

МИНЕРАЛОГИЯ ВОРОНЦОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРНЫЙ УРАЛ). ЧАСТЬ 1: ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ, МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ, КАДАСТР МИНЕРАЛЬНЫХ ВИДОВ

А.В. Касаткин¹, С.Ю. Степанов², М.В. Цыганко³, Р. Шкода⁴, Ф. Нестола⁵,
Я. Плашил⁶, Э. Маковицкий⁷, А.А. Агаханов¹, Р.С. Паламарчук⁸

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

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

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

⁴ Масариков университет, Котларшска 2, Брно, 61137 Чехия

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

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

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

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

MINERALOGY OF THE VORONTSOVSKOE GOLD DEPOSIT (NORTHERN URALS). PART 1: HISTORY OF STUDY, MINERAL ASSEMBLAGES, LIST OF MINERALS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Аннотация. Данная статья открывает серию публикаций, посвященных минералогии Воронцовского золоторудного месторождения на Северном Урале. Последнее является уникальным не только в России, но и в мире по разнообразию и своеобразию Ti–Hg–Mn–As–Sb–S минерализации. Опираясь на литературные и оригинальные данные, авторы создали максимально полный минеральный кадастр месторождения. Всего на месторождении установлено 209 минералов, включая восемь новых минеральных видов, открытых авторами: воронцовит,

ферроворонцовит, цыганкоит, гладковскийит, люборжакит, походяшинит, гунгерит и ауэрбахит. Помимо этого, 40 минералов найдены впервые на территории Российской Федерации и еще 89 – впервые на Воронцовском месторождении. Систематическое исследование руд объекта позволило установить в них девять наиболее устойчивых минеральных ассоциаций, семь из которых приурочены к карбонатным брекчиям. В них диагностировано более 70 редких сульфидов, теллуридов и сульфосолей, 30 из которых содержат Tl, 12 – Hg и 9 – Mn в качестве видообразующих элементов. В настоящей статье охарактеризованы история изучения месторождения, его геологическое положение и строение, типы руд, минеральные ассоциации и методы исследований.

Ключевые слова: Воронцовское месторождение, Северный Урал, кадастр минералов, рудная минеральная ассоциация, карбонатная брекчия, Tl-Hg-Mn-сульфосоли, новый минерал, первая находка в России.

Abstract. This work is the first paper in a series of publications dedicated to mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit in the Northern Urals. The deposit is unique for both Russia and world with regard to the diversity and originality of Tl-Hg-Mn-As-Sb-S mineralization. Based on available literature and our data, we compiled an exhaustive list of 209 mineral species of the deposit, including eight new minerals found by the authors: vorontsovite, ferrovorontsovite, tsyganckoite, gladkovskyite, luborzhakite, pokhodyashinite, gungerite and auerbakhite. In addition, 40 and 89 minerals are found for the first time in Russia and the deposit, respectively. Systematic studies of ores revealed nine main mineral assemblages, seven of which are confined to carbonate breccias. They contain more than 70 rare sulfides, tellurides and sulfosalts including 30, 12 and 9 minerals, where Tl, Hg and Mn are species-defining elements, respectively. In this paper, we characterize the history of study of the deposit, its geological position and structure, ore types, mineral assemblages, and analytical methods.

Key words: Vorontsovskoe deposit, Northern Urals, list of mineral species, ore mineral assemblage, carbonate breccia, Tl-Hg-Mn sulfosalts, new mineral, first find in Russia.

Введение

Воронцовское золоторудное месторождение расположено в Краснотурьинском районе Свердловской области (Северный Урал), в 310 км севернее г. Екатеринбурга, 13 км южнее г. Краснотурьинска и 0.5 км к западу от пос. Воронцовка (рис. 1а, б). Месторождение было открыто в 1985 г., после чего на нем в течение нескольких лет проводились геологоразведочные и геофизические работы (Гладковский, 2002). В 1998 г. месторождение было приобретено компанией ОАО «Полиметалл», а в 1999 г. началась его разработка двумя карьерами – Северным и Южным, глубина которых в настоящее время составляет около 240 и 80 м, соответственно (рис. 2а, б). Руда, как первичная, так и окисленная, складировалась на рудном складе около Северного карьера (рис. 2в), откуда доставлялась на перерабатывающую фабрику, находящуюся восточнее в 6 км. Переработка руды ведется методами сорбционного выщелачивания «уголь-в-пульпе» (мощность 950 тыс. т руды в год) и сезонного кучного

выщелачивания (мощность 1 млн т руды в год). Рядом с карьерами находятся отвалы пустой породы (рис. 2г, д). Расположение основных объектов в пределах месторождения, где отбирались образцы для изучения, показано на рис. 1в.

Объемы переработки руды и производства золота на Воронцовском месторождении достигли максимальных значений в 2010 г., после чего оба показателя стали постепенно снижаться. В середине 2020 г. ОАО «Полиметалл» прекратило добычу золота на Северном карьере. Южный карьер был отработан еще в 2018 г. Таким образом, добыча открытым способом на месторождении к настоящему времени завершена, и в данный момент на фабрике перерабатывается руда из ранее сформированных складов забалансовых руд.

Несмотря на 35-летнюю историю и статус одного из крупнейших месторождений Северного Урала, систематическое исследование минералогии Воронцовского месторождения на современном этапе не проводилось. Большая часть литературы по месторождению посвящена геологическим осо-

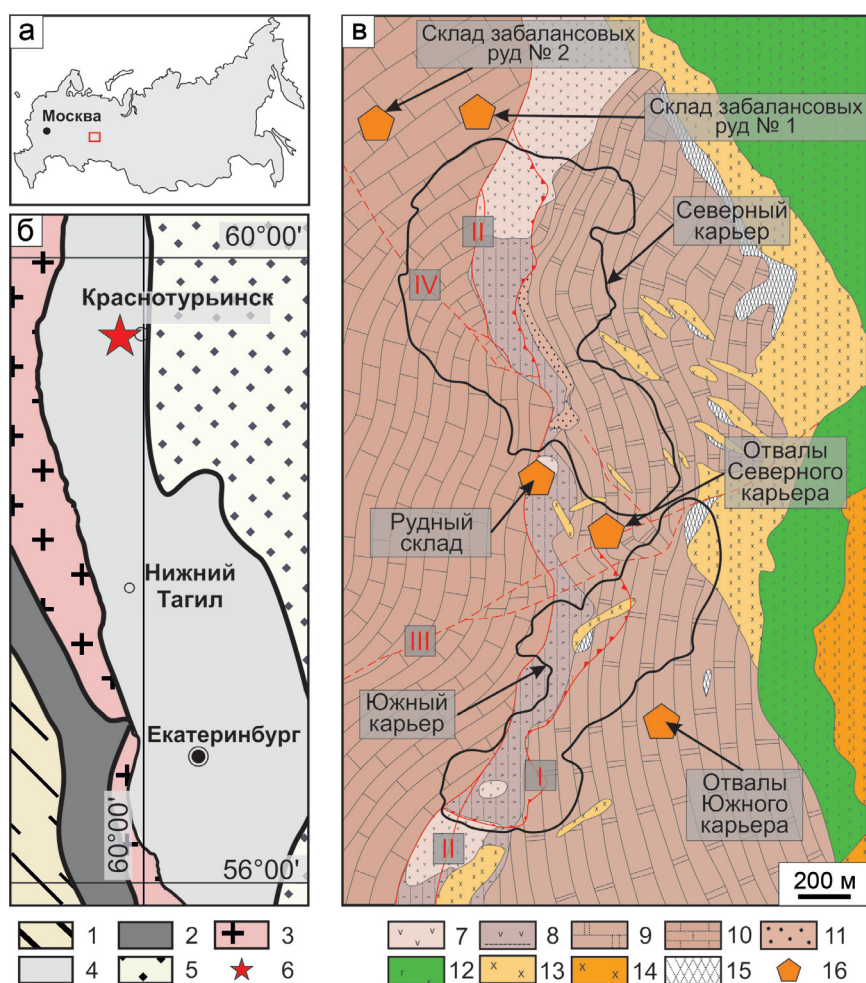


Рис. 1. Географическое положение, геологическая позиция и структура Воронцовского месторождения:

а – положение на карте России; б – позиция в структуре Урала; в – схема геологического строения, по (Викентьев и др., 2016) с изменениями и дополнениями.

1 – Восточно-Европейская платформа; 2 – Западно-Уральская мегазона; 3 – Центрально-Уральское поднятие; 4 – Тагило-Магнитогорская мегазона; 5 – Западно-Сибирская платформа; 6 – Воронцовское золоторудное месторождение; 7 – андезитовые порфириты; 8 – вулканогенно-осадочные породы; 9 – мраморы; 10 – известняки; 11 – карбонатно-осадочные брекчии; 12 – пироксен-плагиоклазовые порфириты; 13 – диориты; 14 – кварцевые диориты; 15 – скарны; 16 – места отбора образцов. Тектонические нарушения: I – Воронцовский рудоконтролирующий надвиг, II – Воронцовский взброс, III – Южно-Воронцовский разлом, IV – Южно-Песчанский разлом.

Fig. 1. Geographical location, geological position and structure of the Vorontsovskoe gold deposit:

а – position on map of Russia; б – position in structure of the Urals; в – geological scheme, modified after (Vikentyev et al., 2016).

1 – East European platform; 2 – West Uralian Megazone; 3 – Central Uralian Uplift; 4 – Tagil-Magnitogorsk Megazone; 5 – West Siberian Platform; 6 – Vorontsovskoe gold deposit; 7 – andesitic porphyrites; 8 – volcanosedimentary rocks; 9 – marbles; 10 – limestones; 11 – sedimentary carbonate breccias; 12 – pyroxene-plagioclase porphyrites; 13 – diorites; 14 – quartz diorites; 15 – skarns; 16 – sampling places. Faults: I – Vorontsovsky ore-controlling thrust, II – Vorontsovsky reverse fault, III – Yuzhno-Vorontsovsky fault, IV – Yuzhno-Peschansky fault.

бенностям объекта, тогда как минералогические сведения о нем отрывочны.

Главной целью предстоящей серии публикаций является восполнение этого пробела. В частности, опираясь на литературные и собственные данные, нами составлен максимально полный на

сегодня кадастр минеральных видов Воронцовского месторождения, а также собрана разрозненная информация из различных литературных источников о минералах, достоверно установленных здесь на сегодняшний день. Основной объем новых данных получен в результате полевых сбо-



Рис. 2. Основные объекты рудника на Воронцовском месторождении:

а – Северный карьер; б – Южный карьер; в – рудный склад; г – отвалы Северного карьера; д – склад забалансовых руд № 1; е – склад забалансовых руд № 2. Фото А.В. Касаткина (а–г; август 2018 г.), С.Ю. Степанова (д; май 2013 г.), М.В. Цыганко (е; сентябрь 2020 г.).

Fig. 2. Main sites of the mine operating at the Vorontsovskoe deposit:

а – Northern open pit; б – Southern open pit; в – ore stockpile; г – dumps of the Northern open pit; д – off-balance ore stockpile no. 1; е – off-balance ore stockpile no. 2. Photo by A.V. Kasatkin (а–г; August 2018), S.Y. Stepanov (д; May 2013), M.V. Tsyganko (е; September 2020).

ров авторов и лабораторных исследований, проведенных в 2013–2020 гг. Во время неоднократных посещений месторождения в указанный период каменный материал отбирался с рудного склада и складов забалансовых руд, а также из карьеров и отвалов. В первую очередь, обращалось внимание на карбонатные брекчии, в которых установлена чрезвычайно богатая и разнообразная Tl–Hg–Mn–As–Sb–S минерализация с широким спектром редких сульфидов и (особенно) сульфосолей. Лабораторное исследование собранных образцов и документирование обнажений в карьерах позволили установить ряд минеральных ассоциаций с уникальным набором минералов, прежде всего, сульфосолей (антимон- и арсеносульфидов) с ви-

дообразующими Tl, Hg, Pb, Cu и/или Mn. Восемь из них – воронцовит, ферроворонцовит, цыганкоит, гладковскиит, люборжакит, походяшинит, гунгерит и ауэрбахит – новые минеральные виды, открытые авторами. Они были утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации (КНМНК ММА) в период с 2016 по 2020 гг.

Если по количеству открытых новых минералов (девять: выше указанные восемь и клерит, открытый ранее (Мурзин и др., 1996)) Воронцовское месторождение пока уступает таким всемирно известным своей Tl–Hg–As–Sb минерализацией объектам, как Ленгенбах в Швейцарии (44 новых минерала) и Алшар в Северной Македонии (11 новых

минералов), то по числу собственных минералов Т1 (30) оно лишь немного отстает от первого (33 минерала) и почти в два раза превосходит второй (16 минералов). По общему же числу достоверно установленных минеральных видов Воронцовское месторождение заметно опережает эти объекты: 209 против 160 и 85, соответственно (Boev et al., 2012; Raber, Roth, 2018; www.mindat.org). Характерной особенностью Воронцовского месторождения, отличающей его от месторождений Ленгенбах и Алшар, является марганцевая специализация некоторых минеральных ассоциаций: Mn здесь входит в качестве видообразующего элемента в состав целого ряда сульфосолей, а также образует многочисленные оксиды и гидроксиды, установленные авторами в зоне окисления.

В предстоящей серии статей будут охарактеризованы главные минеральные ассоциации, а также описаны все минералы, достоверно установленные нами и предыдущими исследователями. Минералы расположены по химическим классам, а внутри классов – по алфавиту. Изоструктурные минералы (например, представители рядов воронцовит–ферроворонцовит и дальнегроит–шабурнеит, члены группы апатита, амфиболы, пироксены и др.) будут рассмотрены совместно. Минералогические данные предваряются краткой историей изучения месторождения и геологической информацией о нем.

Краткая история изучения месторождения

Воронцовское месторождение было открыто в результате поисковых работ на рудное золото на Песчанско-Воронцовском кварцевожильном рудном поле, проводившихся в середине 1980-х гг. Первооткрывателем месторождения является ведущий геолог Воронцовской ГРП Борис Александрович Гладковский, который летом 1985 г. задал канаву по карстовым отложениям в 200 м за дорогой на базу отдыха Шихан, в то время как из-за экономии средств геохимические и геофизические поиски золота проводились только в узкой полосе вдоль западного контакта Ауэрбаховской интрузии диоритов до этой дороги. Бороздовые пробы из канавы показали высокое содержание золота, вследствие чего возле канавы были пройдены поисковые скважины, вскрывшие первичные золото-сульфидные руды (Викентьев и др., 2016). По результатам поисковых работ 1985–1987 гг. были составлены технико-экономическое соображение, определив-

шее рентабельность разработки месторождения открытым способом, и проект на предварительную разведку объекта (Гладковский, 2002). С 1988 по 1999 гг. проводилась детальная разведка месторождения. В 1999 г. выполнены горно-подготовительные работы на опытном карьере площадью 20 га, и в этом же году была начата отработка месторождения двумя карьерами, Северным и Южным (Викентьев и др., 2016). Более подробно история открытия и геологического изучения месторождения изложена в публикациях (Кабанов, 2001; Гладковский, 2002; Бобров, 2013; Викентьев и др., 2016).

