

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВ АЛАКУЛЬСКОГО МЕТАЛЛОПРОИЗВОДСТВА НА РУДНИКЕ ВОРОВСКАЯ ЯМА (ЮЖНОЕ ЗАУРАЛЬЕ)

© 2023 г. П. С. Анкушева^{1,2,*}, М. Н. Анкушев², И. А. Блинов², Д. А. Артемьев², И. П. Алаева^{1,3}

¹Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, Челябинск, Россия

²Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия

³Институт истории и археологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: polenke@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.10.2022 г.

После доработки 29.11.2022 г.

Принята к публикации 10.01.2023 г.

В статье обсуждаются процессы алакульского металлопроизводства на медном руднике Воровская Яма (Южное Зауралье, середина II тыс. до н.э.). Источниками выступают материалы раскопа 2021 г.: руинированные остатки теплотехнических конструкций, металлургический шлак и ошлакованная керамика. Методы исследования включают оптическую и электронную микроскопию, РФА, LA-ICP-MS. Установлено, что технологические операции на месторождении не ограничивались добычей медной руды и ее первичным обогащением. Помимо этого, в непосредственной близости от выработок происходила выплавка металла из сульфидных или окисленно-сульфидных руд, однако она осуществлялась вне пределов изученных участков построек. Вторичный переплав изделий из меди и оловянной бронзы осуществлялся в керамических тиглях при использовании теплотехнических сооружений в постройках.

Ключевые слова: поздний бронзовый век, металлопроизводство, Южное Зауралье, алакульская культура, рудник, ошлакованная керамика, металлургический шлак, тигель.

DOI: 10.31857/S0869606323030042, **EDN:** PUBMKG

К настоящему времени в Южном Зауралье и Мугоджарах выделена отдельная категория производственных памятников – медные месторождения с признаками разработки в позднем бронзовом веке (Черных, 1970; Зайков, Зданович, Юминов, 2000; Ткачев, 2021; Ankushev et al., 2021). Раскопки широкими площадями проведены только на двух рудниках – Новотемирском и Воровской Яме. Первый отличался длительным периодом функционирования в пределах бронзового века: 2028–1124 кал. л. до н.э. (2σ). Культурный слой Новотемирского рудника, несмотря на слабую насыщенность, содержал в себе свидетельства процессов выплавки меди из руд и отливки горнопроходческих орудий (Ankushev et al., 2021). На руднике Воровская Яма впервые в регионе были зафиксированы остатки стационарных построек, а также относительно однородный в культурном отношении артефактный набор (Анкушева, Юминов и др., 2022). Данная работа посвящена выявлению металлургических и металлообрабатывающих процессов на этом руднике в алакульский период на основе анализа руинированных теплотехнических сооружений,

шлаков и керамики со следами воздействия высоких температур. Подобный комплекс впервые обнаружен на месторождениях обширного алакульского ареала и также впервые подвергается детальному минералого-геохимическому анализу. Мы постараемся ответить на следующие вопросы, касающиеся металлургических процессов:

Какие руды могли использоваться при выплавке на месторождении?

Какую функцию выполняли теплотехнические сооружения в постройках горняков?

Какую роль играли керамические изделия в металлургических процессах?

Какие сплавы здесь использовались?

Полученные данные способствуют реконструкции как технологических аспектов металлопроизводства, так и социальной организации труда древних горняков.

Медный рудник Воровская Яма находится в степной зоне Южного Зауралья (53°02' N 59°35' E) (Зайков, Зданович, Юминов, 2000; Zaykov et al., 2005). В настоящее время памятник выглядит как окруженный отвалами округлый карьер глубиной

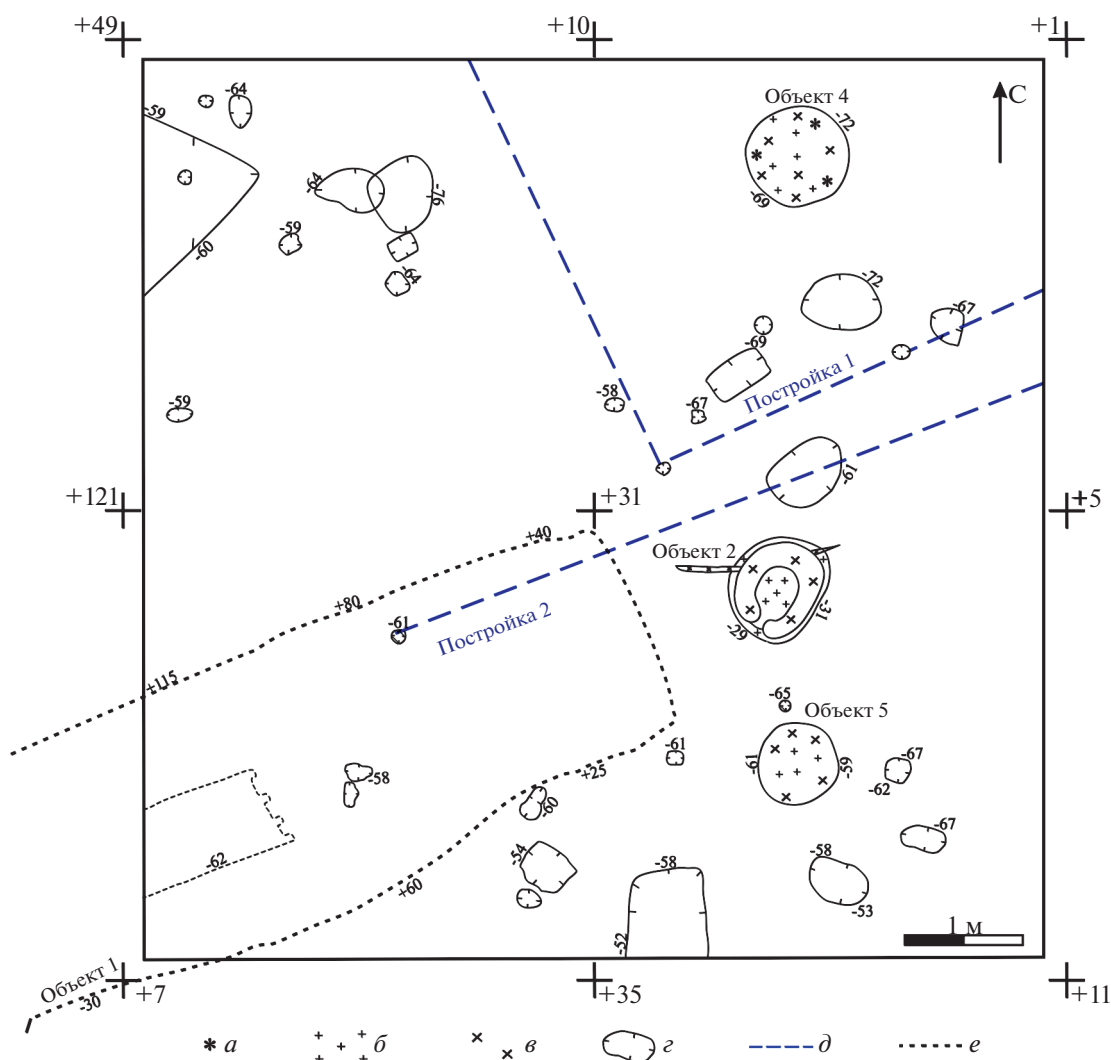


Рис. 1. План-схема раскопа 2021 г. на медном руднике Воровская Яма. Условные обозначения: *a* – участки с окисленными медными рудами; *б* – черный гумус с углями; *в* – красный прокаленный грунт; *г* – углубления на уровне материка; *д* – предполагаемые границы построек; *е* – граница траншеи ВК-4.

Fig. 1. A layout plan of the 2021 excavation site at the Vorovskaya Yama copper mine

4–5 м, диаметр которого по внешнему кругу отвалов достигает 60 м. В 2021 г. на внешнем крае северо-восточного отвала был заложен раскоп размером 8 × 8 м (площадь 64 м²). Под отвалом были обнаружены углубленные в погребенную почву котлованы, серия столбовых ямок, теплотехнические объекты и отличное от прилегающего грунта заполнение, что позволило выделить не менее двух построек на исследованном участке (рис. 1). Керамика алакульского типа на полу построек маркирует их культурную принадлежность (Анкушева, Юминов и др., 2022). По памятнику имеется одна радиоуглеродная датировка, определяющая его функционирование в интервале 1618–1458 кал. л. до н.э. (2σ) (Ankushева et al., 2022).

В данной работе задействованы три группы источников: остатки теплотехнических сооруже-

ний (4 экз.), керамика со следами воздействия высоких температур (6 экз.), фрагмент металлургического шлака (1 экз.). Аналитические исследования выполнены в ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Рентгенофлуоресцентный анализ (далее РФА) проб грунта из различных прослоек очагов, а также поверхности керамики выполнен на портативном приборе Innov-X Alpha-4000 (режим Soil, время экспозиции 30 с, аналитик М.Н. Анкушев). Минералогия образцов ошлакованной керамики и особенности состава различных минералов установлены методом оптической (Olympus BX51; аналитик М.Н. Анкушев) и электронной микроскопии с энергодисперсионным анализатором (Tescan VEGA 3 sbu, ускоряющее напряжение 20 кВ, живое время 120 с, поглощенный ток на эталоне Co около 260 пА; аналитик И.А. Бли-

нов). Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой и лазерным пробоотбором (далее – ЛА-ИСП-МС) медной капли с керамики выполнена на масс-спектрометре Agilent 7700х с Nd:YAG-лазером New Wave Research UP-213 (аналитик Д.А. Артемьев). Примеси в составе грунта очагов, керамики и металлической капли выражены в ppm (part per million или миллионная доля), 1 ppm = 0.0001 мас. %.

