ химического состава сульфосолей выполнен с помощью волнового электронно-зондового микроанализатора Cameca SX 100 в лаборатории электронной микроскопии и микроанализа Департамента геологических наук

Таблица 1. Минералы Воронцовского месторождения, установленные в 2021–2026 гг.

Table 1. Minerals identified at the Vorontsovskoe deposit in 2021–2026

Минерал	Формула	Распространенность	Изученность	
			Метод диагностики	Источник
Бернарлоттит**	$Pb_{12}(As_{10}Sb_6)S_{36}$	+	ЭЗ, О	Наши данные
Бертьерит*	$FeSb_2S_4$	+++	ЭЗ, Р, О	Vikentyev et al., 2019, наши данные
Брусницынит***	$Mn_3CuPbAs_3Sb_2S_{12}$	+	ЭЗ, Р, О	Kasatkin et al., 2025
Вульфенит*	$PbMoO_4$	(+)	ЭЗ, КР	Наши данные
Ганнингит*	$Zn(SO_4)(H_2O)$	(++)	ЭЗ, Р	
Диафорит*	$Ag_3Pb_2Sb_3S_8$	+	ЭЗ, О	
Монпельвуксит**	$AgPb_{16}Sb_{27}As_{18}S_{84}$	+	ЭЗ, О	
Ортосерпьерит*	$CaCu_4(SO_4)_2(OH)_6(H_2O)_3$	(++)	ЭЗ, Р	
Пумпеллиит-(Al)*	$Ca_2Al_3(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)(H_2O)$	++	ЭЗ, Р	
Сепиолит*	$Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2(H_2O)_2 \cdot 4H_2O$	+++	ЭЗ, Р	
Таканелит*	$(Mn^{2+}, Ca)_{2x}(Mn^{4+})_{1-x}O_2 \cdot 0.7H_2O$	(+++)	ЭЗ, Р	
Ульманнит*	$NiSbS$	+	ЭЗ, О	
Хиршит**	$Pb_8As_{10}Sb_6S_{32}$	+	ЭЗ, О	

Примечание. Распространенность минералов на Воронцовском месторождении: +++ – второстепенные; ++ – редкие; + – крайне редкие (единичные находки). В круглых скобках показаны гипергенные минералы. Методы диагностики минералов: ЭЗ – электронно-зондовый микроанализ; Р – рентгенографический метод (монокристалльный и/или порошковый); О – оптические методы; КР – КР-спектроскопия; * – минералы, достоверно установленные авторами впервые для месторождения; ** – минералы, установленные авторами впервые для Российской Федерации; *** – новый минеральный вид, открытый на Воронцовском месторождении.

Note. Distribution of minerals: +++ – subordinate; ++ – rare; + – extremely rare (single finds). Supergene minerals are indicated in parentheses. Identification methods: ЭЗ – electron microprobe analysis; Р – X-ray diffraction (single-crystal or powder method); О – optical data; КР – Raman spectroscopy; * – minerals identified by the authors for the first time at the Vorontsovskoe deposit; ** – minerals identified by the authors for the first time in Russian Federation; *** – new mineral species discovered at the Vorontsovskoe deposit.

Масарикова университета и Чешской геологической службы (г. Брно, Чехия, аналитики Р. Шкода, А.В. Касаткин). Условия анализа: ускоряющее напряжение 25 кВ, ток зонда 10 нА, диаметр зонда 1 мкм. Определявшиеся элементы, аналитические рентгеновские линии, кристаллы-анализаторы и использовавшиеся стандарты: $SK\alpha$ (LPET) – халькопирит; $CuK\alpha$ (LLIF) – Cu; $AsL\beta$ (TAP) – парамельсбергит; $SeL\beta$ (TAP); $AgL\alpha$ (LPET) – Ag; $SbL\beta$ (LPET) – Sb; $PbM\alpha$ (LPET) – PbSe и $BiM\beta$ (LPET) – Bi.

Спектр комбинационного рассеяния (КР) света вульфенита получен в лаборатории рамановской спектроскопии Масарикова университета (аналитики Р. Шкода и А.В. Касаткин) с помощью спектрометра Horiba LabRAM HR Evolution, оснащенного оптическим микроскопом Olympus BX 41, голографической решеткой (600 штрих/мм) и CCD-детектором на основе кремния с Пельтье-охлаждением. Источником монохроматического возбуждающего излучения служил полупроводниковый лазер с рабочей длиной волны излучения 473

нм и выходной мощностью 1.8 мВт. Эффективный диаметр лазерного пучка вблизи поверхности образца составлял 2 мкм. КР спектр регистрировался в 180-градусной геометрии рассеяния в диапазоне 100–1200 cm^{-1} со спектральным разрешением $\sim 2 cm^{-1}$.

Порошковые рентгеновские данные получены на дифрактометре PowDiX 600 ($CoK\alpha$ – излучение, фильтр Fe 50 мкм, ускоряющее напряжение 40 кВ, ток 15 мА, непрерывный режим, скорость сканирования 1°/мин, расстояние образец–детектор 150 мм; аналитик А.В. Касаткин). Дифракционные данные проинтегрированы в программном комплексе ALMAZ, версия 1.0.

Монокристалльное рентгеновское исследование бертьерита выполнено в лаборатории Института физики Академии наук Чешской Республики, (г. Прага, Чехия, аналитик Я. Плашил) с помощью многофункционального рентгеновского дифрактометра XtaLAB Synergy-DW system с детектором HyPix-Arc150 на $MoK\alpha$ -излучении при ускоряющем напряжении 50 кВ, силе тока 25 мА и диаметре

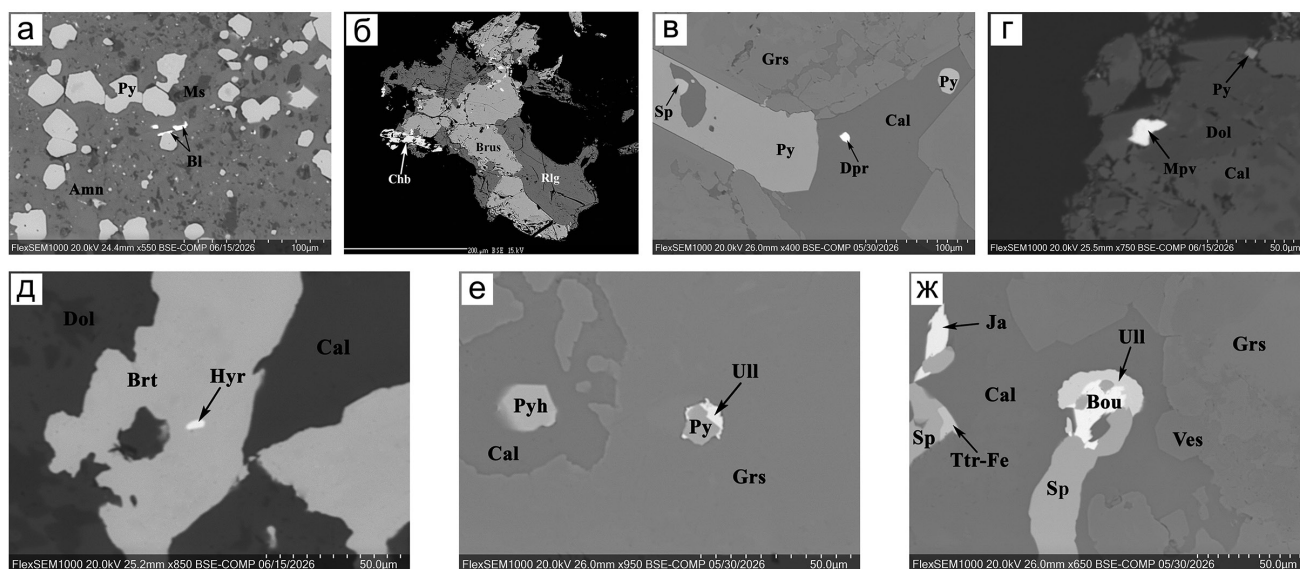


Рис. 2. Сульфосоли и сульфиды из Воронцовского месторождения: а – кристаллы бернарлоттиита в армените с мусковитом и пиритом; б – брусницинит в ассоциации с реальгаром и шабурнеитом; в – зерно диафорита в кальците с гроссуляром, пиритом и сфалеритом; г – индивид монпельвуксита в карбонатной породе (кальцит, доломит) с пиритом; д – включение хиршлита в барите в карбонатной породе (кальцит, доломит); е – сросток ульманнита и пирита в гроссуляр-кальцитовый породе в ассоциации с пирротинитом; ж – сросток ульманнита, буланжерита и сфалерита в гроссуляр-везувиан-кальцитовый породе в ассоциации с джемсонитом и тетраэдритом-(Fe).

РЭМ фото в отраженных электронах.

