

Топография и реконструкция исторических рудников Каргалинского горно-металлургического центра (бронзовый век)

В.В. Носкевич¹, Н.В. Федорова¹, А.М. Юминов², 2021

¹Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

Поступила 16 февраля 2021 г.

В степях Южного Урала начиная с IV тыс. до н. э. и до конца II тыс. до н. э. разрабатывались Каргалинские медные месторождения. Из их руды в бронзовом веке было получено огромное количество меди. Геофизические исследования проведены на южной периферии Каргалинского рудного поля недалеко от поселка Белоусовка на горно-перерабатывающем комплексе протяженностью 900—1000 м при поперечнике 30—70 м. На этой площади фиксируется около сотни небольших открытых карьеров диаметром от 3 до 12 м с прибортовыми отвалами, площадок для сортировки добытой руды, соседствующих с ямами-печами диаметром 3—5 м по пожогу кусковых руд. Выполнены детальная топографическая, градиентная магнитная и георадарная съемки на участках, в пределах которых расположены типичные объекты: рудник-карьер, яма предварительного пожога руд, шламовые площадки и рудный склад. В результате получены новые данные о строении древних выработок и сопутствующих технологических сооружений. Выявление многочисленных магнитных аномалий вблизи карьера и ямы свидетельствует о том, что в медной руде содержится достаточно большое количество железа, причем первичная сортировка обожженной руды производилась вблизи ям. По результатам георадарной съемки восстановлены особенности строения ямы-печи и построена 3D модель древнего карьера. Яма для обжига руды имела конусообразную форму со ступеньками для удобства загрузки и выгрузки руды. Диаметр у основания достигал 5 м, диаметр основной шахты — 1—1,5 м, глубина — около 3 м, объем ямы не превышал 13—15 м³. Поперечные размеры горной выработки составляли 7—9 м, глубина достигала 4 м. Карьер имел крутые борта с севера, востока и юга, на западе рельеф более пологий. Вход на рудник находился с западной стороны. Первичная глубина карьера отличалась от современной поверхности на 2—3 м. По нашей оценке, количество добытой руды в этой горной выработке составило 25—30 т. С учетом общего числа горных выработок за время эксплуатации Белоусовского горно-металлургического комплекса было извлечено порядка 2—2,5 тыс. т рудной массы.

Ключевые слова: горно-металлургический комплекс, магнитная съемка, георадиолокация, 3D модель.

Введение. В степной зоне Южного Приуралья добыча медных руд проводилась с древнейших времен. Каргалинские рудники являются наиболее известными историческими объектами эпохи бронзы. Начиная с IV тыс. до н. э. и до конца II тыс. до н. э.,

Каргалинские месторождения меди составляли основу массового производства металла, и из их руды было выплавлено огромное количество меди [Черных, 2002].

Исследованию Каргалинских рудников посвящена обширная литература, первые

исследования были опубликованы в XVIII ст. [Рычков, 1770; Лепехин, 1772], результаты системного изучения, выполненные в конце XX и начале XI ст., приведены в монографиях [Черных, 2002, 2005, 2007]. К настоящему времени Каргалы рассматриваются большинством исследователей в качестве эталонного горно-металлургического комплекса (ГМК) геoarхеологии и археометаллургии [Богданов и др., 2018].

Общая протяженность Каргалинско-го (или Приуральского) горно-металлургического центра (ГМЦ) составляет 300 км, ширина — не менее 90 км. На этой территории обнаружены многочисленные наземные и подземные горные выработки, представленные карьерами, глубокими шурфами, штольнями и шахтами. На части наиболее ранних геoarхеологических объектов обнаружены специальные обогатительные шламовые площадки и ямы-печи по пиротехническому обогащению руд. На многих рудниках выявлено несколько стратиграфических горизонтов выработок различных периодов бронзового века. При исследовании Каргалинского ГМЦ из геофизических методов применялась мало-глубинная электроразведка, результаты которой были использованы для выбора наиболее интересных мест (или объектов) для раскопок [Черных, 2002; Журбин, 2004].

Медные руды сформировались в зонах окисления медистых песчаников в мелко-водных бассейнах вдоль западной окраины Уральских гор и Мугоджар. На протяжении бронзового века с IV тыс. до н. э. по II тыс. до н. э. источникам медных руд являлись небольшие, но многочисленные рудопроявления в толще серых аркозовых песчаников казанского и татарского ярусов. Благодаря близкому расположению рудных тел от поверхности и высоким запасам древние горные выработки получили развитие на значительных площадях [Юминов и др., 2017].

Основу рудного протолита металлургии бронзового века степного Приуралья преимущественно составляли сульфидные обособления, развитые в серых, реже коричневых или почти черных мергелистых

сланцах с содержанием меди в пределах 20—70 %. Сульфидные обособления в основном сложены халькозином и ковелином в ассоциации с другими сульфидами, сульфатами, оксидами и карбонатами меди [Yuminov et al., 2019; Блинов, 2020].

В восточной части Уральских гор в Зауральском ГМЦ в бронзовом веке разрабатывались преимущественно руды верхних горизонтов зон окисления скарновых, колчеданных и медно-порфириновых месторождений, приуроченные к ультрабазитовым массивам Главного Уральского и Восточного Уральского глубинных разломов [Анкушев и др., 2018]. Некоторые исторические рудники Зауральского ГМЦ были обследованы геофизическими методами, которые показали эффективность использования георадара. Георадиолокационные исследования позволили установить глубину и выявить морфологические особенности древних выработок, перекрытых наносами, построить модели карьеров во время их эксплуатации, а также оценить количество вынутого грунта и добытой руды [Носкевич и др., 2017; Носкевич, Федорова, 2018; Berseleva et al., 2016; Noskewich et al., 2019]. Отметим, что метод широко используется в мировой практике при исследовании археологических объектов [Conyers, 2016; Elsayed et al., 2014; Старовойтов, 2008; Goodman, Piro, 2013; Бондарь и др., 2020].

В настоящее время уральскими исследователями продолжается систематическое изучение горно-металлургических объектов степного Приуралья. В 2017 г. на южной окраине Каргалинского рудного поля западнее с. Белоусовка были обнаружены неизвестные ранее рудники, которые относятся к позднему бронзовому веку [Богданов и др., 2018].

В настоящей статье представлены результаты геофизических исследований в пределах Белоусовского горно-перерабатывающего комплекса (ГПК). Непосредственно в сам комплекс входит Белоусовский рудник — скопления небольших горных выработок, в которых велась непосредственная добыча медных руд, рудные отвалы, предназначенные для складирования

сырья, ямы предварительного пожара руд и «шламовые» площадки, где происходило обогащение руд.

На площади Белоусовского рудника (900—1000 м при поперечнике 30—70 м) фиксируется около сотни древних горных выработок. Выработки удалены на расстояние 8—12 м друг от друга и имеют относительно небольшие размеры (от 3 до 12 м в диаметре, при глубине 2—4 м). По бортам они окружены оплывшими отвалами. В отвалах и материале заполнения горных выработок фиксируются обломки древесного угля, костей животных и фрагменты керамических сосудов срубного времени [Богданов и др., 2018].

Древние выработки прорывают мало-мощный слой аллювиально-делювиальных наносов мощностью 0,2—1 м и доходят до рудоносных песчано-мергелистых отложений татарского яруса, представленных скоплением небольших (0,5—1,0 м в длину при мощности 0,1—0,3 м) линзовидных тел плохо сцементированного сероцветного мергелистого алевролита, в котором при-

сутствуют сульфидно-карбонатные желваки или стяжения меди.