Теплотехнические сооружения в постройках. Планиграфические и стратиграфические особенности построек уже были представлены (Анкушева, Юминов и др., 2022), ниже мы остановимся на характеристике обнаруженных теплотехнических сооружений (далее – объектов).

Объект 1¹ (рис. 2, А, Б) расчищен в южном борту траншеи ВК-4 вне раскопа, поэтому удалось зафиксировать только его профиль. Объект залегал под нижней прослойкой отвала рудника, серо-коричневым мелкодисперсным грунтом. Он представлял собой прослойку красноватого прокала, чашеобразную в профиле, диаметром до 25 см и мощностью до 5 см, обрамленную слоем черного углисто-сажистого грунта мощностью 5–7 см. В прокале встречаются дрсва и единичный мелкий щебень серпентинитов, в черном грунте – мелкие фрагменты костей животных, а также развал срубно-алакульского сосуда (Зайков, Зданович, Юминов, 2000. С. 123. Рис. 4, Г). Длина объекта в профиле составляет около 70 см. Предполагается, что данный объект был сооружен в погребенной почве, возможно, в пределах постройки.

Объект 2 (рис. 2, В, Г) стратиграфически залегал поверх заполнения постройки 2, в слое верхней темно-серой гумусированной супеси. Предполагается его более поздняя хронологическая позиция относительно остальных сооружений, тем не менее, в рамках позднего бронзового века, поскольку культурных слоев последующих эпох в раскопе и на памятнике в целом пока обнаружено не было. Объект представлял собой овальное пятно размером 90 × 75 см, ориентированное СВ–ЮЗ, концентрическое заполнение которого состояло из трех слоев. Центр объекта – овал размером 45 × 35 см – состоял из черного гумусированного грунта с малым количеством древесных углей. Его обрамляла окантовка из красного прокаленного грунта шириной около 20 см, имеющая разрыв в южной части, но смыкающаяся в нижних слоях. Внешний слой объекта шириной до 5 см представлял собой темно-серый с бурым оттенком гумусированный грунт. Разрез объекта обнаружил его

чашеобразную форму, в профиле выделены следующие слои (от верхнего к нижнему): 1) центральное черное гумусированное заполнение с включениями золы и угля мощностью до 5 см; 2) красный прокаленный грунт мощностью до 10 см, обильно насыщенный мелким щебнем; 3) прослойка мелкощебня (1–3 см); 4) черная гумусированная супесь с более редкими включениями мелкощебня (1–3 см) мощностью 2–10 см. В этом слое был обнаружен неорнаментированный фрагмент тулова керамического сосуда бронзового века. Общая глубина объекта составила 18 см.

Объект 4 (рис. 2, Д, Е) был обнаружен на уровне пола постройки 1. Он представлял собой округлое пятно диаметром 85–90 см, заполненное серо-коричневым золистым грунтом, обильно насыщенным древесными углями, мелким прокаленным щебнем и дрсвой серпентинитов, родингитов, бурых железняков и мелкими фрагментами окисленных медных руд. В заполнении наблюдаются множественные дробленые обожженные кости размером в среднем 0.5–2 см. В нем также встречены отдельные крупные (до 10 см) обломки выветрелых родингитов. Разрез объекта обнаружил его чашеобразную форму, в профиле выделяются следующие слои (от верхнего к нижнему): 1) золистый серо-коричневый слой с углями, щебнем, костями животных мощностью 4–6 см; 2) красный прокаленный материковый суглинок мощностью до 10 см. Общая глубина объекта составила 15 см.

Объект 5 (рис. 2, Ж, З) расчищен на уровне пола постройки 2. Он представлял собой пятно, условно состоящее из двух частей: основной – округлой, диаметром 70 см, заполненной прокаленным гумусированным грунтом красноватого оттенка с включениями древесного угля, – и примыкающей к основной части с запада подпрямоугольной, размером около 30 × 40 см, заполненной черным золистым гумусированным грунтом, обильно насыщенным древесными углями. В центральной части обнаружено два фрагмента тулова керамических сосудов алакульской культуры. Как и остальные объекты, он имел чашеобразную форму в разрезе и гумусированное красноватое заполнение с включениями древесного угля, общая глубина не превышала 10 см.

Таким образом, в пределах раскопа было обнаружено 4 теплотехнических сооружения. Концентрическое заполнение объекта 2 может маркировать контуры купола наземной однокамерной печи, а место разрыва указывать на локализацию воздушного сопла. Его также отличает наличие четко фиксируемой прослойки мелких камней, которая, по всей видимости, выравнивала дно печного углубления и защищала его пространство от холода и влаги подстилающего гумусного слоя. Ближайшие аналогии прослеживаются на синта-

¹ Нумерация объектов и находок приводится согласно отчету об археологических раскопках (Анкушева, 2021) во избежание путаницы при дальнейшей работе с материалами и утраты возможности ознакомиться с их детальным контекстом.

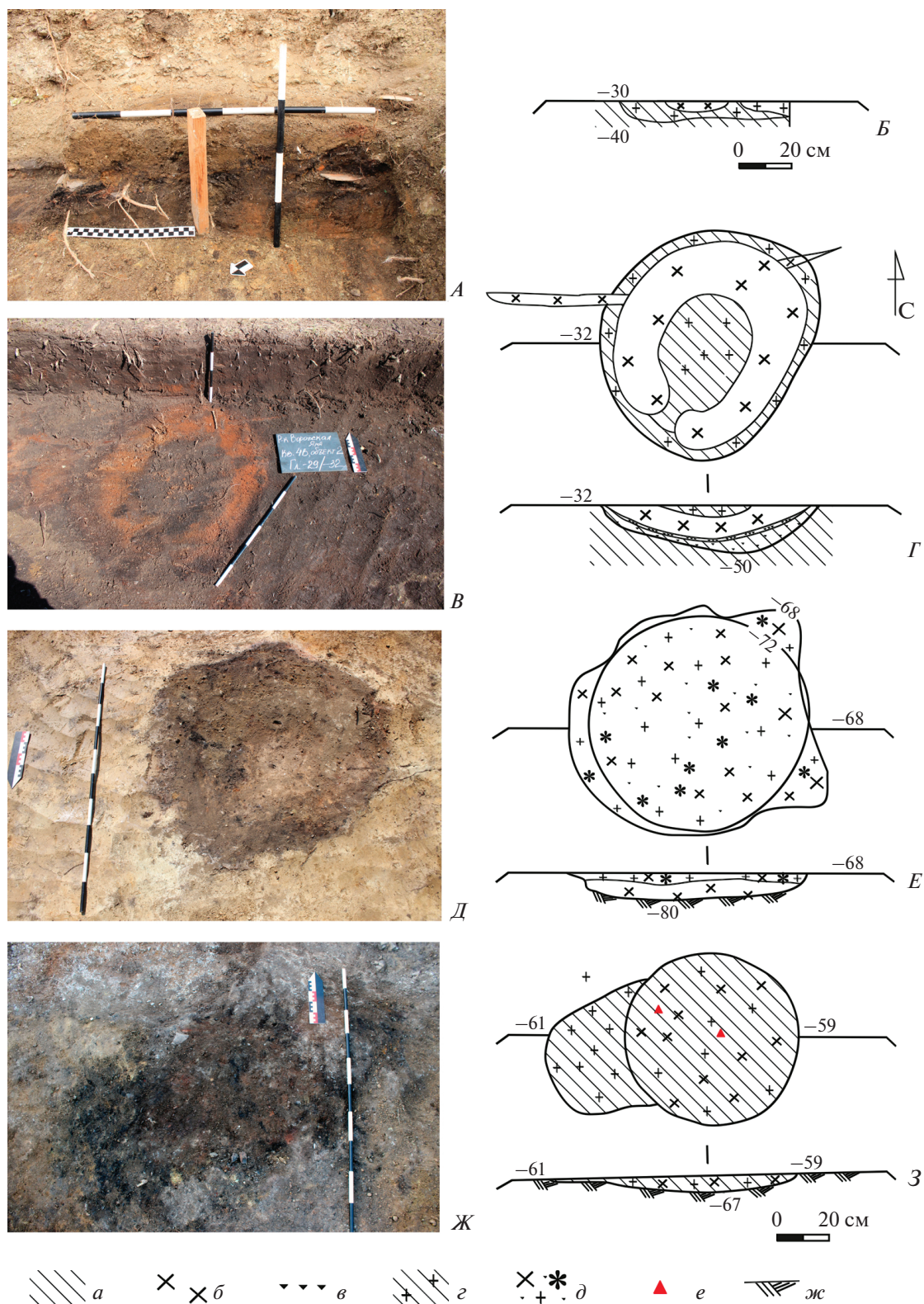


Рис. 2. Теплотехнические сооружения в раскопе 2021 г. на руднике Воровская Яма (фото, план и разрез): А, Б – объект 1; В, Г – объект 2; Д, Е – объект 4; Ж, З – объект 5. Условные обозначения: а – черный гумус; б – красный прокаленный грунт; в – мелкий щебень; г – черный золистый грунт с древесными углями; д – золистый серый грунт со щебнем, углями и медными рудами; е – фрагменты керамики; ж – материк (желто-оранжевый суглинок со щебнем серпентинитов).