Fig. 2. Sulfosalts and sulfides from the Vorontsovskoe deposit: a – bernartlotite crystals in armenite with muscovite and pyrite; б – brusnitsynite with realgar and chabournite; в – diaphorite grain in calcite with grossular, pyrite and sphalerite; г – montpelvouxite grain in carbonate matrix (calcite, dolomite) with pyrite; д – hyrslite inclusion in baryte in carbonate matrix (calcite, dolomite); е – ullmannite and pyrite intergrowth in grossular-calcite matrix with pyrrhotite; ж – complex aggregate of ullmannite, boulangerite and sphalerite in grossular-vesuvianite-calcite matrix with jamesonite and tetrahedrite-(Fe).

SEM (BSE) images.

рентгеновского пучка 0.15 мм. Расстояние образец–детектор 39 мм, время экспозиции – 5 минут.

В статье использованы следующие аббревиатуры минеральных видов (Warr, 2021): антимонит – Sbn, арменит – Amn, арсенипирит – Apy, барит – Brt, бернарлоттиит – Bl, бертьерит – Btr, буланжерит – Bou, везувиан – Ves, вульфенит – Wul, галенит – Gn, гроссуляр – Grs, джемсонит – Ja, диафорит – Dpr, доломит – Dol, калиевый полевой шпат – Kfs, кварц – Qz, клинохлор – Clc, ковеллин – Cv, монпельвуксит – Mpv, мусковит – Ms, пирит – Py, пирротин – Pyh, пренит – Prh, сфалерит – Sp, тетраэдрит-(Zn) – Ttr-Zn, титанит – Ttn, ульманнит – Ull, халькопирит – Csp, хиршлит – Hyr, церуссит – Cer.

ОПИСАНИЕ МИНЕРАЛОВ

Бернарлоттиит $Pb_{12}(As_{10}Sb_6)S_{36}$ был впервые отмечен на Воронцовском месторождении в составе золото-пирит-реальгаровой ассоциации как минерал, срastaющийся со сфалеритом и цемен-

тирующий энаргит (Викентьев и др., 2016), однако приведенный в указанной работе электронно-зондовый анализ по стехиометрии не соответствовал этой сульфосоли. Нами бернарлоттиит установлен электронно-зондовым методом в образце, отобранном в 2021 г., в виде редких и мелких призматических кристаллов (пять кристаллов размерами до 10 × 5 мкм), заключенных в армените с мусковитом в ассоциации с пиритом, акташитом, геттардитом, реальгаром, Hg-содержащим сфалеритом, диопсидом, пренитом, титанитом и фторапатитом (рис. 2а). Химический состав этих кристаллов хорошо рассчитывается на формулу бернарлоттиита (табл. 2, ан. 1). Значение N члена сарторитовой гомологической серии для воронцовской сульфосоли, рассчитанное по (Makovicky, Tora, 2015), составляет 3.47, что превосходно согласуется с полученным по результатам определения структуры значением $N = 3.50$ для бернарлоттиита из места его первой находки (Orlandi et al., 2017). Оптические характеристики уральского минерала не отличаются от

Таблица 2. Химический состав (мас. %) сульфидов и сульфосолей из Воронцовского месторождения
Table 2. Chemical composition (wt. %) of sulfides and sulfosalts from the Vorontsovskoe deposit

№ ан.	№ образца	Минерал	Mn	Fe	Ni	Cu	Ag	Pb	As	Sb	S	Se	Сум- ма	Рас- чет	Эмпирическая формула
1	БК 21-4-1	Бернарлоттит	—	—	—	—	—	47.08	14.30	14.41	22.38	0.06	98.23	64	$Pb_{11.78}(As_{0.88}Sb_{6.14})_{\Sigma 16.02}(S_{36.16}Se_{0.04})_{36.20}$
2	Вор-5/26-2.3	Бертьерит	0.24	12.68	—	—	—	—	0.19	56.85	29.65	—	99.61		$(Fe_{0.98}Mn_{0.02})_{\Sigma 1.00}(Sb_{2.01}As_{0.01})_{\Sigma 2.02}S_{3.98}$
3	Вор-5/26-2а	Бертьерит	2.45	10.24	—	—	—	—	0.24	56.72	29.66	—	99.31		$(Fe_{0.79}Mn_{0.19})_{\Sigma 0.98}(Sb_{2.01}As_{0.01})_{\Sigma 2.02}S_{3.99}$
4	Вор-5/26-5	Бертьерит	3.56	9.28	—	—	—	—	—	57.03	29.86	—	99.73	7	$(Fe_{0.71}Mn_{0.28})_{\Sigma 0.99}Sb_{2.01}S_{4.00}$
5	Вор-5/26-2а	Бертьерит	4.12	8.78	—	—	—	—	0.74	56.41	29.84	—	99.89		$(Fe_{0.67}Mn_{0.32})_{\Sigma 0.99}(Sb_{1.98}As_{0.04})_{\Sigma 2.02}S_{3.98}$
6	Вор-5/26-2.3	Бертьерит	5.06	7.55	—	—	—	—	0.53	56.36	29.84	—	99.34		$(Fe_{0.58}Mn_{0.40})_{\Sigma 0.98}(Sb_{1.99}As_{0.03})_{\Sigma 2.02}S_{4.00}$
7	ММФ 99306	Брусницинит	12.37	—	—	4.57	0.74	15.60	17.83	19.48	29.62	—	100.21	22	$Mn_{2.91}Cu_{0.93}Ag_{0.09}Pb_{0.97}As_{3.08}Sb_{2.07}S_{11.95}$
8	Вор-5/26-2.1	Диафорит	—	—	—	—	24.04	29.67	—	25.15	18.55	0.42	99.80	16	$Ag_{3.06}Pb_{1.96}(Sb_{2.83}Bi_{0.13})_{\Sigma 2.96}(S_{7.94}Se_{0.07})_{8.01}$
9	Вор-11/25-3	Монпельвуксит	—	—	—	0.13	1.20	30.75	13.17	29.83	25.26	—	100.34	146	$(Cu_{0.22}Ag_{1.19})_{\Sigma 1.41}Pb_{15.81}(Sb_{26.11}As_{18.73})_{\Sigma 44.84}S_{83.95}$
10	Вор-11/25-3	Хиршиллит	—	—	—	—	—	38.33	17.05	18.61	24.42	—	98.41	56	$Pb_{7.81}(As_{9.60}Sb_{6.45})_{\Sigma 16.05}S_{32.14}$
11	Вор-5/26-2.1	Ульманнит	—	—	27.84	—	—	—	—	57.33	15.12	—	99.93	3	$Ni_{1.00}Sb_{1.00}S_{1.00}$
12	Вор-5/26-2.1	Ульманнит	—	0.84	26.90	—	—	—	—	57.12	14.99	—	99.85	3	$(Ni_{0.98}Fe_{0.03})_{\Sigma 1.01}Sb_{1.00}S_{0.99}$

Примечание. Анализ № 8 также содержит 1.97 мас. % Bi. Пониженная сумма анализа № 1 объясняется исключением вмещающего армения. Анализ № 7 взят из работы (Kasatkin et al., 2025). Прочерк – содержание компонента ниже предела обнаружения. Формулы рассчитаны на сумму всех атомов (расчет).

Note. Analysis no. 8 also includes 1.97 wt. % Bi. Low analytical total of analysis no. 1 is due to subtraction of the host armenite. Analysis no. 7 is taken from (Kasatkin et al., 2025). Dash – the content of element is below detection limit. The mineral formulas are calculated on sum of all atoms (расчет).

бернарлоттит из места его первой находки. В отраженном свете он выглядит белым, но существенно темнее контактирующего с ним пирита, что соответствует справочным значениям их отражательной способности в белом свете: $R = 30.3\text{--}37.3\%$ у бернарлоттита (Orlandi et al., 2017) и 54% у пирита (здесь и далее коэффициенты отражения для известных минералов при $\lambda = 550$ нм взяты из справочника (Чвилёва и др., 1988). В скрепленных николях минерал отчетливо анизотропен в серых тонах.

По индикаторным признакам и набору минералов бернарлоттит может быть отнесен к боскардинит-экранситовой ассоциации (№ 1), описанной в работе (Касаткин и др., 2020). Наша находка бернарлоттита является первой на территории Российской Федерации.