На рис. 1, а показан снимок с высоты 50 м небольшого участка 70 × 70 м, в пределах которой видны 12 карьеров, а на рис. 1, б в том же масштабе приведен вид на участок, где производилась переработка руды, расположены отвалы и ямы-печи. Пожог в ямах производили для обеспечения контроля за теплотехническими процессами в условиях сильных ветров на водоразделах степных рек. Зольные материалы вместе с обогащенными рудными концентратами высыпались на расположенные рядом шламовые отвалы, где и происходила финальная сортировка сырья, подготовленного к плавке. Современная высота шламовых отвалов от 0,5 до 2 м, в древности они, вероятно, могли достигать 3—4 м [Богданов, 2019].

Магнитная, георадарная и детальная топографическая съемки проведены на двух участках, которые включают небольшой карьер рудника и расположенные на удалении от него рудный склад, шламовые

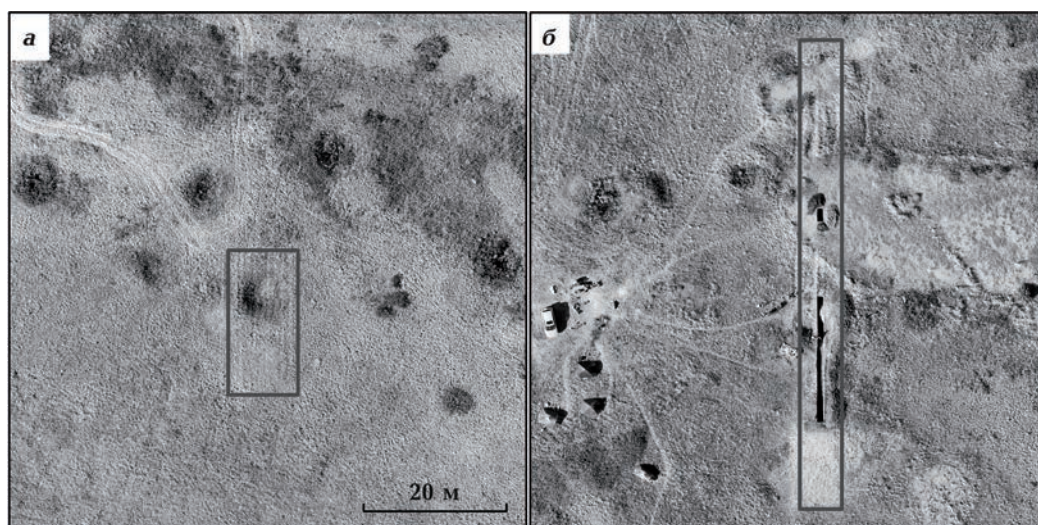


Рис. 1. Современный вид Белоусовского ГПК (фотоснимки с квадрокоптера, июль 2019 г.): а — участок с горными выработками; б — участок шламовой площадки и ямы-печи (с выкопанными разведочными канавами). Черными прямоугольниками выделены контуры геофизических работ.

Fig. 1. Modern view of the Belousovsky mining and processing complex (photographs from a quadrocopter, July 2019): а — a section with mine workings; б — a section of a slurry platform and a pit-furnace (with excavated exploration ditches). The areas marked with black rectangles are the outlines of geophysical works.

площадки и яму-печь. Фотографии этих объектов приведены на рис. 1 и 2. После выполнения геофизических съемок проведены небольшие разведочные горные выработки и построены геологические разрезы, а также отобраны образцы для геохимических исследований и археометаллургических экспериментов по выплавке меди [Богданов, 2019, 2020].

Методика измерений. Градиентная магнитная съемка проведена с использованием магнитометра ММПГ-1 (Санкт-Петербург, Россия). Магнитные датчики располагались вертикально на двух уровнях: нижний датчик — на высоте 0,35 м, а верхний — на высоте 2 м. Данные измерений верхнего датчика использовались в качестве поля относимости для нижнего датчика. При построении магнитных карт используется разность показаний нижнего и верхнего датчиков, что позволяет исключить влияние естественных вариаций магнитного поля Земли. Измерения проводились по профилям, расстояние между которыми составляло 1 м, расстояние между точками измерения вдоль профиля составляло 0,5 м. Чтобы исключить ошибки, которые могут быть созданы оператором и записывающим оборудованием, все проходы были сделаны в одном направлении — с юга на север. В результате обзора получены аномалии модуля магнитной индукции, погрешность которых не превышает ± 1 нТл.

Для радиолокационной съемки использовался радар SIR-3000 (США). Георадарный метод основан на излучении широкополосных импульсов электромагнитных волн с последующим приемом отраженных сигналов. Отражения возникают на границах раздела сред с различной относительной диэлектрической проницаемостью грунтов. Мы провели наблюдения с набором антенн 400, 270 и 100 МГц на профилях, совпадающих с профилями магнитной съемки. Из-за неровности рельефа на участках антенны перемещались вдоль профилей в точечном режиме. Перед съемкой на карьере рудника были проведены следующие установки: расстояние между пикетами — 0,1 м, 10 трасс на метр, диапазон 0—170 нс, усиление сигнала по пяти точкам, количество выборок на трассу — 512. При профилировании ямы для обжига руды расстояние между пикетами выбрали 0,2 м и количество трасс на метр было снижено до 5.

Обработка данных съемки заключалась в приведении начала поверхности профиля к нулевому уровню и фильтрации: горизонтальной при установке максимального числа сканирований и вертикальной в полосе 300—25 МГц. Окончательное выделение отражающих границ проводилось в интерактивном режиме по максимальным амплитудам электромагнитных волн в соответствующих слоях, с использовани-



Рис. 2. Фотографии участков исследований: *а* — горная выработка с прибортовыми отвалами; *б* — вид шламовой площадки и ямы-печи для обогащения медной руды.

Fig. 2. Photos of research sites: *a* — mine workings with side dumps; *b* — view of the slurry platform and pit-furnace for the beneficiation of copper ore.

ем пакета программ [GSSI-Radan-7, 2017].

Для измерений высот рельефа использовался двухчастотный GPS навигатор Trimble 5700 (США) с двумя датчиками. Один датчик использовался как «база» и устанавливался неподвижно, а другой прибор применялся как «ровер» и перемещался вдоль профиля. Погрешность определения превышений рельефа не превышала $\pm 0,1$ м.

Результаты исследований на карьере рудника. В настоящее время края рудника обвалились, и впадина карьера почти полностью засыпана рыхлыми отложениями и переработанными грунтами. Современная глубина карьера не превышает 0,8 м. Топографическая и магнитная съемки рудника проведены на карьере, размеры которого составляли 10×20 м. Результаты приведены на рис. 3.

Магнитные аномалии, полученные с помощью градиентной съемки, представлены на рис. 3, б. Проведена фильтрация данных для того, чтобы разделить локальные аномалии с размерами менее 2 м и более 2 м (рис. 3, в, г). Карьер окружен слабыми положительными аномалиями, которые созданы грунтами, выкопанными из карьера во время его разработки. Их интенсивность достигает 10 нТл. Над карьером наблюдается отрицательная аномалия интенсивностью -16 нТл. Контуры этой аномалии практически совпадают с краями современного карьера (см. рис. 3, в), а экстремальная зона расположена над южной частью впадины. Наличие магнитных аномалий свидетельствует о достаточно большом количестве железа в руде.

На карьере было проложено 5 профилей GPR длиной 20 м, расстояние между профилями составляло 2 м (см. рис. 3, а). Для выбора антенны с оптимальной цент-

ральной частотой проведены измерения с набором антенн 400, 270 и 100 МГц. Анализ полученных разрезов для различных частот показал, что наиболее эффективной оказалась съемка, проведенная с антенной 100 МГц, с помощью которой получены разрезы до глубины более 8 м.