Fig. 2. Heating facilities in the 2021 excavation site at the Vorovskaya Yama mine (photo, plan and cross-section): А, Б – object 1; В, Г – object 2; Д, Е – object 4; Ж, З – object 5

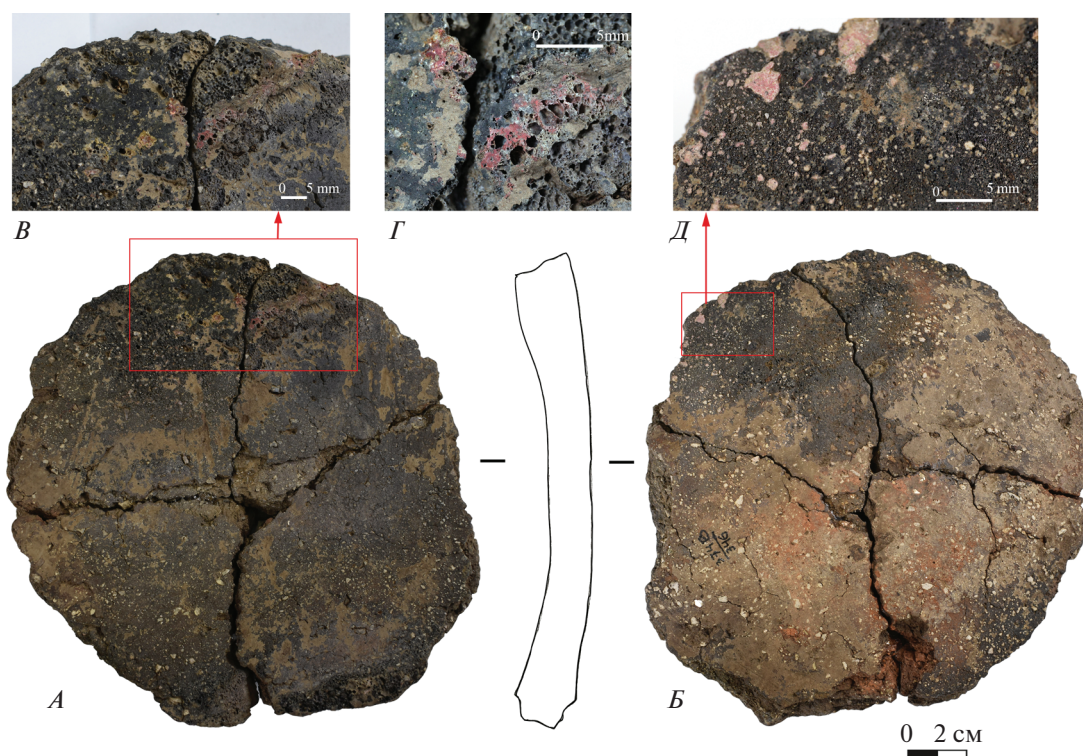


Рис. 3. Образец 346 (блюдо): *А, Б* – общий вид, *В* – ошлакованная поверхность, *Г* – капли металла на ошлакованной поверхности, *Д* – измененная структура керамики.

Fig. 3. Object 346 (dish): *A, B* – general view, *B* – slagged surface, *Г* – metal drops on the slagged surface, *Д* – altered ceramic structure

штинских, петровских укрепленных поселений (Григорьев, 2013. С. 102. Рис. 3–3), алакульских (Потемкина, 1985. С. 323), а также на руднике Новотемирский (Анкушева, Анкушев и др., 2022).

Два других полностью исследованных теплотехнических сооружения (№ 4 и 5) представляют собой округлые в плане прокалы диаметром 70–90 см, незначительно (на 10–20 см) заглубленные в материк. Подобные простые конструкции исследованы на поселении Горный-1 Каргалинского ГМЦ, в частности, очаг № 8 производственного комплекса № 2 (Каргалы, 2002. С. 101). Авторы предполагают связь этого очага с металлургией или металлообработкой.

Для уточнения назначения исследованных на руднике Воровская Яма теплотехнических сооружений был проведен РФА грунта из различных прослоек их заполнения. Нами было проанализировано 24 пробы грунта из 12 различных слоев. Во всех пробах зафиксированы значимые содержания меди (от 0.05 до 2.6 мас. %, среднее по 27 анализам 0.6 мас. %). Но подобные значения (до 6.5 мас. %) характерны и для культурного слоя раскопа в целом в связи с наличием на данном участке медьсодержащих отвалов и обогатительных производственных площадок. В связи с этим они не могут служить уверенным аргументом в

пользу металлопроизводящего функционала объектов. Более определенно на это указывают высокие содержания олова (170 ppm), зафиксированные в крупной фракции просева объекта 4, при фоновых содержаниях олова ниже предела обнаружения прибора. В грунте этого теплотехнического сооружения также отмечены повышенные, в сравнении с другими пробами, содержания меди – от 1.2 до 2 мас. %.

Керамика со следами высокотемпературного воздействия. Во вторую группу источников вошли керамические артефакты (6 экз.), имеющие следы воздействия высоких температур в виде:

1) ошлакованной поверхности – натеков пористой бугорчатой темно-серой массы со стекловидной поверхностью;

2) вспененной поверхности – шершавой, насыщенной многочисленными микропорами, матовой поверхности с включениями минералов-примесей с измененной структурой.

Выборка включает составляющие различных частей сосудов: шейка (1 экз.), плечико (1 экз.), тулово (3 экз.), дно (1 экз.). Ошлакованная поверхность присутствует на трех артефактах – шейке, плечике и дне – преимущественно на внутренней (вогнутой) стороне сосудов. Осталь-

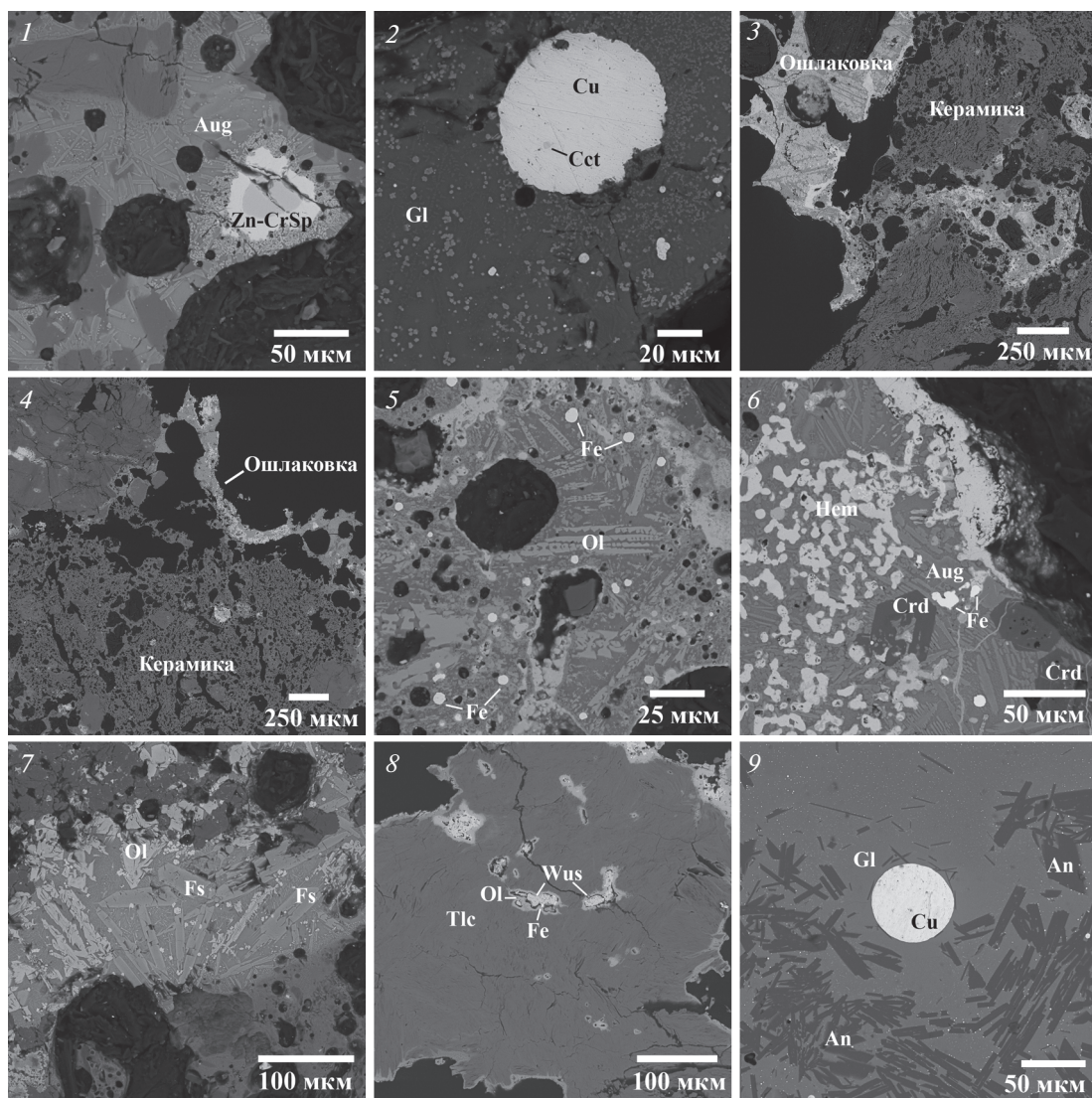


Рис. 4. Микрофотографии ошлакованной керамики и металлургического шлака с древнего рудника Воровская Яма. 1 – реликтовое включение Zn-содержащего хромшпинелида (Zn-CrSp) в пироксеновом шлаке (Aug) на поверхности блюда (образец 346); 2 – медная капля (Cu) с включением халькозина (Cct) в стекловатом шлаке (Gl) с поверхности блюда (образец 346); 3 – железистая ошлаковка на поверхности керамики (образец 290); 4 – тонкая железистая ошлаковка на поверхности керамики (образец 290); 5 – цепочечные кристаллы оливина (Ol) и капли железа (Fe) в ошлаковке (образец 290); 6 – новообразованные кристаллы авгита (Aug) и кордиерита (Crd), агрегаты гематита (Hem) и капли железа (Fe) в ошлаковке (образец 290); 7 – скелетные кристаллы оливина (Ol) и ферросилита (Fs) в ошлаковке (образец 314); 8 – агрегаты оливина (Ol), вюститита (Wus) и капли железа (Fs) в пустотах и трещинах фрагмента тальковой дресвы (Tlc) (образец 314); 9 – капля меди (Cu) и новообразованные кристаллы анортита (An) в фрагменте металлургического шлака (образец 374В-1ш). Фото в отраженных электронах.