Бертьерит $FeSb_2S_4$ на Воронцовском месторождении впервые упомянут в списке рудных минералов гидротермальных ассоциаций (Vikentyev et al., 2019) без какого-либо описания и диагностических данных. Нами эта сульфосоли встречена в значительном количестве на складе забалансовых руд № 1 в апреле 2026 г. Судя по срокам и характеру переработки руды, хранившейся на этом складе, мы полагаем, что образцы с бертьеритом могли быть добыты в первые годы эксплуатации месторождения. Минерал обнаружен в небольших, до 30×30 см, глыбах скарированного мрамора с наложенной сульфидной, преимущественно, пиритовой минерализацией. Он образует длиннопризматические и игольчатые кристаллы длиной до 2 см и толщиной до 3 мм с продольной штриховкой на гранях, а также массивных выделений и корочек площадью до 4×4 см² (рис. 3а). Всего отобрано более 20 образцов с макроскопическими выделениями бертьерита. Он имеет темный стально-серый цвет, темно-серую черту и сильный металлический блеск. Части кристаллов, выходявшие на поверхность глыб, покрыты характерной для этой сульфосоли синей побежалостью (рис. 3б). Минерал хрупкий, при раскалывании демонстрирует раковистый излом. Твердость по шкале Мооса составляет ~3. Помимо пирита с бертьеритом ассоциируют различные сульфиды (антимонит, арсенопирит, галенит, пирротин, сфалерит, ульманнит) и сульфосоли (бенавидесит, джемсонит, клерит, тетраэдрит-(Fe), тетраэдрит-(Zn)). Среди нерудных минералов преобладают кальцит, gros-

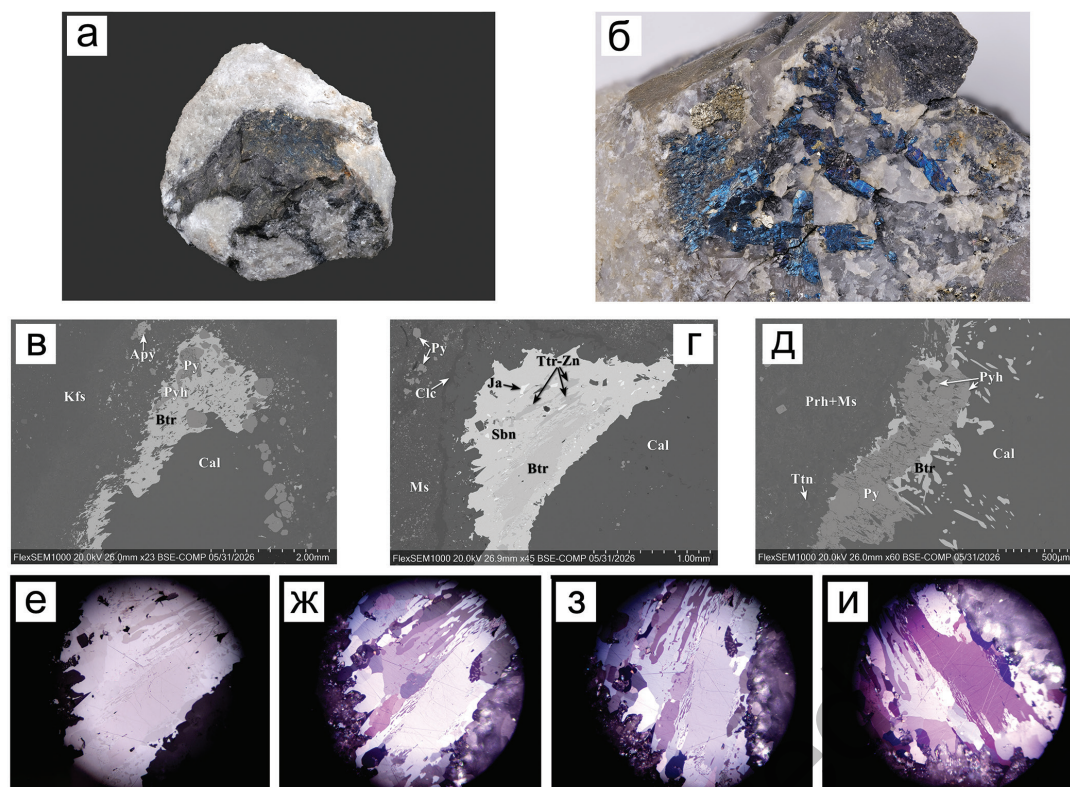


Рис. 3. Морфология бертьерита из Воронцовского месторождения: а – темно-серая массивная корка на скарнированном мраморе с мелкими вкраплениями пирита, 6 x 5 см; б – покрытые синей побелостью кристаллы на породе с пиритом, поле зрения 3 см; в – мономинеральное зерно с включениями пирита и пирротина в кальците и калиевом полевоом шпате в ассоциации с арсенопиритом; г – сросток бертьерита и антимонита в кальцит-мусковит-клинохлоровой породе в ассоциации с тетраэдритом-(Zn), джемсонитом и пиритом; д – частичное замещение бертьерита агрегатом пирита и пирротина в кальцит-мусковит-пренитовой породе с титанитом; е – фрагмент сростка, изображенного на рис. 3г, в отраженном свете; ж-и – тот же сросток в скрещенных николях в различных положениях столика микроскопа.

Фото М.Д. Мильшиной (а, б), BSE фото (в-д), отраженный свет (е-и).

Fig. 3. Morphology of berthierite from the Vorontsovskoe deposit: a – dark gray massive crust on altered marble with small pyrite inclusions, 6 x 5 cm; б – blue tarnished crystals in rock with pyrite, field of view is 3 cm; в – monomineral grain with pyrite and pyrrhotite inclusions in calcite and K-feldspar in assemblage with arsenopyrite; г – berthierite and stibnite aggregate in calcite-muscovite-clinocllore matrix in assemblage with tetrahedrite-(Zn), jamesonite and pyrite; д – partial replacement of berthierite by aggregate of pyrite and pyrrhotite in calcite-muscovite-prehnite matrix with titanite; е – fragment of aggregate shown in Fig. 3г in reflected light; ж-и – the same aggregate under crossed polars in different positions of microscope table.

Photo: M.D. Milshina (a, б), BSE images (в-д), reflected light (е-и).

суляр, кварц, клинохлор и мусковит. К аксессуарным минералам относятся калиевый полевоый шпат, пренит, титанит и фторапатит. Под сканирующим электронным микроскопом бертьерит образует как мономинеральные агрегаты (рис. 3в), так и сростания с антимонитом (рис. 3г). Нередки случаи его замещения агрегатами пирита и пирротина (рис. 3д).

Химический состав бертьерита характеризуется постоянной и нередко существенной примесью Mn. Содержание Mn варьирует в разных образцах от 0.2 до 5.1 мас. % (табл. 2, ан. 2–6), но только в одном из аншлифов было найдено зерно размером 15 мкм, в котором Mn доминирует над

Fe, т. е. его состав формально отвечает Mn-аналогу бертьерита клериту.

Оптические свойства бертьерита весьма характерны и надежно отличают его от ассоциирующих с ним минералов, в первую очередь, от сходного по отражательной способности антимонита. В отраженном свете у первого наблюдается слабый розоватый оттенок, отсутствующий у второго (рис. 3е). Также оба минерала в сростаниях хорошо отличаются по двуотражению: умеренному у бертьерита и очень сильному у антимонита. В скрещенных николях бертьерит, как и антимонит, очень сильно анизотропен с цветными эффектами

Таблица 3. Коэффициенты отражения бертьерита из разных месторождений и клерита
Table 3. Reflectance values of berthierite from different deposits and clerite

Минерал	Марганцовистый бертьерит, обр. Вор-5/26-2а		Бертьерит		Высокомарганцовистый бертьерит		Бертьерит		Клерит	
Месторождение	Воронцовское		Тырныауз				Удереи		Воронцовское	
λ (нм)	$R_{\max}$	$R_{\min}$	$R_{\max}$	$R_{\min}$	$R_{\max}$	$R_{\min}$	$R_{\max}$	$R_{\min}$	$R_{\max}$	$R_{\min}$
400	40.3	36.2								
420	39.6	36.0	40.5	33.5	45.8	30.7	45.9	31.3	35.6	24.8
440	38.8	35.0					45.6	30.8	35.2	24.5
460	38.4	34.8	39.8	32.8	45.6	30.8	45.2	30.6	34.7	24.1
480	38.1	34.4					44.7	30.4	35.2	23.9
500	38.0	34.1	39.2	32.7	44.7	30.1	44.0	30.1	35.5	23.8
520	38.0	34.0					43.3	30.0	35.5	23.7
540	38.2	34.0	39.0	32.7	43.0	30.3	42.8	30.2	36.0	23.8
560	38.3	34.0					42.3	30.6	36.4	24.1
580	38.3	34.1	38.6	33.2	42.0	30.7	41.8	30.9	36.7	24.6
600	38.2	34.2					41.3	31.2	37.1	25.2
620	38.0	34.3	38.3	33.3	41.0	30.7	40.9	31.5	37.0	25.4
640	37.7	34.3					40.6	31.8	36.8	25.6
660	37.5	34.3	38.2	33.2	39.8	31.0	40.4	32.0	36.4	25.7
680	37.2	34.3					40.1	32.0	36.1	25.8
700	36.9	34.2	38.2	33.0	39.2	31.0	40.0	31.9	35.6	25.8
Источник	Наши данные		Кононов и др., 1990				Чвилёва и др., 1988		Мурзин и др., 1996	

в светло-серых, коричневатых-серых и насыщенно-пурпурных тонах (рис. 3ж–и). Спектры отражения воронцовского марганцовистого бертьерита имеют пологий профиль и, в целом, сходны со спектрами бертьерита из других российских объектов, а также со спектром клерита (табл. 3, рис. 4).

