



УДК 549.3:902(470.5)

<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-3-4>

МИНЕРАЛОГИЯ ЗОНЫ ОКИСЛЕНИЯ ДРЕВНЕГО МЕДНОГО РУДНИКА ВОРОВСКАЯ ЯМА (ЮЖНОЕ ЗАУРАЛЬЕ)

А.М. Юминов¹, Ш.Х. Кулдашев², И.А. Блинов¹,П.В. Хворов¹, К.А. Филиппова¹, М.Н. Анкушев¹, П.С. Анкушева¹¹Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; ankushev_maksim@mail.ru²ОАО Полиметалл, пр. Народного ополчения 2, г. Санкт-Петербург, 198216 Россия

Статья поступила в редакцию 04.08.2025 г., после доработки 04.10.2025 г., принята к печати 06.10.2025 г.

Аннотация. Рассмотрена геологическая позиция и минералогия зоны окисления медного рудопроявления Воровская Яма (Южное Зауралье), которое разрабатывалось в XVII–XVI вв. до н. э. горняками алакульской культуры. Рудопроявление приурочено к контакту серпентинитов и базальтов девонского возраста; оруденение, предположительно, связано с мелкими интрузивными телами сиенитов и относится к скарновому типу. Основными минералами скарнов являются андрадит и клинопироксен. В зоне окисления установлены второстепенные (плаггиоклаз, амфибол, эпидот, хлорит, кварц, цоизит, мусковит, малахит), аксессуарные (хромит, магнетит, барит, халькопирит, ковеллин, пирротин, кубанит, самородное золото) и гипергенные (смектиты, оксигидроксиды Fe, опал, самородная медь, йодаргирит) минералы. В бронзовом веке разрабатывались верхние горизонты зоны окисления рудопроявления, представленные выветрелыми скарнами с малахитовой минерализацией. Меднорудное сырье проявления Воровская Яма на поселениях бронзового века Южного Урала можно диагностировать по присутствию граната, а также примесям Zn, Ag и Se в окисленной руде.

Ключевые слова: древний рудник, зона окисления, скарн, медные руды, бронзовый век, Южный Урал

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 25-18-20001 «Первые горняки бронзового века в Южном Зауралье: технологии, связи и повседневность». <https://rscf.ru/project/25-18-20001/>

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

Вклад авторов. А.М. Юминов, М.Н. Анкушев – разработка концепции, исследование, написание черновика рукописи; П.С. Анкушева – археологическое описание материалов и истории изучения; Ш.Х. Кулдашев, И.А. Блинов, П.В. Хворов, К.А. Филиппова – аналитические работы.

Для цитирования: Юминов А.М., Кулдашев Ш.Х., Блинов И.А., Хворов П.В., Филиппова К.А., Анкушев М.Н., Анкушева П.С. Минералогия зоны окисления древнего медного рудника Воровская Яма (Южное Зауралье). Минералогия, 2025, 11(3), 51–66. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-3-4

MINERALOGY OF OXIDATION ZONE OF THE VOROVSKAYA YAMA ANCIENT COPPER MINE (SOUTH TRANSURALS)

A.M. Yuminov¹, Sh.Kh. Kuldashov², I.A. Blinov¹,P.V. Khvorov¹, K.A. Filippova¹, M.N. Ankushev¹, P.S. Ankusheva¹¹South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia; ankushev_maksim@mail.ru²OJCS Polymetal, pr. Narodnogo opolcheniya 2, St. Petersburg, 198216 Russia

Received 04.08.2025, revised 04.10.2025, accepted 06.10.2025

Abstract. The article considers the geological setting and mineralogy of oxidation zone of the Vorovskaya Yama copper occurrence (South Transurals), which was exploited in 17th–16th centuries BC by miners of the Alakul culture. The ore occurrence is confined to the contact of serpentinites and Devonian basalts; mineralization is associated with small intrusive bodies of syenites and belongs to skarn type. Andradite and clinopyroxene are major minerals of skarns. The oxidation zone contains subordinate (plagioclase, amphibole, epidote, chlorite, quartz, zoisite, muscovite, and malachite), accessory (Cr-rich spinel, magnetite, barite, chalcopyrite, covellite, pyrrhotite, cubanite, and native gold) and supergene (smectites, Fe oxyhydroxides, opal, native copper, and iodargyrite) minerals. The upper horizons of the oxidation zone with weathered skarns and malachite were exploited in the Bronze Age. Copper ore of the Vorovskaya Yama type in the South Urals Bronze Age settlements can be identified by the presence of garnet, as well as the presence of Zn, Ag and Se in oxidized ore.

Keywords: ancient mine, oxidation zone, skarn, copper ores, Bronze Age, South Urals.

Funding. This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 25-18-20001 «The First Bronze Age Miners in the Southern Trans-Urals: Technologies, Contacts and Everyday Life».

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

Authors contribution. A.M. Yuminov, M.N. Ankushev – concept development, research, writing of the manuscript draft; P.S. Ankusheva – archaeological description of materials and history of research; Sh.Kh. Kuldashiev, I.A. Blinov, P.V. Khvorov, K.A. Filippova – analytical work.

For citation: Yuminov A.M., Kuldashiev Sh.Kh., Blinov I.A., Khvorov P.V., Filippova K.A., Ankushev M.N., Ankusheva P.S. Mineralogy of oxidation zone of the Vorovskaya Yama ancient copper mine (South Transurals). *Mineralogy*, 2025, 11(3), 51–66. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-3-4.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация медных месторождений древним населением Южного Зауралья началась на рубеже III–II тыс. до н. э. и с перерывами продолжалась в течение всего бронзового века. К настоящему времени известна серия горных выработок, относящихся к этому периоду на основании их структуры, радиоуглеродного датирования и артефактного набора (Зайков и др., 2005; Ankusheva et al., 2022). Рудник Воровская Яма – один из них. Уникальность этого объекта заключается в расположении на нем поселения горняков алакульской культуры, специализированного на добыче и обогащении медной руды в XVII–XVI вв. до н. э. (Ankusheva et al., 2024). Примеры подобных памятников, исследованных раскопками, на территории нашей страны единичны. Среди наиболее знаменитых аналогов следует упомянуть поселение Горный на Каргалинском рудном поле в Оренбуржье (Каргалы, 2002), а также комплекс Михайло-Овсянка I в Самарском Поволжье (Матвеева и др., 2004; Shishlina et al., 2020).

Реконструкция древних технологий по добыче и обогащению медной руды является краеугольным камнем в понимании этих объектов. В частности, минералого-геохимические изыскания направлены на решение вопросов предпочитаемого древними горняками типа меднорудного сырья, а также связанных с этим методов проходки, объемов добычи, способов обогащения и выплавки

первичного металла. Не менее важным является поиск направлений обмена горно-металлургической продукцией, основанный на данных о специфике состава руд и вмещающих пород данного рудопроявления.

Целью настоящего исследования стало уточнение геологической позиции рудопроявления Воровская Яма и выявление минералого-геохимических маркеров местной медной руды для геоархеологических исследований. В задачи работы входило изучение рудовмещающих пород из зоны окисления месторождения и минералогическая характеристика медных руд, добываемых в бронзовом веке.

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ДРЕВНЕГО РУДНИКА

Рудник Воровская Яма находится в Кизильском районе Челябинской области в 6 км северо-восточнее от пос. Зингейского (рис. 1). Территория относится к степной зоне, пункт медной минерализации локализован в 6.6 км к северо-востоку от места впадения р. Куйсак в р. Зингейку. Объект впервые был обследован в 1993 г. отрядом археологов Челябинского государственного университета (г. Челябинск) под руководством Г.Б. Здановича и геологов Института минералогии УрО РАН (г. Миасс) под руководством В.В. Зайкова (рис. 2) (Зайков и др., 1995). В северной части памятника заложено пять геологических траншей, прорезающих отвалы отработанной породы, а в юго-восточной – неболь-