Первые минералогические исследования на месторождении в процессе его разведки были выполнены в 1988–1992 гг. специалистами Института геологии и геохимии УрО АН СССР (Мурзин, Сазонов, 1990; Сазонов и др., 1990а, б; Murzin et al., 1990; Григорьев и др., 1991; Сазонов и др., 1991а, б; Рябинин и др., 1992). В наиболее полном виде данные этих исследований опубликованы в коллективной монографии (Сазонов и др., 1991а). В этой работе подробно описаны геологическое строение рудного района и месторождения, рудные формации, дана геолого-генетическая модель развития оруденения, а сам объект впервые отнесен к месторождениям золота так называемого карлинского типа, охарактеризованы минеральные ассоциации разных типов руд, а также детально описаны рудные и нерудные минералы на основе надежной диагностической информации (химические анализы, рентгенограммы, оптические свойства). Авторы отметили наличие редких минералов систем $Tl-As-Sb-S$ и $Pb-Tl-As-Sb-S$, однако аппаратурно-методические возможности того времени (в частности, электронно-зондового анализа) и малый размер зерен позволили подробно изучить только одну сульфосоль Tl – рутьерит. Несмотря на заметное смещение акцента работы в сторону геологического строения месторождения, характерные для того времени особенности изложения материала, связанные с засекреченностью названия (словосочетание «Воронцовское месторождение» в книге отсутствует) и местоположения золоторудного объекта, а также тот факт, что в распоряжении авторов был лишь весьма ограниченный керновый материал, данную монографию можно считать первой фундаментальной минералогической публикацией по месторождению. В 1991 г. В.В. Мурзиным на месторождении описана редкая серебряная сульфосоль – бенлеонардит (Минералогия..., 1991).

Публикации 1990-х гг., в основном, посвящены геологическим и геохимическим особенностям месторождения (Савельева, Костромин, 1991; Савельева и др., 1991; Барышев и др., 1993; Сазонов и др., 1993; Минина, 1994; Исакович, 1996; Черемисин, Злотник-Хоткевич, 1997; Рахов, 1999), и только в отдельных работах затрагивались частные минералогические вопросы, например, о слюдах (Сазонов и др., 1995) или о морфологии кварца джаспероидов (Бегетнев, 1998). Зона окисления месторождения изучалась Н.М. Риндзюнской с соавторами (1995а, б) и А.А. Кабановым (2001), однако исследования слагающих ее гипергенных минералов не проводились.

В 1996 г. на месторождении был открыт новый минеральный вид – клерит $MnSb_2S_4$ (Мурзин и др., 1996). При этом предполагалось существование целого ряда новых минералов в системах $Mn-As-Sb-S$, $Tl-As-Sb-S$, $K-As-Sb-S$, $As-S$, но подчеркивалось, что мелкие размеры рудных фаз и ограниченность объема материала для исследований ввиду отсутствия эксплуатационных работ на месторождении осложняют их изучение в качестве новых минералов (Мурзин, Суставов, 1997). В сводной публикации о геологии месторождения (Сазонов и др., 1998) впервые приведены данные об изотопном составе серы в сульфидах месторождения (пирит, сфалерит, халькопирит), а также кислорода и углерода в карбонатах вмещающих пород.

В конце 2000-х гг. к минералогическому исследованию объекта подключился специалист по электронно-зондовому анализу Д.А. Варламов (Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черноголовка), в результате чего были опубликованы оригинальные сведения (прежде всего, данные по химическому составу) о ряде минералов золото-сульфидно-сульфосольного парагенезиса рудных брекчий (Мурзин, Варламов, 2010), а также описан парагенезис самородного мышьяка и арсенопирита (Мурзин и др., 2011). Тогда же вышла статья, содержащая оригинальные минералогические данные о полевых шпатах месторождения (Ровнушкин и др., 2010).

В 2016 г. издана совместная монография московских и уральских ученых, посвященная геологии и генезису Воронцовского месторождения (Викентьев и др., 2016). В ней приведены данные по геологии месторождения, результаты термобарометрических и изотопно-геохимических исследований руд, дано более детальное (по сравнению с предыдущими работами) описание модели формирования объекта. С минералогической точки

зрения в работе подробно охарактеризованы минеральные ассоциации гипогенных и гипергенных руд, показана последовательность минералообразования, приведены ранее не публиковавшиеся данные по химическому составу золота, ряда главных рудных минералов и некоторых редких. Описания последних богато иллюстрированы фотографиями в отраженном свете и под растровым электронным микроскопом, приведены карты распределения элементов в кристаллах некоторых сульфидов. Впервые для изучения микропримесей в рудах месторождения применен метод ЛА-ИСП-МС.

Ряд сведений, в том числе диагностические свойства некоторых рудных минералов цемента золоторудных брекчий, приведены в статье С.Ю. Степанова с соавторами (2017). Минералогические исследования жильных карбонатов месторождения выполнены в работах (Сорока и др., 2017, 2018). Две наиболее свежие на сегодняшний день сводные англоязычные публикации по геологии, минералогии, геохимии и геохронологии месторождения (Murzin et al., 2017; Vikentyev et al., 2019) обобщают результаты предыдущих исследований. Во второй из этих публикаций приведен перечень рудных минералов месторождения, включающий 76 наименований.

Оценивая степень изученности месторождения за прошедшие годы, нельзя не отметить геологическую направленность подавляющего большинства публикаций, тогда как исследования богатейшей минералогии месторождения проводились избирательно. За исключением монографии (Сазонов и др., 1991а), в перечисленных публикациях отсутствует рентгенографическая диагностика как редких минералов (хотя многие из них обнаружены в достаточно крупных выделениях), так и главных жильных и рудных. В работах (Викентьев и др., 2016; Vikentyev et al., 2019) упомянуты названия целого ряда редких сульфидов и сульфосолей Tl , в том числе и тех, что описаны в наших более ранних работах (Kasatkin et al., 2018a, b; Kasatkin et al., 2019), однако эти упоминания в подавляющем большинстве не сопровождаются аналитическими данными и ссылками, поэтому их нельзя рассматривать как достоверные. Для пикополита, вейсбергита, дальнегроита, кристита и филротита надежные диагностические сведения впервые будут приведены именно в предстоящей серии статей, что позволяет рассматривать их находки в качестве первых на территории России.

Таким образом, несмотря на то, что Воронцовское месторождение достаточно интенсивно изучалось в последние десятилетия, предлагаемая авторами серия публикаций является первой попыткой систематического описания его богатейшей минералогии. Нами минералогические исследования на месторождении ведутся с 2013 г. с применением рудной микроскопии, электронно-зондового метода, рентгенографии, КР- и ИК-спектроскопии. Можно выделить три основных направления нашей деятельности. Первое – это исследование новых минеральных видов. На сегодняшний день их открыто восемь: воронцовит, ферроворонцовит (Kasatkin et al., 2018a), цыганкоит (Kasatkin et al., 2018b), гладковскийит (Kasatkin et al., 2019), люборжакит (Kasatkin et al., 2020a), походяшинит (Kasatkin et al., 2020b), гунгерит (Kasatkin et al., 2020c) и ауэрбахит (Kasatkin et al., 2020d). Другое направление наших работ – исследование кристаллических структур сульфосолей. Так, на материале из Воронцовского месторождения впервые расшифрованы структуры природного парапьерротита (Plášil et al., 2018) и бесвинцового конечного члена гомеотипного семейства шабурнеита (Makovicky et al., 2020). Аналогичная работа по клериту находится уже в стадии подготовки публикации. Третье главное направление – это комплексное изучение минералогии месторождения. Всего по состоянию на 01.09.2020 г. на Воронцовском золоторудном месторождении установлено 209 минеральных видов. Помимо восьми новых, 40 минералов найдены авторами впервые на территории Российской Федерации и еще 89 – впервые для месторождения. Для 58 ранее известных здесь минералов получены новые сведения, в том числе новые аналитические данные (табл. 1).

Часть оригинальных данных опубликована в статьях по новым минеральным видам, открытым на месторождении (Kasatkin et al., 2018a, b; 2019; 2020a). Помимо информации о самих новых минералах, в этих статьях приведены сведения по соответствующим минеральным ассоциациям, включая аналитические данные по целому ряду редких сульфосолей. Находки на месторождении арменита, вакабаяшилита, гетчеллита, клаудетита и чапманита впервые кратко описаны в обзоре (Касаткин, 2019). Все эти, а также большое количество других оригинальных данных по минералогии объекта, полученных авторами за последние восемь лет, войдут в серию, которую открывает настоящая публикация.

Геологическое положение и строение месторождения

Воронцовское месторождение находится на восточном склоне Северного Урала, в восточной части Тагильской вулканогенной зоны (рис. 1б), в пределах вулканоплутонического пояса субмеридионального простираения с тектоническими границами (Сазонов и др., 1998; Murzin et al., 2017). Этот пояс образован в результате столкновения Тагильской островной дуги с Восточно-Уральским микроконтинентом (Язева и др., 1991; Сазонов и др., 1998). В южной части вулканоплутонического пояса располагается Ауэрбаховский габбро-диорит-гранодиоритовый интрузив среднедевонского возраста (Краснобаев и др., 2007), с внедрением которого связывают формирование Ауэрбаховского рудного района.

В юго-западном экзоконтакте Ауэрбаховского интрузива расположена Воронцовско-Песчанская рудно-магматическая система (Минина, 1994). В ее южной части на удалении от контакта с интрузивными породами Ауэрбаховского интрузива находится Воронцовское месторождение (рис. 1в). Вмещающие месторождение вулканогенно-осадочные отложения слагают моноклиналь, полого падающую на запад и погружающуюся на север. В основании этой структуры залегают известняки, часто мраморизованные, с прослоями туффилов и алевролитов мощностью около 1 км. Эта толща согласно перекрывается вулканогенно-осадочными и вулканогенными породами – туфоалевролитами, туффидами, диоритовыми порфиритами и туфами. На контакте этих пород с известняками в пределах всего Ауэрбаховского рудного узла распространены грубообломочные брекчии с туфовым цементом (Коржинский, 1948).

Границы Воронцовского месторождения во многом обусловлены тектоническими нарушениями. На западе рудные тела прерываются Воронцовским разломом меридионального простираения, падающим на запад под углом 70–80°. На юго-западе месторождение ограничивается Южно-Песчанским разломом северо-западного простираения; на востоке рудные тела месторождения выведены на дневную поверхность и эродированы. На севере оруденение затухает, выклинивается по падению и простираению (Викентьев и др., 2016).

Северным карьером Воронцовского месторождения вскрыто клиновидное тело вулканогенно-осадочных пород с преобладанием туфов среднего

Таблица 1

Минералы Воронцовского месторождения

Table 1

Minerals of the Vorontsovskoe deposit

Минерал	Формула	Распро- страненность	Метод диагностики	Источник
Простые вещества				
Золото*	Au	+++++	ЭЗ, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин, Варламов, 2010; Мурзин и др., 2011; Викентьев и др., 2016; наши данные
Медь	Cu	++	О	Викентьев и др., 2016
Мышьяк*	As	+++++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин и др., 2011; Викентьев и др., 2016; наши данные
Серебро ¹ **	Ag	++	ЭЗ, О	Викентьев и др., 2016; наши данные
Сульфиды, арсениды, теллуриды				
Акантит**	Ag ₂ S	++	ЭЗ, О	наши данные
Алабандин*	MnS	+++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин, Варламов, 2010; Мурзин и др., 2011; Викентьев и др., 2016; наши данные
Антимонит*	Sb ₂ S ₃	+++++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин, Варламов, 2010; Викентьев и др., 2016; наши данные
Арсенопирит*	FeAsS	+++++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин и др., 2011; Викентьев и др., 2016; наши данные
Аурипигмент*	As ₂ S ₃	+++++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин, Варламов, 2010; Викентьев и др., 2016; наши данные
Борнит*	Cu ₃ FeS ₄	+++	ЭЗ, О	Викентьев и др., 2016; наши данные
Вакабаяшилит**	(As,Sb) ₆ As ₄ S ₁₄	+++	ЭЗ, Р, О	Касаткин, 2019; наши данные
Висмутин**	Bi ₂ S ₃	++	ЭЗ, О	наши данные
Галенит*	PbS	+++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Викентьев и др., 2016; наши данные
Герсдорфит*	NiAsS	++	ЭЗ, О	Викентьев и др., 2016; наши данные
Гессит ¹ **	Ag ₂ Te	++	ЭЗ, О	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Гетчеллит***	AsSbS ₃	+++	ЭЗ, Р, О	Касаткин, 2019; наши данные
Грейгит*	Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₂ S ₄	+++	ЭЗ, Р, О	Мурзин и др., 1996; Мурзин, Варламов, 2010; наши данные
Джарлеит**	Cu ₃ S ₁₆	(++)	ЭЗ, Р, О	наши данные
Диморфит ?	As ₄ S ₃	?	ЭЗ	Степанов и др., 2017
Дюранозит ***	As ₄ S	++	ЭЗ, О	наши данные
Жозеит-А**	Bi ₄ TeS ₂	++	ЭЗ, О	наши данные
Икунолит**	Bi ₄ S ₃	++	ЭЗ, О	наши данные
Киноварь*	HgS	+++++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Викентьев и др., 2016; наши данные
Ковеллин*	CuS	(++)	ЭЗ, Р, О	Викентьев и др., 2016; наши данные
Колорадоит*	HgTe	+++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин, Варламов, 2010; наши данные
Кубанит**	CuFe ₂ S ₃	+	ЭЗ, О	наши данные
Лёллингит*	FeAs ₂	+++	ЭЗ, Р, О	Викентьев и др., 2016; наши данные
Метациннабарит**	HgS	+++	ЭЗ, Р, О	наши данные

Молибденит ^{1**}	MoS ₂	++	ЭЗ, О	Викентьев и др., 2016; наши данные
Парареальгар ^{***}	As ₄ S ₄	++	ЭЗ, Р, О	наши данные
Пикополит ^{1***}	TlFe ₂ S ₃	++	ЭЗ, О	Викентьев и др., 2016; наши данные
Пирит [*]	FeS ₂	+++++	ЭЗ, МС, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин, Варламов, 2010; Викентьев и др., 2016; наши данные
Пирротин	Fe _{1-x} S	+++	ЭЗ	Сазонов и др., 1991а; Викентьев и др., 2016
Реальгар [*]	AsS	+++++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин, Варламов, 2010; Викентьев и др., 2016; наши данные
Сфалерит [*]	ZnS	+++++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин, Варламов, 2010; Мурзин и др., 2011; Викентьев и др., 2016, Степанов и др., 2017; наши данные
Тетрадимит ^{**}	Bi ₂ Te ₂ S	++	ЭЗ, О	наши данные
Халькопирит [*]	CuFeS ₂	+++++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Викентьев и др., 2016; наши данные
Хоулит ^{1**}	CdS	(++)	ЭЗ, Р, О	наши данные
Ялпайт ^{**}	Ag ₃ CuS ₂	++	ЭЗ, О	наши данные
Сульфосоли				
Акташит [*]	Cu ₆ Hg ₃ As ₄ S ₁₂	+++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Минералогия..., 1991; Мурзин, Варламов, 2010; Викентьев и др., 2016, Степанов и др., 2017; наши данные
Андорит [*]	AgPbSb ₃ S ₆	++	ЭЗ, О	Викентьев и др., 2016; наши данные
Аргентотетраэдрит-(Fe)	Ag ₆ (Cu ₄ Fe ₂)Sb ₄ S ₁₃	++	ЭЗ	Сазонов и др., 1991а
Аргентотетраэдрит-(Zn)	Ag ₆ (Cu ₄ Zn ₂)Sb ₄ S ₁₃	++	ЭЗ	Сазонов и др., 1991а
Арсеноцит ^{1***}	AgHg ₂ TlAs ₂ S ₆	+	ЭЗ, О	наши данные
Ауэрбахит^{1***}	MnTl ₂ As ₂ S ₅	++	ЭЗ, Р, О, КР	Kasatkin et al., 2020d
Бенавидесит ^{1***}	Pb ₄ MnSb ₆ S ₁₄	++	ЭЗ, О	наши данные
Бенлеонардит [*]	Ag ₁₅ Cu(Sb,As) ₂ S ₇ Te ₄	++	ЭЗ, О	Минералогия..., 1991; наши данные
Бернардит ^{***}	TlAs ₅ S ₈	++	ЭЗ, Р, О	наши данные
Бернарлоттит [?]	Pb ₁₂ (As ₁₀ Sb ₆)S ₃₆	?	ЭЗ	Викентьев и др., 2016
Боскардинит ^{***}	AgTl ₃ Pb ₄ (Sb ₁₄ As ₆) ₂₂₀ ³⁶	+++	ЭЗ, Р, О	наши данные
Буланжерит [*]	Pb ₅ Sb ₄ S ₁₁	+++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Викентьев и др., 2016; наши данные
Бурнонит [*]	PbCuSbS ₃	++	ЭЗ, О	Викентьев и др., 2016; наши данные
Веснит ^{***}	Pb ₃ (Sb,As) ₂ S ₅	++	ЭЗ, Р, О	наши данные
Вейсбертит ^{1***}	TlSbS ₂	++	ЭЗ, О	наши данные
Викингит ^{**}	Ag ₅ Pb ₈ Bi ₁₃ ³⁰	++	ЭЗ, О	наши данные
Воронцовит^{1***}	(Hg ₅ Cu) ₂₆ TlAs ₄ S ₁₂	+++++	ЭЗ, Р, ТВ, О	Kasatkin et al., 2018a; Kasatkin, Паутов, 2020
Врбайт ^{***}	Hg ₃ Tl ₄ As ₈ Sb ₂₀	+++	ЭЗ, Р, О	наши данные
Галхайт ^{**}	(Hg ₅ Cu) ₂₆ CsAs ₄ S ₁₂	+	ЭЗ	наши данные
Геокронит [*]	Pb ₁₄ Sb ₆ S ₂₃	++	ЭЗ, О	Сазонов и др., 1991а; Викентьев и др., 2016; наши данные
Гептасарторит ^{***}	Tl ₇ Pb ₂₂ As ₃₅ ¹⁰⁸	+	ЭЗ, О	наши данные
Гетероморфит ^{***}	Pb ₇ Sb ₈ S ₁₉	++	ЭЗ, О	наши данные
Геттардит ^{***}	PbAsSbS ₄	+++	ЭЗ, О	Викентьев и др., 2016 – как «твиннит», наши данные
Гиллулит ^{***}	Tl ₂ As _{7.5} Sb _{0.3} S ₁₃	++	ЭЗ, Р, ТВ, О, КР	наши данные
Гладковскинит^{1***}	MnTlAs ₃ S ₆	+++	КР	Kasatkin et al., 2019