Порошковая рентгенограмма марганцовистого бертьерита из Воронцовского месторождения приведена в табл. 4. Параметры ромбической элементарной ячейки, рассчитанные по данным порошкограммы [здесь и далее – с помощью программы UnitCell (Holland, Redfern, 1997)]: $a = 11.379(2)$, $b = 14.198(2)$, $c = 3.7580(7)$ Å, $V = 607.1(1)$ Å³. Монокристаллическая съемка одного из кристаллов бертьерита дала следующие параметры элементарной ячейки: $a = 11.321(10)$, $b = 14.152(14)$, $c = 3.775(4)$ Å, $V = 605(1)$ Å³.

Брусницынит $Mn_3CuPbAs_3Sb_2S_{12}$ – это десятый новый минерал, открытый на Воронцовском месторождении, и девятый, открытый здесь нашим авторским коллективом (Kasatkin et al., 2025). Поскольку минерал впервые найден на Урале, а одним из его видообразующих элементов является марганец, нам показалось символическим назвать его в честь профессора Санкт-Петербургского государственного университета (г. Санкт-Петербург, Россия) Алексея Ильича Брусницына (г. р. 1967) за

весомый научный вклад в минералогию марганца и марганцевых месторождений Урала.

Образцы с брусницынитом были отобраны в 2020 г. на складе забалансовых руд № 1. По индикаторным признакам (обогащенность рудной системы Mn, отсутствие Tl, широкий изоморфизм As-Sb в сульфосолях и др.) и набору минералов-спутников брусницынит отнесен к люборжакит-клеритовой ассоциации (№ 5), описанной в работе (Касаткин и др., 2020). Он образует редкие ксеноморфные зерна до 0.35 × 0.2 мм в карбонатных брекчиях, состоящих из зерен кальцита, доломита, барита и кварца, сцементированных пиритом, реальгаром и антимонитом (рис. 2б). Брусницынит ассоциирует также с акташитом, алабандином, мышьяком, арсенопиритом, шабурнеитом, колорадоитом, клеритом, дальнегроитом, экранситом, гетчеллитом, золотом, люборжакитом, рутьеритом, сфалеритом и вакабаяшилито. Брусницынит непрозрачен, имеет черный цвет и металлический блеск. Минерал хрупкий, с неровным изломом. Спайность не наблюдается. Микротвердость по Виккерсу составляет 251 кг/мм² (определена при нагрузке 50 г), что соответствует ~4 по шкале Мооса. Расчетная плотность 4.545 г/см³. В отраженном свете брусницынит светло-серый, двуотражение слабое. В скрещенных николях минерал сильно анизотропный в

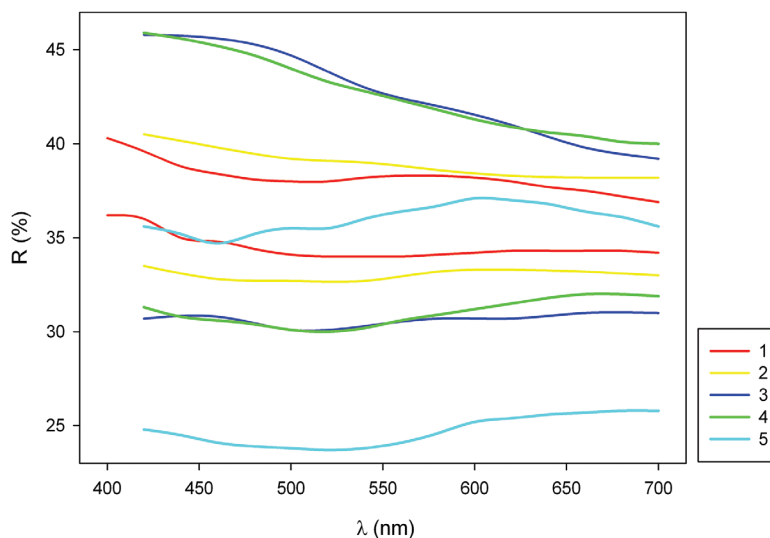


Рис. 4. Спектры отражения бертьерита из различных месторождений и клерита из Воронцовского месторождения.

1 – марганцовистый (2.45 мас. % Mn) бертьерит, Воронцовское месторождение (наши данные); 2 – бертьерит, месторождение Тырныауз, Кабардино-Балкария (Кононов и др., 1990); 3 – высокомарганцовистый (6.24 мас. % Mn) бертьерит, месторождение Тырныауз (Кононов и др., 1990); 4 – бертьерит, месторождение Удереи, Красноярский край (Чвилёва и др., 1988); 5 – клерит, Воронцовское месторождение (Мурзин и др., 1996).

Fig. 4. Reflectance spectra of berthierite from different deposits and clerite from the Vorontsovskoye deposit.

1 – Mn-bearing (2.45 wt. % Mn) berthierite, Vorontsovskoye deposit (our data); 2 – berthierite, Tyrnauz deposit, Kabardino-Balkaria, Russia (Kononov et al., 1990); 3 – Mn-rich (6.24 wt. % Mn) berthierite, Tyrnauz deposit (Kononov et al., 1990); 4 – berthierite, Uderey deposit, Krasnoyarsk krai, Russia (Chvileva et al., 1988); 5 – clerite, Vorontsovskoye deposit (Murzin et al., 1996).

серых и темно-серых тонах. Внутренние рефлексы не наблюдаются. Коэффициенты отражения для длин волн, рекомендованных Комиссией по рудной минералогии Международной минералогической ассоциации (R_{min}/R_{max} , %): 29.8/31.0 (470 нм), 29.4/30.4 (546 нм), 28.9/30.1 (589 нм), 28.1/29.2 (650 нм). Химический состав голотипа и его эмпирическая формула приведены в табл. 2 (ан. 7).

Брусницынит моноклинный, пространственная группа $P2_1/n$, параметры элементарной ячейки: $a = 11.597(2)$, $b = 18.905(4)$, $c = 8.732(2)$ Å, $\beta = 98.47(3)^\circ$, $V = 1893.4(7)$ Å³ и $Z = 4$. Наиболее сильные линии порошковой рентгенограммы [d , Å (I , %) (hkl): 6.113 (51) (111), 3.264 (52) (151), 3.195 (88) ($3\bar{3}1$), 2.864 (61) ($11\bar{3}$), 2.837 (55) (410), 2.831 (100) (161), 2.772 (62) ($12\bar{3}$). Кристаллическая структура брусницынита решена по монокристалльным данным и уточнена до $R_1 = 0.0548$ для 3890 независимых рефлексов с $I > 3\sigma(I)$. Кристаллическая структура (рис. 5) содержит бесконечные зигзагообразные вытянутые вдоль $[101]$ цепочки из Pb- и Sb-центрированных полиэдров, а также широкие ориентированные вдоль $[100]$ пластины из реберно-связанных полиэдров Mn, октаэдрически координированных атомами S. Цепочки и пластины связываются друг с другом атомами As и Cu. Брусницынит

– новый член лиллианит–андоритовой гомологической серии и первый, в котором As доминирует над Sb и Bi. Отметим, что это первый представитель новой ветви данной гомологической серии – третьей, As-доминантной, наряду с лиллианитовой (Bi-доминантной) и андоритовой (Sb-доминантной) ветвями; эта ветвь названа брусницынитовой.

Вульфенит $PbMoO_4$ – второй минерал с видообразующим Mo после молибденита, установленный на Воронцовском месторождении. Он диагностирован в аншлифе, изготовленном из фрагмента кварцевой жилы с наложенной сульфидной минерализацией (образец найден на складе забалансовых руд № 1). Вульфенит образует вытянутые зерна в церуссите и кварце и также ассоциирует с англезитом, галенитом, ковеллином, пиритом, сфалеритом и теннантитом-(Zn) (рис. 6а). Вульфенит не содержит примесей, его химический состав (мас. %): PbO 60.73, MoO₃ 39.05, сумма 99.78. Он отвечает идеальной формуле $Pb_{1.00}Mo_{1.00}O_4$. Диагностика минерала подтверждена КР спектром (рис. 7). Самая сильная полоса при 870 см⁻¹ соответствует симметричным, а полосы при 742 и 767 см⁻¹ – асимметричным валентным колебаниям связей Mo⁶⁺–O. Полоса средней интенсивности при 318 см⁻¹ является результатом деформационных колебаний O–Mo–

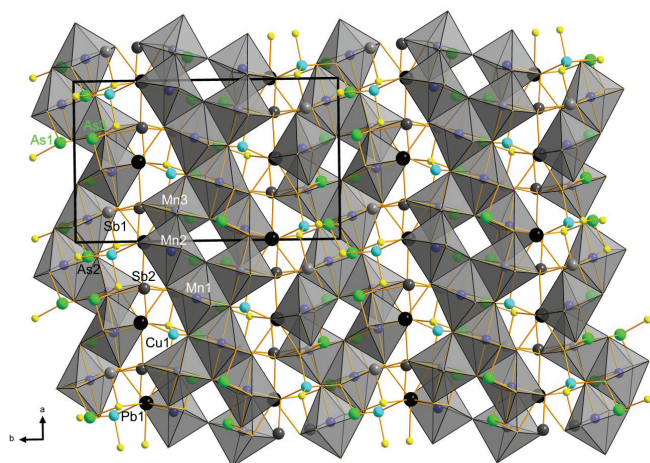


Рис. 5. Кристаллическая структура брусницинита в проекции вдоль оси с.