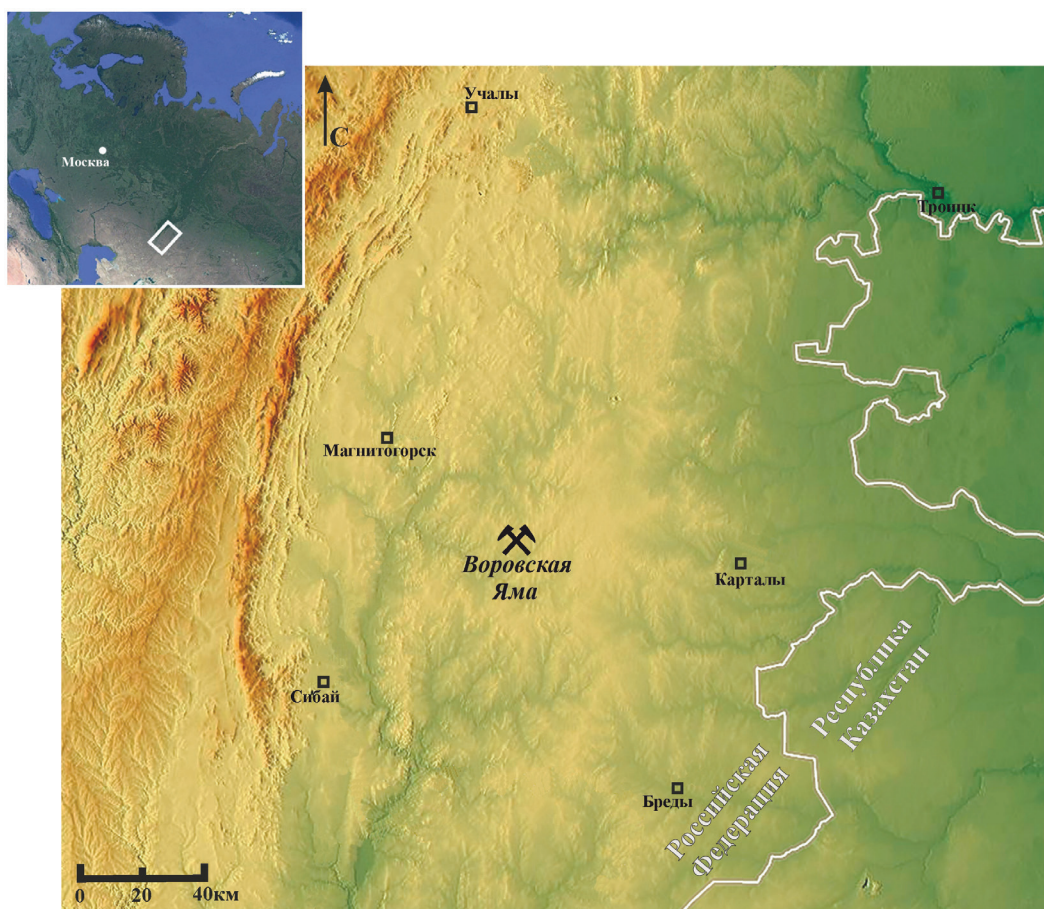


Рис. 1. Расположение рудопроявления и древнего рудника Воровская Яма.
Fig. 1. Location of the Vorovskaya Yama ore occurrence and ancient mine.



Рис. 2. Вид древнего рудника Воровская Яма, 1993 г.
Fig. 2. View of the Vorovskaya Yama ancient mine, 1993.

шой археологический раскоп. Исследователями составлены схемы геологического строения рудника и профилей отвалов. В профиле одной из траншей (ВК-4) обнаружен культурный слой позднего бронзового века. На погребенной почве внешнего края траншеи под слоем отвала отработанной по-

роды залегал темно-серый суглинок с древесным углем, костями домашних животных и фрагментами керамики. Керамический комплекс представлен фрагментами не менее десяти различных сосудов срубно-алакульского типа, датируемых первой половиной II тыс. до н. э. (Зайков и др., 2000).



Рис. 3. Современное состояние рудника бронзового века Воровская Яма (июль 2023 г.).
Fig. 3. Current state of the Bronze Age Vorovskaya Yama mine (July 2023).



Рис. 4. Желтый песок в постройке бронзового века – результат дробления медных руд при обогащении.
Fig. 4. Yellow sand in a Bronze Age structure – a result of crushing copper ores during their processing.

Впоследствии здесь был заложен археологический раскоп размером 16×24 м общей площадью 384 м^2 (работы выполнялись в 2021 и 2023–2025 гг.) (рис. 3). Он захватывал внешний край отвала рудника (желто-белесый суглинок со щебнем рудовмещающих пород), территорию нескольких заглубленных в погребенную почву или кору выветривания («материк») построек каркасно-столбовой конструкции, а также периферию поселка горняков, слабо насыщенную следами их деятельности. По-

стройка 1 имела каркасно-столбовую конструкцию, заглубленную в кору выветривания на 15–25 см, а ее размеры составляли около 8.00×3.75 м. Ее котлован имел двухслойное заполнение. Нижний слой представлен неоднородным «пестрым» суглинком коричневого оттенка с включениями медьсодержащих минералов и древесного угля. На нем залегал желтый песок, состоящий, предположительно, из дробленой породы – отходов обогащения медной руды (рис. 4). К югу от постройки предполагалось

присутствие других строительных конструкций, заглубленных в погребенную почву. В раскопе расчищено несколько теплотехнических сооружений, часть из которых определена как металлургические (Анкушева и др., 2023), столбовые и хозяйственные ямы.

На площадке к юго-востоку от центрального карьера в 2024 г. начато исследование вертикальной горной выработки, функционировавшей одновременно с поселением в бронзовом веке. Массовый археологический материал представлен бытовыми отходами в виде фрагментированных костей домашних копытных и керамических сосудов. Индивидуальные находки включают, в основном, каменные макро-орудия горно-металлургического цикла (Ankusheva et al., 2023), металлургические шлаки (Анкушева и др., 2023), медные сплески и литейную форму для отливки кайла. Культурно определяемая керамика аналогична найденной на других алакульских памятниках позднего бронзового века Южного Зауралья. Этому не противоречит серия радиоуглеродных AMS-датировок, согласно которой алакульское поселение на месторождении функционировало на протяжении длительного периода (максимум 155 лет) примерно в диапазоне середины XVII–середины XVI вв. до н.э. (Ankusheva et al., 2024).

В центральной части карьера проведена съемка методом георадиолокации. По результатам этих исследований реконструирован рельеф коренных пород карьера, скрытый под слоем рыхлых отложений и переработанного грунта. Согласно модели во время разработки карьера в бронзовом веке глубина рудника достигала 7 м (Носкевич, Федорова, 2018). Во время георадарной съемки А.М. Юминовым на днище карьера обнаружены три фрагмента металлургических шлаков (Анкушев и др., 2017). Как и образцы из раскопа, они имеют аналогии в материалах близлежащих неукрепленных поселений позднего бронзового века в долине р. Зингейки (Анкушев и др., 2016; Анкушева и др., 2023).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ УЧАСТКА РУДОПРОЯВЛЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД

На прилегающей к рудопроявлению территории развиты девонские и каменноугольные вулканогенно-осадочные толщи и ассоциирующие с ними интрузивные массивы и мелкие тела (Мосейчук и др., 2013) (рис. 5). Раннедевонские отложения

сложены аповулканиковыми сланцами различного состава. Основная часть вулканических комплексов средне- и позднедевонского возраста представлена базальтами, андезитами и трахиандезитами. Раннекаменноугольные отложения сосредоточены на юго-восточном фланге изученной площади и сложены в разной степени метаморфизованными терригенными породами и вулканитами, в том числе щелочными. Интрузивные магматические породы на прилегающей к рудопроявлению территории представлены девонскими ультрабазитами, габброидами и сиенитами. Многочисленные мелкие тела серпентинитов относятся к раннедевонскому Бриентскому дунит-гарцбургитовому комплексу. К северу от рудопроявления располагается позднедевонский Сахаринский штокообразный массив, сложенный клинопироксенитами, габбро и диоритами. Строение массива осложнено мелкими телами сиенитов и граносиенитов позднедевонского Верхнеуральского комплекса (Мосейчук и др., 2013).

Рудовмещающей структурой является северный верхний контакт крупной тектонической пластины, сложенной офиолитами, в том числе серпентинитами. Строение северной части пластины чешуйчатое, что обусловлено сочетанием линз серпентинитов, тальцитов, базальтов и силицитов мощностью от 10 до 200 м (Зайков и др., 2000). Рудная зона, имеющая форму линзы мощностью в раздуве 8 м и длиной до 25 м, залегает в серпентинитах и представлена гранат-пироксеновыми породами. Рудная составляющая включает комплекс вторичных минералов Си зоны гипергенеза. Наиболее распространен малахит, образующий включения, натеки, тонкие корки, пленки и рыхлые массы зеленовато-коричневого цвета, а также небольшие зонально-концентрические, радиально-лучистые, иногда почковидные агрегаты до 2–3 мм в диаметре. Азурит редок: он обнаружен в виде мелких зерен в тесном сростании с малахитом в зернистых массах (Зайков и др., 2014).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа основана на исследовании штучных горных пород из бортов древней выработки, фрагментов окисленных медных руд и шлиховой пробы общим весом 53 кг (№ ВЯ-100), отобранной бороздовым способом из заполнения постройки 1 в археологическом раскопе (Ankusheva et al., 2024). Материал пробы представлен щебнисто-глинистой фракцией. Щебень (10–70 мм) составлял 50 % от объема



Рис. 5. Схема геологического строения участка рудопроявления Воровская Яма, по (Мосейчук и др., 2013) с дополнениями.