Fig. 4. Microphotographs of slag ceramics and metallurgical slag from the ancient Vorovskaya Yama mine. Reflected electron image

ные фрагменты имеют вспененную поверхность как на внутренней, так и на наружной поверхности фрагментов тулова.

Образец 346 (рис. 3). К условно целым изделиям этой группы источников относится “блюдо” из заполнения ямки в постройке 2. Вместе с блюдом в ямке залежали каменный пест, два крупных куса долерита и пять фрагментов сосудов алакульского типа. Артефакт представляет собой

дисковидное изделие с неровными краями диаметром 18 см и толщиной 2.5 см (рис. 3, А, Б). Цвет варьируется от темно-серого до красновато-коричневого. На вогнутой стороне по краям присутствуют участки ошлакованной поверхности с красноватыми включениями (рис. 3, В, Г), выпуклая поверхность прокалена докрасна (рис. 3, Д).

РФА выявил медь (до 3.5 мас. %), олово (240–280 ppm), а также мышьяк на пределе обнаруже-

Таблица 1. Состав капель металла в артефактах с древнего рудника Воровская яма
Table 1. Composition of metal droplets in artifacts from the ancient Vorovskaya Yama mine

№ п/п	№ образца	Характеристика образца	Анализ	Характеристика анализируемой фазы	Содержание, мас. %						Сумма
					Cu	Fe	Ni	Co	Mn	S	
1	374В-1ш	Фрагмент металлургического шлака	22381a	Капля меди	100.53	0.25	—	—	—	—	100.79
2			22381d	—“—	98.12	1.47	—	—	—	—	99.59
3			22381h	—“—	98.74	0.16	0.25	—	—	—	99.15
4	1234-3	Металлургический шлак на поверхности блюда	22419a	—“—	99.78	—	—	—	—	—	99.78
5			22419b	Включение халькозина в капле меди	82.97	0.18	—	—	—	16.4	99.54
6			22419d	Капля меди	98.43	1.68	—	—	—	—	100.11
7	1234-4	Металлургический шлак на поверхности блюда	22420a	Капля меди	97.65	1.66	—	—	—	—	99.33
8	374В-214	Ошлаковка на керамике	22252a	Fe–Ni–Co капля	—	58.19	39.66	1.31	—	—	99.17
9			22252h	Ni–Fe–Co–Mn капля	—	37.81	50.96	10.14	1.06	—	99.97
10	374В-290-1	—“—	22251a	Капля железа	—	99.52	—	—	—	—	99.52
11	374В-290-2	—“—	22251h	Капля железа	—	99.50	—	—	—	—	99.50
12	374В-290-3	—“—	22563a	Fe–Ni–Co капля	—	94.29	5.32	0.68	—	—	100.29
13	374В-96	—“—	22564a	Капля железа	0.55	99.49	—	0.56	—	—	100.60
14			22564e	—“—	—	99.90	0.92	—	—	—	100.82
15	374В-303	—“—	22566a	—“—	0.44	99.47	—	—	—	—	99.92
16	374В-314	—“—	22565d	Fe–Ni капля	—	70.68	29.32	—	—	—	100.00

ния прибора (20–40 ppm) на красноватых участках вогнутой поверхности блюда (рис. 3, Г). По данным электронной микроскопии, пористая керамическая матрица блюда содержит в себе дресву мусковита и талька размером до 2 мм и органики. Кроме этого, в керамической массе зафиксированы реликтовые зерна цинксодержащих хрошпинелидов, размером до 50 мкм (рис. 4, Г). Примесь цинка характерна для района рудника, это указывает на производство изделия из местного сырья (Ankushev et al., 2021). Можно отметить значительное температурное воздействие на верхнюю часть блюда, которое привело к его частичному переплавлению с образованием гетерогенных стекловатых масс различного состава, а также кристаллов авгита и кордиерита. Участки высококремнистого стекла на оплавленной поверхности блюда содержат в себе мельчайшие капли меди (размером доли мкм, наиболее крупные до 2 мкм). Их состав представлен чистой медью, примеси олова не зафиксировано.

Небольшие фрагменты металлургического шлака с поверхности блюда представлены стекловаты-

ми разностями, содержащими зерна новообразованного магнетита размером до 5 мкм. В единичных случаях наблюдаются скелетные кристаллы оливина с примесями P, Ca, Mn, Ni, Co, Cu. Металлические включения в шлаках представлены медью с примесью железа (табл. 1). В наиболее крупной капле отмечено зерно измененного железистого халькозина (рис. 4, 2).

Коллекция фрагментированных изделий со следами высокотемпературного воздействия включает 5 единиц.

Образец 290 (рис. 5, Г). Фрагмент шейки сосуда найден в переложенном слое современного отвала экскаватора из траншеи ВК-4. Размеры 4.5 × 4 × 0.8 см. Шейка прямая со слегка отогнутым наружу прямоугольным венчиком, орнамента нет. Венчик и внутренняя поверхность покрыты тонким (до 1 мм) слоем ошлаковки со сферическими включениями бордового цвета 1–2 мм в диаметре. На наружной поверхности ошлаковка присутствует преимущественно на венчике, ниже по шейке — в виде отдельных пузырьков.

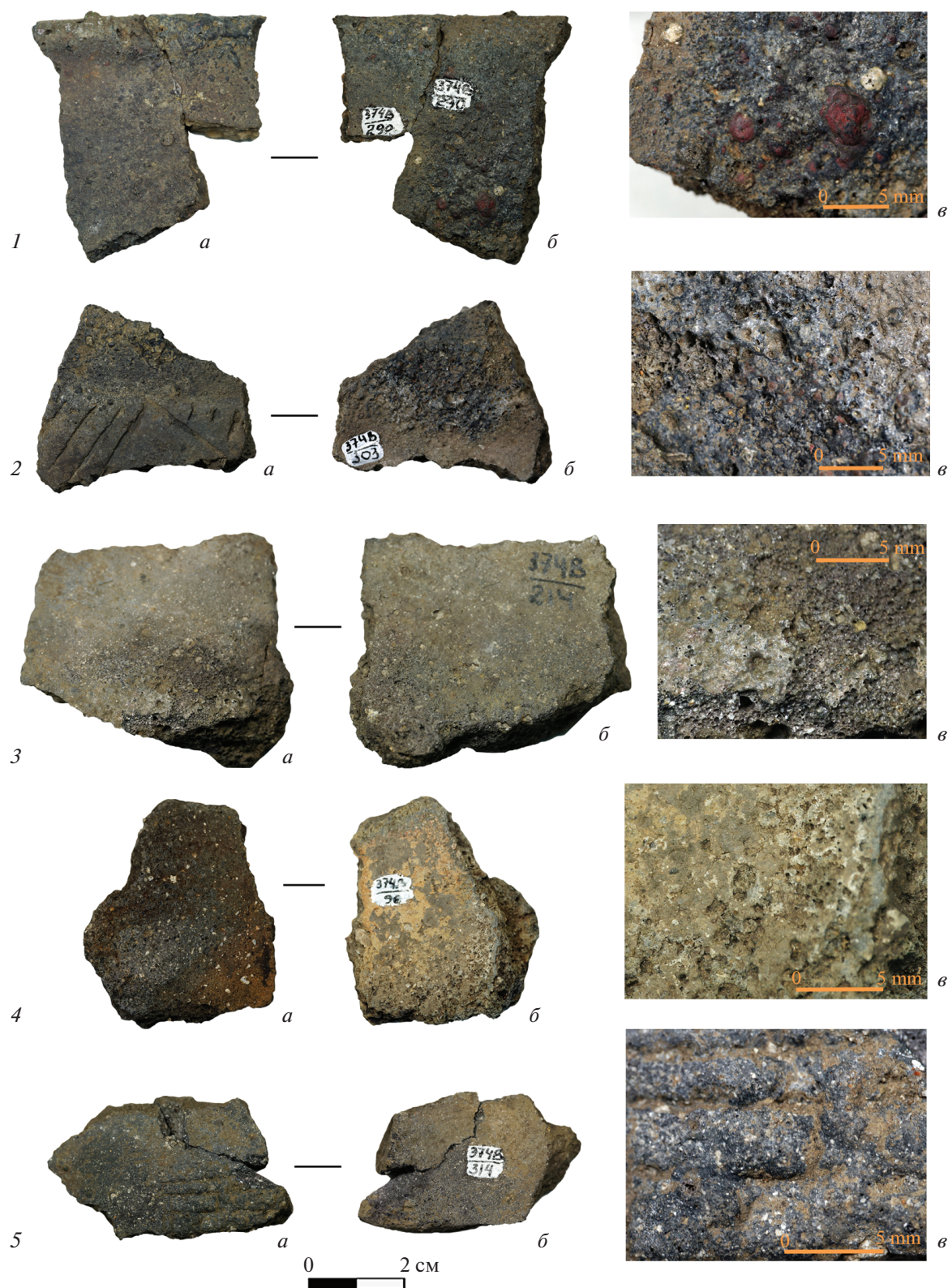


Рис. 5. Фрагменты керамических сосудов: 1 – образец 290; 2 – образец 303; 3 – образец 214; 4 – образец 96; 5 – образец 314 (*а* – внешняя поверхность, *б* – внутренняя поверхность, *в* – следы высокотемпературного воздействия).
Fig. 5. Fragments of ceramic vessels: 1 – object 290; 2 – object 303; 3 – object 214; 4 – object 96; 5 – object 314 (*a* – external surface, *б* – internal surface, *в* – traces of high-temperature exposure)