«Тонкие» цепочки представлены атомами Pb1 и Sb2. Октаэдры Mn1, Mn2 и Mn3 показаны серым цветом. Координационный полиэдр Sb1 не показан для ясности. Позиция Cu1 расположена на месте краевого октаэдра (заселенного Ag в случае других гомологов лиллианита). Элементарная ячейка показана черными линиями.

Fig. 5. Crystal structure of brusnitsyite projected along axis c.

Thin slabs are Pb1 and Sb2 atoms. Mn1, Mn2 and Mn3 octahedra are shown in gray. The coordination polyhedron for Sb1 site is omitted for better clarity. The Cu1 site is located in the marginal octahedron (occupied by Ag in case of other lillianite homologs). Black lines show the unit cell.

О. Полосы с частотами ниже 200 см^{-1} относятся к колебаниям связей Pb–O и решеточным модам.

Ганнингит $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – первый сульфат Zn, встреченный на Воронцовском месторождении. Он является продуктом современного минералообразования и, вероятно, образовался уже непосредственно на складе забалансовых руд № 1, где в апреле 2026 г. были найдены образцы с ним. Минерал слагает тонкие порошковатые корочки белого цвета до 5 см на окисленном сфалерите с кварцем и ассоциирует с более ранними галенитом, пиритом, теннантитом-(Zn), халькопиритом, гётитом, англезитом, гемиморфитом и церусситом (рис. 6б). Ганнингит диагностирован по химическому составу (табл. 5, ан. 1) и порошковой рентгенограмме. К сожалению, малое количество вещества не позволило получить порошкограмму хорошего качества, однако отражения с межплоскостными расстояниями 4.801, 4.760, 3.800, 3.410, 3.345, 3.312, 3.050 и 2.525 Å позволяют с уверенностью отнести этот цинковый сульфат к структурному типу кизерита.

Таблица 5. Химический состав (мас. %) минералов–кислородных соединений из Воронцовского месторождения
Table 5. Chemical composition (wt. %) of oxy salt minerals from the Vorontsovskoe deposit

№ ан.	Минерал	CaO	MgO	MnO	FeO	CuO	ZnO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	SO_3	H_2O	Сумма	Эмпирическая формула
1	Ганнингит	–	1.48	–	–	3.90	37.64	0.69	–	–	46.84	10.50	101.05	$(\text{Zn}_{0.80}\text{Cu}_{0.08}\text{Mg}_{0.06}\text{Al}_{0.02})_{\Sigma 0.96}\text{S}_{1.01}\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
2	Ортосерпьерит	8.77	–	–	–	48.74	0.67	–	–	–	24.86	16.79	99.83	$\text{Ca}_{1.01}(\text{Cu}_{3.94}\text{Zn}_{0.05})_{\Sigma 3.99}\text{S}_{2.00}\text{O}_8(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
3	Пумпеллиит-(Al)	23.55	0.62	0.75	–	–	–	30.87	–	37.80	–	5.65	99.24	$\text{Ca}_{2.01}(\text{Al}_{2.90}\text{Mg}_{0.07}\text{Mn}_{0.05})_{\Sigma 3.02}\text{Si}_{3.01}\text{O}_{12}(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$
4	Сепиолит	–	24.34	0.26	0.10	–	–	0.12	0.97	55.07	–	19.42	100.27	$\text{Mg}_{3.92}\text{Mn}_{0.02}\text{Fe}^{2+}_{0.01}\text{Fe}^{3+}_{0.08}\text{Al}_{0.02}\text{Si}_{5.95}\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Примечание. Содержание H_2O во всех анализах вычислено по стехиометрии. Отношение $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ в анализе № 3 рассчитано по балансу зарядов. Прочерк – содержание компонента ниже предела обнаружения. Формулы минералов рассчитаны на 5 атомов O (ганнингит), 17 атомов O (ортосерпьерит), 14 атомов O [пумпеллиит-(Al)], сумму всех катионов равную 10 и 23 атома O (сепиолит).

Note. The H_2O content in all analyses is calculated by stoichiometry. The $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ratio in analysis no. 3 is calculated from charge balance. Dash – the content of element is below detection limit. The formulas are calculated on the basis of five, 17, and 14 oxygen atoms for gunningite, orthoserpierite, pumpeyite-(Al), respectively, and cation sum of ten and 23 of oxygen atoms for sepiolite.

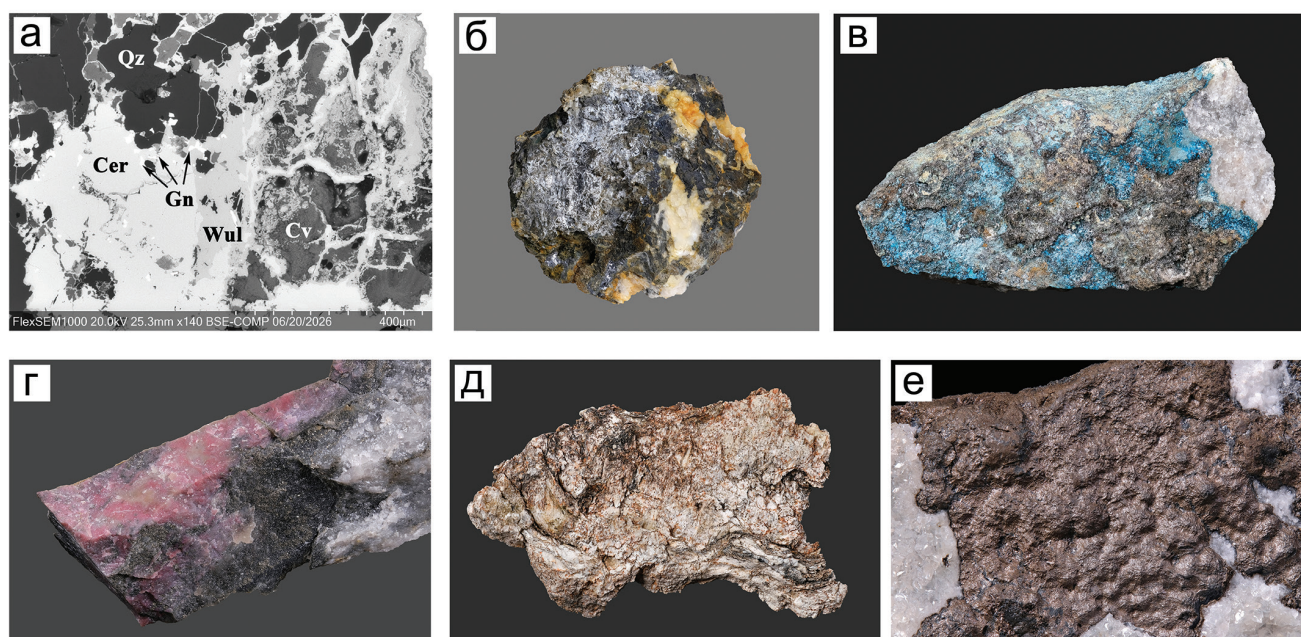


Рис. 6. Минералы–кислородные соединения из Воронцовского месторождения: а – удлиненное зерно вольфенита в церуссите в ассоциации с галенитом, ковеллином и кварцем; б – белая порошковая корка ганнингита на темном сфалерите с кварцем и пиритом, 6 x 5 см; в – ярко-голубой мелкозернистый ортосерпьерит на кальците с гипсом (темные корки и мелкие игольчатые кристаллы), 8 x 4 см; г – розовый мелкозернистый пумпеллиит-(Al) в ассоциации с пиритом, диопсидом, клинохлором и другими минералами, поле зрения 3 x 1,5 см; д – корка грязно-белого волокнистого сепиолита, 8 x 5 см; е – черная землистая корка таканелита на кальците, поле зрения 1 x 1 см.

BSE фото (а), фото М.Д. Мильшиной (б–е).

Fig. 6. Oxsalts from the Vorontsovskoe deposit: а – elongated wulfenite grain in cerussite with galena, covellite and quartz; б – white powdery gunningite crust on dark sphalerite with quartz and pyrite, 6 x 5 cm; в – bright blue fine-grained orthoserpierite on calcite with gypsum (dark crusts and tiny acicular crystals), 8 x 4 cm; г – pink fine-grained pumpellyite-(Al) in assemblage with pyrite, diopside, clinochlore and other minerals, field of view is 3 x 1.5 cm; д – dirty white fibrous sepiolite crust, 8 x 5 cm; е – black earthy takanelite crust on calcite, field of view is 1 x 1 cm.