1 – раннедевонские аповулканогенные сланцы; 2 – средне-позднедевонские вулканы; 3 – среднедевонские кластолавы; 4 – раннекаменноугольные отложения: а – метаморфизованные вулканы и терригенные породы; б – метаморфизованные щелочные вулканы; 5 – раннедевонские серпентиниты Бриентского комплекса; 6 – позднедевонский Сахаринский габбро-диоритовый массив; 7 – позднедевонские тела сиенитов; 8 – разломы; 9 – рудопроявление и древний рудник Воровская Яма.

Fig. 5. Scheme of geological structure of the Vorovskaya Yama ore occurrence, modified after (Moseichuk et al., 2013).

1 – Early Devonian shales after volcanic rocks; 2 – Middle-Late Devonian volcanic rocks; 3 – Middle Devonian clastic lava; 4 – Early Carboniferous rocks: a – metamorphosed volcanic and terrigenous rocks; б – metamorphosed alkaline volcanic rocks; 5 – Early Devonian serpentinite of the Brient complex; 6 – Late Devonian Sakhara gabbrodiorite pluton; 7 – Late Devonian syenite bodies; 8 – faults; 9 – Vorovskaya Yama ore occurrence and ancient mine.

пробы, дресва (2–10 мм) – 20 %, песок крупнозернистый (0.05–2 мм) – 20 % и алеврит (<0.05 мм) – 10 %. Проба промыта до серого шлиха (68 г). Шлиховой материал просеян через комплект сит: >1, 1.0–0.5, 0.50–0.25, 0.25–0.10 и <0.1 мм. Для каждого класса зерен определен минеральный состав и подсчитано количество минералов и обломков пород для 500 зерен в дорожке. После определения минерального состава фракций данные пересчитаны на весь объем пробы с учетом доли фракции в пробе.

Все аналитические исследования проведены в Южно-Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс). Рентгенофазовый анализ трех растертых проб проведен на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000; количество минералов рассчитано в программном продукте SIROQUANT V4 на 100 % без учета рентгеноаморфной составляющей. Содержание элементов-примесей в восьми пробах оруденелых пород

и трех пробах окисленной медной руды определены методом атомно-абсорбционного (PerkinElmer) и ИСП-МС анализов (масс-спектрометр Agilent 7700х). Содержание Cu в окисленной руде оценено методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре Olympus Vanta. Из крупных обломков пород изготовлены шлифы (4 шт.) и аншлифы (2 шт.), которые исследовались методами оптической (микроскоп OlympusBX-51/52) и электронной микроскопии (электронный микроскоп Tescan Vega 3 sbu, напряжение на катоде 30 kV, диаметр пучка 5 мкм, время экспозиции 60 сек). Формулы минералов рассчитаны анионным методом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рудовмещающие породы представлены серпентинитами, базальтами, эпидот-карбонатными метасоматитами, гранат-пироксеновыми породами.

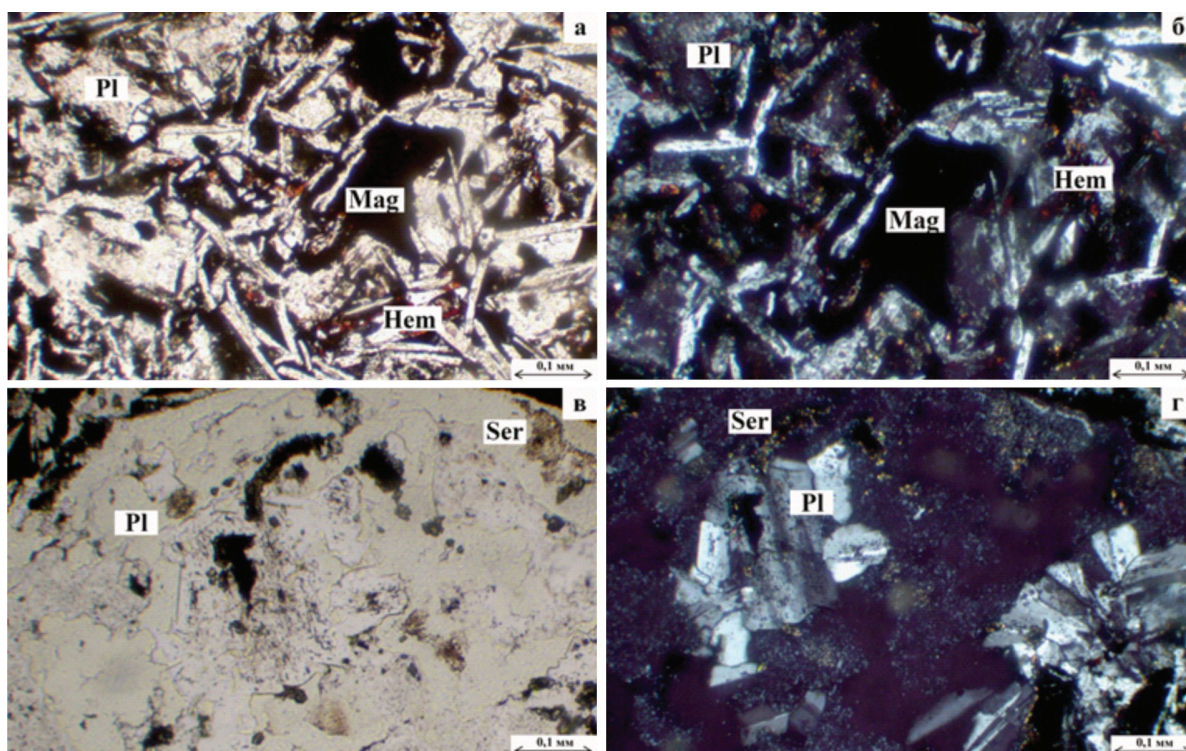


Рис. 6. Микроструктуры витрофирового базальта: а, б – шестоватые, игольчатые лейсты лабрадора (Pl) в вулканическом стекле и вкрапленники магнетита (Mag), замещенные гематитом (Hem) (а – без анализатора, б – с анализатором); в, г – развитие серицита (Ser) по лабрадору (Pl) (в – с анализатором, г – без анализатора). Обр. 706-1.

Fig. 6. Microstructures of vitrophyric basalt: а, б – columnar acicular labradorite (Pl) laths in volcanic glass and magnetite (Mag) phenocrysts replaced by hematite (Hem) (а – without analyzer, б – with analyzer); в, г – replacement of labradorite (Pl) by sericite (Ser) (в – with analyzer, г – without analyzer). Sample 706-1.

Серпентиниты слагают борта древнего карьера. Породы зеленовато-коричневого, светло-коричневого цвета, в значительной степени выветрены, оталькованы и хлоритизированы. Структура средне- и мелкозернистая; текстура пятнистая, полосчатая. В серпентинитах присутствуют включения магнезита, магнетита и хромшпинелидов. Медная минерализация визуально не обнаружена.

Базальты встречаются в западном борту, центральной части древнего карьера и к востоку от него. В приповерхностной части породы в значительной степени выветрены. Структура мелкопорфировая, цвет зеленовато-серый с желтоватым оттенком. Минеральный состав базальтов представлен плагиоклазом, пироксеном, кварцем, серицитом, магнетитом, гематитом и вулканическим стеклом. Плагиоклаз (лабрадор) наблюдается в виде удлиненных таблитчатых и короткопризматических зональных порфировых вкрапленников от лабрадора до альбита размером 0.2–0.6 мм (рис. 6). Базальты значительно окварцованы и эпидотизированы. Поздние агрегаты кварца заполняют пустоты

в основной массе стекла. Среди аксессуарных минералов присутствуют магнетит и гематит.