Таблица 2. Состав металлической капли на венчике сосуда (образец 374В-290) по данным ЛА-ИСП-МС
Table 2. Composition of a metal droplet on the rim of a vessel (object 374V-290) based on LA-ICP-MS data

№ линии	Содержание, мас. %		Содержание, ppm ($10^{-4}\%$)												
	Cu	S	Sn	Pb	Zn	Bi	Ag	Sb	As	Fe	Ni	Co	Au	Se	Te
1	98.47	1.43	9.6	10.2	3.4	14.7	271	4.6	126	<0.1	79.3	<0.1	13.8	92	10
2	98.75	1.15	20.7	16.8	12.4	15.1	248	4.5	140	40	90.5	<0.1	14.6	85	16.4
3	98.78	1.12	20.5	32.4	5.6	17.4	466	15.9	171	55	98.8	<0.1	17.5	176	25.7
4	98.84	1.06	390	234	14.6	121	309	42	146	68	157	<0.1	16.8	208	57
5	99.03	0.87	52.7	51.9	400	18.2	143	12.8	125	70	276	<0.1	9.6	131	46
6	98.91	0.79	28.7	129	113	24.9	177	111	141	85	612	0.5	10	220	150

Примечание: 1 ppm (part per million, миллионная доля) = 0.0001 мас. %.

Ошлаковка керамики выражена небольшими каплями и пленками, приплавленными к поверхности сосуда или частично сплавленными с керамической массой (рис. 4, 3, 4), иногда заполняет поры и трещины в керамике (рис. 4, 3). Основная масса ошлаковки представлена новообразованными кристаллами фаялита, авгита и кордиерита, находящимися в матрице железистого стекла (рис. 4, 5, 6). Также здесь присутствуют мелкие реликты магнетита (возможно, измененные хромшпинелиды) и массы оксидов и гидроксидов железа (рис. 4, 5, 6). Металлическая составляющая представлена многочисленными каплями железа с примесями Ni и Co, размером до 5–7 мкм. Сферические бордовые включения на поверхности также выполнены железистой ошлаковкой, состоящей из кристаллов пироксена (ряд энстатит-ферросилит), мелких зерен новообразованных шпинелидов (ряд магнетит-герцинит) и стекла. Также в сферических включениях присутствуют реликты зерен талька и Zn-содержащих хромшпинелидов.

На венчике этого фрагмента сосуда также обнаружена капля меди диаметром 2 мм, окисленная по периферии. Центральная часть капли вмещает большое количество включений куприта. Также в ней наблюдаются небольшие (до 5 мкм) включения Sn–Sb–Pb–Bi фаз. По данным ЛА-ИСП-МС анализа капля состоит из меди с примесями S, Ag, As; кроме этого в некоторых линиях анализа наблюдаются повышенные содержания Ni, Sn, Pb, Sb, Bi, Zn, Se и Te (табл. 2). По определению А.Д. Дегтяревой, капля характеризуется литой полиэдрической структурой с равномерно распределенными включениями эвтектики Cu–Cu₂O. Судя по площади, занимаемой участками эвтектики, содержание кислорода в меди повышено до 0.39%. Ближе к поверхности капли эвтектическое строение практически полностью исчезает, вероятно, из-за угольной засыпки. Полиэдрические кристаллы имеют крупные размеры и почти округлую форму, что

свидетельствует о замедленном остывании капли совместно с теплотехническим сооружением.

Образец 303 (рис. 5, 2). Фрагмент плечика сосуда найден в переотложенном слое современного отвала экскаватора из траншеи ВК-4. Размеры 5 × 3.5 × 0.9 см, цвет темно-серый, по верхней части тулова нанесен орнамент в виде косозаштрихованных треугольников вершинами вниз с использованием гладкого штампа. Две трети внутренней поверхности фрагмента (ближе к верхней части сосуда) покрыты бугристой пузырчатой массой со стекловидной поверхностью темно-серого цвета толщиной 1–2 мм, на внешней поверхности имеются лишь отдельные бугорки. Ошлаковка выражена слабее, чем в других образцах, чаще она представлена частично расплавленной и вспененной керамической массой. Однако местами отмечается значительное расплавление с образованием зародышей кристаллов (возможно, пироксена) и капель железа с примесью меди до 0.44 мас. % (табл. 1, № 15).

Образец 214 (рис. 5, 3). Фрагмент тулова сосуда найден в переотложенном слое современного отвала экскаватора из траншеи ВК-4. Размеры 6 × 5 × 1.4 см, цвет серый, орнамента нет. Фрагмент происходит от слабораздутого тулова сосуда и, возможно, является придонной частью. На более толстой половине фрагмента (ближе к дну) и внутри, и снаружи поверхность вспенена, имеет множество микропор, только на внешней присутствует небольшой участок натека серой массы ошлаковки со стекловидной поверхностью и мелкими бурными включениями. Ее состав выражен железисто-марганцевыми новообразованными нестехиометричными минеральными фазами и стеклом, широко распространены кристаллы фаялита. Металлические включения представлены Fe–Ni–Co–Mn-фазами в виде капель размером до 10 мкм и их скоплениями (табл. 1, № 8, 9).

Образец 96 (рис. 5, 4). Фрагмент тулова сосуда найден в черном гумусированном грунте на краю

постройки 2. Размеры $4.8 \times 4 \times 1.3$ см, цвет серо-коричневый, орнамента нет. Преимущественно по краям фрагмента на более толстой его половине поверхность вспенена и имеет множество микропор, как внутри, так и снаружи. Ошлаковка значительно сплавлена с керамической массой, она образована Fe-Al-стеклом и кристаллами оливина. Включения металла представлены никелистым и самородным железом (табл. 1, № 13, 14).

Образец 314 (рис. 5, 5). Фрагмент тулова сосуда найден в коричневом рыхлом грунте под отвалом, совместно с другими алакульскими фрагментами сосудов, но без привязки к постройкам. Размеры $5 \times 3 \times 1.2$ см. Возможно, придонная часть. Фрагмент серого цвета, имеет орнамент в виде угла из нескольких параллельных прочерченных линий. На участке с орнаментом и под ним на внутренней стороне поверхность сосуда вспенена и имеет множество микропор.

Ошлаковка в образце сплавлена с керамической составляющей. Ее состав выражен Fe-Al-стеклом, новообразованными кристаллами оливина и пироксена (ряд ферросилит-энстатит) (рис. 4, 7). В керамической массе отмечается много обломков талька размером до 2–3 мм, в трещинах и пустотах которых присутствуют новообразованные фазы: никелистое железо, оливин и вюстит (рис. 4, 8) (табл. 1, № 16).

Металлургический шлак. Единственный фрагмент металлургического шлака был найден на погребенной почве вне пределов выделенных построек. Фрагмент имеет размеры 1.5×2 см, темно-коричневый цвет. Поверхность гладкая, на изломе стекловатый, среднепористый. Основную массу шлака составляет низкокремнистое стекло. Новообразованные фазы представлены удлиненными кристаллами анортита и зернами магнетита с примесями Al, Ca, Mn, Mg, Ni, Zn (рис. 4, 9). Реликтовых минеральных включений в шлаке не отмечено. Металл в шлаке представлен каплями меди с примесями Fe и Ni, размером до 100 мкм.

Металлургические шлаки, ранее обнаруженные на руднике в ходе подъемных сборов, отличались разнородностью: обнаружены стекловатые разновидности с новообразованными кристаллами анортита и пироксеновые шлаки. В образцах отмечена примесь Zn, в некоторых из них были встречены реликтовые включения Zn-содержащих хромшпинелидов. Металл в шлаках представлен каплями меди с примесями S, Ag, Bi, Se, Te (Ankushev et al., 2021).

Изученные категории источников позволяют предположить, что в непосредственной близости от горных выработок в алакульский период происходили как металлургические, так и металлообрабатывающие процессы.

Выплавка металлов из руд. Артефакты, маркирующие выплавку металлов из руд, исчисляются

единичными экземплярами. Они представлены фрагментами металлургического шлака из раскопа и подъемных сборов, ситуационно не связанными ни с одним из теплотехнических сооружений, а также шлаковой прослойкой на блюде. Следовательно, говорить о широкомасштабном медеплавильном производстве здесь не приходится, по крайней мере, на исследуемом участке в пределах изученных построек. Возможно, этот этап металлургического процесса был вынесен в другие зоны прилегающего к выработкам пространства, либо за пределы рудника.