BSE image (а), photographs by M.D. Milshina (б–е).

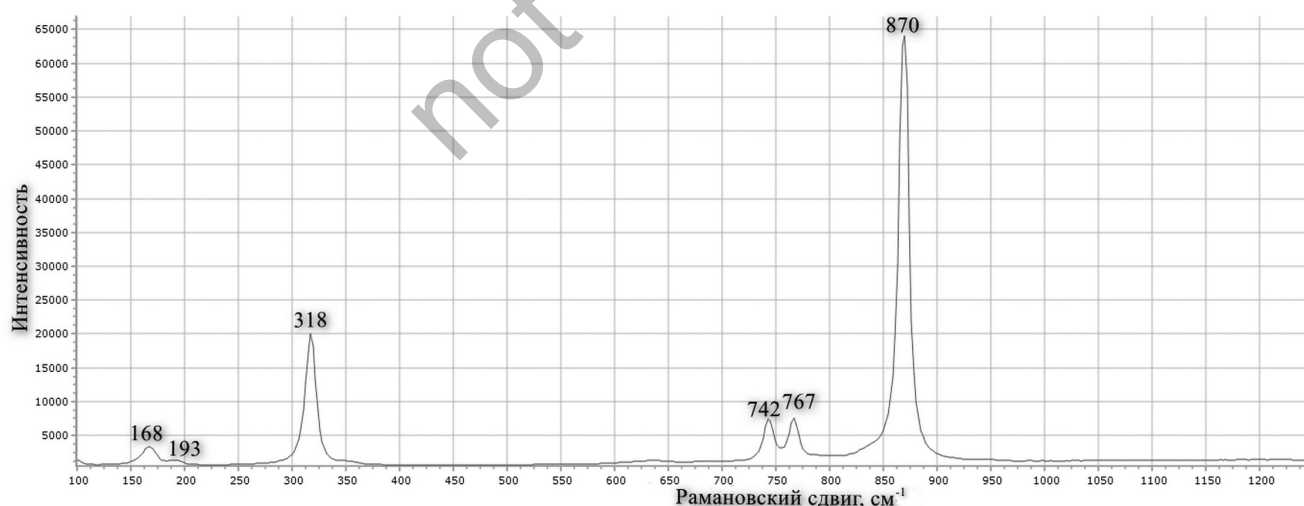


Рис. 7. КР спектр вольфенита из Воронцовского месторождения.

Fig. 7. Raman spectrum of wulfenite from the Vorontsovskoe deposit.

Таблица 6. Порошковая рентгенограмма ортосерпьерита из Воронцовского месторождения

Table 6. Powder X-ray diffraction data of orthoserperite from Vorontsovskoe deposit

Ортосерпьерит, Воронцовское месторождение		Ортосерпьерит (PDF #3950346)		<i>hkl</i>
<i>d</i> , Å	<i>I</i> , %	<i>d</i> , Å	<i>I</i> , %	
10.18	100	10.210	100	0 0 2
6.180	5	6.1800	<5	0 1 0
5.722	4	5.7300	<5	1 1 1
5.301	5	5.3000	<5	0 1 2
5.095	80	5.1000	90	0 0 4
		4.8700	<5	4 0 2
4.740	5	4.7300	5	3 1 0
4.620	5	4.6200	<5	2 0 4, 3 1 1
4.493	3	4.4920	5	1 1 3
4.290	12	4.2960	10	3 1 2, 4 0 3
3.890	4	3.9000	5	3 1 3, 1 1 4
		3.6830	<5	6 0 0
3.540	10	3.5450	10	5 1 1
3.390	75	3.4000	90	0 0 6, 5 1 2
		3.2850	20	4 0 5
3.179	50	3.1840	50	5 1 3
		3.0910	<5	0 2 0, 3 1 5
		2.9760	<5	0 1 6
2.939	5	2.9420	<5	1 1 6, 5 1 4
2.901	4	2.9000	<5	4 1 5, 4 0 6
		2.7600	5	8 0 0
2.740	30	2.7360	30	8 3 1, 2 2 3
		2.6960	5	4 2 0, 5 1 5
2.680	20	2.6780	25	4 2 1, 8 0 2
		2.6500	<5	0 2 4
2.607	40	2.6100	50	1 1 7, 4 2 2
2.555	35	2.5580	50	2 1 7, 8 0 3
2.510	35	2.5110	40	5 2 1, 4 2 3
2.428	5	2.4240	5	8 0 4
2.379	50	2.3840	60	4 2 4
		2.3600	<5	0 1 8
2.285	23	2.2850	30	8 0 5, 9 1 0
2.244	27	2.2490	30	4 2 5, 3 1 8
2.211	5	2.2150	5	2 0 9, 7 2 0
2.150	5	2.1590	<5	7 1 6, 10 0 2
		2.1420	<5	8 0 6
2.108	30	2.1110	35	4 2 6, 1 2 7
		2.0020	15	2 0 10, 8 0 7
1.990	10	1.9800	20	4 2 7, 3 3 1
1.848	22	1.8520	25	3 3 4, 10 0 6
1.755	8	1.7600	10	10 0 7, 1 3 6
1.740	10	1.7360	10	4 2 9, 6 2 8
1.700	5	1.6990	5	0 0 12, 10 2 4
1.625	10	1.6260	10	4 2 10, 4 0 12
1.600	5	1.6000	<5	0 3 8, 6 1 11
1.575	30	1.5770	30	14 0 0, 9 3 1
1.548	15	1.5500	25	2 0 13, 0 4 0
1.527	10	1.5290	20	2 4 1, 11 1 8

Диафорит $\text{Ag}_3\text{Pb}_2\text{Sb}_3\text{S}_8$ установлен электронно-зондовым методом в одном аншлифе, изготовленном из фрагмента той же глыбы с многочисленными образцами бертьерита. Диафорит слагает редкие зерна до 10 мкм в кальците, ассоциируя сgrossуляром, везувианом, золотом, сульфидами (галенит, пирит, пирротин, сфалерит, ульманнит, халькопирит) и сульфосолями (буланжерит, марганцовистый джемсонит, тетраэдрит-(Fe), физелиит) (рис. 2в). В составе диафорита зафиксирована небольшая примесь Bi (табл. 2, ан. 8). В отраженном свете минерал выглядит белым, примерно как галенит, но темнее пирита. Анизотропия выражена слабо.

Монпельвуксит $\text{AgPb}_{16}\text{Sb}_{27}\text{As}_{18}\text{S}_{84}$ и **хиршлит** $\text{Pb}_8\text{As}_{10}\text{Sb}_6\text{S}_{32}$ идентифицированы электронно-зондовым методом в образце Вор-11/25-3, отобранном в 2025 г. Каждый из них встречен всего в одном зерне: индивид монпельвуксита размером 20 x 12 мкм заключен в карбонатной породе (доломит, кальцит) (рис. 2г), а зерно хиршлита размером 8 x 4 мкм – в барите (рис. 2д). Дополняют эту ассоциацию антимонит, колорадоит и реальгар. Электронно-зондовые анализы этих минералов надежно рассчитываются на формулы монпельвуксита (табл. 2, ан. 9) и хиршлита (табл. 2, ан. 10), соответственно. Последний является членом гомологической серии сарторита, что, как и в случае с бернарлоттитом, позволяет рассчитать значение N (2.97) и сравнить с идеальным значением, полученным в результате определения структуры ($N = 3$) хиршлита из места его первой находки (Keutsch et al., 2018). Близость этих показателей также свидетельствует о достоверности нашей диагностики.

В отраженном свете оба минерала выглядят белыми, приблизительно равными по отражательной способности антимониту ($R = 31\text{--}47\%$), но существенно темнее пирита ($R = 54\%$) и светлее реальгара ($R = 19\text{--}21\%$). Это соответствует их коэффициентам отражения [$R = 36.4\text{--}40.6\%$ у монпельвуксита (Dan Tora, устное сообщение) и $R = 32.1\text{--}38.5\%$ у хиршлита (Keutsch et al., 2018)]. В скрещенных николях обе воронцовские сульфосоли отчетливо анизотропны в серых тонах. Монпельвуксит и хиршлит найдены впервые на территории Российской Федерации.