Эпидот-карбонатные метасоматиты распространены ограничено и приурочены к зонам контакта серпентинитов и гранат-пироксеновых пород, где образуют прерывистые узкие полосы северо-восточного простирания (Зайков и др., 2014). Выходы этих пород фиксируются также в 500 м к юго-западу от рудопроявления. В минеральном составе определены эпидот, доломит, кальцит, смектиты, амфибол, кварц, альбит.

Медная минерализация на руднике Воровская Яма связана с **гранат-пироксеновыми породами**, которые являлись объектами разработки в древности. Породы встречаются в днище горной выработки, а также распространены в бортах шахты. Цвет образцов желтый с коричневым оттенком. Текстура однородная, местами пятнистая (в основной массе четко выделяются вкрапления малахита) (рис. 7). Структура разномелкозернистая с преобладанием средних и мелких зерен. По данным рентгенофазового анализа порода состоит из граната, пироксена и ма-

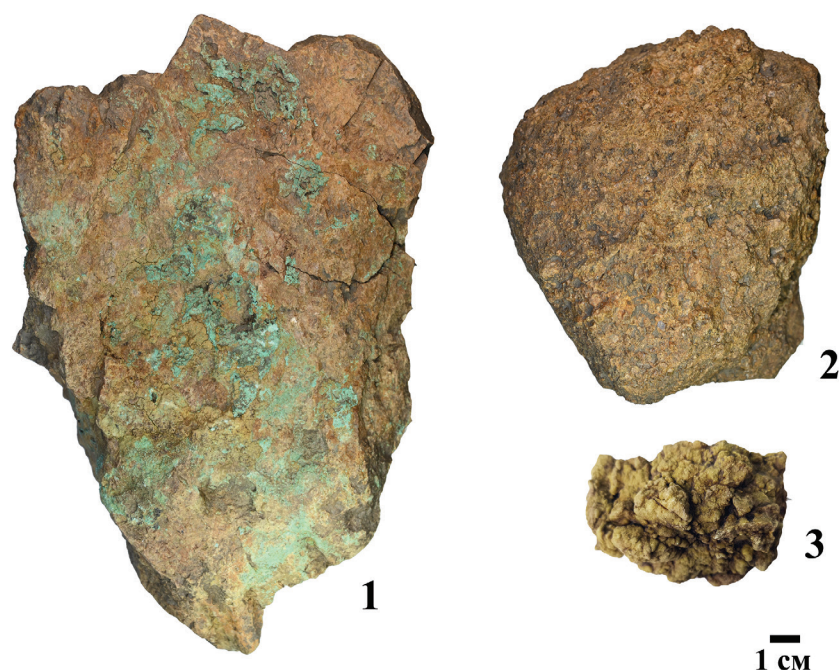


Рис. 7. Разновидности гранат-пироксеновых пород рудопоявления Воровская Яма: 1 – оруденелая, 2 – преимущественно гранатовая, 3 – выветрелая.

Fig. 7. Types of garnet-pyroxene rocks of the Vorovskaya Yama ore occurrence: 1 – ore-bearing, 2 – predominantly garnet, 3 – weathered.

Таблица 1

Результаты рентгенофазового анализа гранат-пироксеновых пород рудопоявления Воровская Яма

Table 1

Results of XRD analysis of garnet-pyroxene rock of the Vorovskaya Yama ore occurrence

№ пробы	Минеральный состав (прибл. вес. %)						
	Кварц	Гранат	Хлорит	Смектит	Малахит	Сидерит ?	Энстатит ?
1 оруденелая гранат-пироксеновая порода	–	71	–	15	7	<1	7
2 гранатит	<1	97	3	–	–	–	–
3 выветрелая гранат-пироксеновая порода	57	22	–	21	–	–	–

Таблица 2

Содержание минералов в шлиховой пробе отходов обогащения из заполнения постройки 1

Table 2

Mineral content of heavy concentrate of processing wastes from the structure 1 filling

Минерал	Гранат	Пироксен	Кварц	Малахит	Эпидот	Амфибол	Хромит	Плагиоклаз	Лимонит	Магнетит
%	25	20	18	8	8	7	5	5	3	1

лахита, а в зоне гипергенеза встречаются кварц и смектит (табл. 1).

Минералогический анализ шлиховой пробы отходов обогащения из заполнения постройки 1 показал несколько разные результаты (табл. 2). В шлихе наблюдаются многочисленный пироксен и, реже, кварц по сравнению с данными рентге-

нофазового анализа выветрелых агрегатов. Также здесь отмечается эпидот и хромит. По данным атомно-абсорбционного (табл. 3) и ИСП-МС (табл. 4) анализов окисленные медные руды и рудовмещающие гранат-пироксеновые породы содержат повышенные содержания Zn, а в некоторых образцах в значимом количестве присутствуют Ag, Se и W.

Таблица 3

Содержание некоторых элементов в породах рудопроявления Воровская Яма по данным атомно-абсорбционного анализа

Table 3

Content of some elements in rocks of the ancient mine Vorovskaya Yama according to atomic absorption analysis

№ пробы	Характеристика материала	Cu, %	Zn, %	S, %	Au, г/т	Ag, г/т
ВК2-4	Крупнозернистая гранат-пироксеновая порода с малахитом	1.62	0.03	1.22	—	—
ВК2-5	Гранат-пироксеновая порода с корками малахита	2.93	0.05	0.65	0.20	9.10
ВК2-14	Гранат-пироксеновая порода с пленками малахита	2.76	0.05	1.24	0.50	19.0
ВК2-20	Крупнозернистая гранат-пироксеновая порода	0.65	0.05	1.28	0.20	6.00
ВК2-21	Бурий железняк с прожилками малахита	0.96	0.05	0.86	—	4.00
ВК2-22	Желтоватые суглинки с малахитом	1.39	0.03	0.79	0.20	3.40
ВК2-23	Тонкозернистая гранат-пироксеновая порода с тонкими корками малахита	2.11	0.03	0.82	0.30	7.40
ВК2-24	Тонкозернистая гранат-пироксеновая порода с тонкими прожилками малахита	0.67	0.03	0.79	0.20	5.00

Примечание: прочерк – содержание ниже предела чувствительности.

Note: dash – content below detection limit.

Гранат в большинстве случаев представлен изометричными зернами до 0.5 мм в поперечнике с четким рельефом (рис. 8а, 9а), реже в виде хорошо ограненных ромбододекаэдрических кристаллов размером до 1 см. Цвет минерала желтовато-коричневый. В шлифах желтый, розовато-желтый (рис. 8а). По химическому составу гранат соответствует андрадиту (табл. 5). Часть крупных зерен имеет зональное строение (рис. 10а): от центра к краю в них нарастают концентрации Al и Mn (MnO до 2 мас. %) (табл. 5). Количество андрадита в некоторых образцах превышает 95 %.

Пироксен встречается преимущественно в виде короткопризматических, реже таблитчатых кристаллов размером до 0.5 мм и шестоватых агрегатов (рис. 8в). Цвет минерала от серо-зеленого до зеленого с различными оттенками, встречаются полупрозрачные или прозрачные разности. По химическому составу пироксен наиболее близок к диопсиду (табл. 5).

Второстепенные минералы включают плагиоклаз, амфибол, эпидот, хлорит, кварц, цоизит, мусковит и малахит. **Плагиоклаз** представлен сплошными зернистыми агрегатами и скоплениями ксеноморфных зерен размером до 0.2 мм. **Амфибол** образует длиннопризматические и игольчатые выделения зеленого цвета размером до 0.3 мм. **Эпидот** образует длиннопризматические кристаллы, реже игольчатые, столбчатые агрегаты или их сростки.

Хлорит развивается по пироксену, диагностируется в шлифах по характерным сросткам зеленых, реже сине-зеленых чешуйчатых агрегатов (рис. 8в, г). **Кварц** наиболее широко распространен в выветрелых породах зоны гипергенеза. Образует изометричные зерна размером 1–5 мм и их сростки. **Цоизит** образует зернистые, шестоватые, волокнистые, иногда радиально-лучистые агрегаты размерами от 0.2 до 0.6 мм и ассоциирует с кварцем и андрадитом (рис. 8в, г). **Мусковит (серицит)** образует тонкозернистые массы, развивается по плагиоклазу. **Малахит** встречается в виде пленок, включений, мелкозернистых сростков, реже почковидных сферолитов (рис. 9в), сложенных пластинчато-клиновидными агрегатами (рис. 9г).