После проведения геофизических съемок в центральной части карьера для геологических исследований был заложен шурф размером 2×2 м (см. рис. 3, а). Результаты раскопок были использованы для определения скорости электромагнитных волн и перехода на разрезах от временной шкалы к шкале глубин. Скорость электромагнитной волны зависит от относительной диэлектрической проницаемости грунта. Критерием правильности выбора этого физического параметра является совпадение глубины контрастной отражающей границы на радарограмме и расположение среди рыхлых грунтов обломков более проводящих пород на геологическом разрезе.

На рис. 4, а показан фрагмент волнового разреза по профилю вдоль западной стенки шурфа. Возле нее на глубине 1,3—1,4 м были обнаружены плиты из плотного аркозового песчаника, которые возможно служили ступенями для спуска в карьер (рис. 4, в). Поскольку относительная диэлектрическая проницаемость аркозового песчаника значительно меньше, чем у вмещающих грунтов, на радарограмме наблюдаются значительное увеличение амплитуды электромагнитной волны и отражения обратной полярности в отличие от исходного сигнала (см. рис. 4, а и б). Таким образом, диэлектрическая проницаемость исследуемой среды была принята 11, что соответствует скорости электромагнитных волн 0,09 м/нс. Такое значение соответствует табличным данным для алевролитов и

→

Рис. 4. Сравнение результатов георадарной и геологической съемки вдоль западной стенки шурфа: а — фрагмент радарограммы; б — волновая картина вдоль трассы для пикета 13 м; в — схема геологического строения западного борта разведочного шурфа. 1 — слабогумусированная масса с прослоями гравия; 2 — плохо сцементированный мергелистый алевролит с медистыми стяжениями; 3 — алевро-мелкий гравий; 4 — песчано-гравийная смесь; 5 — контуры археологических зачисток; 6 — гравийно-галечная смесь разнотипных пород; 7 — плиты плотного аркозового песчаника; 8—10 — мелкозернистый песчаник.

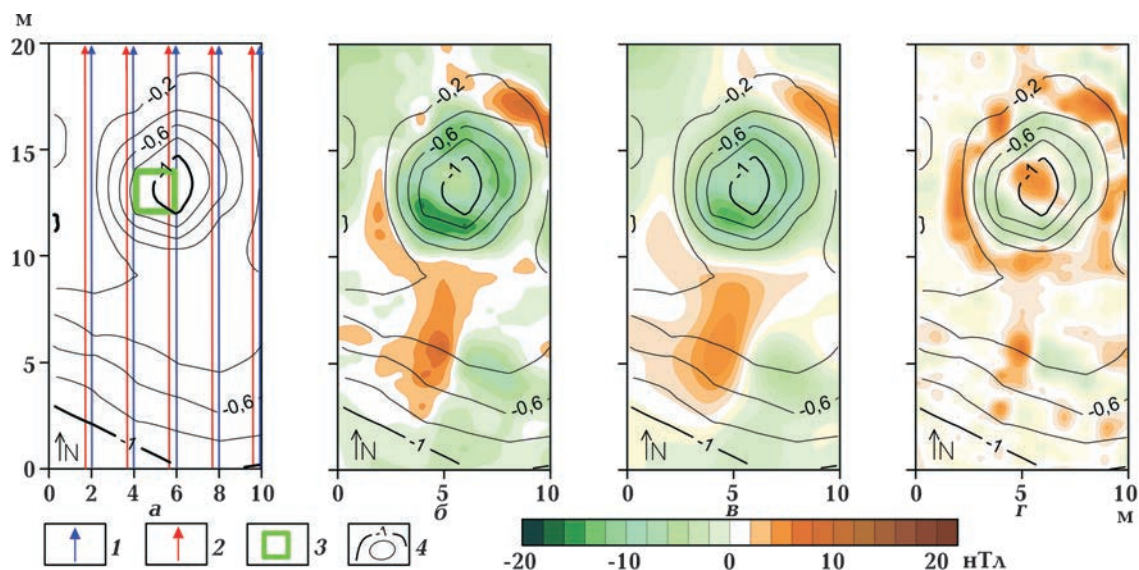


Рис. 3. Результаты геофизических исследований участка с древней выработкой: *а* — ситуационный план, изолинии высот проведены через 0,2 м; *б* — наблюдаемые магнитные аномалии и полученные в результате фильтрации; *в* — магнитные аномалии протяженностью более 2 м; *г* — локальные аномалии. 1 — профили GPR съемки с антеннами 400 и 270 МГц (стрелки показывают направление съемки); 2 — профили GPR съемки с антенной 100 МГц; 3 — контуры разведочного шурфа; 4 — изолинии рельефа (в м).

Fig. 3. Results of geophysical studies of a site with an ancient working: *a* — situational plan, isolines of heights are drawn every 0.2 m; *b* — observed magnetic anomalies and obtained as a result of filtration; *v* — magnetic anomalies with a length of more than 2 m; *r* — local anomalies. 1 — GPR profiles of surveying with antennas 400 and 270 MHz (arrows show the direction of survey); 2 — profiles of GPR survey with a 100 MHz antenna; 3 — contours of the exploration pit; 4 — contours of the relief (in meters).

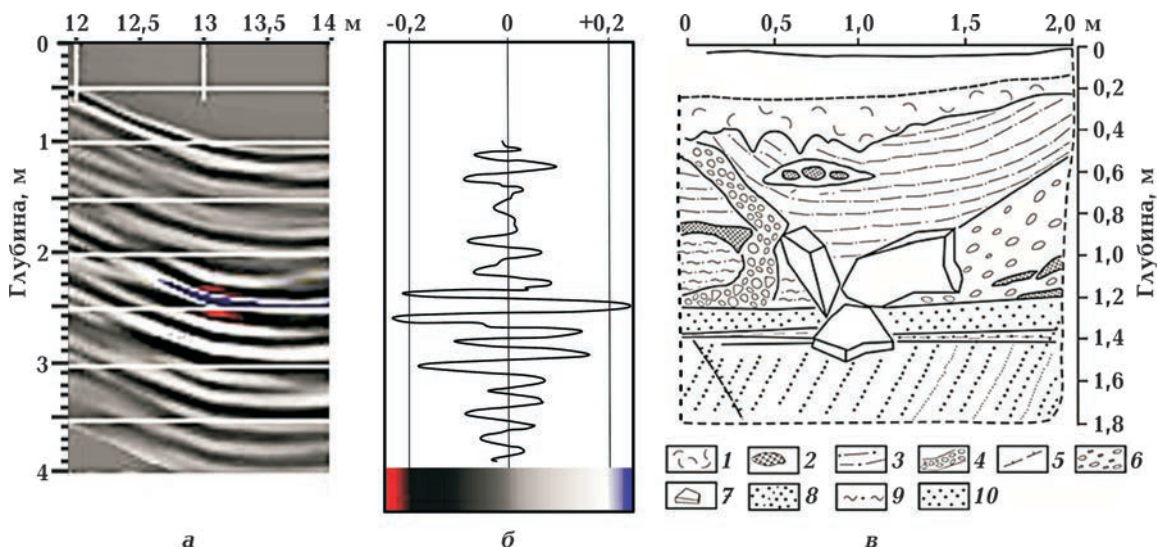


Fig. 4. Comparison of the results of georadar and geological surveys along the western wall of the pit: *a* — fragment of the radarogram; *b* — wave pattern along the route for a picket 13 m; *v* — a diagram of the geological structure of the western side of the exploration pit. 1 — weakly humified mass with interlayers of gravel; 2 — poorly cemented marly siltstone with cuprous concretions; 3 — silty-fine gravel; 4 — sand and gravel mixture; 5 — contours of archaeological clean-ups; 6 — gravel-pebble mixture of different types of rocks; 7 — slabs of dense arkose sandstone; 8–10 — fine-grained sandstone.