Гунгерит ****	$\text{TiAs}_5\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	ЭЗ, Р, ТВ, О, КР	Касаткин et al., 2020с
Дальнегроит****	$\text{TiPb}_2(\text{As},\text{Sb})_{20}\text{S}_{34}$	ЭЗ, Р, О	Викентьев и др., 2016; наши данные
Джемсонит*	$\text{Pb}_4\text{FeSb}_6\text{S}_{14}$	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; Викентьев и др., 2016; наши данные
Дрехслерит****	$\text{Ti}_4(\text{Sb}_{4-x}\text{As}_x)_8\text{S}_8; 1 < x < 2$	ЭЗ, О	
Дюфренуазит**	$\text{Pb}_2\text{As}_2\text{S}_5$	ЭЗ, О	наши данные
Зиннерит**	$\text{Cu}_6\text{As}_4\text{S}_9$	ЭЗ, О	
Имхофит****	$\text{TiAg}_2(\text{As},\text{Sb})_3\text{S}_6$	ЭЗ, О	
Йорданит**	$\text{Ti}_{5,8}\text{As}_{15,4}\text{S}_{26}$	ЭЗ, Р, О	
Клерит *	$\text{Pb}_{14}(\text{As},\text{Sb})_6\text{S}_{23}$	ЭЗ	Мурзин и др., 1996; Мурзин, Варламов, 2010; наши данные
Кристит****	MnSb_2S_4	ЭЗ, Р, О, ТВ	Викентьев и др., 2016; наши данные
Купрополибазит****	TiHgAsS_3	ЭЗ, Р, О	
Лафитит****	$[\text{Cu}_6\text{Sb}_2\text{S}_7][\text{Ag}_9\text{CuS}_4]$	ЭЗ, О	наши данные
Лиллианит**	AgHgAsS_3	ЭЗ, О	Викентьев и др., 2016 – как «As-буланжерит»
Лопаткаит	$\text{Pb}_{3,2x}\text{AgBi}_{2-x}\text{S}_6$	ЭЗ, О	наши данные
Лорандит**	$\text{Pb}_5\text{Sb}_3\text{AsS}_{11}$	ЭЗ	наши данные
Люборжакит ****	TiAsS_2	ЭЗ, Р, О, КР	Касаткин et al., 2020а; наши данные
Манганоквадратит****	$\text{Mn}_2\text{AsSbS}_5$	ЭЗ, Р, ТВ, О	
Менегинит**	AgMnAsS_3	ЭЗ, О	
Новаккиит****	$\text{Pb}_{13}\text{CuSb}_7\text{S}_{24}$	ЭЗ, Р, О	
Ойонит****	$\text{Cu}_6\text{Zn}_3\text{As}_4\text{S}_{12}$	ЭЗ	наши данные
Павонит**	$\text{Ag}_3\text{Mn}_2\text{Pb}_4\text{Sb}_7\text{As}_4\text{S}_{24}$	ЭЗ, О	
Парапьерротит****	AgBi_3S_5	ЭЗ, О	Plasil et al., 2018; наши данные
Плагионит*	TiSb_3S_8	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Полибазит**	$\text{Pb}_5\text{Sb}_8\text{S}_{17}$	ЭЗ, О	наши данные
Похоляшиннит ****	$[\text{Ag}_9\text{CuS}_4][(\text{Ag},\text{Cu})_6(\text{Sb},\text{As})_2\text{S}_7]$	ЭЗ, Р, ТВ, О	Касаткин et al., 2020b
Пьерротит?	$\text{Cu}_2\text{Ti}_3\text{Sb}_3\text{As}_2\text{S}_{13}$	ЭЗ	Сазонов и др., 1991а; Мурзин, Варламов, 2010
Рамлорит**	$\text{Ti}_2(\text{Sb},\text{As})_{10}\text{S}_{16}$	ЭЗ	наши данные
Ребулит****	$\text{Pb}_6\text{Ag}_5\text{Sb}_{11}\text{S}_{24}$	ЭЗ	Сазонов и др., 1991а; Мурзин и др., 2011; Викентьев и др., 2016; наши данные
Рошинит****	$\text{Ti}_2\text{Sb}_2\text{As}_8\text{S}_{22}$	ЭЗ, Р, О, КР	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Рутьерит*	$(\text{Ag},\text{Cu})_{19}\text{Pb}_{10}\text{Sb}_{51}\text{S}_{96}$	ЭЗ, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин и др., 2011; Викентьев и др., 2016; наши данные
Семсейит**	$\text{CuHg}_2\text{TiAs}_2\text{S}_6$	ЭЗ, Р, О, ТВ	наши данные
Теннантит-(Fe)*	$\text{Pb}_9\text{Sb}_8\text{S}_{21}$	ЭЗ, О	Сазонов и др., 1991а; Минералогия..., 1991; Мурзин, Варламов, 2010; Викентьев и др., 2016, Степанов и др., 2017; наши данные
Теннантит-(Zn)*	$\text{Cu}_6[\text{Cu}_4\text{Fe}_2]\text{As}_4\text{S}_{12}\text{S}$	ЭЗ, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин и др., 2011; Викентьев и др., 2016; наши данные
Тетраэдрит-(Fe)*	$\text{Cu}_6[\text{Cu}_4\text{Zn}_2]\text{As}_4\text{S}_{12}\text{S}$	ЭЗ, Р, О	наши данные
Тетраэдрит-(Zn)*	$\text{Cu}_6[\text{Cu}_4\text{Fe}_2]\text{Sb}_4\text{S}_{12}\text{S}$	ЭЗ, О	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Твиннит****	$\text{Cu}_6[\text{Cu}_4\text{Zn}_2]\text{Sb}_4\text{S}_{12}\text{S}$	ЭЗ, О	Сазонов и др., 1991а; Мурзин и др., 2011; Викентьев и др., 2016; наши данные
Ферроворонцовит ****	$\text{Pb}(\text{Sb}_{0,63}\text{As}_{0,37})_2\text{S}_4$ $(\text{Fe},\text{Cu})_{26}\text{TiAs}_4\text{S}_{12}$	ЭЗ, Р, О	наши данные
		ЭЗ, Р, ТВ, О	Касаткин et al., 2018а; Касаткин, Паутов, 2020

Толорокит**	(Na,K,Ca,Ba,Sr) _{1-x} (Mn,Mg, Al)O ₃ · 3-4H ₂ O	(+++)	ЭЗ, Р	наши данные
Ферберит**	FeWO ₄	+	ЭЗ, О	
Фергусонит-(Y)**	YNbO ₄	+	ЭЗ	
Хромит**	FeCr ₂ O ₄	++	ЭЗ	
Цезаролит**	PbMn ⁴⁺ ₃ O ₆ (OH) ₂	(++)	ЭЗ, Р	
Карбонаты				
Азурит**	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	(++)	ЭЗ, Р	наши данные
Доломит*	CaMg(CO ₃) ₂	+++++	ЭЗ, Р, МС	Сазонов и др., 1991а; Викентьев и др., 2016, Сорока и др., 2017,
Кальцит*	CaCO ₃	+++++	ЭЗ, Р, МС	2018; наши данные
Кунтогорит**	CaMn(CO ₃) ₂	++	ЭЗ, Р	наши данные
Малахит**	Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂	(+++)	ЭЗ, Р	
Родохрозит**	MnCO ₃	+++	ЭЗ, Р	
Сидерит*	FeCO ₃	+++	ХС, ЭЗ, Р	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Церуссит**	PbCO ₃	(++)	ЭЗ, КР	наши данные
Сульфаты				
Англезит**	PbSO ₄	(++)	ЭЗ, Р	наши данные
Барит*	BaSO ₄	+++++	ЭЗ	Викентьев и др., 2016; наши данные
Биверит-(Cu)**	Pb(Fe ³⁺ Cu)(SO ₄) ₂ (OH) ₆	(++)	ЭЗ, Р	
Бропангит**	Cu ₄ (SO ₄)(OH) ₆	(++)	ЭЗ, Р	
Гипс**	CaSO ₄ · 2H ₂ O	(+++)	ЭЗ, Р	
Пентагидрит**	MgSO ₄ · 5H ₂ O	(++)	ЭЗ, Р	наши данные
Старкеит**	MgSO ₄ · 4H ₂ O	(++)	ЭЗ, Р	
Халькантит**	CuSO ₄ · 5H ₂ O	(++)	ЭЗ, Р	
Эпсомит**	MgSO ₄ · 7H ₂ O	(+++)	ЭЗ, Р	
Вольфраматы				
Шеелит**	CaWO ₄	+++	ЭЗ, О	наши данные
Фосфаты, арсенаты				
Байдонит**	Cu ₃ PbO(AsO ₃ OH) ₂ (OH) ₂	(++)	ЭЗ, Р	наши данные
Виванит	Fe ²⁺ ₃ (PO ₄) ₂ · 8H ₂ O	+++	ХС, Р	Сазонов и др., 1991а
Гаспарит-(La)**	LaAsO ₄	+	ЭЗ	
Гидроксиллапатит**	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	++	ЭЗ	наши данные
Свабит**	Ca ₅ (AsO ₄) ₃ F	+	ЭЗ	
Тилазит**	CaMg(AsO ₄)F	++	ЭЗ, Р, О	
Турнорит**	Ca ₅ (AsO ₄) ₃ Cl	++	ЭЗ	
Фторапатит*	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F	+++++	ЭЗ	Мурзин, Варламов, 2010; Мурзин и др., 2011; наши данные
Хлорапатит**	Ca ₅ (PO ₄) ₃ Cl	++	ЭЗ	наши данные
Черновит-(Y)**	YAsO ₄	+	ЭЗ	
Силикаты				
Альбит*	NaAlSi ₃ O ₈	+++	МХ, РФА, ЭЗ, Р	Сазонов и др., 1991а; наши данные

Авгит**	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	++	ЭЗ	наши данные
Андрадит**	$\text{Ca}_3\text{Fe}^{3+}[\text{SiO}_4]_3$	++++	ЭЗ	Касаткин, 2019; наши данные
Арменит***	$\text{BaCa}_2\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{43} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	+++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а
Бейделлит	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	[+++]	ХС, Р	наши данные
Везувиан**	$(\text{Ca}, \text{Na})_{19}(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_{13}[\text{SiO}_4]_{10}[\text{SiO}_3]_4(\text{OH}, \text{F}, \text{O})_{10}$	+++	ЭЗ	Сазонов и др., 1991а
Волластонит	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	++++	ЭЗ, Р, О	Кабанов, 2001; наши данные
Галлуазит-7Å¹*	$\text{Ba}_2\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	[+++]	ЭЗ, Р	наши данные
Гармотом**	$\text{Zn}_4[\text{Si}_2\text{O}_7](\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	++	ЭЗ	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Гемиморфит**	$\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$	(++)	ЭЗ, Р	наши данные
Гроссуляр*	$\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$	+++	ЭЗ, Р	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Диккит**	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	[+++]	ЭЗ, ИК	наши данные
Диопсид*	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	++++	ЭЗ	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Йохансенит**	$\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$	+	ЭЗ	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Каолинит*	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	[++++]	ЭЗ, Р, ИК	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Клинохлор*	$\text{Mg}_5\text{Al}_4\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	+++++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Ломонит*	$\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	+++	ЭЗ, Р	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Магнезиоферригорнблендит	$\square\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{3+})\text{Si}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2$	++	ХС	Сазонов и др., 1991а
Микроклин	KAlSi_3O_8	+++	МХ, РФА, ЭЗ, Р	Сазонов и др., 1991а
Монтмориллонит	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$	[+++]	ЭЗ, Р	Сазонов и др., 1991а
Мусковит*	$\text{KAl}_2(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	++++	ЭЗ, Р	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Нонтронит**	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	(+++)	ЭЗ, Р, ИК	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Ортоклаз*	KAlSi_3O_8	+++	МХ, РФА, Р, ЭЗ	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Паргасит**	$\text{NaCa}_2(\text{Mg}, \text{Al})\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	+++	ЭЗ, Р	наши данные
Пижонит**	$(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ca})_2\text{Si}_5\text{O}_{16}$	+++	ЭЗ, Р	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Пренит¹**	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	++++	ЭЗ	наши данные
Пумпеллиит-(Mg)**	$\text{Ca}_2\text{MgAl}_2[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4](\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$	++	ЭЗ	Мурзин, Варламов, 2010; наши данные
Селадонит**	$\text{KMgFe}^{3+}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	+++	ЭЗ, Р	наши данные
Тальк*	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	+++	ЭЗ, Р	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Титанит*	$\text{CaTi}[\text{SiO}_4]\text{O}$	+++	ЭЗ, О	наши данные
Торит**	$\text{Th}[\text{SiO}_4]$	+	ЭЗ, О	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Тремолит*	$\square\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	++	ЭЗ, Р, О	наши данные
Ферроселадонит**	$\text{KFe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	+++	ЭЗ, Р	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Хинганийт-(Y)**	$\text{Y}_2\text{Be}_2[\text{SiO}_4]_2(\text{OH})_2$	+	ЭЗ	наши данные
Хинганийт-(Nd)***	$\text{Nd}_2\text{Be}_2[\text{SiO}_4]_2(\text{OH})_2$	+	ЭЗ	наши данные
Хризотил-2Or**	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	+++	ЭЗ, Р	Мурзин и др., 2010; наши данные
Циркон*	$\text{Zr}[\text{SiO}_4]$	+++	ЭЗ	Касаткин, 2019; наши данные
Цапманит***	$\text{Fe}^{3+}_2\text{Sb}^{3+}[\text{SiO}_4]_2(\text{OH})$	(+++)	ЭЗ, Р	