Акцессорные минералы представлены хромитом, магнетитом, баритом, сульфидами и самородным золотом. **Хромит** и **магнетит** образуют хорошо ограненные октаэдрические кристаллы и изометричные зерна размером от 0.2 до 2 мм. Барит представлен отдельными зернами или их сростками размером до 10 мкм. Минерал встречается крайне редко и приурочен к зальбандам тонких кварцевых прожилков.

Сульфиды и самородное золото обнаружены только в виде включений в зернах граната. **Халькопирит** встречается в виде мелких одиночных включений до 30 мкм (рис. 10б) и в виде сростков с другими рудными минералами (рис. 10в). **Сфалерит**

Таблица 4

Содержание некоторых элементов в окисленных рудах древнего рудника Воровская Яма по данным ИСП-МС анализа

Table 4

Content of some elements in oxidized ores of the Vorovskaya Yama ancient mine according to ICP-MS analysis

	Прибл. мас. %	ppm																		
Местонахождение	Cu	V	Cr	Mn	Co	Ni	Zn	Ga	As	Se	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Ba	W	Pb	Bi
Кв. 2В, гл.-20	20	39.3	4.11	3786	13.6	77.6	1377	5.13	3.47	75.9	4.55	79.5	20.7	0.58	<0.10	0.85	6.09	177	0.57	0.13
Объект 9 (яма), гл.-85, 																				

Примечание: содержание меди определено методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре Olympus Vanta, режим Geoschem.

Note: Cu content was determined by XRF using an Olympus Vanta spectrometer. Geochem mode

образует отдельные зерна размером до 20 мкм или сростки с агрегатами других минералов (рис. 10в, г). В составе минерала определена примесь Fe 13 мас. %. *Ковеллин* представлен сростками с другими минералами. Размер агрегатов варьирует до 5 мкм. В химическом составе ковеллина фиксируется примесь Ag (4.3 мас. %) (табл. 6). *Пирротин* встречается в виде единичных включений гипидиоморфных зерен размером до 100 мкм в гранате. *Кубанит* также представлен единичными включениями размером до 20 мкм в зернах граната (рис. 10а). *Самородное золото* образует сростки с халькопиритом и сфалеритом размером не более 10 мкм, а также субмикронные включения в йодаргирите. На энергодисперсионных спектрах самородного золота присутствуют линии Ag и Cu.

Гипергенные минералы включают смектиты, оксигидроксиды Fe, опал, самородную медь, йодаргирит. *Смектиты* развиты в выветрелых образцах, диагностированы по рентгенограммам (табл. 1). *Оксигидроксиды Fe* представлены охристыми наростами и корками на зернах других минералов. *Опал* образует мелкобугристые корки мощностью 0.5–20 мкм на поверхности отдельных минералов и тонкие ветвящиеся прожилки коричневатого-кирпичного цвета. Единственное зерно *самородной меди* размером 20 мкм найдено на поверхности эпидота (рис. 9б). По ее поверхности развита тонкая оксидная пленка (куприт?) и корка атакамита (?). *Йодаргирит* встречается как в виде мелких (до 2 мкм в поперечнике) зерен в малахите (рис. 10д), а также образует более крупные пластинчатые сростки размером около 50 мкм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Древние горные выработки Воровская Яма отмечены в каталоге памятников природы и древней культуры, приведенном в объяснительной записке к геологической карте масштаба 1:200 000 (Лист N-40-XXX), однако рудопроявление в этой точке не отмечено (Мосейчук и др., 2013). Согласно положению на геологической карте древний рудник относится к Зингейской группе аномалий на Cu, Pb и Zn, приуроченной к вулканитам среднедевонской гумбейской свиты, что не согласуется с данными о рудовмещающих породах проявления.

Сложное геологического строение и слабая обнаженность территории не позволяют однозначно отнести объект к определенному ультрабазитовому комплексу. Вероятно, рудопроявление при-

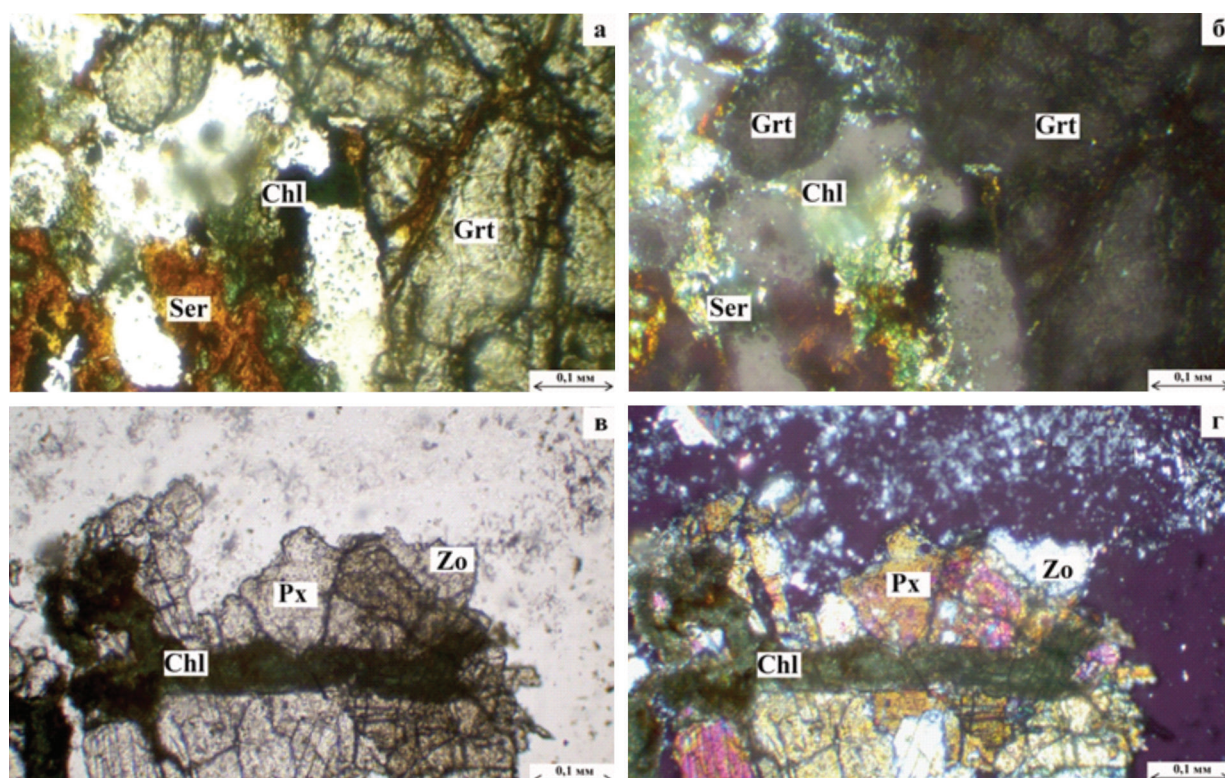


Рис. 8. Микроструктуры гранат-пироксеновых пород: а, б – хлорит (Chl) и серицит (Ser) на границе с зерном андрадита (Grt) (а – без анализатора, б – с анализатором); в, г – хлорит и цоизит (Zo), развитые по кристаллам диопсида (Px) (в – с анализатором, г – без анализатора). Обр. 705-3, 705-1, 705.

Fig. 8. Microstructures of garnet-pyroxene rocks: а, б – chlorite (Chl) and sericite (Ser) at the boundary of andradite grain (Grt) (а – without analyzer, б – with analyzer); в, г – chlorite and zoisite (Zo) after diopside (Px) (в – с анализатором, г – без анализатора). Samples 705-3, 705-1, 705.

Таблица 5

Состав граната и пироксена рудопоявления Воровская Яма по данным СЭМ-ЭДС

Table 5

Composition of garnet and pyroxene of the Vorovskaya Yama ore occurrence according to SEM-EDS data

Минерал	SiO ₂	CaO	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Сумма, %	Кристаллохимическая формула
Гранат	35.8	32.4	–	31.4	0.7	–	–	100.3	Ca _{2.92} Fe ³⁺ _{1.98} Al _{0.07} Si _{3.00} O ₁₂
	36.4	31.6	–	23.7	6.4	–	1.9	99.9	(Ca _{2.78} Mn _{0.13}) _{2.91} (Fe ³⁺ _{1.46} Al _{0.62}) _{2.08} Si _{2.99} O ₁₂
Пироксен	51.7	24.0	10.5	–	0.2	10.2	2.7	99.4	(Ca _{0.99} Mg _{0.59} Fe _{0.34} Mn _{0.09}) _{2.01} (Si _{1.99} Al _{0.01}) _{2.00} O ₆

Примечание: прочерк – содержание ниже предела чувствительности прибора.