песчано-гравийной смеси [Coneyers, 2016].

На радарных профилях дно древнего карьера отмечается по смене волновой картины. На рис. 5 красным цветом выделен контур древнего карьера. Кроме того, интенсивные отражения электромагнитных волн отчетливо прослеживаются вдоль всех профилей на глубинах 4,5—5,5 м от земной поверхности. Возможно, там залегает слой плотного аркозового песчаника, плиты из которого были использованы при строительстве карьера. На радарограмме отражаются кровля и подошва слоя, и его мощность составляет 0,4—0,7 м.

Объемная модель дна древнего карьера была построена после интерполяции границ отражений по всем профилям (рис. 6). В бронзовом веке глубина рудника достигала 4 м. Карьер имел крутые края с севера, востока и юга, а на западе рельеф был более пологий. Вероятно, вход в карьер находился с западной стороны. В настоящее время в карьере мощность рыхлых отложений достигает 3 м. Это отчетливо видно по графикам современного и древнего дна

карьера на разрезах 1—2 и 3—4, показано на рис. 6, в, г.

По нашим оценкам, общий объем вынутого грунта составил 40—45 м³. Из них примерно треть (13—15 м³, или приблизительно около 25—30 т) приходилась на добываемые мергелистые алевролиты. С учетом общего числа горных выработок за время эксплуатации Белоусовского горно-перерабатывающего комплекса могло быть добыто порядка 2—2,5 тыс. т рудной массы.

Результаты исследований ямы-печи и двух площадок для обогащения руды.

Участок исследований имел протяженность 65 м и ширину 6 м. На этой площади расположены несколько технологических объектов: отвал пород, яма для обжига руды и две шламовые площадки, предназначенные для ее обогащения. Для исследований была проведена градиентная магнитная съемка по сети из 7 профилей, проложенных через 1 м, с шагом измерений 0,5 м (рис. 7). По центральному профилю (на отметке абсцисс 3 м, рис. 7, а) была проведена GPR

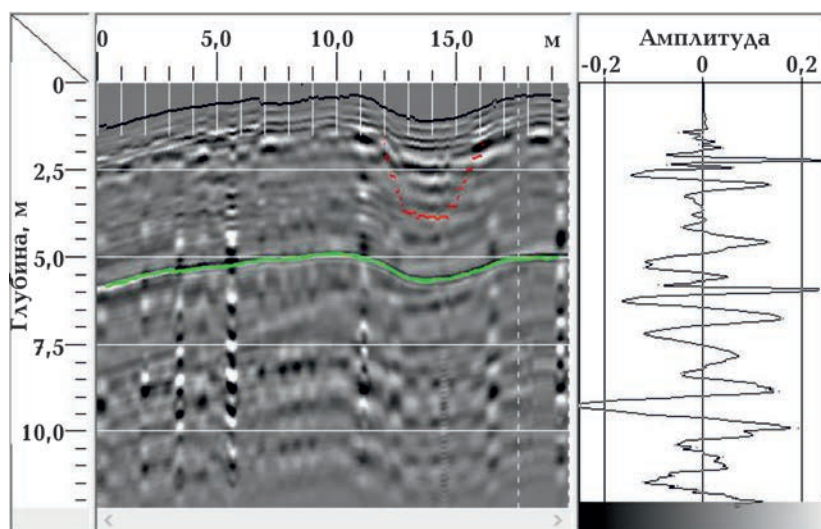


Рис. 5. Результаты георадарной съемки центрального профиля на отметке 6 м (см. рис. 3, а). Красным цветом показан контур древнего карьера, зеленым — слой, предположительно состоящий из плотного аркозового песчаника.

Fig. 5. Results of GPR survey of the central profile at a height of 6 m (see Fig. 3, a). The contour of the ancient quarry is shown in red, the layer, presumably consisting of dense arkose sandstone, is marked in green.

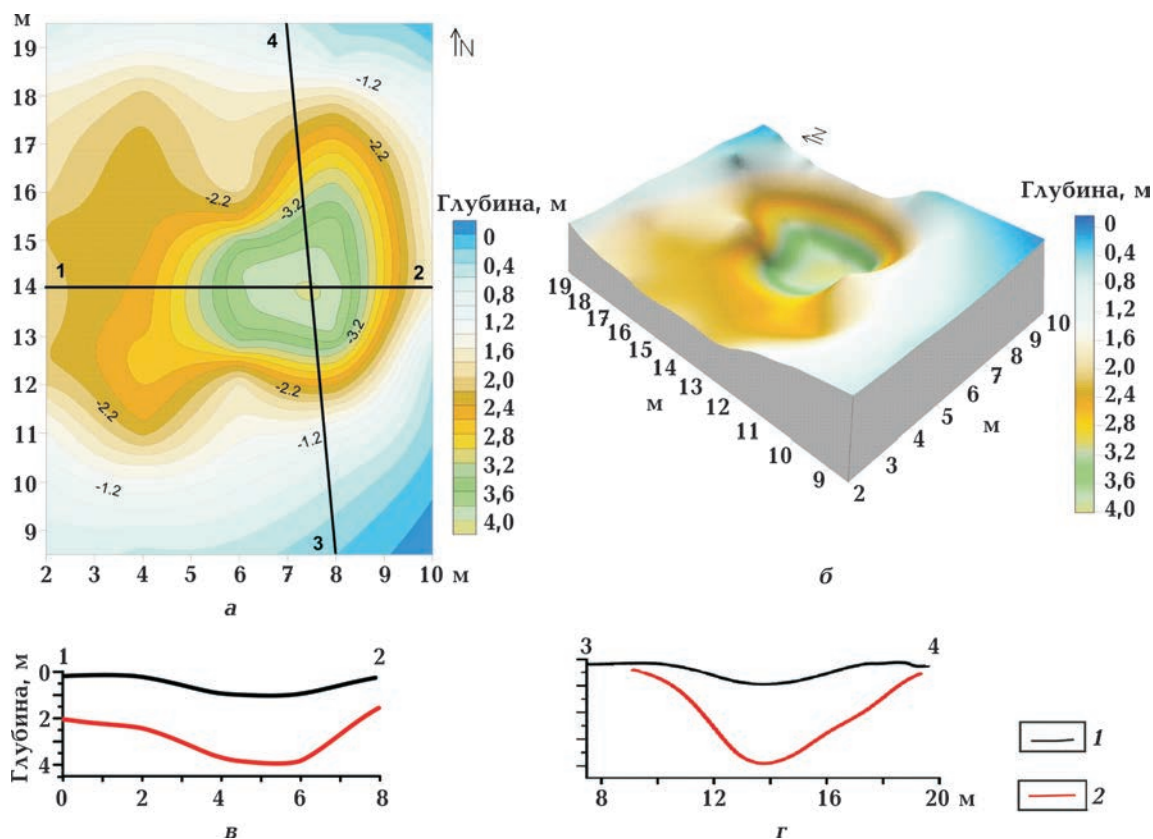


Рис. 6. Модель древнего карьера: *а* — в плане; *б* — в 3D формате; *в* — разрез по профилю 1—2; *г* — разрез по профилю 3—4. 1 — контуры современной поверхности; 2 — контуры дна выработки в бронзовом веке.

Fig. 6. Model of an ancient quarry: *a* — in plan; *б* — in 3D format; *в* — section along profile 1—2; *г* — section along the profile 3—4. 1 — the contours of a modern surface; 2 — contours of the bottom of the mine in the Bronze Age.