Ортосерпьерит $\text{Ca}(\text{Cu}, \text{Zn})_4(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ обнаружен в виде эффектных ярко-голубых корочек до 30 x 30 см на глыбах белого мрамора (кальцита) в образцах, отобранных в апреле 2026 г. на складе забалансовых руд № 1. Кроме него здесь

присутствует только гипс, образующий грязно-белые и темные корки на поверхности ортосерпьерита, а также миллиметровые игольчатые кристаллы белого цвета (рис. 6в). Химический анализ показал, что найденный минерал является кальциевым членом группы девиллина (табл. 5, ан. 2). Порошковая рентгенограмма (табл. 6) содержит несколько слабоинтенсивных отражений, присущих только ортосерпьериту, но отсутствующих у девиллина и серпьерита. Рассчитанные по порошкограмме параметры ромбической элементарной ячейки ортосерпьерита: $a = 22.033(2)$, $b = 6.1878(6)$, $c = 20.342(2)$ Å, $V = 2773.3(4)$ Å³.

Пумпеллиит-(Al) $\text{Ca}_2\text{AlAl}_2[\text{Si}_2\text{O}_6\text{OH}][\text{SiO}_4](\text{OH})_2\text{O}$ является пороодообразующим минералом в метасоматических образованиях, встреченных в апреле 2026 г. на складе забалансовых руд № 1. Он тесно сростается с диопсидом, клинохлором, мусковитом и титанитом, но выделяется среди них своим насыщенным розовым цветом (рис. 6г). Максимальный размер агрегатов пумпеллиита-(Al) достигает 10 см. Из рудных минералов в изученной ассоциации присутствует только пирит. Розовая окраска минерала может быть объяснена наличием в его составе небольшой примеси Mn (табл. 5 ан. 3). Порошковая рентгенограмма приведена в табл. 7. Рассчитанные по ней параметры моноклинной элементарной ячейки уверенно отвечают структурному типу пумпеллиита: $a = 8.8189(9)$, $b = 5.867(1)$, $c = 19.093(2)$ Å, $\beta = 97.27(1)^\circ$, $V = 979.9(2)$ Å³. Это второй минерал из группы пумпеллиита, диагностированный нами на Воронцовском месторождении: ранее в метасоматических образованиях, наложенных на карбонатные брекчии, здесь был описан пумпеллиит-(Mg) (Касаткин и др., 2021в).

Сепиолит $\text{Mg}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ найден в апреле 2026 г. на складе забалансовых руд № 2 в виде грязно-белых волокнистых корок площадью несколько десятков квадратных сантиметров, нарастающих на стенку тектонической трещины в белом мраморе (рис. 6д). Минерал диагностирован по химическому составу (табл. 5, ан. 4) и порошковой рентгенограмме (табл. 8). Параметры его ромбической элементарной ячейки: $a = 13.448(2)$, $b = 26.914(4)$, $c = 5.2879(7)$ Å, $V = 1913.9(3)$ Å³.

Таканелит $(\text{Mn,Ca})\text{Mn}_4\text{O}_9 \cdot \text{H}_2\text{O}$ образует мягкие землистые корочки до 4 см в поперечнике черного цвета с полуметаллическим блеском на кальците (рис. 6е). Образцы с этим минералом были отобраны на складах забалансовых руд в апреле 2026 г., и мы не исключаем, что туда они

Таблица 7. Порошковая рентгенограмма пумпеллиита-(Al) из Воронцовского месторождения

Table 7. Powder X-ray diffraction data of pumpellyite-(Al) from Vorontsovskoe deposit

Пумпеллиит-(Al), Воронцовское месторождение		Пумпеллиит-(Al) (PDF #250156)		<i>hkl</i>
<i>d</i> , Å	<i>I</i> , %*	<i>d</i> , Å	<i>I</i> , %	
4.743	10	4.7400	16	0 0 4
4.659	20	4.6600	25	1 1 1
4.376	17	4.3700	30	2 0 0
3.802	15	3.7900	30	2 0 2
3.512	35	3.5200	40	2 1 1
3.442	9	3.4400	11	2 0 4
3.034	8	3.0300	10	2 0 4
2.950	15	2.9520	18	0 2 0
		2.9450	16	2 1 3
2.917	45	2.9150	55	3 0 0
2.896	100	2.8960	100	1 1 5
2.730	18	2.7340	30	2 0 6
2.642	15	2.6310	20	3 1 1
2.504	23	2.5060	30	0 2 4
2.446	26	2.4460	25	1 1 7
2.326	18	2.3290	13	2 2 2, 3 1 3
2.206	10	2.2060	25	2 0 8
2.191	14	2.1930	17	4 0 2
		2.1870	17	4 0 0
2.155	12	2.1570	10	0 2 6
2.105	8	2.1130	9	4 0 4
2.089	8	2.0910	8	5 1 2
		2.0730	10	4 0 2
1.852	10	1.8475	10	0 2 8
1.660	10	1.6634	8	1 1 11
1.575	18	1.5944	17	4 2 4
		1.5799	11	0 0 12
1.544	8	1.5539	8	2 2 10
1.474	12	1.4872	10	4 2 8
		1.4765	15	0 4 0
		1.4714	10	3 0 12

Примечание. Приведены только отражения с интенсивностями $\geq 8\%$.

Note. Only reflections with intensity $\geq 8\%$ are provided.

поступили из Южного карьера. Именно на отвалах последнего нами в 2017–2018 гг. были найдены все оксиды и гидроксиды Mn, включая Ca-аналог таканелита рансьеит. Химический состав таканелита (мас. %): K₂O 0.46, MgO 0.21, CaO 2.36, CuO 0.54, BaO 0.67, MnO₂ 88.94, сумма 93.18. Валентность Mn и содержание воды в минерале не определялись, поэтому написание его эмпирической формулы затруднительно. Тем не менее, низкое количество Ca и главные отражения порошковой рентгенограммы (7.601, 3.801, 2.466, 2.351, 2.069 и 1.422 Å) позволяют с уверенностью говорить о надежности нашей диагностики.

Таблица 8. Порошковая рентгенограмма сепиолита из Воронцовского месторождения

Table 8. Powder X-ray diffraction data of sepiolite from Vorontsovskoe deposit .

Сепиолит, Воронцовское м-ние		Сепиолит (PDF #261226)		hkl
d, Å	I, %*	d, Å	I, %	
12.15	100	12.200	50	1 1 0
7.552	25	7.5300	25	1 3 0
6.738	34	6.7300	30	0 4 0
5.043	9	5.0400	13	1 5 0
4.502	35	4.5200	40	0 3 1
4.304	30	4.3200	40	1 3 1
4.010	8	4.0000	11	3 3 0
3.748	50	3.7600	55	2 3 1
3.549	10	3.5400	19	2 4 1
3.363	95	3.3600	100	0 8 0
3.197	38	3.2000	55	3 3 1
3.041	18	3.0500	20	2 6 1
		2.8310	5	2 7 1
2.709	40	2.6900	50	0 10 0
2.614	18	2.6230	30	2 8 1
2.571	30	2.5650	40	5 3 0
2.440	15	2.4490	20	2 1 2
2.397	12	2.4050	20	1 11 0
2.261	25	2.2600	30	2 10 1
2.130	10	2.1240	11	6 4 0
2.080	20	2.0720	30	2 7 2
1.879	5	1.8790	8	5 1 2
1.751	0.5	1.7590	1	4 12 1
1.704	12	1.7000	16	2 1 3
1.600	30	1.5940	35	5 9 2

Ульманнит NiSbS установлен электронно-зондовым методом в одной минеральной ассоциации с бертьеритом. Он не образует обособленных индивидов, но отмечен в сростках до 40 мкм с другими сульфидами (пирит, сфалерит) или сульфосолями (бертьерит, буланжерит, джемсонит) (рис. 2е, ж). Химический состав воронцовского ульманнита отвечает идеальной формуле NiSbS (табл. 2, ан. 11); иногда этот минерал содержит примесь Fe (табл. 2, ан. 12). Отражательная способность ульманнита умеренно высокая, близкая к пириту. В контакте с последним он имеет слабый сиреневый оттенок. Ульманнит изотропен, благодаря чему его легко отличить в сростках с сильно анизотропными бертьеритом, буланжеритом и джемсонитом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние пять с половиной лет кадастр минералов Воронцовского золоторудного месторождения пополнился тринадцатью новыми наименованиями: бернарлоттитом, бертьеритом, брусницинитом, вульфенитом, ганнингитом, диафоритом, монпельвукситом, ортосерпьеритом, пумпеллиитом-(Al), сепиолитом, таканелитом, ульманнитом и хиршлитом. Таким образом, общее количество минеральных видов, с высокой степенью достоверности установленных (инструментально диагностированных) на этом месторождении, достигло 223. Поскольку добычные работы здесь более не ведутся, перспективы дальнейшего пополнения минерального кадастра связаны не столько с поступлением новых образцов, сколько с доизучением уже имеющихся. В частности, авторы не теряют надежду довести до статуса «полноправных» минеральных видов несколько потенциально новых Ti- и Mn-содержащих сульфосолей, исследование которых в настоящее время продолжается.

ЛИТЕРАТУРА

Викентьев И.В., Тюкова Е.Э., Мурзин В.В., Викентьева О.В., Павлов Л.Г. (2016) Воронцовское золоторудное месторождение. Геология, формы золота, генезис. Екатеринбург, Форт Диалог-Исеть, 206 с.