Notes: dash – content below detection limit.

урочено к контакту мелкого тела Бриентского дунит-гарцбургитового комплекса с базальтами гумбейской свиты (Мосейчук и др., 2013). Рудоносные гранат-пироксеновые породы были определены В.В. Зайковым как апосерпентинитовые скарноиды или родингиты по аналогии с золотосодержащими гранат-пироксеновыми породами офиолитовых зон (например, месторождение Золотая Гора) (Зайков и др., 2000; Зайков и др., 2005). На наш взгляд, гранат-пироксеновые породы можно отнести к скарнам, а рудопоявление – к скарновому типу (Жариков, 1968; Meinert, 1992). В данной работе под тер-

мином скарн понимается метасоматическая горная порода пироксен-гранатового или преимущественно гранатового состава, которая была образована при изменении базальтов при воздействии мелких интрузивных тел сиенитов. Скарновая природа рудовмещающих пород подтверждается рядом косвенных признаков. Во-первых, с породами Верхнеуральского комплекса, к которому принадлежат сиениты и граносиениты, залегающие на небольшом удалении от рудопоявления, связаны скарноподобные эпидот-пироксеновые и гранат-эпидот-пироксеновые породы, а также скарново-магнети-

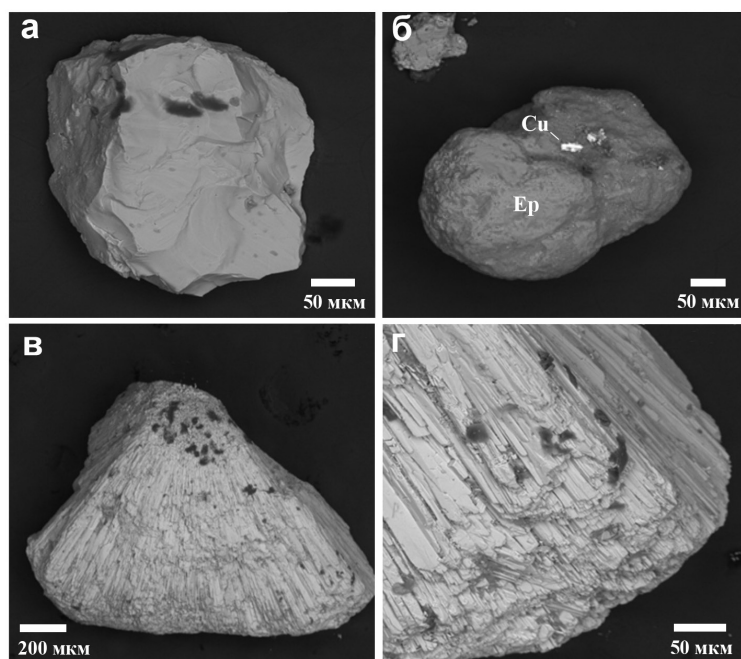


Рис. 9. Минералы шлиховой пробы: а – обломок зерна граната (обр. ВЯ-100шл-5); б – частица самородной меди (Cu) на поверхности зерна эпидота (Ep) (обр. ВЯ-100шл-12); в – обломок сферолита малахита (обр. ВЯ-100шл-1); г – сростки пластинчато-клиновидных агрегатов малахита (светло-серое) с пятнами глинистых минералов на поверхности (темно-серое) (обр. ВЯ-100шл-1, фрагмент рисунка в). Здесь и на рис. 10: фото в отраженных электронах.

Fig. 9. Minerals of the heavy concentrate sample: а – fragment of the garnet grain (sample VYa-100shl-5); б – native copper (Cu) particle on the epidote grain (Ep) surface (sample VYa-100shl-12); в – fragment of the malachite spherulite (sample VYa-100shl-1); г – intergrowths of the lamellar-wedged malachite aggregates (light gray) with spots of clay minerals on the surface (dark gray) (sample VYa-100shl-1, fragment of Fig. в). Here and in Fig. 10: BSE images.

Состав сульфидов рудопроявления Воровская Яма по данным СЭМ-ЭДС

Таблица 6

Table 6

Composition of sulfides of the Vorovskaya Yama ore occurrence according to SEM-EDS data

Минерал	№ анализа	Содержание мас. %					Сумма, %	Кристаллохимическая формула
		Cu	Fe	S	Zn	Ag		
Халькопирит	21359a	34.3	30.9	34.5	–	–	99.7	$\text{Cu}_{1.00}\text{Fe}_{1.04}\text{S}_2$
Халькопирит	21359b	34.5	31.2	34.0	–	–	99.7	$\text{Cu}_{1.02}\text{Fe}_{1.06}\text{S}_2$
Халькопирит	21359c	34.6	30.9	34.4	–	–	99.8	$\text{Cu}_{1.02}\text{Fe}_{1.04}\text{S}_2$
Кубанит	ВЯ-13-g	20.0	39.9	35.8	4.3	–	100.0	$(\text{Cu}_{0.84}\text{Zn}_{0.17})_{1.01}\text{Fe}_{1.92}\text{S}_3$
Ковеллин	ВЯ-13-b	64.7	0.8	29.7	–	4.3	99.4	$(\text{Cu}_{1.10}\text{Ag}_{0.04}\text{Fe}_{0.02})_{1.16}\text{S}_1$
Пирротин	ВЯ-507-в-а	0.7	60.2	39.1	–	–	100.0	$(\text{Fe}_{0.88}\text{Cu}_{0.01})_{0.89}\text{S}_1$
Сфалерит	ВЯ-507-d	–	13.0	33.4	52.6	–	99.0	$(\text{Zn}_{0.77}\text{Fe}_{0.22})_{0.99}\text{S}_1$

Примечание: прочерк – содержание ниже предела чувствительности прибора.

Notes: dash – content below detection limit.

товое и золотое оруденение (Мосейчук и др., 2013). Предполагается, что скарны могли образоваться при взаимодействии магмы кислого или субщелочного состава с вмещающими алюмосиликатными породами основного состава и образованием рудных тела штокверкового типа, которые могут быть

удалены от контакта интрузива на расстояние до 1 км (Российская..., 2012).

Во-вторых, железистые смектиты, отмеченные в окисленных рудах, преимущественно являются продуктами выветривания пород основного состава. Третьим косвенным аргументом в пользу

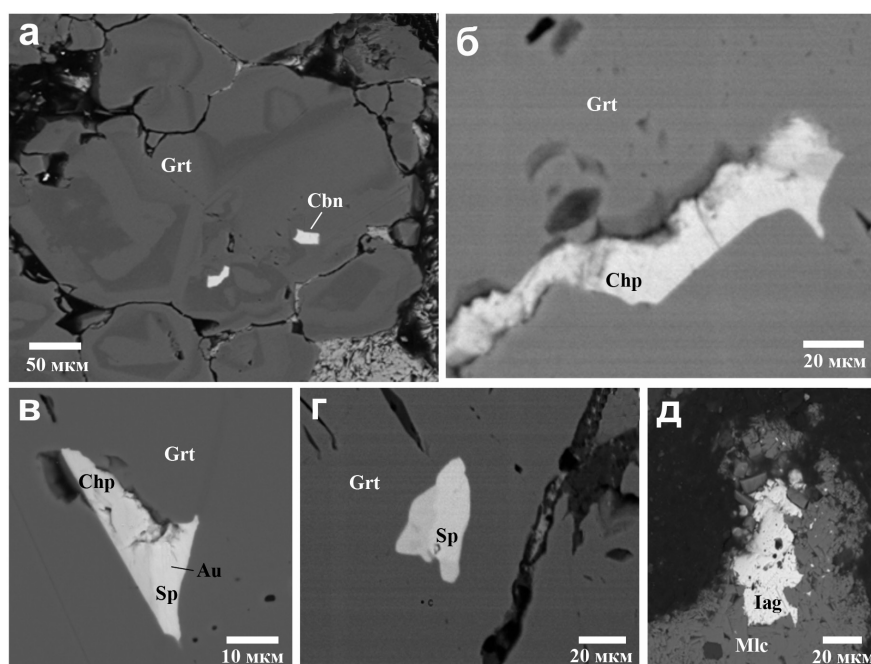


Рис. 10. Акцессорные минералы гранат-пироксеновых пород: а – зональные зерна граната (Grt) с обогащением Mn (более темные участки) и зерном кубанита (Cbn) (обр. ВЯ-13); б – сростки зерен халькопирита (Chp) в гранате (обр. ВЯ-13-г); в – самородное золото (Au) в сростке зерен сфалерита (Sp) и халькопирита в гранате (обр. ВЯ-507-д); г – зерно сфалерита в гранате (обр. ВЯ-507-д); д – микровключение йодаргирита (Iag) в малахите (Mlc) (обр. ВЯ-507-г).