съемка с антенной 100 МГц, расстояние между пикетами 0,1 м.

Участок находился на склоне большого холма, на профилях перепад высот составлял около 4,5 м (см. рис. 7, *а*). Карта полученных магнитных аномалий показана на рис. 7, *б*. Над площадками для сортировки и обогащения руды отсутствуют заметные магнитные аномалии, интенсивность небольших локальных аномалий лежит в пределах от -3 до $+3$ нТл (см. рис. 7, *б*). Аномалии, связанные с горно-обоганительным производством, наблюдаются в пределах ординат 15—40 м. Для этого участка магнитные карты построены в более крупном масштабе. Мы провели фильтрацию исходных данных и выделили аномалии протяженностью более 2 м и локальные

аномалии менее 2 м. Карты дополнены изолиниями рельефа и приведены на рис. 7, *в* и *г*.

Над ямой для отжига медной руды наблюдается отрицательная аномалия с интенсивностью 12 нТл, причем эпицентральной часть аномалии смещена к северу от центра впадины (см. рис. 7, *в*). Интенсивные положительные локальные аномалии 10—15 нТл практически кольцом окружают яму (рис. 7, *г*). Более слабые локальные аномалии 3—8 нТл наблюдаются к северу и югу от ямы, а также внутри ямы. Интенсивность аномалий в окрестности ямы в 2—3 раза превосходит интенсивность вокруг карьера. Значительное увеличение магнитных свойств отвалов является следствием обжига руды и процессами окисления же-

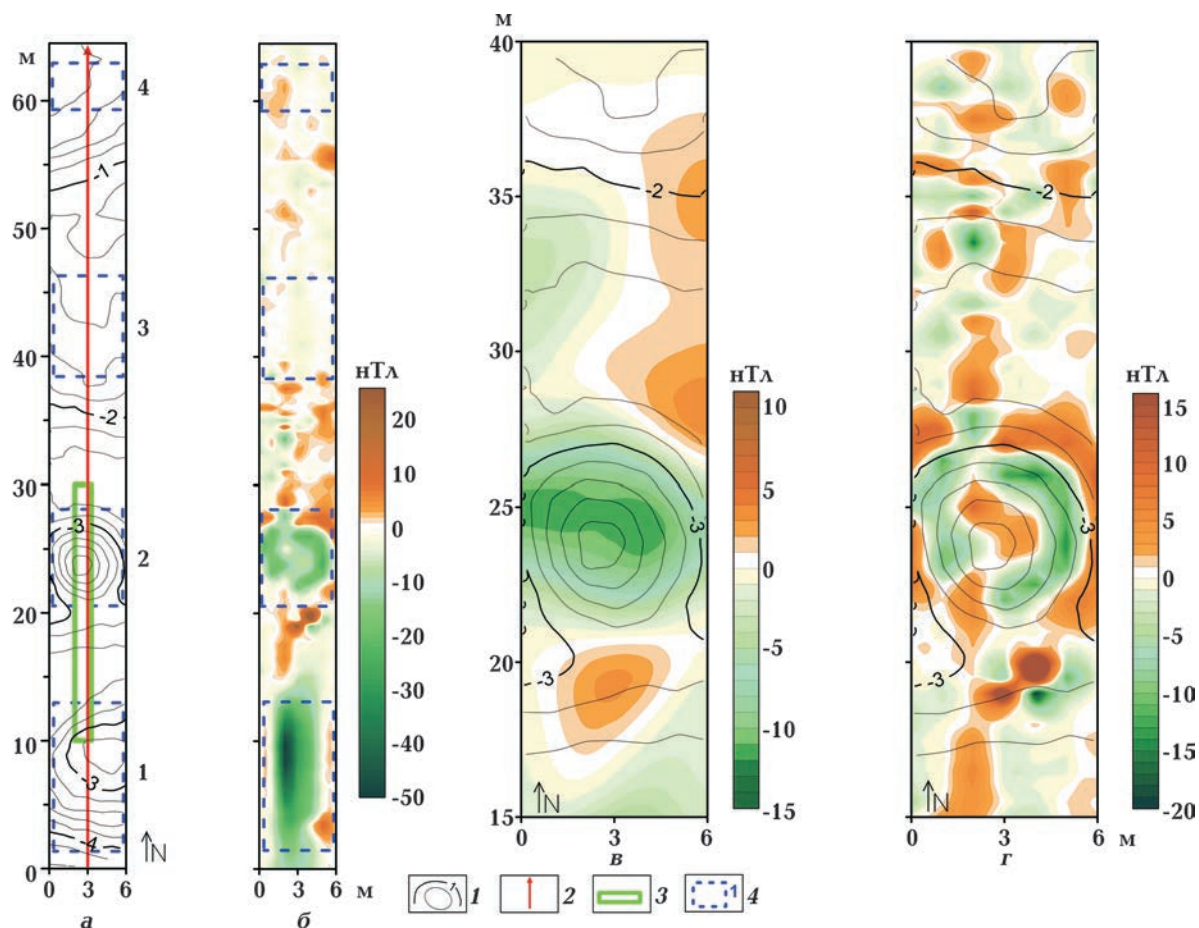


Рис. 7. Результаты магнитометрической съемки участка ямы-печи: *а* — ситуационный план, изолинии высот проведены через 0,2 (1 — отвал пород, 2 — яма для обжига руды, 3 и 4 — площадки для обогащения руды); *б* — наблюдаемые магнитные аномалии, *в* — аномалии протяженностью более 2 м; *г* — локальные магнитные аномалии протяженностью менее 2 м (1 — изолинии рельефа (в м), 2 — GPR профиль, 3 — геологическая канава, 4 — границы объектов).

Fig. 7. Results of magnetometric survey of the pit-furnace section: *a* — situational plan, isolines of heights are drawn in 0.2 (1 — rock dump, 2 — pit for roasting ore, 3 and 4 — sites for ore beneficiation); *б* — observed magnetic anomalies, *в* — anomalies longer than 2 m; *г* — local magnetic anomalies less than 2 m long (1 — relief contours (in meters), 2 — GPR profile, 3 — geological ditch, 4 — boundaries of objects).

леза. В результате из слабомагнитных минералов, содержащих железо (гематита, гидроокислов, пирротин и др.), образовался магнетит, имеющий высокие магнитные свойства. Наличие многочисленных магнитных аномалий вокруг ямы указывает на то, что первичная сортировка обожженной руды производилась вблизи ямы.

Георадарный разрез показан на рис. 8. В современном рельефе яма имеет минимальную отметку глубины 3,7 м (на разрезе нулевая отметка находится у северного края профиля). Интенсивные отражения

электромагнитных волн в пределах ямы прослеживаются до глубины 6,7—7,0 м. Во время функционирования яма для обжига руды имела конусообразную форму со «ступеньками» для удобства закладки рудного материала. Глубина ямы около 3 м, диаметр у основания достигал 4—5 м и на глубине сокращался до 1—1,5 м (рис. 8, б). Объем одноразовой загрузки материала (руды и дров) в данную конструкцию не мог превышать 13—15 м³.

После геофизических съемок была выкопана канава (ее положение показано на

рис. 7, а), изучены грунты, заполняющие яму, и построены геологические разрезы вдоль стенок канавы. Фрагмент разреза в пределах ямы показан на рис. 8, в. Границы ямы-печи, установленные в раскопе, хорошо соответствуют результатам GPR исследования.

Вдоль всего профиля на разрезе отчетливо прослеживаются интенсивные от-

ражения на глубине около 4,5 — 5 м от современной земной поверхности, предположительно вызванные слоем плотного аркозового песчаника.