Все найденные на руднике образцы шлаков являются продуктом выплавки чистой меди, реже меди с небольшими примесями Fe и Ni. То, что эти шлаки являются продуктом передела руды, добытой именно здесь, доказывает наличие примесей Zn в стекле и реликтовых хромшпинелидах, что является характерной особенностью месторождения. Присутствие включений халькозина в медной капле свидетельствует об использовании вторичных сульфидов в рудной шихте. Это согласуется с наличием примесей S, Se и Te, ранее зафиксированных в шлаке с рудника (Ankushev et al., 2021. С. 408). Можно предположить, что рудная шихта была сульфидной или смешанной окисленно-сульфидной. Однако точно восстановить минералогию исходной шихты пока не представляется возможным из-за малого количества образцов шлака.

Отливка и переплав изделий. Несколько шире представлены свидетельства вторичного переплава меди и сплавов. По крайней мере, одно из теплотехнических сооружений (№ 4) — использовалось в качестве металлообрабатывающего. На это указывает отсутствие металлургических шлаков в грунте объекта и на прилегающем пространстве, следовые содержания олова в его заполнении, а также повышенные в сравнении с остальными объектами содержания меди (от 1.2 до 2 мас. %). Близкие значения содержания меди (1–1.5 мас. %) ранее были установлены по результатам рентгенофлуоресцентного анализа центральной части горна на руднике Новотемирский, чья металлургическая принадлежность надежно аргументирована находками шлаков *in situ* (Анкушева, Анкушев и др., 2022). Таким образом, объект 4 мог использоваться для расплава слитков, переплавки готовых медь- и оловосодержащих изделий или лома.

Особенности строения наиболее хорошо сохранившегося очага № 2 — его небольшие размеры, концентрические прослойки с разрывом, футеровка из мелких камней — косвенно могут указывать на его использование в металлопроизводстве. Отсутствие даже мельчайших фрагментов шлака в его заполнении и на прилегающей территории говорит в пользу металлообрабатывающей функции. Использование сульфидных руд, зафиксированное по шлакам, также является контраргументом

Таблица 3. Валовый состав керамики, ошлаковки на керамике и металлургического шлака на блюде с рудника Воровская яма (сумма приведена к 100%)**Table 3.** Gross composition of ceramics, slag on ceramics, and metallurgical slag on a dish from the Vorovskaya Yama mine (the total is reduced to 100%)

№ образца	Анализ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO
Керамика												
374В-96	22649a	52.55	20.59	12.02	10.08	1.32	0.70	1.17	0.70	0.87	—	—
	22649b	51.60	20.64	13.55	8.84	1.34	0.71	1.38	0.79	0.59	0.55	—
	22649c	53.04	21.81	11.35	8.63	1.27	0.50	1.26	0.98	0.54	0.61	—
	22649d	52.19	21.89	11.66	9.67	1.33	0.39	0.84	0.77	0.59	0.67	—
	22649e	53.36	17.45	11.02	12.95	1.39	0.82	1.28	0.71	0.49	0.54	—
374В-290 нов	22648a	54.31	20.25	12.33	10.22	0.94	—	0.51	0.94	0.50	—	—
	22648b	55.84	18.03	11.01	13.13	0.71	—	0.55	0.73	—	—	—
	22648c	57.09	17.68	10.46	11.67	0.89	0.40	0.56	0.85	0.41	—	—
	22648d	55.58	17.51	10.5	14.28	0.61	0.38	0.41	0.72	—	—	—
	22648e*	56.28	18.38	10.79	11.09	0.82	0.36	0.58	0.69	0.41	—	—
374В-303 нов	22651a	54.05	22.32	9.67	8.25	1.86	0.59	1.40	0.75	0.25	0.85	—
	22651b	54.52	22.67	10.66	8.79	0.99	0.51	0.74	0.76	0.36	—	—
	22651c	54.95	22.81	10.66	8.49	0.98	0.35	0.67	0.77	0.32	—	—
	22651d	54.62	25.82	10.44	5.75	1.06	0.29	0.78	0.96	0.27	—	—
	22651e	53.08	22.24	13.24	8.46	0.78	0.22	0.58	1.13	—	—	0.29
374В-314	22650a	61.78	18.14	8.77	6.91	1.17	0.35	1.72	0.66	0.50	—	—
	22650b	55.63	18.74	11.20	8.05	1.63	0.86	1.88	0.92	1.08	—	—
	22650c	56.99	18.07	8.92	9.75	1.40	0.69	2.13	0.89	1.14	—	—
	22650d	67.63	12.88	6.86	7.69	1.16	0.46	1.30	1.42	0.59	—	—
	22650e	56.99	16.49	10.12	11.38	1.27	0.68	1.54	0.80	0.72	—	—
Ошлаковка на керамике												
374В-290 нов	22648f	52.56	18.05	8.79	6.45	5.64	1.52	4.55	0.99	—	1.27	0.18
Блюдо												
374В-346	22380r**	53.74	16.95	10.80	14.07	0.74	0.66	0.80	1.30	0.49	—	—
Металлургический шлак на блюде												
374В-346-3	22419f***	51.20	18.69	9.07	7.04	2.16	0.78	7.09	1.45	—	0.86	0.36

Примечание. В составе присутствует (мас. %): *Cr₂O₃ – 0.6; **Cr₂O₃ – 0.25; ***CuO – 1.3.

против их выплавки в расположенных в постройках очагах. Экспериментальные исследования исключают возможность сульфидных плавков в закрытом помещении ввиду резкого запаха серного газа и дыма (Григорьев, 2013. С. 47).

Наибольшие затруднения вызвало определение назначения керамики со следами воздействия высоких температур. Блюдо могло являться полифункциональным изделием, поскольку содержит как шлак от выплавки чистой меди, так и следы олова на поверхности, выявленные РФА. Последние указывают скорее на перепад или отливку бронзы, поскольку на месторождении олово отсутствует. Таким образом, блюдо могло использоваться как плавильная чаша для передела руды (тигель), так и в качестве изложницы для от-

ливки бронзового слитка. Совместная плавка медной и оловянной руды в данном случае маловероятна, поскольку, как было сказано выше, шлаки Воровской ямы содержали включения чистой меди. Похожее изделия, функциональное назначение которых связывается с плавкой руды, найдены на поселении Архангельский Прииск II (Григорьев, 2013. С. 432. Рис. 11–29).

Ошлаковка на остальных керамических изделиях могла образоваться в разных случаях: при выплавке металла из руды (например, Кирюшин и др., 2013), при переплаве уже готовых изделий (например, Луньков, 2004. С. 74, 75; Erb-Satullo, Gilmour, Khakhutaishvili, 2015), при использовании в футеровке печи (например, Rehren, Leshta-

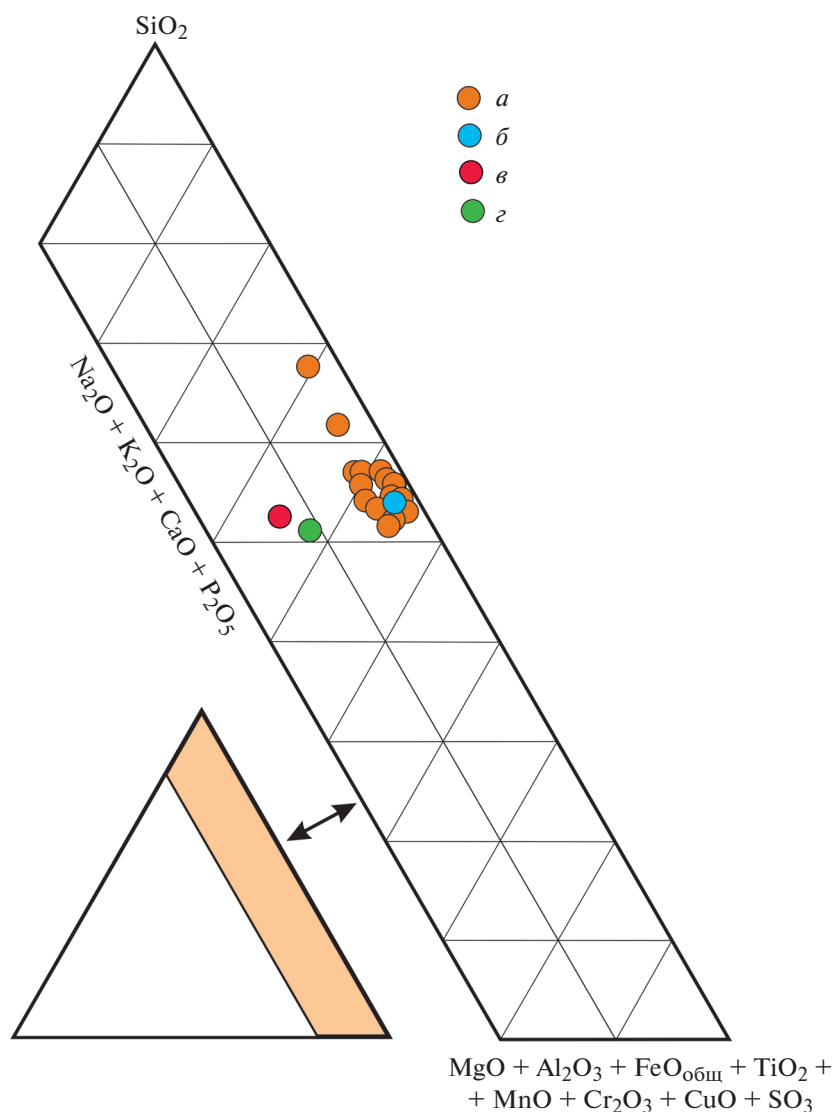


Рис. 6. Соотношение основных компонентов состава керамики, ошлаковки на керамике и металлургического шлака на блюде с древнего рудника Воровская Яма. Условные обозначения: *a* – фрагменты керамики, *б* – блюдо, *в* – ошлаковка керамики, *г* – шлак на блюде.