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. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2020-6-4-1>

Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. (2021a) Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 2: Простые вещества, сульфиды, арсениды, теллуриды. *Минералогия*, 7(1), 5–22. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-1-1>

Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. (2021b) Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). Часть 3: Сульфосоли. *Минералогия*, 7(2), 5–49. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-2-1>

Касаткин А.В., Степанов С.Ю., Цыганко М.В., Шкода Р., Нестола Ф., Плашил Я., Маковицки Э., Агаханов А.А., Паламарчук Р.С. (2021в) Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный

Урал). Часть 4: Кислородные соединения. *Минералогия*, 7(3), 5–31. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-3-1>

Кононов О.В., Виноградова Р.А., Бородаев Ю.С., Агеева Е.С., Дейнеко И.П., Бочек Л.И. (1990) Высокомарганцовистый бертьерит Тырныаузского месторождения (Северный Кавказ). *Записки ВМО*, 119(2), 82–87.

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

Чвилёва 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.

Holland T.J.B., Redfern S.A.T. (1997) Unit cell refinement from powder diffraction data: the use of regression diagnostics. *Mineralogical Magazine*, 61, 65–77. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.404.07>

Kasatkin A.V., Stepanov S.Yu., Tsyganko M.V., Škoda R., Nestola F., Plášil J., Makovicky E., Agakhanov A.A., Palamarchuk R.S. (2022) Mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). *Mineralogy*, 8(1), 5–93. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2022-8-1-1>.

Kasatkin A.V., Plášil J., Sandalov F.D., Nestola F., Škoda R., Gurzhiy V.V., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y. (2025) Brusnitsynite, $\text{Mn}_3\text{CuPbAs}_3\text{Sb}_2\text{S}_{12}$, a first As-dominant member of the lillianite-andorite homologous series from the Vorontsovskoe Au deposit, Northern Urals, Russia. *Записки РМО*, 154(6), 40–59. <https://doi.org/10.7868/S2658435225060033>

Keutsch F., Topa D., Makovicky E. (2018) Hyršlite, $\text{Pb}_8\text{As}_{10}\text{Sb}_6\text{S}_{32}$, a new $N = 3;3$ member of the sartorite homologous series from the Uchucchacua polymetallic deposit, Peru. *European Journal of Mineralogy*, 30, 1155–1162. <https://doi.org/10.1127/ejm/2018/0030-2797>

Makovicky E., Topa D. (2015) Crystal chemical formula for sartorite homologues. *Mineralogical Magazine*, 79, 25–31. <https://doi.org/10.1180/minmag.2015.079.1.03>

Orlandi P., Biagioni C., Bonaccorsi E., Moëlo Y., Paar W. (2017) Lead-antimony sulfosalts from Tuscany (Italy). XXI. Bernarlottiite, $\text{Pb}_{12}(\text{As}_{10}\text{Sb}_6)_{\Sigma 16}\text{S}_{36}$, a new $N=3.5$ member of the sartorite homologous series from the Ceragiola marble quarry: occurrence and crystal structure. *European Journal of Mineralogy*, 29, 713–726. <https://doi.org/10.1127/ejm/2017/0029-2625>

Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Vikent'eva O.V., Chugaeva A.V., Dubinina E.O., Prokofiev V.Yu., Murzin V.V. (2019) Vorontsovka Carlin-style gold deposit in the North Urals: Mineralogy, fluid inclusion and isotope data for genetic model. *Chemical Geology*, 508, 144–166. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.07.020>

Warr L.N. (2021) IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85, 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>

REFERENCES

Chvileva T.N., Bezsmertnaya M.S., Spiridonov E.M., Agroskin A.S., Papayan G.V., Vinogradova R.A., Lebedeva S.I., Zavyalov E.N., Filimonova A.A., Petrov V.K., Rautian L.P., Sveschnikova O.L. (1988) Handbook of ore minerals in reflected light. Moscow, Nedra, 504 p. (in Russian)

Holland T.J.B., Redfern S.A.T. (1997) Unit cell refinement from powder diffraction data: the use of regression diagnostics. *Mineralogical Magazine*, 61, 65–77. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.404.07>

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. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2020-6-4-1> (in Russian)

Kasatkin A.V., Stepanov S.Yu., Tsyganko M.V., Škoda R., Nestola F., Plášil J., Makovicky E., Agakhanov A.A., Palamarchuk R.S. (2021a) Mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). Part 2: Native elements, sulfides, arsenides, tellurides. *Mineralogiya (Mineralogy)*, 7(1), 5–22. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-1-1> (in Russian)

Kasatkin A.V., Stepanov S.Yu., Tsyganko M.V., Škoda R., Nestola F., Plášil J., Makovicky E., Agakhanov A.A., Palamarchuk R.S. (2021b) Mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). Part 3: Sulfosalts. *Mineralogiya (Mineralogy)*, 7(2), 5–49. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-2-1> (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. (2021c) Mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). Part 4: Oxysalts. *Mineralogiya (Mineralogy)*, 7(3), 5–31. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-3-1> (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. (2022) Mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 8(1), 5–93. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2022-8-1-1>.

Kasatkin A.V., Plášil J., Sandalov F.D., Nestola F., Škoda R., Gurzhiy V.V., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y. (2025) Brusnitsynite, $\text{Mn}_3\text{CuPbAs}_3\text{Sb}_2\text{S}_{12}$, a first As-dominant member of the lillianite-andorite homologous series from the Vorontsovskoe Au deposit, Northern Urals, Russia. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 154(6), 40–59. <https://doi.org/10.7868/S2658435225060033>

Keutsch F., Topa D., Makovicky E. (2018) Hyršlite, $\text{Pb}_8\text{As}_{10}\text{Sb}_6\text{S}_{32}$, a new $N = 3;3$ member of the sartorite homologous series from the Uchucchacua polymetallic deposit, Peru. *European Journal of Mineralogy*, 30, 1155–1162. <https://doi.org/10.1127/ejm/2018/0030-2797>

Kononov O.V., Vinogradova R.A., Borodaev Yu.S., Ageeva E.S., Deyneko I.P., Bochek L.I. (1990) High-Mn berthierite from the Tyrnyauz deposit (Northern Caucasus). *Zapiski VMO (Proceedings of the All-Union Mineralogical Society)*, 119(2), 82–87. (in Russian)

Makovicky E., Topa D. (2015) Crystal chemical formula for sartorite homologues. *Mineralogical Magazine*, 79, 25–31. <https://doi.org/10.1180/minmag.2015.079.1.03>

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

Orlandi P., Biagioni C., Bonaccorsi E., Moëlo Y., Paar W. (2017) Lead-antimony sulfosalts from Tuscany (Italy). XXI. Bernarlottiite, $\text{Pb}_{12}(\text{As}_{10}\text{Sb}_6)_{\Sigma 16}\text{S}_{36}$, a new $N=3.5$ member of the sartorite homologous series from the Ceragiola marble quarry: occurrence and crystal structure. *European Journal of Mineralogy*, 29, 713–726. <https://doi.org/10.1127/ejm/2017/0029-2625>

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)

Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Vikent'eva O.V., Chugaeva A.V., Dubinina E.O., Prokofiev V.Yu., Murzin V.V. (2019) Vorontsovka Carlin-style gold deposit in the North Urals: Mineralogy, fluid inclusion and isotope data for genetic model. *Chemical Geology*, 508, 144–166. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.07.020>

Warr L.N. (2021) IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85, 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>

Информация об авторах

Касаткин Анатолий Витальевич – ведущий специалист, Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва, Россия; anatoly.kasatkin@gmail.com

Цыганко Михаил Владимирович – директор, Минералогический музей «Штуфной кабинет», г. Североуральск, Свердловская обл., Россия; zigankom@mail.ru

Шкода Радек – доктор наук, ассоциированный профессор, Университет Масарика, г. Брно, Чехия; rskoda@sci.muni.cz

Плашил Якуб – доктор наук, старший научный сотрудник, Институт физики Чешской Академии наук, г.Прага, Чехия; plasil@fzu.cz

Мильшина Мария Дмитриевна – фотограф минералов, коллекционер, г. Москва, Россия, narrata@mail.ru.

Information about the authors

Anatoly V. Kasatkin – Leading Researcher, Fersman Mineralogical Museum RAS, Moscow, Russia; anatoly.kasatkin@gmail.com.

Mikhail V. Tsyganko – Director, Mineralogical Museum “Shtufnoi Kabinet”, Severouralsk, Sverdlovsk region, Russia; zigankom@mail.ru

Radek Škoda – Doctor Sci., Associate Professor, Masaryk University, Brno, Czech Republic; rskoda@sci.muni.cz

Jakub Plášil – Doctor Sci., Senior Researcher, Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic; plasil@fzu.cz

Maria D. Milshina – mineral photographer, collector, Moscow, Russia, narrata@mail.ru.