Шабазит-Са**	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24} \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ($\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+}$) ₆ (Si, Al) ₄ O_{10} (OH, O) ₈	+++	ЭЗ, Р	наши данные
Шамозит*		+++	ЭЗ, Р, О	Сазонов и др., 1991а; наши данные
Эпидот	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Fe}^{3+}[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{Si}_2\text{O}_4][\text{O}(\text{OH})]$	++++	ХС	Сазонов и др., 1991а

Примечание. Степень распространенности минералов на Воронцовском месторождении: +++++ – породообразующие, главные жильные и рудные минералы, +++++ – распространенные минералы, +++ – малораспространенные минералы, ++ – редкие минералы, + – крайне редкие минералы (единичные находки). В столбце «Распространенность» в круглых скобках даны гипергенные минералы, в квадратных скобках – минералы, которые могут иметь как гипогенное, так и гипергенное происхождение. Методы, которыми изучались (в том числе диагностировались) минералы: ЭЗ – электронно-зондовый микроанализ; МХ – методы мокрой химии; РФА – рентгенофлуоресцентный анализ; МС – масс-спектрометрия (ЛА-ИСП-МС); Р – рентгенографический метод (монокристалльный и/или порошковый); О – оптические методы; ТВ – определение твердости микровдавливании; ИК – инфракрасная спектроскопия; КР – рамановская спектроскопия. ХС – минерал диагностирован по химическому составу, но нет информации, каким именно методом (для литературных данных). * – минералы, изученные в образцах из Воронцовского месторождения авторами; ** – минералы, достоверно установленные авторами впервые для Российской Федерации; *** – новые минералы, открытые авторами. Жирным шрифтом выделены новые минеральные виды, открытые на Воронцовском месторождении. ¹ – минерал упомянут в литературе (см. графу «Источники») без указания каких-либо аналитических данных, а достоверные аналитические данные впервые публикуются в настоящей статье; ? – минерал упомянут в литературе с указанием химического состава, однако его диагностика на основании только этих данных вызывает сомнение. Для боскардинита указана формула из работы (Biagioni, Moëlo, 2017), так как она более наглядно демонстрирует изоструктурность минерала с экранситом, чем формула ММА. В таблицу не включены следующие минералы, упомянутые в литературе по месторождению без аналитических данных и диагностических признаков: актинолит, анкерит, апофиллит, геденбергит, датолит, марказит, пираргирит, стильбит (десмин), таумасит (Сазонов и др., 1991а); алтаит, дигенит, калаверит, теллуровисмутит, ярозит (Кабанов, 2001), айкинит, свинец, фрейбергит (Викентьев и др., 2016), виттихенит (Vikent'eva, Vikentyev, 2016), груздевит, полхемусит, сильвиалит (Степанов и др., 2017), ауристобит, бертьерит, висмут, дискразит, йентшит, кобальтин, русселит (Vikentyev et al., 2019).

Note. Occurrence of minerals: +++++ – rock-forming minerals, major gangue and ore minerals, +++++ – abundant minerals, +++ – subordinate minerals, ++ – rare minerals, + – extremely rare minerals (single findings). In third column, supergene minerals are given in round brackets; minerals that can have both hypogene and supergene origin are given in square brackets. Analytical methods of identification of minerals: ЭЗ – microprobe analysis; МХ – wet chemical methods; РФА – X-ray fluorescence; МС – laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry; Р – X-ray diffraction (single-crystal or powder method); О – optical data; ТВ – micro-indentation hardness; ИК – infrared spectroscopy; КР – Raman spectroscopy. ХС – mineral is determined by chemistry (method is not specified; only for literature data). * – minerals studied by the authors; ** – 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 found by the authors. New mineral species found at the Vorontsovskoe deposit are typed in bold. ¹ – mineral is mentioned in literature without analytical data and reliable analytical data are published for the first time in this paper; ? – mineral is identified on the basis of chemical composition, however, this identification is doubtful. Formula of boscardinite is given according to (Biagioni, Moëlo, 2017), because it clearer reflects its isostructural correlation with écrinsite rather than IMA formula. The following minerals are not included in Table but they are mentioned in literature without analytical data and identification features: actinolite, ankerite, apophyllite, hedenbergite, datolite, marcasite, pyrrargyrite, stilbite (desmine), thaumasite (Sazonov et al., 1991a); altaite, hessite, digenite, calaverite, tellurobismuthite, jarosite (Kabanov, 2001), aikinite, lead, freibergite (Vikentyev et al., 2016), vittichenite (Vikent'eva, Vikentyev, 2016), gruzdevite, polhemusite, silvialite (Stepanov et al., 2017), aurostibite, berthierite, bismuth, dyscrasite, jentschite, cobaltite, russellite (Vikentyev et al., 2019).

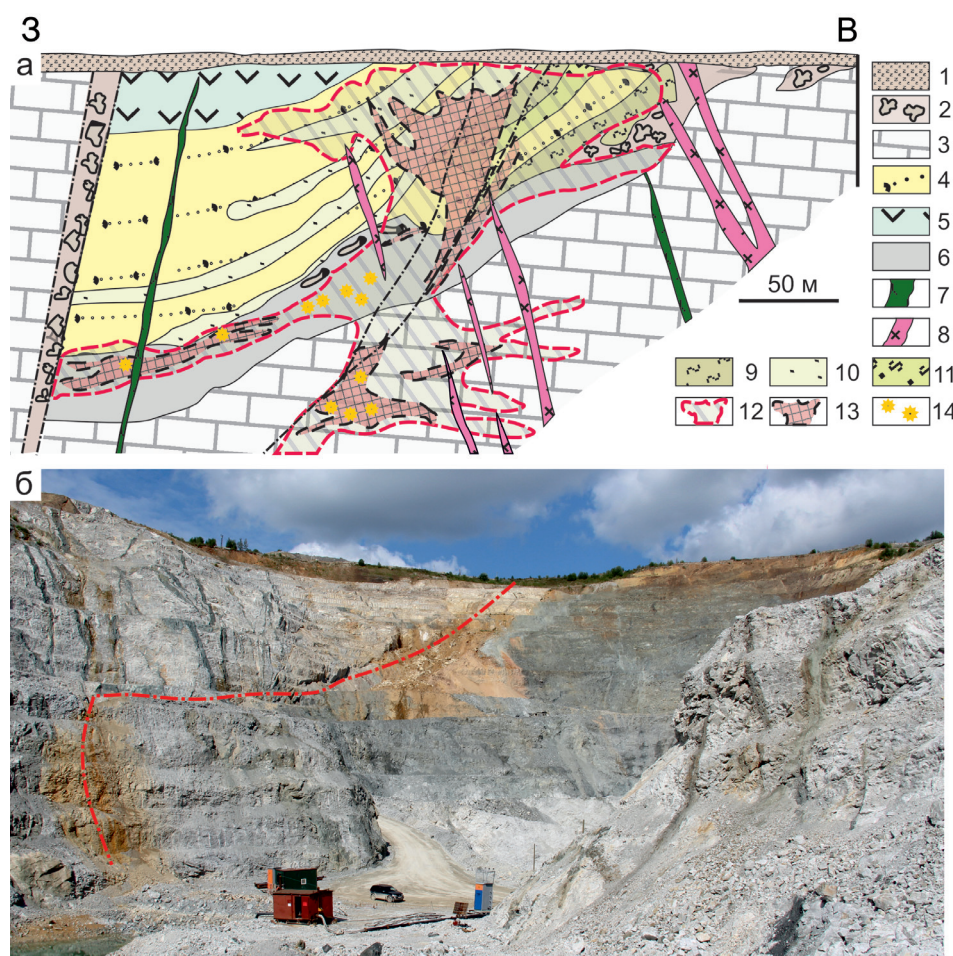


Рис. 3. Разрезы Воронцовского месторождения:

а – геологический разрез, по (Черемисин, Злотник-Хоткевич, 1997; Сазонов и др., 1998) с изменениями и дополнениями.

1 – покровные неоген-четвертичные отложения; 2 – девонский карст; 3 – известняки; 4 – туфоалевролиты, туфопесчаники, туфоконгломераты; 5 – андезиты, их туфы и лавобреккии; 6 – бреккии 1-й стадии; 7 – дайки лампрофиров; 8 – дайки диоритовых порфиров; 9–11 – метасоматиты: 9 – кварц-серицитовые, 10 – кварц-серицит-альбитовые, 11 – березит-лиственитовые и хлорит-серицитовые; 12 – рудные столбы с рядовыми концентрациями золота; 13 – обогащенные золотом рудные столбы; 14 – участки развития брекчий с реальгар-аурипигментовым цементом;

б – фото борта Северного карьера с отмеченным Воронцовским взбросом (красная пунктирная линия).

Fig. 3. Cross-sections of the Vorontsovskoe deposit:

а – geological cross-section, modified after (Cheremisin, Zlotnik-Khotkevich, 1977; Sazonov et al., 1998).

1 – Neogene-Quaternary deposits; 2 – Devonian karst; 3 – limestones; 4 – tuff siltstones, tuff sandstones, tuff conglomerates; 5 – andesites, andesitic tufts, lava breccias; 6 – 1st stage breccias; 7 – lamprophyre dikes; 8 – diorite-porphyrite dikes; 9–11 – metasomatites: 9 – quartz-sericite, 10 – quartz-sericite-albite, 11 – berezite-listvenite and chlorite-sericite; 12 – ore shoots with ordinary Au grades; 13 – gold-rich ore shoots; 14 – breccias with realgar-orpiment matrix;

б – photo of the Northern open pit with Vorontsovsky reverse fault (red dotted line).

состава и туфопесчаников (рис. 3а). Западная часть этого тела ограничена крупным тектоническим разломом (рис. 3б). В лежачем контакте тела вулканогенно-осадочных пород с известняками локализован основной объем рудоносных брекчий. Брекчированию подвержены как известняки, так и

вулканогенно-осадочные породы. Бреккии состоят из полуокатанных и угловатых обломков известняка размером до 25 см, сцементированных глинисто-карбонатным и вулканогенно-осадочным материалом (Викентьев и др., 2016).

Помимо рудных брекчий в пределах месторождения широко распространены различные метасоматиты, сформировавшиеся в течение длительного периода. Наиболее ранними являются скарны, ассоциирующие с интрузивными телами ранних фаз внедрения Ауэрбаховского интрузива. Мощность зон скарнирования обычно не превышает 10–20 м, а протяженность достигает 1.5 км и более. С удалением от интрузивных тел скарны сменяются пропилитами. Последние широко развиты на месторождении: они являются внешней зоной скарнов и развиты по всем вулканогенно-осадочным породам. Метасоматиты березит-лиственитовой формации развиты по габбро, вулканитам от среднего до основного состава, дайкам долеритов, туффитам, иногда накладываются на скарны. Мощность зон березитизированных и лиственитизированных пород обычно не превышает первых метров, а протяженность достигает 40–60 м. Кварц-серицитовые метасоматиты моложе березитов и лиственитов. Они широко распространены на всем месторождении, а по объему локализованного в них золотого оруденения уступают только брекчированным рудным телам. Джаспероиды развиты на контактах даек средне-основного состава с известняками и в самих известняках. Аргиллизиты на верхних горизонтах месторождения сопровождают низкотемпературное золотое оруденение (Сазонов и др., 1998; Викентьев и др., 2016). По вулканогенно-осадочным и интрузивным породам Ауэрбаховского комплекса развиты коры химического выветривания мощностью до 60 м, а по карбонатным породам – карст, выполненный продуктами перемещенных кор выветривания мощностью до 120 м (Викентьев и др., 2016).

Рудное тело с промышленными концентрациями золота на месторождении имеет форму раскрывающегося кверху факела (Черемисин, Злотник-Хоткевич, 1997). Золоторудная минерализация локализована преимущественно в области распространения брекчий и охватывает существенную часть метасоматически преобразованных вулканогенно-осадочных пород. Анализ геологической позиции и петрографических особенностей брекчий позволил выделить два главных этапа брекчирования (Степанов и др., 2017). В рамках первого этапа сформированы крупноглыбовые, преимущественно апотраморные, брекчии с тонкокристаллическим рудным (с преобладанием пирита) цементом. Тела брекчий с реальгар-аурипигментовым цементом, сформированные в ходе второго этапа брек-

чирования и локализованные в брекчиях первого этапа, имеют сложные ветвящиеся контуры. Количество реальгар-аурипигментового цемента по отношению к обломкам максимально в центральной части этих тел и постепенно снижается к их краю.

Совокупность структурно-вещественных признаков золотого оруденения привела предыдущих исследователей объекта к выводу о том, что Воронцовское золоторудное месторождение относится к карлинскому типу (Сазонов и др., 1998; Викентьев и др., 2016; Murzin et al., 2017). Этот вывод основан на широком распространении брекчий среди рудных образований, а также наличии минералов Tl, в том числе входящих в парагенезис с золотом, что характерно для месторождений золота карлинского типа (Dickson et al., 1979; Radtke, 1985; Волков, Сидоров, 2016). Другая точка зрения на генезис Воронцовского месторождения заключается в том, что часть руд этого объекта, включая, прежде всего, золоторудные брекчии, по ряду признаков (природа брекчий, геодинамическая позиция месторождения и др.) может быть рассмотрена в качестве эпитермальных образований, сформированных в краевой части рудно-магматической системы, связанной с магматитами ауэрбаховского комплекса (Степанов и др., 2019). Особенности геологического строения рудного тела, сложенного брекчиевыми породами, морфология обломков известняков, вулканогенно-осадочных пород и метасоматитов, структурно-текстурные особенности и минеральный состав связующей массы брекчий дают основание предполагать флюидоэксплозивную природу последних (Степанов и др., 2017). Формирование рудных брекчий могло происходить вследствие декompрессии флюида в приповерхностных условиях, что характерно для эпитермальных месторождений (White, Hedenquist, 1995). Пространственное сочетание в брекчиях большого количества обломков различных пород, обладающих разными геохимическими особенностями, в совокупности с гидротермально-метасоматическими процессами, сопутствующими формированию цемента брекчий, привели к возникновению парагенезисов уникальных (в том числе новых) минералов, совместно концентрирующих компоненты контрастных геохимических ассоциаций. Характерным примером является гладковскиит $\text{MnTlAs}_3\text{S}_6$ (Kasatkin et al., 2019), источником Mn для которого, вероятно, послужили карбонатные осадочные породы, в то время как источником Tl, As и S могли быть гидротермальные растворы, порожденные эндогенным

(магматическим) источником. Таким образом, вопрос о генетическом типе Воронцовского месторождения остается пока дискуссионным.

Типы руд и минеральные ассоциации

В пределах месторождения установлено несколько типов руд, которые ассоциируют с различными вулканогенно-осадочными и гидротермально-метасоматическими образованиями. Так, И.В. Викентьев с соавторами (2016) выделяют гипогенные руды в известняках и вулканогенно-осадочных породах и гипергенные (окисленные) руды. К гипогенным рудам отнесены: 1) вкрапленные золото-магнетит-сульфидные руды в известковых скарнах, 2) вкрапленные золото-полиметаллические руды в джаспероидах, 3) тонковкрапленные золото-пирит-арсенопиритовые руды в туфопесчаниках и туфоалевролитах, 4) тонковкрапленные золото-пирит-реальгаровые руды в карбонатных брекчиях и 5) золото-сульфидно-глинистые руды в аргиллизитах. К окисленным отнесены золото-окисдно-глинистые руды зоны гипергенеза.