Fig. 10. Accessory minerals of garnet-pyroxene rocks: а – zoned garnet (Grt) grains with darker areas enriched in Mn and the cubanite (Cbn) grain (sample VYa-13); б – intergrowths of chalcopyrite (Chp) grains in garnet (sample VYa-13-g); в – intergrowth of native gold (Au) with sphalerite (Sp) and chalcopyrite grains in garnet (sample VYa-507-d); г – sphalerite grain in garnet (sample VYa-507-d); д – iodargyrite (Iag) microinclusion in malachite (Mlc) (sample VYa-507-g).

скарновой природы рудопроявления является примесь W в окисленной медной руде. Большинство проявлений вольфрама, включая скарновые, связаны с кислыми интрузивами (Денисенко, 1978). На Южном Урале вольфрамоносные скарны установлены на Гумбейской группе месторождений, связанных с монцодиорит-граносиенит-гранитовым комплексом. В их зоне окисления повышенные содержания W связаны с оксигидроксидами Fe и Mn (Белогуб и др., 2025). Предполагается, что в окисленных рудах Воровская Ямы W также концентрируется в лимоните, а его источником служили кислые интрузивные породы.

Минеральный состав первичных медных руд можно оценить по реликтовым включениям в зернах граната, которые представлены Cu-Fe сульфидами (халькопиритом, кубанитом), ковеллином, пирротинном и сфалеритом. В верхних горизонтах зоны окисления месторождения медная минерализация представлена почти исключительно малахитом. Примесь Zn в малахите и продуктах металлургии бронзового века (Анкушев и др., 2016) связана с окислением сфалерита. Благодаря расположению

рудопроявления в семиаридном степном климатическом поясе за счет примеси Ag в первичных сульфидах и самородном золоте в зоне гипергенеза образуются йодаргирит (Зайков и др., 2015).

Минералогический анализ древних отходов обогащения показал, что в позднем бронзовом веке на руднике разрабатывались верхние горизонты зоны окисления, представленные выветрелыми скарнами, с большим количеством граната, кварца и включениями малахита. Присутствие на руднике глубоких вертикальных горных выработок (шахт) позволяет предполагать также отработку более глубоких горизонтов рудопроявления.

ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам проведенных работ в зоне окисления рудопроявления Воровская Яма (Южный Урал) установлены основные (андрадит, клинопироксен), второстепенные (плагноклаз, амфибол, эпидот, хлорит, кварц, цоизит, мусковит, малахит), акцессорные (хромит, магнетит, барит, халькопирит, ковеллин, пирротин, кубанит, само-

родное золото) и гипергенные (сметиты, оксиды железа, опал, самородная медь, йодаргирит) минералы. Проявление предположительно относится к скарновому типу и связано с мелкими интрузивными телами сиенитов позднедевонского Верхнеуральского комплекса. В позднем бронзовом веке на руднике происходила разработка и обогащение верхних горизонтов зоны окисления рудопрооявления, представленных выветрелыми скарнами с малахитовой минерализацией. Меднорудное сырье Воровской Ямы на поселениях бронзового века Южного Урала можно диагностировать по присутствию граната, а также примесей Zn, Ag и Se в окисленной руде.

ЛИТЕРАТУРА

- Анкушев М.Н., Алаева И.П., Медведева П.С., Че-
чушков И.В., Шарапов Д.В. (2016) Металлургические
шлаки поселений бронзового века в долине р. Зингейка
(Южный Урал). *Геоархеология и археологическая мине-
ралогия*, 3, 116–120.
- Анкушев М.Н., Юминов А.М., Блинов И.А., Кот-
ляров В.А. (2017) Металлургические шлаки древнего
рудника Воровская Яма (Южный Урал). *Геоархеология и
археологическая минералогия*, 4, 128–133.
- Анкушева П.С., Анкушев М.Н., Блинов И.А.,
Артемов Д.А., Алаева И.П. (2023) Минералого-геохи-
мическое исследование свидетельств алаккульского ме-
таллопроизводства на руднике Воровская Яма (Южное
Зауралье). *Российская археология*, 3, 23–37.
- Белогуб Е.В., Мосейчук В.М., Новоселов К.А.,
Лонщикова Г.Ф., Блинов И.А. (2025) Минералогия окис-
ленных руд Балканского месторождения вольфрама
(Южный Урал). *Минералогия*, 3, 20–36.
- Денисенко В.К. (1978) Месторождения вольфра-
ма. М., Недра. 143 с.
- Жариков В.А. (1968) Скарновые месторождения /
Генезис эндогенных рудных месторождений. М., Недра,
220–302.
- Зайков В.В., Зданович Г.Б., Юминов А.М. (1995)
Медный рудник бронзового века «Воровская яма». *Ма-
териалы конференции «Россия и Восток: проблемы вза-
имодействия»*. Челябинск, ЧГУ, 157–162.
- Зайков В.В., Зданович Г.Б., Юминов А.М. (2000)
Воровская яма – новый рудник бронзового века. Архе-
ологический источник и моделирование древних тех-
нологий: труды музея-заповедника Аркаим. Челябинск,
Специальный природно-ландшафтный и историко-архе-
ологический центр «Аркаим», Институт истории и архе-
ологии УО РАН, 112–130.
- Зайков В.В., Юминов А.М., Дунаев А.Ю., Здано-
вич Г.Б., Григорьев С.А. (2005) Геолого-минералогиче-
ские исследования древних медных рудников на Южном
Урале. *Археология, этнография и антропология Евразии*, 4, 101–115.
- Зайков В.В., Юминов А.М., Зданович Г.Б., Носке-
вич В.В. (2014) Древние медные рудники в гипербазитах
Южного Урала (на примере археологического памятника
Воровская Яма). *Геоархеология и археологическая мине-
ралогия*, 1, 103–107.
- Зайков В.В., Котляров В.А., Кужугет Р.В., Юми-
нов А.М. (2015) Йодидная минерализация в родингитах
древнего рудника Воровская Яма, Южный Урал. *Метал-
логения древних и современных океанов-2015. Месторо-
ждения океанических структур: геология, минерало-
гия, геохимия и условия образования*. Миасс, Институт
минералогии УрО РАН, 208–211.
- Каргалы. Т. I: Геолого-географические характери-
стики. История открытий, эксплуатации и исследований.
Археологические памятники (2002) М., Языки славян-
ской культуры, 112 с.
- Матвеева Г.И., Колев Ю.И., Королев А.И. (2004)
Горно-металлургический комплекс бронзового века у
с. Михайло-Овсянка на юге Самарской области (первые
результаты и проблемы исследования). *Вопросы архе-
ологии Урала и Поволжья*, 2, 64–88.
- Мосейчук В.М., Яркова А.В., Михайлов И.Г.,
Кашина Л.В., Сури Т.Н., Плохих Н.А., Юрецкий В.Н.
(2013) Государственная геологическая карта Российской
Федерации масштаба 1:200 000. Серия Южно-Ураль-
ская. Лист N-40-XXX. Объяснительная записка. М., МФ
ВСЕГЕИ, 222 с.
- Носкевич В.В., Федорова Н.В. (2018) Использо-
вание метода георадиолокации для исследований древнего
медного рудника «Воровская яма» на Южном Урале. *Из-
вестия УГТУ*, 4(52), 61–67.
- Российская геологическая энциклопедия. В трех
томах. Т. 3. (2012) М.-СПб, ВСЕГЕИ, 519 с.
- Ankusheva P.S., Rassadnikov A. Yu., Ankushev M.N.,
Bachura O.P., Chechushkov I.V., Kiseleva D.V., Zazovs-
kaya E.P., Epimakhov A.V. (2024) Meat supply of Alakul
miners at the Bronze Age Vorovskaya Yama copper mine
(southern Trans-Urals). *Environmental Archaeology*, 1–22.
<https://doi.org/10.1080/14614103.2024.2321419>
- Ankusheva P.S., Yuminov A.M., Molchanov I.V.,
Alaeva I.P., Ankushev M.N. (2023). The Functionality of
building structures at the Bronze Age Vorovskaya Yama mine
in the Southern Trans-Urals (based on the 2021 excavation).
*Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy. Springer
Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, 232–243.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-46424-9_22
- Ankusheva P.S., Zazovskaya E.P., Yuminov A.M.,
Ankushev M.N., Alaeva I.P., Epimakhov A.V. (2022)
Radiocarbon chronology of Bronze Age mines in the
Southern Trans-Urals: first results. *Archaeological and
Anthropological Sciences*, 14, 218. <https://doi.org/10.1007/s12520-022-01681-5>
- Meinert L.D. (1992) Skarns and skarn deposits.
Geoscience Canada, (4), 145–162.