Заключение. Проведенные исследования позволили получить новые данные о строении древних выработок и сопутствующих технологических сооружений горно-перерабатывающего комплекса брон-

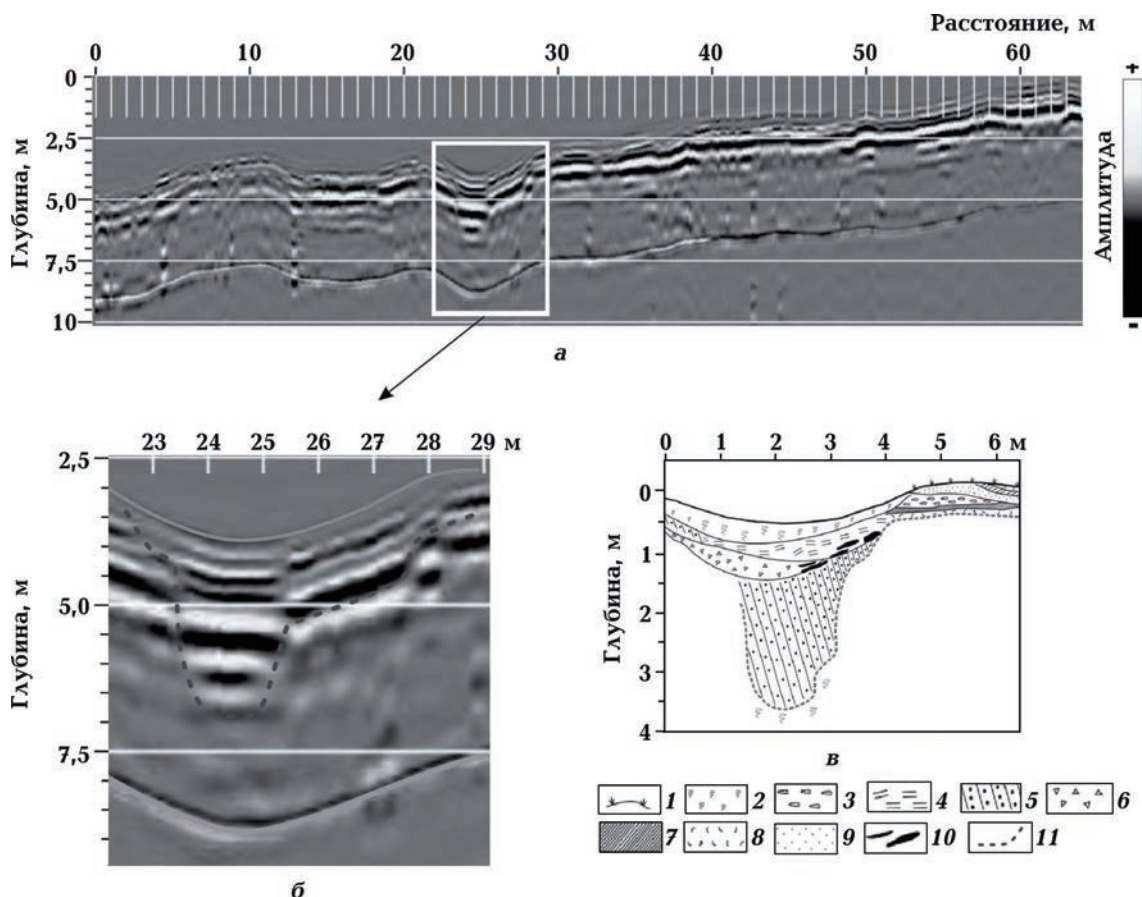


Рис. 8. Результаты георадарной съемки участка ямы-печи: а — радарограмма вдоль профиля GPR; б — результаты интерпретации отражений, полученных от бортов ямы (пунктир) и слоя более плотного аркозового песчаника (серый цвет); в — геологический разрез вдоль стенки канавы: 1 — современный почвенный слой; 2 — наносы (осыпь); 3 — щебень песчаника; 4 — почвенно-гравийная смесь; 5 — песчаник красноцветный; 6 — дресвяно-щебнистый материал; 7 — плохо сцементированный серый алевролит; 8 — слабогумусированная масса с гравием; 9 — песчаник мелкозернистый; 10 — дресва обожженного серого алевролита; 11 — границы ямы для обжига руды.

Fig. 8. Results of georadar survey of the pit-furnace section: а — radarogram along the GPR profile; б — the results of the interpretation of reflections obtained from the pit sides (dotted line) and a layer of denser arkose sandstone (grey); в — geological section along the ditch wall: 1 — modern soil layer; 2 — sediments (talus); 3 — crushed sandstone; 4 — soil and gravel mixture; 5 — red sandstone; 6 — rubble-gravelly material; 7 — poorly cemented gray siltstone; 8 — slightly humus mass with gravel; 9 — fine-grained sandstone; 10 — gruss of burnt gray siltstone; 11 — boundaries of the pit for roasting ore.

зового века Белоусовский, находящегося в степной зоне Южного Приуралья.

По результатам магнитной съемки отвалы грунтов вокруг ямы-печи и древнего карьера характеризуются положительными аномалиями разной степени интенсивности, а над впадинами наблюдается отрицательная аномалия. Наличие магнитных аномалий свидетельствует, что в медной руде содержится достаточно большое количество железа.

Интенсивность магнитных аномалий в окрестности ямы для обогащения руды в 2—3 раза превосходит интенсивность аномалий вокруг карьера. Это вызвано тем, что в результате обжига руды происходило окисление железа. Скорее всего, из слабомагнитных минералов железа (гематита, гидроокислов, пирротинов и других) образовался магнетит, имеющий высокие магнитные свойства. Выявленные многочисленные магнитные аномалии вокруг ямы указывают на то, что первичная сортировка обожженной руды производилась вблизи ям.

По результатам георадарной съемки древнего рудника и ямы-печи восстановлены их формы в историческое время. Результаты интерпретации данных гео-

физических съемок подтверждены серией разведочных горных выработок.

Яма-печь для обжига руды имела конусообразную форму со ступеньками для удобства загрузки и выгрузки руды. Диаметр у основания достигал 5 м, основная шахта имела диаметр 1—1,5 м, а глубина — около 3 м, объем ямы не превышал 13—15 м³.

Поперечные размеры древней выработки составляли 7—9 м, а глубина достигала 4 м. Она имела крутые борта с севера, востока и юга, на западе рельеф более пологий. Вход на рудник находился с западной стороны. По нашей оценке, количество добытого сырья в этом руднике составило 25—30 т. С учетом общего числа горных выработок за время эксплуатации Белоусовского горно-металлургического комплекса было извлечено около 2—2,5 тыс. т рудной массы.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность С.В. Богданову и В.В. Ткачеву, под руководством которых были выбраны исторические горно-металлургические объекты для наших исследований.