Наши исследования позволяют сделать вывод о том, что наибольшим богатством и разнообразием минералов характеризуются рудные брекчии, развитые по карбонатным породам. Именно в них установлены новые минеральные виды (арсено- и антимонсульфиды, содержащие Tl, Hg, Pb и Mn в качестве видообразующих элементов) и диагностирован ряд других редких сульфидов и сульфосолей, многие из которых найдены впервые для территории России. Приведенные ниже названия большинства установленных нами минеральных ассоциаций отражают находки именно таких минералов. Часть из них (воронцовит, гунгерит, гладковскийит, люборжакит, цыганкоит) представляют собой новые минеральные виды, открытые на месторождении, другие же (боскардинит, парапьерротит, экрансит) распространены в данных ассоциациях существенно больше остальных минералов.

Карбонатные брекчии обычно сложены обломками крупно-среднезернистых мраморизованных известняков, погруженными в рудный цемент. Мраморизованные известняки и сами брекчии претерпели сложные метасоматические преобразования, результатом которых стало формирование скоплений рудных минералов. Главными жильными минералами цемента брекчий являются кальцит и доломит; в разных ассоциациях к ним добавляются кварц, барит, пренит, клинохлор, мусковит и

другие минералы. В рудном цементе преобладают тонкодисперсные пирит и реальгар, а в некоторых ассоциациях в качестве третьего главного рудного минерала могут выступать антимонит, арсенопирит, аурипигмент или самородный мышьяк.

Сложная схема гидротермально-метасоматических процессов с последовательным телекопированием рудных минеральных ассоциаций в сочетании с их наложением на разнообразные вулканогенно-осадочные и карбонатные породы стали одной из причин распространения большого количества минералов с уникальным химическим составом. Например, развитие рудных брекчий с сопутствующими метасоматическими процессами в мраморизованных известняках, сложенных кальцитом с повышенными содержаниями марганца, привело к формированию эндемичной арсеносульфидной ассоциации Mn- и Tl-содержащих минералов. Высокая активность S и As на последних стадиях рудообразующего процесса инициировала замещение ранних высоко- и среднетемпературных минералов полиметаллической рудной ассоциации (галенит, сфалерит, халькопирит и др.) редкими арсеносульфидами. Широкое развитие низкотемпературных гидротермальных процессов оказало также благоприятное влияние на накопление и фиксацию в рудах Hg.

Нами установлено девять наиболее устойчивых по составу рудных минеральных ассоциаций, семь из которых обнаружены в карбонатных брекчиях, одна – в магнетитовых скарнах и еще одна – в зоне гипергенеза. Каждая из ассоциаций приурочена к определенному минеральному типу руд и имеет свои индикаторные признаки, отличающие ее от других ассоциаций, и свой уникальный набор минералов. Для компактности изложения материала каждой ассоциации присвоен номер (от 1 до 9), и в дальнейших статьях серии при описании конкретных минералов даются ссылки уже на эти номера (табл. 2).

Боскардинит-экранситовая ассоциация (№ 1) минералов обнаружена в 2018 г. в карбонатных брекчиях, отобранных на нижних горизонтах Северного карьера. Координаты места отбора 59°39'12" с.ш., 60°12'53" в.д. Часть образцов, соответствующих этой же ассоциации по индикаторным признакам и набору минералов, была отобрана на рудном складе месторождения в 2015–2018 гг. Из всех ассоциаций именно эта содержит самый богатый набор рудных минералов, в том числе, редких сульфосолей Tl. Среди последних наиболее широко распро-

Таблица 2
Table 2

Минеральные ассоциации в рудах Воронцовского месторождения
Mineral assemblages in ores of the Vorontsovskoe deposit

№ п/п	Ассоциация	Тип руд	Индикаторные признаки и некоторые примечательные особенности	Минералы			Редкие
				Породообразующие, главные жильные и рудные	Распространенные	Малораспро- страненные	
1	Боскардинит- экранситовая	Пирит- реальгаровые	Уникальный по количеству набор редких сульфосолов TI Широкое распространение боскардинита и экрансита, образующих ряд твердых растворов Наложенный метасоматоз пропилитового типа с породообразующим пренитом и распространенным арменитом	Пирит Реальгар Барит Доломит Кальцит Кварц Клинохлор Мусковит Пренит	Акташит Антимонит Арсенопирит Аурипигмент Боскардинит Золото Парапьерротит Рутьерит Сфалерит Шабурнит Экранит Арменит	Вакабаяшиллит Вейсбергит Гетчеллит Дальнегроит Киноварь Колорадоит Кристит Метацин- набарит Халькопирит Цинкенил Диопсид Магнетит Фторпатит Шеелит	Акантит Алабадин Андорит Арсиччиоит Бернардит Воронцовит Врбаит Галенит Геттардит Дрехслерит Зиннерит Зихерит Имхофит Манганоквадратит Молибденит Мышьяк Новаксит Ойонит Походяшинит Ребулит Серебро Твиннит Теннантит-(Zn) «Теннантит-(Mn)» Филротит Хагчинсонит Штальдерит Фаза I Фаза II Авгит Альбит Андрадит Гармотом Магнезиохромит

							Ортоклаз (гидрофан) Пумпеллит-(Mg) Рутил Свабит Титанит Торит Хромит Циркон
2	Воронцовит-гунгеритовая	Антимонит-пирит-реальгаровые	Распространенность минералов, образующих протяженные изоморфные ряды (воронцовит-ферроворонцовит и дальнегроит-шабурнеит) Единственная ассоциация, где установлены минералы, содержащие в существенных количествах Cs (галхаит, воронцовит, ферроворонцовит) или Se (киноварь)	Антимонит Пирит Реальгар Доломит Кальцит Клинохлор	Воронцовит Гунгерит Дальнегроит Киноварь (в т. ч. Se-содержащая) Парапьерротит Рутьерит Сфалерит Ферроворонцовит Кварц	Аурипигмент Колорадоит Шабурнеит Барит	Бернардит Боскардинит Вакабаяшиллит Галхаит Гентасарторит Геттардит Грейгит Золото Метациннабарит Мышьяк <i>Парареальгар</i> Хатчинсонит Экрансит Эннеасарторит Фаза I Фаза II Гётит Рутил
3	Гладковски-итовая (арсено-сульфидная)	Аурипигмент-пирит-реальгаровые	Мышьяковая специализация руд, отсутствие антимонита Резкое доминирование As над Sb в сульфосолях Присутствие арсеносульфидов с видообразующим Mn (гладковскиит, ауэрбахит)	Аурипигмент Пирит Реальгар Барит Кальцит	Алабандин Врбаит Гладковскиит Золото Рутьерит Доломит Клинохлор Фторапатит	Ауэрбахит Сфалерит	Бернардит Гиллулит Дальнегроит Имхофит Киноварь Колорадоит Кристит Лорандит Метациннабарит Никополит Ребулит Филротит Хатчинсонит Кварц Тальк

4	Киноварь-колорадоит-парапьерротитовая	Антимонит-пирит-реальгаровые	Единственная ассоциация, где макроскопически установлена киноварь Широкое распространение парапьерротита, в т. ч. в кристаллах до 1 мм Широкое распространение колорадоита, в т. ч. в крупных для этого минерала зернах (до 0.12×0.06 мм)	Анимонит Пирит Реальгар Доломит Кальцит	Аурипигмент Киноварь Колорадоит Парапьерротит Сфалерит Барит Кварц Клинохлор Пренит	Акташит Метациннабарит Мышьяк Рутьерит Цинкениит	Акантит Андорит Арсенопирит Бернардит Галенит Герсдорфит Геттардит Золото Крестит Лафтитит Новацкиит Никополит Роцинит Теннантит-(Zn) Шабурнеит <i>Бисмоклит</i> Диопсид Микроклин Мусковит Рутил Ферберит Фторапатит
5	Люборжакит-клеритовая	Пирит-реальгаровые	Обогащенность системы Mn (породообразующие Mn-содержащие кальцит и доломит, присутствие алабандина, Mn-содержащего сфалерита, изоморфное вхождение Mn в сульфосоли) Наличие антимонарсеносульфидов с видообразующим Mn и без видообразующего П (люборжакит, клерит) Широкий изоморфизм As-Sb в сульфосолях (люборжакит, клерит, боскардинит, парапьерротит, шабурнеит, экрансит) Отсутствие кварца	Пирит Реальгар Доломит Кальцит Барит	Алабандин Сфалерит Диопсид Клинохлор	Акташит Боскардинит Клерит Люборжакит Рутьерит	Антимонит Арсенопирит Аурипигмент Геттардит Золото Колорадоит Парапьерротит Твиннит Теннантит-(Zn) Шабурнеит Экрансит Фаза II Мусковит Пренит Фторапатит Черновит-(Y)

6	Ассоциация с самородным мышьяком	Мышьяк-арсенопирит-реальгаровые	<p>Присутствие обильного самородного мышьяка</p> <p>Вкрапленность в самородном мышьяке идиоморфных кристаллов арсенопирита до 1 мм</p> <p>Значительно более обильная и крупная по размерам индивидов вкрапленность золота</p> <p>Обедненность системы Tl и Hg (отсутствие соответствующих минералов, за исключением очень редких и мелких зерен акташита и параспёрротита)</p> <p>Присутствие везувiana</p>	<p>Арсенопирит</p> <p>Мышьяк</p> <p>Реальгар</p> <p><i>Арсенолит</i></p> <p><i>Клаудетит</i></p> <p>Доломит</p> <p>Кварц</p> <p>Кальцит</p>	<p>Аурипигмент</p> <p>Золото</p> <p>Пирит</p> <p>Барит</p> <p>Клинохлор</p> <p>Мусковит</p>	<p>Тетраэдрит-(Zn)</p> <p>Диопсид</p> <p>Везувian</p> <p>Фторapatит</p>	<p>Акташит</p> <p>Антимонит</p> <p>Бенавидесит</p> <p>Галенит</p> <p>Гессит</p> <p>Джемсонит</p> <p>Кубанит</p> <p>Парапёрротит</p> <p>Рамдорит</p> <p>Сфалерит</p> <p>Теннантит-(Zn)</p> <p>Теннантит-(Fe)</p> <p>Тетраэдрит-(Fe)</p> <p>Халькопирит</p> <p>Рутил</p> <p>Титанит</p>
7	Цыганко-итовая	Арсенопирит-пирит-реальгаровые	<p>Присутствие арсенопирита как одного из главных рудных минералов ассоциации</p> <p>Обогащенность системы Mn (породообразующие Mn-содержащие кальцит и доломит, распространенность алабандина и Mn-содержащего сфалерита)</p> <p>Присутствие антимонсульфидов с видообразующим Mn (цыганкоит, бенавидесит)</p> <p>Присутствие зональных кристаллов фторapatита с широко проявленным изоморфизмом между P и As и между F, Cl и OH, вплоть до появления хлорapatита и турнорита</p>	<p>Арсенопирит</p> <p>Пирит</p> <p>Реальгар</p> <p>Доломит</p> <p>Кальцит</p> <p>Клинохлор</p>	<p>Алабандин</p> <p>Аурипигмент</p> <p>Сфалерит</p> <p>Цыганкоит</p> <p>Тилазит</p> <p>Фторapatит</p>	<p>Акташит</p> <p>Дюранозит</p> <p>Золото</p> <p>Мышьяк</p> <p>Рутьерит</p> <p>Титанит</p>	<p>Бенавидесит</p> <p>Веенит</p> <p>Геттардит</p> <p>Дальнегроит</p> <p>Иорданит</p> <p>Колорадоит</p> <p>Теннантит-(Zn)</p> <p>Барит</p> <p>Гаспарит-(La)</p> <p>Гейкилит</p> <p>Гидроксилапатит</p> <p>Пирофанит</p> <p>Турнорит</p> <p>Хлорapatит</p>

8	Ассоциация с минералами висмута	Магнетит-сульфидные	Присутствие минералов Bi Приуроченность к скарнам Крупные включения арсенопирита в массивном магнетите Многочисленные включения сульфидов и теллуридов Bi в магнетите	Магнетит Андрадит Кальцит	Арсенопирит Пирит Халькопирит Эпидот	Золото Пирротин Сфалерит Кварц	Висмутин Галенит Жозеит-А Золото Икунолит Лиллианит Павонит Тетрадимит
9	Гипергенная	Золото-окисдно-глинистые	Приуроченность к зоне окисления месторождения Широкое распространение оксидов и гидроксидов Fe и Mn Широкое распространение глинистых минералов, в т. ч. смектитов Присутствие разнообразных сульфатов	Гётит Каолинит Кварц Монтмориллонит	Пирит Галлуазит Гематит Гипс Доломит Кальцит	Арсенопирит Галенит Золото Сфалерит Халькопирит Барит Вернадит Диксит Коронадит Криптомелан Малахит Нонтронит Пирролюзит Родохрозит Романешит Тодорокит Фторпатит Церуссит	Борнит <i>Джарлемит</i> <i>Ковеллин</i> Теннантит-(Zn) <i>Хоулит</i> <i>Азурит</i> <i>Англезит</i> <i>Асболан</i> <i>Ахтенскит</i> <i>Байдонит</i> <i>Бёрнессит</i> <i>Биверит-(Cu)</i> <i>Биксбит</i> <i>Брошантит</i> Гемиморфит <i>Голландит</i> Кутногогорит <i>Литиофорит</i> Манганит <i>Манжироит</i> <i>Пентагидрит</i> Рамсделлит <i>Рансьеит</i> Рутил <i>Старкеит</i> <i>Халькантит</i> <i>Цезаролит</i> <i>Энсомит</i>

Примечание. Жирным шрифтом выделены бескислородные рудные минералы, курсивом – гипергенные минералы.

Note. Oxygen-free ore and supergene minerals are typed in bold and italic, respectively.



Рис. 4. Гладковскиитовая ассоциация *in situ*:

а – отбор материала на дне Северного карьера; б – карбонатные брекчии с гладковскиитовой ассоциацией. Август 2016 г. Фото Р.С. Паламарчука.

Fig. 4. Gladkovskyite assemblage *in situ*:

а – sampling at the bottom of the Northern open pit; б – carbonate breccias with gladkovskyite assemblage. August 2016. Photo by R.S. Palamarchuk.

странены изоструктурные боскардинит и экрансит, образующие ряд твердых растворов. Только здесь встречены такие бескислородные минералы, как арсиччиоит, вейсбергит, гетчеллит, зиннерит, зихерит, манганоквадратит, молибденит, ойонит, походяшинит, серебро, штальдерит, «теннантит-(Mn)» (потенциально новый минерал), а из оксисолей – арменит, магнезиохромит, пумпеллиит-(Mg), свабит, торит, хромит, циркон и шеелит.

Воронцовит-гунгеритовая ассоциация (№ 2). Образцы, содержащие минералы этой ассоциации, были отобраны в 2016 г. на рудном складе месторождения и в 2020 г. на складе забалансовых руд № 2. В ее названии отражены новые минералы – воронцовит, ферроворонцовит (Kasatkin et al., 2018a) и гунгерит (Kasatkin et al., 2020c), встреченные в существенных количествах. Особенностью ассоциации является широкий изоморфизм разных сульфосолей. Воронцовит и ферроворонцовит образуют непрерывный ряд твердых растворов с изменением величины отношения Hg–Fe, а дальнегроит и шабурнеит – протяженный, но с разрывами ряд по As–Sb. Изоморфное замещение между As и Sb установлено в гунгерите. Также зафиксированы нетипичные для месторождения примеры изоморфизма между Tl и Cs (воронцовит, ферроворонцовит, галхаит), S и Se (киноварь). Эта ассоциация – единственная, в которой встречены ферроворон-

цовит, гунгерит, галхаит, грейгит, парареальгар, гептасарторит и эннеасарторит.