Shishlina N., Roslyakova N., Kolev Yu., Bachura O.P., Kuznetsova O.V., Kiseleva D., Retivov V.M., Tereschenko E. (2020). Animals, metal and isotopes: Mikhailo-Ovsyanka I, the Late Bronze Age mining site of the steppe Volga region. *Archaeological Research in Asia*, 24, 100229. <https://doi.org/10.1016/j.ara.2020.100229>

REFERENCES

- Ankushev M.N., Alaeva I.P., Medvedeva P.S., Chechushkov I.V., Sharapov D.V. (2016) Metallurgical slags from the Bronze Age settlements of the Zingeika river valley (South Urals). *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya (Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy)*, 3, 116–120. (in Russian)
- Ankushev M.N., Yuminov A.M., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. (2017) Metallurgical slags of the ancient mine Vorovskaya Yama (South Urals). *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya (Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy)*, 4, 128–133. (in Russian)
- Ankusheva P.S., Ankushev M.N., Blinov I.A., Artemyev D.A., Alaeva I.P. (2023) Mineralogical and geochemical research of evidence of the Alakul metal production at the Vorovskaya Yama mine (South Trans-Urals). *Rossiyskaya arkheologiya (Russian Archaeology)*, 3, 23–37. (in Russian)
- Ankusheva P.S., Rassadnikov A.Yu., Ankushev M.N., Bachura O.P., Chechushkov I.V., Kiseleva D.V., Zazovskaya E.P., Epimakhov A.V. (2024) Meat supply of Alakul miners at the Bronze Age Vorovskaya Yama copper mine (southern Trans-Urals). *Environmental Archaeology*, 1–22. <https://doi.org/10.1080/14614103.2024.2321419>
- Ankusheva P.S., Yuminov A.M., Molchanov I.V., Alaeva I.P., Ankushev M.N. (2023). The Functionality of building structures at the Bronze Age Vorovskaya Yama mine in the Southern Trans-Urals (based on the 2021 excavation) *Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, 232–243. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46424-9_22
- Ankusheva P.S., Zazovskaya E.P., Yuminov A.M., Ankushev M.N., Alaeva I.P., Epimakhov A.V. (2022) Radiocarbon chronology of Bronze Age mines in the Southern Trans-Urals: first results. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 14, 218. <https://doi.org/10.1007/s12520-022-01681-5>
- Belogub E.V., Moseychuk V.M., Novoselov K.A., Lonshchakova G.F., Blinov I.A. (2025) Mineralogy of oxidized ore of the Balkanskoe tungsten deposit (South Urals). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 3, XX-XX. (in Russian)
- Denisenko V.K. (1978) *Tungsten deposits*. Moscow, Nedra. 143 p. (in Russian)
- Kargaly. Vol. I: *Geological and geographical characteristics. History of discoveries, exploitation and research. Archaeological sites* (2002) Moscow, Yazyki slavyanskoy kultury, 112 p. (in Russian)
- Matveeva G.I., Kolev Yu.I., Korolev A.I. (2004) Bronze Age mining and metallurgical complex near the village of Mikhailo-Ovsyanka in the south of the Samara region (first results and research problems). *Voprosy arkheologii Urala i Povolzh'ya (Problems of Archaeology of the Urals and Volga Region)*, 2, 64–88. (in Russian)
- Meinert L.D. (1992) Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, (4), 145–162.
- Moseychuk V.M., Yarkova A.V., Mikhailov I.G., Kashina L.V., Surin T.N., Plokhikh N.A., Yuretsky V.N. (2013) *State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. South Ural series. Sheet N-40-XXX. Explanatory note*. Moscow, Moscow Branch of VSEGEI, 222 p. (in Russian)
- Noskevich V.V., Fedorova N.V. (2018) Using the ground penetrating radar method to study the ancient copper mine Vorovskaya Yama in the South Urals. *Izvestiya UGGU (News of the Ural State Mining University)*, 4(52), 61–67. (in Russian)
- Russian geological encyclopedia. Vol. 3.* (2012) Moscow–St. Petersburg: VSEGEI, 519 p. (in Russian)
- Shishlina N., Roslyakova N., Kolev Yu., Bachura O.P., Kuznetsova O.V., Kiseleva D., Retivov V.M., Tereschenko E. (2020). Animals, metal and isotopes: Mikhailo-Ovsyanka I, the Late Bronze Age mining site of the steppe Volga region. *Archaeological Research in Asia*, 24, 100229. <https://doi.org/10.1016/j.ara.2020.100229>
- Zaykov V.V., Kotlyarov V.A., Kuzhuget R.V., Yuminov A.M. (2015) Iodide mineralization in rodingites of the ancient Vorovskaya Yama mine, South Urals. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2015. Mestorozhdeniya okeanicheskikh struktur: geologiya, mineralogiya, geokhimiya i usloviya obrazovaniya (Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2015. Deposits in Oceanic Structures: Geology, Mineralogy, and Formation Conditions)*. Miass, Institut mineralogii UrO RAN, 208–211. (in Russian)
- Zaykov V.V., Yuminov A.M., Dunaev A.Yu., Zdanovich G.B., Grigoriev S.A. (2005) Geological and mineralogical studies of ancient copper mines in South Urals. *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii (Archaeology, Ethnography and Anthropology of Eurasia)*, 4, 101–115. (in Russian)
- Zaykov V.V., Yuminov A.M., Zdanovich G.B., Noskevich V.V. (2014) Ancient copper mines in South Urals ultramafites (archaeological relics Vorovskaya Yama as example). *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya (Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy)*, 1, 103–107. (in Russian)
- Zaykov V.V., Zdanovich G.B., Yuminov A.M. (1995) The Bronze Age Vorovskaya Yama copper mine. *Materialy konferentsii "Rossiya i vostok: problemy vzaimodeystviya" (Proceedings of Conference "Russia and the East: Problems of Interaction")*. Chelyabinsk, ChGU, 157–162. (in Russian)
- Zaykov V.V., Zdanovich G.B., Yuminov A.M. (2000) Vorovskaya Yama – a New Bronze Age Mine. *Arkheologicheskii istochnik i modelirovanie tekhnologii:*

trudy muzeya-zapovednika Arkaim (Proceedings of the Arkaim Museum-Reserve: Archaeological Source and Modeling of Ancient Technologies). Chelyabinsk, Arkaim, Institut Istorii i Arkheologii UrO, 112–130. (in Russian)

Zharikov V.A. (1968) Skarn deposits. In: *Genezis endogennyh rudnyh mestorozhdeniy (Genesis of endogenic ore deposits)*. Moscow, Nedra, 220–302. (in Russian)

Информация об авторах

Юминов Анатолий Михайлович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; umin@mineralogy.ru

Кулдашев Шербек Хусанбойевич – геолог 1 категории, ОАО Полиметалл, г. Санкт-Петербург, Россия; Kuldashv97@bk.ru

Блинов Иван Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; ivan_a_blinov@mail.ru

Хворов Павел Витальевич – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; khvorov@mineralogy.ru

Филиппова Ксения Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; kseniyafil@yandex.ru

Анкушев Максим Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; ankushev_maksim@mail.ru

Анкушева Полина Сергеевна – кандидат исторических наук, младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; polenke@yandex.ru

Information about the authors

Anatoly M. Yuminov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Senior Researcher, South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; umin@mineralogy.ru

Sherbek Kh. Kuldashv – Geologist, OJCS Polymetal, St. Petersburg, Russia; Kuldashv97@bk.ru

Ivan A. Blinov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; ivan_a_blinov@mail.ru

Pavel V. Khvorov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; khvorov@mineralogy.ru

Ksenia A. Filippova – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; kseniyafil@yandex.ru

Maksim N. Ankushev – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; ankushev_maksim@mail.ru

Polina S. Ankusheva – Candidate of Historical Sciences, Junior Researcher, South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; polenke@yandex.ru