Fig. 6. The ratio of the main components in the ceramic composition, slag on ceramics and metallurgical slag on a dish from the ancient mine of Vorovskaya Yama

kov, Penkova, 2016), а также в результате случайного попадания битой посуды в горн.

Последние два варианта были исключены по следующим причинам. Во-первых, прослеживалась закономерность в локализации ошлакованного слоя (на внутренней поверхности). Во-вторых, натеки отсутствовали на поверхности излома сосудов, а значит, они образовались до того, как горшки были разбиты. Следовательно, требовалось выяснить, в каких процессах были задействованы сосуды – в металлургических или металлообрабатывающих.

Для этого мы определили отдельно валовый состав керамики и ошлаковки методом электронной микроскопии с растра размером около 1 мкм^2 .

Состав всех керамических фрагментов, включая блюдо, является сходным, они были изготовлены из одного сырья (табл. 3). В ошлаковке керамики и шлаке на поверхности блюда содержится значительно больше Na_2O , K_2O , CaO и P_2O_5 – компонентов, приуроченных к древесному углю и золе (Калгаро и др., 2021) (рис. 6). Количество других компонентов сходно, поэтому привнос сторонних добавок (флюсов) не предполагается. Значимым отличием ошлаковки на фрагментированной керамике и шлака на поверхности блюда является присутствие в последнем капель меди и высокое содержание Cu в шлаке (1.3 мас. %).

Включения металлического железа, экзотических Fe-Ni-Co-Mn фаз, новообразованных

кристаллов оливина фаялит-форстеритового ряда и вюстита в ошлакованной части объясняется воздействием высоких температур и восстановительной атмосферы на керамическую массу, в большом количестве содержащую тальк, хромшпинелиды, оксиды и гидроксиды железа. Это подтверждается также находками никелистого железа, новообразованного оливина и вюстита в пустотах тальковой дресвы в керамике, вблизи зоны ошлакования (рис. 4, 8). Следовательно, ошлаковка на керамике могла являться косвенным продуктом внутритигельного переплава металла в восстановительной атмосфере, контролируемой угольной засыпкой (Д.С. Агапов, С.А. Агапов, 2021). На это указывают также минералого-геохимические характеристики капли меди, обнаруженной на образце 290. ЛА-ИСП-МС анализ медной капли на венчике керамического сосуда показал низкое содержание характерных для ультрабазитов маркирующих примесей Fe, Ni, Co и As. При этом некоторые аналитические линии показывают повышенные содержания коррелирующих друг с другом Sn, Sb, Pb и Bi, что наряду с неоднородностью элементов-примесей в объеме капли свидетельствует о переплаве различного металлического лома, часть из которого была легирована оловосодержащей медью. При этом повышенные содержания подвижных элементов S и Zn свидетельствуют об ограниченном количестве (вероятно, одноразовом) переплавах. В целом минералого-химические исследования и морфологические особенности этой группы керамики Воровской Ямы находят свои параллели со II категорией плавильных чаш, выделенной на поселении Горный-1 Каргалинского ГМЦ. В нее входят бытовые сосуды небольших размеров (до 1500 см³) с ошлакованной поверхностью, которые использовались в металлообрабатывающем производстве при отливке изделий небольшой металлоемкости (Луньков, 2004. С. 73–75).

Таким образом, исследование свидетельств металлопроизводства из алакульского слоя рудника Воровская Яма позволило получить новые данные о технологических процессах, происходящих на медном месторождении.

1) Вблизи выработок происходила выплавка металла с использованием смешанных окислено-сульфидных или сульфидных руд. Масштабы этих процессов пока невозможно реконструировать ввиду единичного характера находок, но очевидно, что они были вынесены за пределы исследованных участков построек.

2) В самих постройках отмечены свидетельства металлообработки в виде фрагментов тиглей и теплотехнических сооружений со следами меди и олова в грунте. В роли тиглей могли выступать сосуды, близкие по морфологии к бытовым. Они использовались в том числе для неоднократ-

ного переплава изделий из меди и оловянной бронзы.

Несмотря на присутствие на памятнике признаков всех стадий металлургического процесса, пока по имеющимся данным складывается картина об ограниченных масштабах этого производства. Небольшой объем связанных с ним находок позволяет предположить, что оно было связано с нуждами и потребностями самих горняков, в частности, в изготовлении горнодобывающих орудий труда. Это косвенно подтверждается находкой литейной формы горнопроходческого орудия на другом памятнике этого периода – руднике Новотемирский (Ankusheva et al., 2021). Перспективы проверки этой гипотезы лежат в дальнейшем расширении источникового фонда, аналитических исследований в области организации хозяйства алакульского периода как на рудниках, так и на металлопроизводящих поселениях позднего бронзового века.

Обработка полевых материалов выполнена в рамках бюджетной темы ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 122062100023-5. Аналитические исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта № 20-59-56007.

Авторы благодарят А.Д. Дегтяреву за комментарии по металлографии включений меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агапов Д.С., Агапов С.А. Модели плавки цветных металлов в древности (по результатам экспериментальных работ Самарской археометаллургической группы) // Аналитические исследования лаборатории естественнонаучных методов. Вып. 5 / Отв. ред. и сост. Е.Н. Черных, В.И. Завьялов. М.: ИА РАН, 2021. С. 70–78.
DOI 10.25681/IARAS.2021.978-5-906045-24-9.70-77
- Анкушева П.С. Отчет об археологических раскопках рудника Воровская Яма в Кизильском районе Челябинской области в 2021 году // Архив Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета. № 110. 2 т. (187 + 194 с.)
- Анкушева П.С., Анкушев М.Н., Алаева И.П., Фомичев А.В., Блинов И.А., Артемьев Д.А. Медеплавильный горн на древнем руднике Новотемирский // Поволжская археология. 2022. № 1 (39). С. 34–48.
DOI 10.24852/ра2022.1.39.34.48
- Анкушева П.С., Юминов А.М., Молчанов И.В., Алаева И.П., Анкушев М.Н. Функциональное назначение построек на руднике бронзового века Воровская яма (по материалам раскопа 2021 года) // Геоархеология и археологическая минералогия. 2022. Т. 9. С. 140–147.
- Григорьев С.А. Металлургическое производство в Северной Евразии в эпоху бронзы. Челябинск: Циперо, 2013. 660 с.
- Зайков В.В., Зданович Г.Б., Юминов А.М. Воровская яма – новый рудник бронзового века // Археологический источник и моделирование древних технологий:

- труды музея-заповедника Аркаим. Челябинск, 2000. С. 112–130.
- Калгаро И., Веронези У., Ермолаева А.С., Радивоевич М. Технология производства меди на поселении Талдысай (Центральный Казахстан) в эпоху поздней бронзы и его роль в общей системе металлургии Евразии // Геоархеология и археологическая минералогия. 2021. Т. 8. С. 145–149.
- Каргалы. Т. II. Горный – поселение эпохи поздней бронзы. Топография, литология, стратиграфия. Производственно-бытовые и сакральные сооружения. Относительная и абсолютная хронология / Сост. и науч. ред. Е.Н. Черных. М.: Языки славянской культуры, 2002. 184 с.
- Кирюшин Ю.Ф., Тишкин А.А., Грушин С.П., Кирюшин К.Ю., Шайхутдинов В.М. Особенности металлургического производства елунинской культуры (по материалам изучения ошлакованной керамики с поселения Павловка-1) // Теория и практика археологических исследований. 2013. Т. 7. № 1. С. 103–111.
DOI 10.14258/tpai(2013)1(7).-06
- Луньков В.Ю. Керамический комплекс // Каргалы. Т. III. Селище Горный: археологические материалы, технология горно-металлургического производства, археобиологические исследования / Сост. и науч. ред. Е. Н. Черных. М.: Языки славянской культуры, 2004. С. 22–75.
- Потемкина Т.М. Бронзовый век лесостепного Притоболья. М.: Наука, 1985. 376 с.
- Ткачев В.В. Концепция культурного ландшафта в ретроспективе эпохи поздней первобытности (по материалам позднего бронзового века Южного Урала) // Stratum plus. 2021. № 2. С. 53–67.
- Черных Е.Н. Древнейшая металлургия Урала и Поволжья. М.: Наука, 1970. 185 с.
- Ankushev M.N., Yuminov A.M., Zaykov V.V., Noskevich V.V. Ancient copper mines in the southern Trans-Urals (Russia) // The Bronze Age in the Karagaily-Ayat Region (Trans-Urals, Russia). Culture, Environment and Economy / Eds. L. Koryakova, R. Krause. Bonn: Habelt, 2021 (Frankfurt Archaeological Studies; 43). P. 399–414.
- Ankusheva P.S., Alaeva I.P., Ankushev M.N., Fomichev A.V., Zazovskaya E.P., Blinov I.A. From Ore to Metal: Exploitation of the Novotemirsky Mine, Southern Trans-Urals, in the Second Millennium BC // Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia. 2021. V. 49. № 1. P. 30–38.
DOI 10.17746/1563-0110.2021.49.1.030-038
- Ankusheva P.S., Zazovskaya E.P., Yuminov A.M., Ankushev M.N., Alaeva I.P., Epimakhov A.V. Radiocarbon Chronology of Bronze Age Mines in the Southern Trans-Urals: First Results // Archaeological and Anthropological Sciences. 2022. V. 14. P. 218.
DOI 10.1007/s12520-022-01681-5
- Erb-Satullo N.L., Gilmour B.J.J., Khakhutaishvili N. Crucible technologies in the Late Bronze–Early Iron Age South Caucasus: copper processing, tin bronze production, and the possibility of local tin ores // Journal of Archaeological Science. 2015. V. 61. P. 260–276.
DOI 10.1016/j.jas.2015.05.010
- Rehren T., Leshtakov P., Penkova P. Reconstructing Chalcolithic copper smelting at Akladi cheiri, Chernomorets, Bulgaria // Der Schwarzmeerraum vom Neolithikum bis in die Früheisenzeit (6000–600 v. Chr.) / Eds. V. Nikolov, W. Schier. Rahden: Verlag Marie Leidorf, 2016. P. 205–214.
- Zaykov V.V., Yuminov A.M., Dunaev A.Y., Zdanovich G.B., Grigoriev S.A. Geologo-Mineralogical Studies of ancient Copper mines in the Southern Urals // Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia. 2005. № 4 (24). P. 101–114.