Гладковскиитовая (арсеносульфидная) ассоциация (№ 3). Карбонатные брекчии, в которых обнаружена данная ассоциация, отобраны в 2016 г. в Северном карьере, на самых нижних на тот момент горизонтах, приблизительно в 50 м от его восточной стенки (рис. 4). Ассоциация названа по гладковскииту – новой Mn-Tl-сульфосоли, открытой на месторождении (Kasatkin et al., 2019) и присутствующей в каждом образце. В указанной работе впервые кратко описаны сама ассоциация, слагающие ее минералы, и предполагаемая последовательность минералообразования. Альтернативно эту ассоциацию можно назвать арсеносульфидной: ее уникальность состоит в резко выраженной мышьяковой специализации руд при полном отсутствии в них антимонита и общей относительной обедненности сурьмой. Соответственно, в списке слагающих ее минералов нет ни одного антимонсульфида и, в целом, в их химическом составе отмечается резкое доминирование As над Sb. Представителями только данной ассоциации минералов являются ауэрбахит, гиллулиит, гладковскиит и лорандит.

Киноварь-колорадоит-парапьерротитовая ассоциация (№ 4). Киноварь, колорадоит и парапьерротит являются редкими для месторождения, однако в данной ассоциации они широко распро-

странены и присутствуют совместно или попарно в каждом из изученных образцов. Карбонатные брекчии с минералами этой ассоциации отобраны в Северном карьере в 2016 г. Так же, как и воронцовит-гунгеритовая, эта ассоциация приурочена к антимонит-пирит-реальгаровым рудам, однако их индикаторные признаки и набор минералов существенно отличаются. Киноварь, отнесенная предыдущими исследователями к очень редким минералам руд (Сазонов и др., 1991а; Викентьев и др., 2016), обнаружена здесь в крупных макроскопических скоплениях. Колорадоит и парапьерротит, установленные практически во всех остальных рудных ассоциациях, приуроченных к карбонатным брекчиям в виде редких зерен размером не более 40–50 мкм, здесь представлены наиболее крупными индивидами: колорадоит – до 0.12 мм, парапьерротит – до 1 мм. Именно в данной ассоциации были найдены кристаллы парапьерротита, позволившие впервые расшифровать структуру данного минерального вида на природном материале (Plášil et al., 2018). Это единственная ассоциация, где установлены герсдорфит, лаффитит, рощинит, ферберит и бисмоклит.

Люборжакит-клеритовая ассоциация (№ 5) минералов обнаружена в 2017 г. на складе забалансовых руд № 1. Отобранные для изучения образцы представляют собой эксплозивные брекчии, в обломках которых преобладают фрагменты осадочных (известняки, в том числе мраморизованные) и вулканогенно-осадочных (туфоалевролиты и туфопесчаники) пород с наложенными продуктами метасоматических преобразований. Образцы на склад забалансовых руд № 1 были доставлены из средней части трубообразного рудного брекчиевого тела из области контакта клина вулканогенно-осадочных с вмещающими карбонатными породами. Так же, как и боскардинит-экранситовая, эта ассоциация приурочена к пирит-реальгаровому типу руд. Антимонит, арсенопирит и аурипигмент здесь редки. Интересной особенностью этой ассоциации является обогащенность рудообразующей системы Mn, источником которого, скорее всего, были осадочные и вулканогенно-осадочные породы. Помимо его повышенного содержания в карбонатах, представленных марганцовистыми кальцитом и доломитом, и широкого распространения алабандина и Mn-содержащего сфалерита, Mn часто входит в виде небольшой изоморфной примеси в состав аксессуарных сульфосолей (акташит, боскардинит, шабурнеит, экрансит), что не наблюдается в других

ассоциациях. Кроме того, Mn здесь образует сульфосолы без видообразующего Tl – люборжакит и клерит, которые и дали название всей ассоциации. Помимо них, только в этой ассоциации встречен черновит-(Y).

Ассоциация с самородным мышьяком (№ 6). Первая партия образцов брекчий, в которых обнаружены минералы данной ассоциации, была отобрана в 2015 г. в отвалах Северного карьера. Там же в 2018 г. были найдены образцы, которые по основным индикаторным признакам, типу руд и набору минералов также могут быть отнесены к ассоциации № 6. Ее особенностью являются крупные (до 3–4 см) ксеноморфные обособления, изометричные зерна и почки самородного мышьяка, срastaющиеся с нерудными минералами цемента брекчий (кальцитом, доломитом, кварцем, баритом, клинохлором, мусковитом). Наиболее вероятно, что самородный мышьяк образовался на последней низкотемпературной стадии гидротермального процесса вследствие разложения более ранних реальгара и аурипигмента. Самородный мышьяк частично окислен и замещен гипергенными пленками и корками, которые образованы тесным срастанием двух оксидов As^{3+} – арсенолита и клаудетита. Последние нередко составляют большую часть объема изученных образцов, т. к. из всех главных минералов ассоциации самородный мышьяк быстрее всего подвержен гипергенным изменениям (рис. 5). Самородный мышьяк, арсенолит и клаудетит цементируют и корродируют арсенопирит и реальгар, а их обособления содержат обильную вкрапленность золота, причем в наиболее крупных среди всех остальных ассоциаций индивидах (до 0.1 мм). По набору индикаторных признаков и слагающих данную ассоциацию минералов можно предположить, что образцы принадлежат к той же минерализации, что была вскрыта в 2007 г. взрывными работами ОАО «Полиметалл», когда было обнаружены рекордные для месторождения скопления самородного мышьяка общим весом более 1 т (Викентьев и др., 2016; подробнее об этом см. в разделе «Описание минералов»). В пользу этой версии говорит и высокая степень замещения самородного мышьяка арсенолитом и клаудетитом: очевидно, это произошло уже при нахождении этих образцов в отвалах. Это единственная ассоциация, в которой встречены гессит, джемсонит, кубанит, рамдорит, тетраэдрит-(Fe), тетраэдрит-(Zn) и теннантит-(Fe), а из нерудных минералов – везувиан.

Цыганкоитовая ассоциация (№ 7). Образцы с данной ассоциацией отобраны на рудном складе месторождения в 2015 г. Ассоциация названа по новому минералу цыганкоиту $\text{Mn}_8\text{Tl}_8\text{Hg}_2(\text{Sb}_{21}\text{Pb}_2\text{Tl})_{\Sigma 24}\text{S}_{48}$ с уникальным набором видообразующих элементов (Kasatkin et al., 2018b). Это третья после гладковскиитовой и люборжакит-клеритовой ассоциация, где встречены сульфосоли с видообразующим Mn. В каждой из трех ассоциаций имеются породообразующие Mn-содержащие карбонаты (кальцит и доломит), широко распространены алабандин и Mn-содержащий сфалерит. Существенное различие между ними заключается в специализации Mn-сульфосолей: в ассоциации № 3 они представлены арсеносульфидами (гладковскиит, ауэрбахит), в ассоциации № 5 – антимон-арсеносульфидами без видообразующего таллия (люборжакит, клерит), а в данной ассоциации – только антимонсульфидами (цыганкоит, бенавидесит). Исключительно в этой минеральной ассоциации на месторождении найдены веенит, дюраниозит, иорданит, цыганкоит, а также гаспарит-(La), гейкилит, гидроксиллапатит, пирофанит, турнорит и хлорапатит.

Ассоциация с минералами висмута (№ 8). В карбонатных брекчиях минералы Bi обнаружены не были, однако висмутовая минерализация на Воронцовском месторождении присутствует. На южном фланге месторождения в отвалах Южного карьера в 2018 г. были отобраны скарны магнетит-кальцит-андрадит-эпидотового состава с наложенной сульфидной минерализацией, в составе которой электронно-зондовым методом выявлена группа редких сульфидов и сульфотеллуридов Bi, а также Bi-содержащих сульфосолей. В частности, установлены висмутин, жозеит-А, икунолит, лиллианит, павонит и тетрадимит. Золотосодержащие магнетит-сульфидные руды в гранатовых, пироксен-гранатовых и эпидотовых скарнах описаны в работе (Викентьев и др., 2016), однако отмеченный набор рудных минералов ограничивался золотом, магнетитом и простыми сульфидами (пирит, пирротин, халькопирит и подчиненные сфалерит и галенит).

Гипергенная ассоциация (№ 9). Зона окисления была вскрыта Южным карьером на контакте вулканогенно-осадочных пород с подстилающими их известняками и изучена в ряде работ (Сазонов и др., 1991а; Риндзюнская и др., 1995а, б; Кабанов, 2001; Викентьев и др., 2016). Окисленные руды также добывались на южном фланге Северного карьера. Приуроченный к зоне гипергенеза тип руд

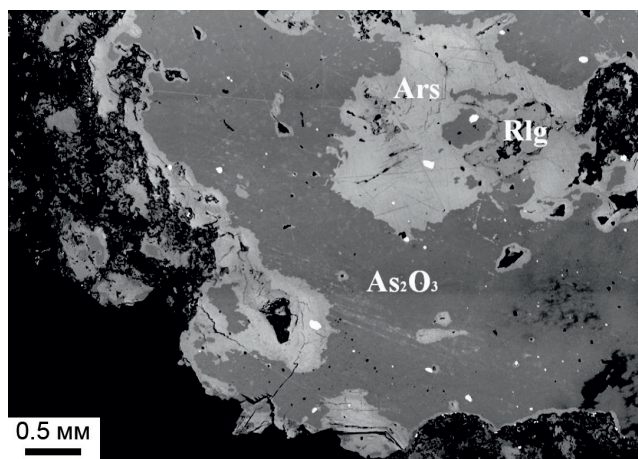


Рис. 5. Ассоциация с самородным мышьяком: фрагмент крупной почки мышьяка (Ars) с вростками реальгара (Rlg) и золота (мелкие белые зерна) и развивающимся вокруг гипергенным арсенолитом/клаудетитом (As_2O_3) и нерудными минералами (черные выделения). РЭМ-фото в отраженных электронах.

Fig. 5. Assemblage with native arsenic: a fragment of a large nodule of native arsenic (Ars) with inclusions of realgar (Rlg) and gold (small white grains) and supergene arsenolite/claudeite (As_2O_3) and gangue minerals (black). SEM(BSE) image.

на Воронцовском месторождении принято именовать золото-окисдно-глинистым (Викентьев и др., 2016). В составе зоны окисления более 90 об. % приходится на нерудную массу: глинистые минералы (каолинит, галлуазит и смектиты – бейделлит, монтмориллонит, нонтронит), гидрослюда, кварц, карбонаты (кальцит, доломит), фторапатит, полевые шпаты и т. д. Рудные минералы составляют менее 10 % и представлены, в основном, оксидами и гидроксидами Fe и Mn, самородным золотом и небольшим количеством сульфидов, среди которых резко преобладает пирит (Кабанов, 2001). Как показали наши исследования, оксиды и гидроксиды Fe представлены гётитом и гематитом, тогда как среди гидроксидов Mn нами впервые для месторождения установлены ахтенскит, бёрнессит, биксбиит, манжироит, цезаролит и др. (рис. 6а, б; табл. 2). В этой же минеральной ассоциации выявлены гипергенные сульфиды (джарлеит, ковеллин, хоулиит), карбонаты (азурит, кутногорит, малахит, родохрозит, церуссит) и сульфаты (англезит, биверит-(Cu), брошантит, гипс, пентагидрит, старкеит, халькантит, эпсомит) (рис. 6в).

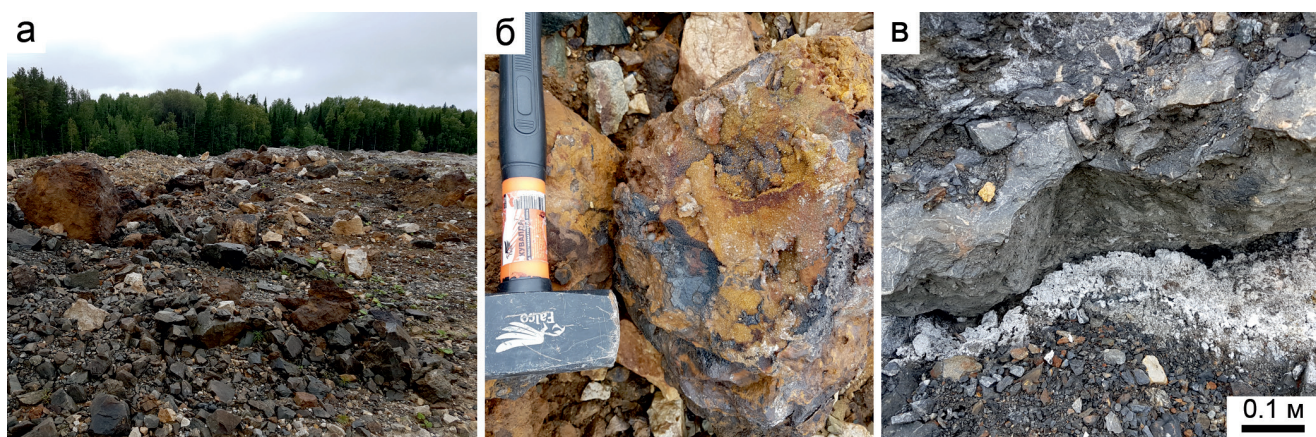


Рис. 6. Гипергенная ассоциация *in situ*:

а – отвалы Южного карьера с гипергенной минерализацией; б – коричневые оксиды Fe и черные оксиды Mn; в – белые порошковые сульфаты. Август 2018 г. Фото А.В. Касаткина.

Fig. 6. Supergene assemblage *in situ*:

а – dumps of the Southern open pit with supergene mineralization; б – brown Fe oxides and black Mn oxides; в – white powdery sulfates. August 2018. Photo by A.V. Kasatkin.

Методы исследования

Минералы описаны на основании наблюдений под стереомикроскопом Zeiss Discovery V8. Оптические свойства рудных минералов в отраженном свете исследованы под поляризационными микроскопами МИН-8 с opak-иллюминатором ОИ-12 и Leitz Wetzlar Type 307–107.002 в воздухе и в иммерсии с использованием кедрового масла (показатель преломления $n_d = 1.516$). Спектры отражения регистрировались на микроспектрофотометре UMSP-50 фирмы Opton по стандарту WTiC при спектральной ширине щели монохроматора 10 нм (аналитики – Л.А. Паутов и А.А. Агаханов).

Микроморфология и химический состав минералов изучались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и электронно-зондового микроанализа с применением энергодисперсионного и волново-дисперсионного спектрометров. Предварительный просмотр полированных препаратов и полуколичественный анализ химического состава минералов выполнен в лаборатории Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (г. Москва) с помощью СЭМ CamScan 4D с энергодисперсионным Si(Li)-детектором и микроанализатором INCA Oxford (условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 5 нА на металлическом кобальте, диаметр зонда 5 мкм; аналитик А.В. Касаткин). Часть количественных анализов выполнена в лаборатории Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН на электронном микроана-

лизаторе JCXA-733 Superprobe JEOL с энергодисперсионным Si(Li)-детектором с тонким окном ATW-2 и системой анализа INCA X-MAX (Oxford Instruments) (условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 2 нА, диаметр зонда 2 мкм; аналитик А.А. Агаханов). Количественный анализ химического состава с помощью волнового электронно-зондового микроанализатора Cameca SX 100 проводился в совместной лаборатории электронной микроскопии и микроанализа Департамента геологических наук Масарикова университета и Чешской геологической службы, Брно, Чехия (аналитик Р. Шкода). Условия анализа: для простых веществ, сульфидов, сульфогарсенидов, теллуридов и сульфосолей – ускоряющее напряжение 25 кВ, ток зонда 20 нА, диаметр зонда 1 мкм; для галогенидов и кислородных соединений – 15 кВ, 10 нА и 8 мкм соответственно. Для всех минералов время накопления импульсов на пике составляло 10–20 с для основных элементов и 20–120 с для второстепенных, на фоне – 5–10 и 10–20 с соответственно.