Список литературы

- Анкушев М.Н., Юминов А.М., Зайков В.В., Носкевич В.В. Медные рудники бронзового века в Южном Зауралье. *Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Геоархеология. Этнология. Антропология.* 2018. Т. 23. С. 87—110. <https://doi.org/10.26516/2227-2380.2018.23.87>.
- Блинов И.А. Химический и минеральный состав сульфидных конкреций из медистых песчаников Михайловского и Белоусовского древних рудников (Оренбургское Приуралье). *Минералогия.* 2020. № 6(4). С. 35—45. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2020-6-4-2>.
- Богданов С.В. Технологии горно-металлургического производства эпохи раннего металла Северной Евразии с позиций экспериментальной археологии. В сб.: *Феномены культур раннего бронзового века степной и лесостепной полосы Евразии: пути культурного взаимодействия в V—II тыс. до н. э.* Оренбург: Изд-во ОГПУ, 2019. С. 161—174.
- Богданов С.В. Технологические алгоритмы пастушеской модели металлопроизводства бронзового века степных регионах Северной Евразии. *Урал. истор. вестник.* 2020. № 4(69). С. 6—14.
- Богданов С.В., Ткачев В.В., Юминов А.М., Авраменко С.В. Геоархеологическая система исторических медных рудников Приуральского (Каргалинского) степного горно-металлургического центра. *Геоархеология и археологическая минералогия.* 2018. Т. 5. С. 121—133.
- Бондарь К.М., Хоменко Р.В., Чернов А.П., Кукса Н.В. Результаты георадарного обследо-

- дования Ильинской церкви — усыпальницы Богдана Хмельницкого в Субботове. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 3. С. 175—194. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204709>.
- Журбин И.В. Геофизика в археологии: методы, технология и результаты применения. Ижевск: Изд. Удмурт. ин-т истории, языка и литературы УрО РАН, 2004. 152 с.
- Лепехин И.И. Дневные записки путешествия доктора и Академии Наук адъюнкта Ивана Лепехина по разным провинциям Российского государства в 1770 году. СПб.: Тип. Императорской АН, 1772. 359 с.
- Носкевич В.В., Федорова Н.В., Ткачев В.В., Байтлеу Д.А., Юминов А.М. Реконструкция древних медных карьеров бронзового века по георадарным данным. *Геофизика*. 2017. № 1. С. 56—62.
- Носкевич В.В., Федорова Н.В. Использование метода георадиолокации для исследований древнего медного рудника «Воровская яма» на Южном Урале. *Изв. Урал. гос. горного ун-та*. 2018. Вып. 4(52). С. 61—67. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-61-67>.
- Рычков Н.П. Журнал или Дневные записки путешествия капитана Рычкова по разным провинциям Российского государства в 1769 и 1770 году. СПб.: Тип. Императорской АН, 1770. 220 с.
- Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 192 с.
- Черных Е.Н. (Ред.). Каргалы. Т. I. Геолого-географические характеристики. История открытий, эксплуатации и исследований. Археологические памятники. Москва: Языки славянской культуры, 2002. 112 с.
- Черных Е.Н. (Ред.). Каргалы. Т. V. Феномен и парадоксы развития. Каргалы в системе металлургических провинций. Потаенная (сакральная) жизнь архаичных горняков и металлургов. Москва: Языки славянской культуры, 2007. 200 с.
- Черных Е.Н. Пути и модели развития археометаллургии (Старый и Новый Свет). *Российская археология*. 2005. № 4. С. 49—60.
- Юминов А.М., Богданов С.В., Ткачев В.В., Авраменко С.В., Манбетова Г.Р. Геохимическая характеристика руд исторических медных рудников степного Приуралья. *Геоархеология и археологическая минералогия*. 2017. Т. 4. С. 118—123.
- Berseneva, N.A., Epimakhov, A.V., Noskevich, V.V., Fedorova, N.V. & Tkachev, V.V. (2016). Reconstruction of the Ancient Bronze Age Copper Quarries Using GPR. *23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience: Conference Proceedings* (pp. 1—4).
- Conyers, L.B. (2016). *Ground-penetrating Radar for Geoarchaeology. Analytical Methods in Earth and Environmental Science*. New York: Wiley Publ., 160 p.
- Goodman, D., & Piro, S. (2013). *GPR Remote Sensing in Archaeology*. Springer, 233 p.
- GSSI-RADAN-7 Manual. (2017). Geophysical Survey Systems, Inc. Nashua, NH, USA. Retrieved from <https://www.geophysical.com/wp-content/uploads/2017/10/GSSI-RADAN-7-Manual.pdf>.
- Elsayed, I.S., Alhussein, A.B., Gad, E., & Mahfuuz, A.H. (2014). Shallow seismic refraction, two-dimensional electrical resistivity imaging, and ground penetrating radar for imaging the ancient monuments at the western shore of old Luxor city, Egypt. *Archaeological Discovery*, 2(2), 31—43. <https://doi.org/10.4236/ad.2014.22005>.
- Noskewich, V.V., Fedorova, N.V., & Yuminov, A.M. (2019). Application of GPR for the reconstruction of the copper mine of the Bronze in the Southern Trans-Ural of Russia. *25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience: Conference Proceedings* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902372>.
- Yuminov, A.M., Blinov, I.A., & Guzairova, A.E. (2019). Mineral Composition of Ores and Primary Processing Products of the Ancient Mikhailovsky Mine (Central Orenburg Region). *Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy* (pp. 90—95). Springer. https://doi.org/10.007/978-3-030-48864-2_13.

Topography and reconstruction of historical mines of the Kagarlinsk mining-metallurgical center (Bronze Age)

V. V. Noskevich¹, N. V. Fedorova¹, A. M. Yuminov², 2021

¹Yu. P. Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

²South Ural Federal Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass, Russia

Kagarlinsk copper deposits have been worked out since IV millennium BC and till the end of II millennium BC in the steppes of the South Urals and a huge amount of copper have been recovered from their ores in the Bronze Age. Geophysical studies have been conducted in the south periphery of the Kagarlinsk ore field not far from Belousovka village at the mining-processing complex with the length of 900—1000 m and 30—70 m size across. Something like a hundred of small open-cut mines from 3 to 12 m in diameter are fixed in this area with near side mine dumps, sites for assortment of extracted ore adjoined at stove pits 3—5 m in diameter for burning up lump ores. Thorough topographic, gradient magnetic and geo-radar surveys have been fulfilled in areas where typical objects: open-cut mine, a pit for pilot burning up ores, slime sites and ore store are situated. As a result new data have been obtained on the structure of ancient outputs and associated technological facilities. Numerous magnetic anomalies revealed near the open-cut mine and a pit testify that copper ore encloses sufficient amount of iron and pilot assortment of the burned up ore took place near the pits. According to the results of geo-radar survey special features of pit-stove have been reconstructed and 3D model of the ancient open-cut mine built. A pit for burning up ore was cone-shaped with steps for comfort of loading and unloading ore. Its bottom diameter was 5 m, the principal mine was 1—1.5 m in diameter and depth rough 3 m, the volume of the pit did not exceed 13—15 m³. Transversal size of a mine was 7—9 m and the depth was up to 4 m. The open-cut mine had steep sides from the north, east and south and in the west the relief was mildly sloping. The entrance to the open-cut mine was from the west. Initial depth of the open-cut mine differed from the present day surface by 2—3 m. According to our appraisal the amount of extracted ore in this mine was 25—30 tons. Taking into account the overall number of mines some 2—2.5 thousand tons of bulk ore were extracted during operation of Belousovka mining-metallurgical complex.

Key words: mining-metallurgical complex, magnetic survey, georadiolocation, 3D model.