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL RESEARCH ON EVIDENCE OF ALAKUL METAL PRODUCTION AT THE VOROVSKAYA YAMA MINE (SOUTHERN TRANS-URALS)

**Polina S. Ankusheva^{a,b,#}, Maksim N. Ankushev^b, Ivan A. Blinov^b,
Dmitry A. Artemyev^b, Irina P. Alaeva^{a,c}**

^aSouth Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk, Russia

^bSouth Ural Federal Research Centre for Mineralogy and Geoecology, Ural Branch RAS, Miass, Russia

^cThe Institute of History and Archaeology, Ural branch RAS, Yekaterinburg, Russia

[#]E-mail: polenke@yandex.ru

The article discusses the processes of Alakul metal production at the Vorovskaya Yama copper mine (Southern Trans-Urals, middle of the 2nd millennium BC). The study sources are the materials of the 2021 excavation site including ruined remains of heating facilities, metallurgical slag and slagged ceramics. The research employed optical and electron microscopy, XRF and LA-ICP-MS methods. It was established that technological operations at the deposit were not limited to the extraction of copper ore and its primary enrichment. In addition, metal was smelted from sulfide or oxidized-sulfide ores in the immediate vicinity of the mine entry; however, it was done outside the studied areas of the structures. Secondary remelting of copper and tin bronze products was performed in ceramic crucibles using heating facilities inside structures.

Keywords: the Late Bronze Age, metal production, the Southern Trans-Urals, the Alakul culture, mine, slagged ceramics, metallurgical slag, crucible.

REFERENCES

- Agapov D.S., Agapov S.A., 2021. Models of smelting non-ferrous metals in antiquity (based on experimental results of the Samara archeometallurgical team). *Analiticheskie issledovaniya laboratorii estestvennonauchnykh metodov [Analytical studies of the Laboratory of Natural Science Methods]*, 5. E.N. Chernykh, V.I. Zav'yalov, eds. Moscow: IA RAN, pp. 70–78.
DOI 10.25681/IARAS.2021.978-5-906045-24-9.70-77. (In Russ.)
- Ankushev M.N., Yuminov A.M., Zaykov V.V., Noskevich V.V., 2021. Ancient copper mines in the southern Trans-Urals (Russia). *The Bronze Age in the Karagaily-Ayat Region (Trans-Urals, Russia). Culture, Environment and Economy*. L. Koryakova, R. Krause, eds. Bonn: Habelt, pp. 399–414. (Frankfurt Archaeological Studies, 43).
- Ankusheva P.S. Otchet ob arkhеologicheskikh raspokpakh rudnika Vorovskaya Yama v Kizil'skom rayone Chelyabinskoy oblasti v 2021 godu [Report on the archaeological excavations at the Vorovskaya Yama mine in Kizil'skoye district of Chelyabinsk Region in 2021]. *Arkhiv Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo gumanitarno-pedagogicheskogo universiteta [Archive of the South Ural State Humanitarian Pedagogical University]*, № 110. 2 vols. (187 + 194 p.)
- Ankusheva P.S., Alaeva I.P., Ankushev M.N., Fomichev A.V., Zazovskaya E.P., Blinov I.A., 2021. From Ore to Metal: Exploitation of the Novotemirsky Mine, Southern Trans-Urals, in the Second Millennium BC [Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia], vol. 40, no. 1, pp. 30–38.
DOI 10.17746/1563-0110.2021.49.1.030-038
- Ankusheva P.S., Ankushev M.N., Alaeva I.P., Fomichev A.V., Blinov I.A., Artem'ev D.A., 2022. Copper smelting furnace at the ancient Novotemirsky mine. *Povolzhskaya arkhеologiya [The Volga River region archaeology]*, 1 (39), pp. 34–48.
DOI 10.17746/1563-0110.2021.49.1.030-038 (In Russ.)
- Ankusheva P.S., Yuminov A.M., Molchanov I.V., Alaeva I.P., Ankushev M.N., 2022. Function of structures at the Bronze Age mine Vorovskaya Yama (based on excavation materials of 2021). *Geoarkheologiya i arkhеologicheskaya mineralogiya [Geoarchaeology and archaeological mineralogy]*, 9, pp. 140–147. (In Russ.)
- 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.
DOI 10.1007/s12520-022-01681-5
- Chernykh E.N., 1970. Drevneyshaya metallurgiya Urala i Povolzh'ya [Earliest metallurgy of the Urals and the Volga region]. Moscow: Nauka. 185 p.
- Erb-Satullo N.L., Gilmour B.J.J., Khakhutaishvili N., 2015. Crucible technologies in the Late Bronze–Early Iron Age South Caucasus: copper processing, tin bronze production, and the possibility of local tin ores. *Journal of Archaeological Science*, 61, pp. 260–276.
DOI 10.1016/j.jas.2015.05.010
- Grigor'ev S.A., 2013. Metallurgicheskoe proizvodstvo v Severnoy Evrazii v epokhu bronzy [Metal production in Northern Eurasia during the Bronze Age]. Chelyabinsk: Tsitsero. 660 p.
- Kalgaro I., Veronezi U., Ermolaeva A.S., Radivoevich M., 2021. Copper production technology at the Taldysai settlement (Central Kazakhstan) in the Late Bronze Age and its role in the general system of Eurasian metallurgy. *Geoarkheologiya i arkhеologicheskaya mineralogiya [Geoarchaeology and archaeological mineralogy]*, 8, pp. 145–149. (In Russ.)
- Kargaly [Kargaly], II. Gornyy – poselenie epokhi pozdney bronzy. Topografiya, litologiya, stratografiya. Proizvodstvenno-bytovye i sakral'nye sooruzheniya. Otnositel'naya i absolyutnaya khronologiya [Gornyy – a Late Bronze Age settlement. Topography, lithology, stratigraphy. Industrial, household and sacral structures. Relative and absolute chronology]. E.N. Chernykh, ed., comp. Moscow: Yazyki slavyanskoy kul'tury, 2002. 184 p.
- Kiryushin Yu.F., Tishkin A.A., Grushin S.P., Kiryushin K.Yu., Shaykhutdinov V.M., 2013. Features of the metallurgical production of the Elunino culture (based on the study of slag pottery from the settlement of Pavlovka-I). *Teoriya i praktika arkhеologicheskikh issledovaniy [Theory and practice of archaeological research]*, vol. 7, no. 1, pp. 103–111.
DOI 10.14258/tpai(2013)1(7).-06 (In Russ.)
- Lun'kov V.Yu., 2004. Ceramic complex. *Kargaly [Kargaly], III. Selishche Gornyy: arkhеologicheskije materialy, tekhnologiya gorno-metallurgicheskogo proizvodstva, arkhеologicheskije issledovaniya [The settlement of Gornyy: archaeological materials, technology of mining and metal production, archaeological research]*. E.N. Chernykh, ed., comp. Moscow: Yazyki slavyanskoy kul'tury, pp. 22–75. (In Russ.)
- Potemkina T.M., 1985. Bronzovyy vek lesostepnogo Pritobol'ya [The Bronze Age of the forest-steppe Tobol region]. Moscow: Nauka. 376 p.
- Rehren T., Leshtakov P., Penkova P., 2016. Reconstructing Chalcolithic copper smelting at Akladi cheiri, Chernomorets, Bulgaria. *Der Schwarzmeerraum vom Neolithikum bis in die Früheisenzeit (6000–600 v. Chr.)*. V. Nikolov, W. Schier, eds. Rahden: Verlag Marie Leidorf, pp. 205–214.
- Tkachev V.V., 2021. The concept of cultural landscape in retrospective of the the late prehistoric period (based on materials from the late Bronze Age of the Southern Urals). *Stratum plus*, 2, pp. 53–67. (In Russ.)
- Zaykov V.V., Yuminov A.M., Dunaev A.Y., Zdanovich G.B., Grigoriev S.A., 2005. Geologo-Mineralogical Studies of ancient Copper mines in the Southern Urals. [Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia], 4 (24), pp. 101–114.
- Zaykov V.V., Zdanovich G.B., Yuminov A.M., 2000. Vorovskaya Yama – a new Bronze Age mine. *Arkheologicheskij istochnik i modelirovanie drevnikh tekhnologiy: trudy muzeya-zapovednika Arkaim [Archaeological source and simulation of ancient technologies: Works of the Arkaim Museum-Reserve]*. Chelyabinsk, pp. 112–130. (In Russ.)