Определявшиеся элементы, аналитические рентгеновские линии, кристаллы-анализаторы и использовавшиеся стандарты: а) для бескислородных соединений (кроме галогенидов): $SK\alpha$ (PET) – халькопирит; $MnK\alpha$ (LIF) – Mn; $FeK\alpha$ (LLIF) – FeS_2 ; $CoK\alpha$ (LLIF) – Co; $NiK\alpha$ (LLIF) и $AsL\beta$ (TAP) – параммельсбергит; $CuK\alpha$ (LLIF) – Cu; $ZnK\alpha$ (LLIF) – ZnS; $SeL\beta$ (TAP) и $PbM\alpha$ (PET) – PbSe; $MoL\alpha$ (LPET) – Mo; $AgL\alpha$ (PET) – Ag; $CdL\beta$ (PET) – Cd; $SbL\beta$ (PET) – Sb; $CsL\alpha$ (LPET) – поллуцит;

TeL β (LPET) и HgMa (LPET) – HgTe; TlMa (PET) – Tl(Br,I); BiM β (PET) – Bi; б) для галогенидов и оксисолей: FK α (PC1) – топаз; NaK α (TAP) – альбит; MgK α (TAP) – пироп; AlK α (TAP) – андалузит; SiK α (TAP) и CaK α (LPET) – волластонит; PK α (PET) – фторапатит; SK α (LPET) и SrL α (TAP) – SrSO₄; ClK α (PET), VK α (LLIF) и PbMa (LPET) – ванадинит; KK α (PET) – ортоклаз; ScK α (PET) – ScVO₄; TiK α (LPET) – TiO₂; CrK α (LPET) – хромит; MnK α (LLIF) – Mn₂SiO₄; FeK α (LLIF) – андрадит; CoK α (LLIF) – Co; NiK α (LLIF) – Ni₂SiO₄; CuK α (LLIF) и AsL α (TAP) – ламмерит; ZnK α (LLIF) – ганит; YL α (TAP) – YAG; ZrL α (TAP) – циркон; NbL α (LPET) – колумбит; BaL α (PET) – барит; LaL α (PET) – LaPO₄; CeL α (PET) – CePO₄; PrL β (LLIF) – PrPO₄; NdL α (LLIF) – NdPO₄; SmL α (LLIF) – SmPO₄; EuL β (LLIF) – EuPO₄; GdL β (LLIF) – GdPO₄; TbL α (LLIF) – TbPO₄; DyL α (LLIF) – DyPO₄; HoL β (LLIF) – HoPO₄; ErL α (LLIF) – ErPO₄; TmL α (LLIF) – TmPO₄; YbL α (LLIF) – YbPO₄; LuM β (TAP) – LuPO₄; TaL α (TAP) – CrTa₂O₆; WL α (LLIF) – W; ThMa (LPET) – ThO₂; UM β (LPET) – UO₂. К измеренным интенсивностям применена X-PHI коррекция матрицы (Merlet, 1994).

Спектры комбинационного рассеяния (КР) света регистрировались 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 служили полупроводниковые лазеры с рабочей длиной волны излучения 473, 532 или 633 нм и выходной мощностью 5–10 мВт. Эффективный диаметр лазерного пучка вблизи поверхности образца составлял от 1 до 2.6 мкм. КР спектр регистрировался в 180-градусной геометрии рассеяния в диапазоне 100–4000 см⁻¹ со спектральным разрешением ~2 см⁻¹.

Для получения рентгенодифракционных данных предварительно изученные электронно-зондовым методом, а в некоторых случаях и КР спектроскопически, зерна были извлечены из шлифов и проанализированы в лабораториях Департамента наук о Земле Университета Падуи, Падуа, Италия (аналитик Ф. Нестола) и Института физики Академии наук Чешской Республики, Прага (аналитик Я. Плашил).

В первой из них монокристалльные и порошковые рентгеновские данные получены с помощью многофункционального рентгеновского дифрактометра Rigaku Oxford Diffraction SuperNova с детектором Pilatus 200K Dectris, на MoK α -излучении при ускоряющем напряжении 50 кВ, силе тока 0.12 мА и размере фокуса рентгеновского пучка 0.12 мм. Стандартное расстояние образец–детектор составляло 68 мм. Время экспозиции при монокристалльной съемке варьировалось от 15 мин (определение параметров элементарных ячеек для относительно крупных кристаллов) до 90 ч (получение структурных данных на кристаллах размером 10–15 мкм). Порошковые рентгенограммы (вплоть до $d_{\min} = 0.8$ Å) регистрировались на том же приборе в режиме микродифракции при повороте по углу Phi 0–360°. Время экспозиции от 30 мин до 12 ч. Стандартные дифрактограммы получены также при помощи дифрактометра PANalytical θ - θ на CuK α -излучении при ускоряющем напряжении 40 кВ и силе тока 40 мА в пошаговом режиме (шаг 0.033° при 2 θ).

В лаборатории Института физики Академии наук Чешской Республики исследования проводились на монокристалльном дифрактометре Rigaku Oxford Diffraction SuperNova с детектором Atlas S2 CCD, на MoK α -излучении при ускоряющем напряжении 50 кВ, силе тока 30 мА и размере фокуса рентгеновского пучка 0.3 мм. Расстояние образец–детектор для получения стандартных монокристалльных данных – 55 мм, для получения структурных данных при длительной съемке – 120 мм. Время экспозиции варьировалось от 15 мин (определение параметров элементарных ячеек для относительно крупных кристаллов) до 14 дней (получение структурных данных для самых сложных сульфосолей типа гунгерита, цыганкоита и других минералов). Указанный прибор также имеет режим Гандольфи, что позволило получать порошковые рентгенодифракционные данные. Расстояние образец–детектор в этом режиме составляло 53.5 мм, стандартное время экспозиции 25 мин.

Авторы выражают искреннюю благодарность И.В. Пекову, В.В. Гуржию и Е.В. Белогуб за ценные замечания и редакторскую правку всех статей серии, Л.А. Паутову – за помощь в оптических исследованиях и получении спектров отражения для воронцовита и ферроворонцовита, Н.В. Чуканову – за ИК-спектроскопическое исследование ряда минералов и помощь в интерпретации КР спектров сульфосолей, А.Д. Касаткиной,

В.В. Левицкому и Т.В. Пашко – за фотографирование образцов. Мы признательны представителям Уральского филиала АО «Полиметалл УК»: директору А.В. Новикову – за помощь в организации полевых работ и главному геологу А.А. Готтману – за образцы самородного мышьяка, предоставленные нам для исследований.

Литература

- Барышев А.Н., Злотник-Хоткевич А.Г., Черемисин А.А.** (1993) Воронцовское золоторудное месторождение на Северном Урале, строение и прогнозно-поисковые критерии. *ИТД-92 – ЦНИГРИ. Материалы научно-технической конференции*. М., ЦНИГРИ, 31–32.
- Бегетнев С.В.** (1998) Морфология «рисовидного» джаспероидного кварца Воронцовского золоторудного месторождения (Сев. Урал). *Уральская летняя минералогическая школа-98*. Екатеринбург, УГГА, 67–68.
- Бобров В.Н.** (2013) Воронцовский клад. Поиски и открытия. Карпинск, Печатный дом «Перспектива», 32 с.
- 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.
- Волков А.В., Сидоров А.В.** (2016) Геолого-генетическая модель месторождений золота карлинского типа. *Литосфера*, (6), 145–165.
- Гладковский Б.А.** (2002) История открытия Воронцовского золоторудного месторождения. *Уральский геологический журнал*, 5, 165–170.
- Григорьев Н.А., Сазонов В.Н., Мурзин В.В.** (1991) Минеральный баланс золота в породах объекта карлинского типа. *Минеральный баланс химических элементов в горных породах и рудах Урала*. Свердловск, УрО АН СССР, 2, 14–19.
- Исакович И.З.** (1996) Минералогические ореолы Воронцовского золоторудного месторождения. *Отечественная геология*, 8, 26–30.
- Кабанов А.А.** (2001) Окисленные руды – новый геолого-промышленный тип гипергенных месторождений золота (на примере Воронцовского месторождения на Урале). *Дисс. на соиск. уч. степ. канд. геол.-мин. наук*. Санкт-Петербург, 142 с.
- Касаткин А.В.** (2019) Новые находки редких минералов на территории постсоветских государств. *Минералогический альманах*, 24(2), 4–47.
- Касаткин А.В., Паутов Л.А.** (2020) Оптические свойства воронцовита и ферроворонцовита: новые данные. *Новые данные о минералах*, 54(2), 69–72.
- Коржинский Д.С.** (1948) Петрология Турьинских скарных месторождений меди. М., АН СССР. 148 с.
- Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Богомолов Е.С., Ларионов А.Н., Бережная Н.Г.** (2007) Ауэрбаховский массив: цирконы, возраст, полихронность. *Ежегодник–2006 ИГиГ УрО РАН*. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 191–196.
- Минералогия Урала. Арсениды и стибниды. Теллуриды. Селениды. Фториды. Хлориды и бромиды (1991). Свердловск, УрО АН СССР, 215 с.
- Минина О.В.** (1994) Ауэрбаховская комплексная рудно-магматическая система на Среднем Урале. *Отечественная геология*, 7, 17–23.
- 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.
- Мурзин В.В., Сазонов В.Н.** (1990) Особенности минералогии золотого оруденения карлинского типа в андезитоидном вулcano-плутоническом поясе (Урал). Минералогия месторождений Урала: тезисы докладов II регионального совещания «Минералогия Урала». Свердловск, УрО АН СССР, 2, 95–98.
- Мурзин В.В., Сазонов В.Н., Ронкин Ю.Л.** (2010) Модель формирования Воронцовского золоторудного месторождения на Урале (карлинский тип): новые данные и проблемы. *Литосфера*, 6, 66–73.
- Мурзин В.В., Суставов С.Г.** (1997) К вопросу о перспективах открытия новых рудных минералов на Урале. *Структура и эволюция минерального мира: материалы к международному минералогическому семинару*. Сыктывкар, 105–106.
- Рахов Е.В.** (1999) Рудоносные брекчии Воронцовского месторождения: их состав, генезис и роль в формировании золотого оруденения. *Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геол.-мин. наук*. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 17 с.
- Риндзюнская Н.М., Берзон Р.О., Полякова Т.П.** (1995а) Геолого-генетические основы прогноза и поисков месторождений золота в корах выветривания. М., ЦНИГРИ, 300 с.
- Риндзюнская Н.М., Полякова Т.П., Бобров В.Н.** (1995б) Геолого-минералогическая характеристика зоны гипергенеза Воронцовского золоторудного месторождения. *Руды и металлы*, 4, 42–52.
- Ровнушкин М.Ю., Гуляева Т.Я., Галахова О.Л.** (2010) Проявление калишпатового метасоматоза в пределах Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). *Ежегодник–2009 ИГГ УрО РАН*. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 57, 241–244.

- Рябинин В.Ф., Мурзин В.В., Сурганов А.В.** (1992) Особенности распределения золота и серебра в сульфидизированных эндо- и экзокскариях Воронцовского золоторудного месторождения. *Ежегодник–1991 ИГиГ УрО АН СССР*. Свердловск, ИГиГ УрО АН СССР, 65–66.
- Савельева К.П., Костромин Д.А.** (1991) Полигенный и полихронный метасоматоз одного из золоторудных месторождений Урала. *Рудоносные метасоматические формации Урала*. Свердловск, УрО АН СССР, 77–78.
- Савельева К.П., Костромин Д.А., Мельничук Г.Д.** (1991) Особенности формирования одного из золоторудных месторождений Северного Урала. *Материалы по геологии и металлогении Урала*. Свердловск, УрО АН СССР, 60–64.
- Сазонов В.Н., Артеменко Н.А., Воронина Л.К.** (1995) Светлые слюды Воронцовского золоторудного месторождения (Сев. Урал). *Ежегодник–1994 ИГиГ УрО РАН*. Екатеринбург, ИГиГ УрО РАН, 93–94.
- Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А.** (1990а) Золотоносность рудных формаций района развития андезитовых краевых поясов (на примере Урала). *Доклады Академии наук СССР*, **314**(3), 677–681.
- Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А.** (1998) Воронцовское золоторудное месторождение – пример минерализации карлинского типа на Урале, Россия. *Геология рудных месторождений*, **40**(2), 157–170.
- Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А., Гладковский Б.А.** (1990б) Золотооруденение карлинского типа на Урале. *Новые данные по золоторудным месторождениям Урала*. Свердловск, УрО АН СССР, 26–49.
- Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А., Гладковский Б.А.** (1991а) Эндогенное оруденение девонского андезитовидного вулканоплутонического комплекса (Урал). Свердловск, УрО АН СССР, 184 с.
- Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А., Огородников В.Н., Рябинин В.Ф.** (1991б) Нетрадиционное золотооруденение Урала. *Материалы по геологии и металлогении золота Урала*. Свердловск, УрО АН СССР, 3–36.
- Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Шумилов И.А.** (1993) Изотопно-геохимическая модель Ауэрбаховского рудного поля (Северный Урал). *Доклады Академии наук*, **331**(4), 456–458.
- Сорока Е.И., Притчин М.Е., Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Лютоев В.П., Смолева И.В.** (2018) Физико-химические исследования жильных карбонатов Воронцовского золоторудного месторождения. *Вестник Пермского университета*, **17**(1), 41–51.
- Сорока Е.И., Притчин М.Е., Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Смолева И.В., Галахова О.Л.** (2017) Жильные карбонаты рудовмещающих пород Воронцовского золоторудного месторождения. *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского*. Пермь, ПГУ, 242–248.
- Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Черепанов А.В., Проскурнин В.Ф.** (2019) Геолого-генетический тип Воронцовского месторождения золота (Северный Урал). *Уральская минералогическая школа-2019*. Екатеринбург, ИГиГ УрО РАН, 163–168.
- Степанов С.Ю., Шарпёнок Л.Н., Антонов А.В.** (2017) Флюидо-эксплозивные брекчии Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). *Записки РМО*, **146**(1), 29–43.
- Черемисин А.А., Злотник-Хоткевич А.Г.** (1997) Воронцовское золоторудное месторождение. *Руды и металлы*, **1**, 59–70.
- Язева Р.Г., Пучков В.Н., Бочкарев В.В.** (1991) Геодинамика и металлогения восточной палеоконтинентальной окраины и краевых вулканоплутонических поясов Урала. *Геодинамика и металлогения Урала*. Свердловск, УрО АН СССР, 43–45.
- 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.
- Boev B., Jovanovski G., Makreski P.** (2012) Geology and mineralogy of Allchar Sb–As–Tl–Au deposit. *Geologica Macedonica*, **3**, 215–233.
- Dickson F.W., Radtke A.S., Peterson J.A.** (1979) Ellisite, Ti_3AsS_3 a new mineral from the Carlin gold deposit, Nevada, – and associated sulfide and sulfosalt minerals. *American Mineralogist*, **64**, 701–707.
- Kasatkin A.V., Nestola F., Agakhanov A.A., Škoda R., Karpenko V.Y., Tsyganko M.V., Plášil J.** (2018a) Vorontsovite, $(\text{Hg}_5\text{Cu})_{\Sigma 6}\text{TiAs}_4\text{S}_{12}$, and ferrovorontsovite, $(\text{Fe}_5\text{Cu})_{\Sigma 6}\text{TiAs}_4\text{S}_{12}$: 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, $\text{Mn}_8\text{Ti}_8\text{Hg}_2(\text{Sb}_{21}\text{Pb}_2\text{Ti})_{\Sigma 24}\text{S}_{48}$, 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, $\text{MnTiAs}_3\text{S}_6$, 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., Palamarчук 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**, 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**, 485–488.
- Kasatkin A.V., Plášil J., Makovicky E., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Tsyganko M.V.**

(2020c) Gungerite, IMA 2020-009. CNMNC Newsletter No. 56; *Mineralogical Magazine*, **84**, 485–488.