References

- Ankushev, M.N., Yuminov, A.M., Zaikov, V.V., & Noskevich, V.V. (2018). Copper mines of Bronze Age in Southern Trans-Urals. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Geoarkheologiya. Etnologiya. Antropologiya*, 23, 87—110. <https://doi.org/10.26516/2227-2380.2018.23.87> (in Russian).
- Blinov, I.A. (2020). Chemical and mineral composition of sulfide nodules from the Mikhaylovsky and Belousovsky ancient mines, Orenburg Cis-Urals. *Mineralogiya*, (6), 35—45. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2020-6-4-2> (in Russian).
- Bogdanov, S.V. (2019). Technologies of mining and metallurgical production of the early metal era of Northern Eurasia from the standpoint of experimental archeology. In *Phenomena of cultures of the Early Bronze Age of the steppe and forest-steppe zone of Eurasia: ways of cultural interaction in the 5th—3rd millennium BC* (pp. 161—174). Orenburg: Publ. house of the OGPU (in Russian).
- Bogdanov, S.V. (2020). Technological algorithms of the pastoral model of metal production in the steppe regions of North Eurasia in the Bron-

- ze Age. *Uralskiy istoricheskiy vestnik*, (4), 6—14 (in Russian).
- Bogdanov, S.V., Tkachev, V.V., Yuminov, A.M., & Avramenko, S.V. (2018). Geoarchaeological system of historical copper mines of the Priuralsky (Kargalinsky) steppe mining and metallurgical center. *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya*, 5, 121—133 (in Russian).
- Bondar, K.M., Khomenko, R.V., Chernov, A.P., & Kuksa, N.V. (2020). Results of the ground penetrating radar survey in the church of St. Elias — Bohdan Khmelnytsky burial vault in Subbotov. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(3), 175—194. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204709> (in Russian).
- Zhurbin, I.V. (2004). *Geophysics in archeology: methods, technology and application results*. Izhevsk: Ed. Udmurt Institute of History, Language and Literature, Ural Branch of RAS, 152 p. (in Russian).
- Lepekhin, I.I. (1772). *Day notes of the journey of the doctor and the Academy of Sciences of the adjunct Ivan Lepekhin to different provinces of the Russian state in 1770*. St. Petersburg: Printing house of the Imperial Academy of Sciences, 359 p. (in Russian).
- Noskevich, V.V., Fedorova, N.V., Tkachev, V.V., Baytleu, D.A., & Yuminov, A.M. (2017). Reconstruction of ancient quarries copper Bronze Age by GPR data. *Geofizika*, (1), 56—62 (in Russian).
- Noskevich, V.V., & Fedorova, N.V. (2018). Using the ground penetrating radar method for research of the ancient «Vorovskaya Yama» copper mine in the South Urals. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, (4), 61—67. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-61-67> (in Russian).
- Rychkov, N.P. (1770). *Journal or Day Notes of Captain Rychkov's voyage to different provinces of the Russian state in 1769 and 1770*. Petersburg: Printing house of the Imperial Academy of Sciences, 220 p. (in Russian).
- Starovoytov, A.V. (2008). *Interpretation of GPR data*. Moscow: Publ. house of Moscow University, 192 p. (in Russian).
- Chernykh, E.N. (Ed.). (2002). *Kargaly. Vol. I. Geological and geographical characteristics History of discoveries, exploitation and investigations Archaeological sites*. Moscow: Languages of Slavonic culture, 112 p. (in Russian).
- Chernykh, E.N. (Ed.). (2007). *Kargaly. Vol. V. Phenomenon and paradoxes of development Kargaly in the systems of metallurgical provinces hidden (sacral) life of archaic miners and metallurgists*. Moscow: Languages of Slavonic culture, 200 p. (in Russian).
- Chernykh, E.N. (2005). Ways and models of development of archaeometallurgy in the Old and New World. *Rossiyskaya arkheologiya*, (4), 49—60 (in Russian).
- Yuminov, A.M., Bogdanov, S.V., Tkachev, V.V., Avramenko, S.V., & Manbetova, G.R. (2017). Geochemical characteristics of ores of historical copper mines in the steppe Urals. *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya*, 4, 118—123 (in Russian).
- Berseneva, N.A., Epimakhov, A.V., Noskevich, V.V., Fedorova, N.V. & Tkachev, V.V. (2016). Reconstruction of the Ancient Bronze Age Copper Quarries Using GPR. *23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience: Conference Proceedings* (pp. 1—4).
- Conyers, L.B. (2016). *Ground-penetrating Radar for Geoarchaeology. Analytical Methods in Earth and Environmental Science*. New York: Wiley Publ., 160 p.
- Goodman, D., & Piro, S. (2013). *GPR Remote Sensing in Archaeology*. Springer, 233 p.
- GSSI-RADAN-7 Manual. (2017). Geophysical Survey Systems, Inc. Nashua, NH, USA. Retrieved from <https://www.geophysical.com/wp-content/uploads/2017/10/GSSI-RADAN-7-Manual.pdf>.
- Elsayed, I.S., Alhussein, A.B., Gad, E., & Mahfuuz, A.H. (2014). Shallow seismic refraction, two-dimensional electrical resistivity imaging, and ground penetrating radar for imaging the ancient monuments at the western shore of old Luxor city, Egypt. *Archaeological Discovery*, 2(2), 31—43. <https://doi.org/10.4236/ad.2014.22005>.

- Noskewich, V.V., Fedorova, N.V., & Yuminov, A.M. (2019). Application of GPR for the reconstruction of the copper mine of the Bronze in the Southern Trans-Ural of Russia. *25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience: Conference Proceedings* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902372>.
- Yuminov, A.M., Blinov, I.A., & Guzairova, A.E. (2019). Mineral Composition of Ores and Primary Processing Products of the Ancient Mikhailovsky Mine (Central Orenburg Region). *Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy* (pp. 90—95). Springer. https://doi.org/10.007/978-3-030-48864-2_13.

Топографія і реконструкція історичних копалень Каргалінського гірничо-металургійного центру (бронзовий вік)

В.В. Носкевич¹, Н.В. Федорова¹, А.М. Юмін², 2021

¹Інститут геофізики ім. Ю.П. Булашевича УрВ РАН, Єкатеринбург, Росія

²Південно-Уральський федеральний науковий центр мінералогії і геоєкології
УрВ РАН, Міасс, Росія

У степах Південного Уралу починаючи з IV тис. до н. е. і до кінця II тис. до н. е. розробляли Каргалінські мідні родовища. З їхньої руди в епоху бронзи було отримано величезну кількість міді. Геофізичні дослідження проведено на південній периферії Каргалінського рудного поля недалеко від селища Білоусівка на гірничопереробному комплексі, протяжність якого становить 900—1000 м за поперечника 30—70 м. На цій площі зафіксовано близько сотні невеликих відкритих кар'єрів діаметром від 3 до 12 м з прибортовими відвалами, майданчики для сортування добутої руди, суміжних з ямами-печами діаметром 3—5 м з пожогу кускових руд. Виконано детальне топографічне, градієнтне магнітне і георадарне знімання на ділянках, у межах яких розташовані типові об'єкти: рудник-кар'єр, яма попереднього пожогу руд, шламові майданчики і рудний склад. У результаті отримано нові дані щодо будови древніх виробок і супутніх технологічних споруд. Виявлення числених магнітних аномалій поблизу кар'єру і ями засвідчило, що в мідній руді міститься досить велика кількість заліза, первинне сортування обпаленої руди проводили поблизу ям. За результатами георадарного знімання відновлено особливості будови ями-печі, побудовано 3D модель давнього кар'єру. Яма для випалу руди мала конусоподібну форму зі сходами для зручності завантаження і вивантаження руди. Діаметр біля основи сягав 5 м, діаметр основної шахти — 1—1,5 м, а глибина — близько 3 м, об'єм ями не перевищував 13—15 м³. Поперечні розміри гірничої виробки становили 7—9 м, глибина сягала 4 м. Кар'єр мав круті борти з півночі, сходу та півдня, а на заході рельєф більш пологий. Вхід на рудник був із західного боку. Первинна глибина кар'єру відрізнялася від сучасної поверхні на 2—3 м. За нашим оціненням, кількість видобутої руди в цій гірничій виробці становила 25—30 т. З урахуванням загального числа гірничих виробок за час експлуатації Білоусівського гірничо-металургійного комплексу було вилучено близько 2—2,5 тис. т рудної маси.

Ключові слова: гірничо-металургійний комплекс, магнітне знімання, георадіолокація, 3D модель.