Kasatkin A.V., Plášil J., Makovicky E., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y. (2020d) Auerbachite, IMA 2020-047. CNMNC Newsletter No. 57; *Mineralogical Magazine*, **84**, 791–794.

Makovicky E., Plášil J., Kasatkin A.V., Škoda R. (2020) The crystal structure of $\text{Ti}_{2.355}\text{Sb}_{5.984}\text{As}_{4.591}\text{S}_{17}$, the lead-free end-member of the chabournéite homeotypic family. *The Canadian Mineralogist*, accepted.

Merlet C. (1994) An accurate computer correction program for quantitative electron probe microanalysis. *Microchimica Acta*, **114/115**, 363–376.

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

Murzin V.V., Sazonov V.N., Grigoriev N.A., Ryabinin V.F. (1990) A genetic model for Carlin-type gold ores in the Urals. *Proceedings of Eighth Quaddrennial IAGOD Symposium*, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 647–652.

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 РМО*, **147**(1), 68–78.

Raber T., Roth P. (2018) The Lengenbach quarry in Switzerland: classic locality for rare thallium sulfosalts. *Minerals*, **8**, paper 409.

Radtke A. (1985) Geology of the Carlin gold deposit, Nevada. USGS Professional Paper 1267, 124 p.

Vikent'eva O., Vikentev I. (2016) Occurrence modes of As, Sb, Te, Bi, Ag in sulfide assemblages of gold deposits of the Urals. *3rd International Conference on Competitive Materials and Technology Processes (IC-CMTP3)*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, **123**, doi:10.1088/1757-899X/123/1/012028

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.

White N.C., Hedenquist J.W. (1995) Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, (23), 9–13.

References

Baryshev A.N., Zlotnik-Khotkevich A.G., Cheremisin A. A. (1993) [Vorontsovskoe gold deposit in the Northern Urals, structure and forecast-prospecting criteria] *NTD-92-TSNIGRI. Materiali nauchno-tehnicheskoy ryyferensii. Proceedings of scientific and technical conference*. Moscow, TsNIGRI, 31–32. (in Russian)

Begetnev S. V. (1998) [Morphology of «rice-like» jasperoid quartz of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals)]. *Ural'skaja letnyaya mineraloicheskaya shkola-98 [Urals summer mineralogical school-98]*. Yekaterinburg, IGSA, 67–68. (in Russian)

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.

Bobrov V.N. (2013) [Vorontsov's treasure. Prospecting and discoveries]. Karpinsk, pechatniy dom «Perspektiva», 32 p. (in Russian)

Boev B., Jovanovski G., Makreski P. (2012) Geology and mineralogy of Allchar Sb–As–Tl–Au deposit. *Geologica Macedonica*, **3**, 215–233.

Cheremisin A.A., Zlotnik-Hotkevich A.G. (1997) [The Vorontsovskoe gold deposit]. *Rudy i metally [Ores and Metals]*, (1), 59–70. (in Russian)

Dickson F.W., Radtke A.S., Peterson J.A. (1979) Ellisite, Ti_3AsS_3 , a new mineral from the Carlin gold deposit, Nevada, and associated sulfide and sulfosalt minerals. *American Mineralogist*, **64**, 701–707.

Gladkovsky B.A. (2002) [The history of discovery of the Vorontsovskoe gold deposit]. *Uralskiy geologicheskii zhurnal [Urals Geological Journal]*, **5**, 165–170. (in Russian)

Grigoriev N.A., Sazonov V.N., Murzin V.V. (1991) [Mineral balance of gold in Carlin type rocks]. *Mineral'nyy balans khimicheskikh elementov v gornykh porodakh i rudakh Urala [Mineral balance of chemical elements in rocks and ores of the Urals]*. Sverdlovsk, UB AS USSR, 14–19. (in Russian)

Isakovich I.Z. (1996) [Mineralogical halos of the Vorontsovskoe gold deposit]. *Otechestvennaya geologiya [Native Geology]*, **8**, 26–30. (in Russian)

Kabanov A.A. (2001) [Oxidized ores as a new geological and industrial type of supergene gold deposits: example of the Vorontsovskoe deposit in the Urals]. *Dissertation of Candidate of Geological-Mineralogical Sciences*. St. Petersburg, 142 p. (in Russian)

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

Kasatkin A.V., Nestola F., Agakhanov A.A., Škoda R., Karpenko V.Y., Tsyganko M.V., Plášil J. (2018a) Vorontsovite, $(\text{Hg}_5\text{Cu})_{26}\text{TiAs}_4\text{S}_{12}$, and ferrovorontsovite, $(\text{Fe}_5\text{Cu})_{26}\text{TiAs}_4\text{S}_{12}$: 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, $\text{Mn}_8\text{Ti}_8\text{Hg}_2(\text{Sb}_{21}\text{Pb}_2\text{Ti})_{24}\text{S}_{48}$, 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., Nesto-

- Ia F.** (2019) Gladkovskyite, $\text{MnTlAs}_5\text{S}_6$, 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., Palamar-chuk R.S.** (2020a) Luboržákitite, $\text{Mn}_2\text{AsSbS}_5$, a new member of pavonite homologous series from Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Mineralogical Magazine*, **84**, doi:10.1180/mgm.2020.48.
- 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**, 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., Plášil J., Makovicky E., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Tsyganko M.V.** (2020c) Gungerite, IMA 2020-009. CNMNC Newsletter No. 56; *Mineralogical Magazine*, **84**, 485–488.
- Kasatkin A.V., Plášil J., Makovicky E., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y.** (2020d) Auerbakhite, IMA 2020-047. CNMNC Newsletter No. 57; *Mineralogical Magazine*, **84**, 791–794.
- Korzhinsky D.S.** (1948) [Petrology of the Turinsky skarn copper deposits]. Moscow, AN SSSR, 148 p. (in Russian)
- Krasnobaev A.A., Fershtater G.B., Bogomolov E.S., Larionov A.N., Berezhnaya N.G.** (2007) [Auerbakh massif: zircons, age, polychronism]. *Ezhegodnik–2006 IGG UrO RAN [Yearbook–2006 of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS]*, Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 191–196. (in Russian)
- Makovicky E., Plášil J., Kasatkin A.V., Škoda R.** (2020) 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*, accepted.
- Merlet C.** (1994) An accurate computer correction program for quantitative electron probe microanalysis. *Microchimica Acta*, **114/115**, 363–376.
- [Mineralogy of the Urals. Arsenides and stibnides. Tellurides. Selenides. Fluorides. Chlorides and bromides] (1991) Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 215 p. (in Russian)
- Minina O.V.** (1994) [Auerbakh complex ore-magmatic system in the Central Urals]. *Otechestvennaya geologiya [Native Geology]*, (7), 17–23. (in Russian)
- Murzin V.V., Bushmakina A.F., Sustavov S.G., Shcherbachov D.K.** (1996) [Clerite MnSb_2S_4 – a new mineral from the Vorontsovskoe gold deposit in the Urals]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **125**(3), 95–101. (in Russian)
- Murzin V.V., Naumov E.A., Azovskova O.B., Varlamov D.A., Rovnushkin M.Yu., Pirajno F.** (2017) The Vorontsovskoe Au–Hg–As ore deposit (Northern Urals, Russia): geological setting, ore mineralogy, geochemistry, geochronology and genetic model. *Ore Geology Reviews*, **85**, 271–298.
- Murzin V.V., Sazonov V.N.** (1990) [Mineralogical features of Carlin type gold mineralization in an andesite volcano-plutonic belt (Urals)]. *Mineralogiya mestorozhdeniy Urala: tezisyy dokladov II regionalnogo soveshchaniya «Mineralogiya Urala» [Mineralogy of the Urals deposits: abstracts of II regional meeting «Mineralogy of the Urals»]*. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 95–98. (in Russian)
- Murzin V.V., Sazonov V.N., Grigoriev N.A., Ryabinin V. F.** (1990) A genetic model for Carlin-type gold ores in the Urals. *Proceedings of Eighth Quaddrennial IAGOD Symposium*, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 647–652.
- Murzin V.V., Sazonov V.N., Ronkin Yu.L.** (2010) [Model of formation of the Vorontsovskoe gold deposit in the Urals (Carlin type): new data and problems]. *Litosfera [Lithosphere]*, **6**, 66–73. (in Russian)
- Murzin V.V., Sustavov S.G.** (1997) [Prospects of finding of new ore minerals in the Urals]. *Struktura i evolutsiya mineralnogo mira: materialy k mezhdunarodnomu mineralogicheskomu seminaru [Structure and evolution of the mineral world: materials of the international mineralogical seminar]*. Syktyvkar, 105–106. (in Russian)
- Murzin V.V., Varlamov D.A.** (2010) [Gold-sulfide-sulfosalt assemblage of minerals from breccias with siliceous clasts of the Vorontsovskoe deposit (Central Urals)]. *Vestnik Uralskogo Otdeleniya RMO [Bulletin of the Urals Branch of the Russian Mineralogical Society]*, **7**, 92–100 (in Russian).
- Murzin V.V., Varlamov D.A., Rovnushkin M.Yu.** (2011) [Assemblage of native arsenic and arsenopyrite of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals)]. *Vestnik Uralskogo Otdeleniya RMO [Bulletin of the Urals Branch of the Russian Mineralogical Society]*, **8**, 80–87. (in Russian).
- Plášil J., Kasatkin A.V., Škoda R., Stepanov S.Yu.** (2018) Parapiertrotite from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia: crystal structure and chemical composition. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **147**(1), 68–78
- Raber T., Roth P.** (2018) The Lengenbach quarry in Switzerland: classic locality for rare thallium sulfosalts. *Minerals*, **8**, paper 409.
- Radtke A.** (1985) Geology of the Carlin gold deposit, Nevada. USGS Professional Paper 1267, 124 p.
- Rakhov E.V.** (1999) [Ore-bearing breccias of the Vorontsovskoe deposit: composition, genesis and role in formation of gold mineralization]. *Abstracts of Dissertation of Candidate of Geological-Mineralogical Sciences*. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 17 p. (in Russian)
- Rindzyunskaya N.M., Berzon R.O., Polyakova T.P.** (1995a) [Geological and genetic bases of forecast and prospect of gold deposits in weathering crusts]. Moscow, TsNIGRI, 300 p. (in Russian)
- Rindzyunskaya N.M., Polyakova T.P., Bobrov V.N.** (1995b) [Geological and mineralogical characteristics of supergene zone of the Vorontsovskoe gold deposit]. *Rudy i metally [Ores and Metals]*, **4**, 42–52. (in Russian)

- Rovnushkin M.Yu., Gulyaeva T.Ya., Galakhova O.L.** (2010) [K-feldspar metasomatism within the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals)]. *Ezhegodnik–2009 IGG UrO RAN* [Yearbook–2009 of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS]. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 241–244. (in Russian)
- Ryabinin V.F., Murzin V.V., Surganov A.V.** (1992) [Features of gold and silver distribution in sulfidized endo- and exoskarns of the Vorontsovskoe gold deposit]. *Ezhegodnik–1991 IGG UrO AN SSSR* [Yearbook–1991 of the Institute of Geology and Geochemistry UB AS USSR]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 65–66. (in Russian)
- Savel'eva K.P., Kostromin D.A.** (1991) [Polygenic and polychronous metasomatism of one of the Ural gold deposits]. *Rudonosnye metasomaticheskie formatsii Urala* [Ore-bearing metasomatic complexes of the Urals]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 77–78. (in Russian)
- Savel'eva K.P., Kostromin D.A., Melnichuk G.D.** (1991) [Features of formation of ore gold deposits of the Northern Urals]. *Materiali po geologii i metallogenii Urala* [Materials on geology and metallogeny of the Urals]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 60–64. (in Russian)
- Sazonov V.N., Artemenko N.A., Voronina L.K.** (1995) [Light micas of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals)]. *Ezhegodnik–1994 IGG UrO RAN* [Yearbook–1994 of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS]. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 93–94. (in Russian)
- Sazonov V.N., Murzin V.V., Grigor'ev N.A.** (1998) [Vorontsovskoe gold deposit: example of Carlin-type mineralization in the Urals, Russia]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits], **40**(2), 139–151. (in Russian)
- Sazonov V.N., Murzin V.V., Grigor'ev N.A.** (1990a) [Gold potential of ore complexes within andesite marginal belts: example of the Urals]. *Doklady AN SSSR*, **314**(3), 677–681. (in Russian)
- Sazonov V.N., Murzin V.V., Grigoriev N.A., Gladkovsky B.A.** (1990b) [The Carlin-type gold mineralization in the Urals]. *Novye dannye po zolotorudnym mestorozhdeniyam Urala* [New data on the Ural gold deposits]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 26–49 (in Russian).
- Sazonov V.N., Murzin V.V., Grigoriev N.A., Gladkovsky B.A.** (1991a) [Endogene mineralization of the Devonian andesite volcano-plutonic complex (the Urals)]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 184 p. (in Russian)
- Sazonov V.N., Murzin V.V., Grigoriev N.A., Ogorodnikov V.N., Ryabinin V.F.** (1991b) [Nontraditional gold mining in the Urals]. *Materiali po geologii i metallogenii zolota Urala* [Materials on geology and metallogeny of gold of the Urals]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 3–36. (in Russian)
- Sazonov V.N., Murzin V.V., Shumilov I.A.** (1993) [Isotopic-geochemical model of the Auerbakh ore field (Northern Urals)]. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], **331**(4), 456–458. (in Russian)
- Soroka E.I., Pritchkin M.E., Azovskova O.B., Rovnushkin M.Yu., Lyutov V.P., Smoleva I.V.** (2018) [Physico-chemical studies of vein carbonates of the Vorontsovskoe gold deposit]. *Vestnik Permskogo universiteta* [Bulletin of Perm State University], **17**(1), 41–51. (in Russian)
- Soroka E.I., Pritchkin M.E., Azovskova O.B., Rovnushkin M.Yu., Smoleva I.V., Galakhova O.L.** (2017) [Vein carbonates of ore-bearing rocks of the Vorontsovskoe gold deposit]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo* [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinskiy]. Perm, PGU, 242–248. (in Russian)
- Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S., Cherepanov A.V., Proskurnin V.F.** (2019) [Geological-genetic type of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals)]. *Ural'skaya mineralogicheskaya shkola–2019* [Ural mineralogical school-2019]. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 163–168. (in Russian)
- Stepanov S.Yu., Sharpenok L.N., Antonov A.V.** (2017) [Fluid-explosive breccias of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals)]. *Zapiski RMO* [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], **146**(1), 29–43. (in Russian)
- Vikent'eva O., Vikentev I.** (2016) Occurrence modes of As, Sb, Te, Bi, Ag in sulfide assemblages of gold deposits of the Urals. *3rd International Conference on Competitive Materials and Technology Processes (IC-CMTP3). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **123**, doi:10.1088/1757-899X/123/1/012028
- 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]. Ekaterinburg, 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.
- Volkov A.V., Sidorov A.V.** (2016) [Geological-genetic model of Carlin type gold deposits]. *Litosfera* [Lithosphere], (6), 145–165. (in Russian)
- White N.C., Hedenquist J.W.** (1995) Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, (23), 9–13.
- Yazeva R.G., Puchkov V.N., Bochkarev V.V.** (1991) [Geodynamics and metallogeny of eastern paleocontinental margin and marginal volcano-plutonic belts of the Urals]. *Geodinamika i metallogeniya Urala* [Geodynamics and metallogeny of the Urals]. Sverdlovsk, UrO RAN SSSR, 43–45. (in Russian)

Поступило в редакцию 1 ноября 2020 г.

После доработки 18 ноября 2020 г.

Принято в печать 19 ноября 2020 г.