Известия Уральского государственного горного университета. 2018. Вып. 4(52). С. 61-67

УДК 550.8.056 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-61-67

Использование метода георадиолокации для исследований древнего медного рудника «Воровская яма» на Южном Урале

Владислав Витальевич НОСКЕВИЧ[*],
Наталья Васильевна ФЕДОРОВА[**]

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

Актуальность. Неотъемлемой частью исследований в археологии стали геофизические методы, которые позволяют изучать погребенные памятники без разрушения почвенного слоя и дают возможность более целенаправленно определять место будущих дорогостоящих и трудоемких раскопок археологов. В степной зоне Южного Урала и Мугоджар известно около трех десятков древних медных рудников, разработка которых происходила в бронзовом веке. В настоящее время дно покрыто толстым слоем наносов, а борта карьеров оплыли. При исследовании древних рудников актуально определить рельеф карьеров и локализовать места добычи руды во время их эксплуатации, что позволяет провести оценки количества добытой руды и выплавленной меди.

Цель исследований. Выделение методом георадиолокации отражающих границ между рыхлыми отложениями наносов и скальными породами медного карьера бронзового века «Воровская Яма», построение объемной модели древнего карьера и определение места добычи руды.

Обоснование использования метода георадиолокации и методика исследований. Эффективность метода георадиолокации зависит от контраста диэлектрической проницаемости слоев в исследуемой среде. В данном случае это осадочный комплекс, представленный техногенными грунтами, и коренные породы, которые и определяют поверхность карьера во время его разработки. Коренные породы имеют значительный контраст диэлектрической проницаемости по сравнению с осадочным комплексом как минимум в два раза. Это обстоятельство позволяет выделить отражения от границы коренных пород. Съемка методом георадиолокации на карьере «Воровская Яма» проведена георадаром SIR-3000 по девяти параллельным профилям длиной 9–20 м с расстоянием между профилями 2 м. На профилях съемка проводилась с шагом между пикетами 0,1 м. Для корректной интерпретации результатов и учета современного рельефа была проведена топографическая съемка. После обработки данных съемки на профилях построены георадарные разрезы.

Результаты исследований. После интерпретации на разрезах выделено два георадарных комплекса: нижний, который обусловлен кровлей коренных пород, и верхний, связанный с техногенными или переработанными грунтами. Отмечаются слабые отражающие границы в зоне верхнего комплекса, которые предположительно вызваны следами отвалов, погребенных канав и шурфов. Основными «индикаторами» при выделении границы между техногенным грунтом и коренными породами на георадарных разрезах является смена волновой картины отражений в этих средах, а также угловое несогласие осей синфазности отражений между ними. После интерполяции границ между профилями построена объемная модель рельефа рудника в период его разработки. Мощность наносов, образовавшихся к настоящему времени, варьирует в пределах карьера на кромке выработки от 0,5–1 м до 3 м в забое. Максимальная глубина карьера в древности была 7 м.

Выводы. По результатам георадарной съемки на руднике под толстым слоем более поздних наносов удалось уверенно определить рельеф коренных пород. Построена объемная модель древнего карьера, локализовано место добычи руды. Эти данные позволили оценить глубину и объем выработок в период разработки месторождения меди в бронзовом веке.

Ключевые слова: геофизические методы, георадар, георадиолокация, модель, медный рудник, бронзовый век, Южный Урал.

Введение

В последние десятилетия геофизические методы активно используются при изучении археологических памятников [1–3], в том числе и древних металлургических комплексов. В настоящее время в степной зоне Южного Урала и Мугоджар известно несколько десятков медных древних рудников разного типа, разработка которых происходила в эпоху бронзового века [4–9]. По предварительным расчетам на них было добыто приблизительно 55 тыс. т медной руды, в которой содержалось около 3,5 тыс. т металла [10]. За прошедшие века борта древних карьеров оплыли, и дно рудников и выработки с рудной минерализацией были засыпаны переработанными грунтами и осадочными породами [11]. Для исследований археологических памятников в последние годы, в том числе и для определения рельефа древних карьеров стали активно использовать геофизические методы, в частности метод георадиолокации [1, 12].

В георадиолокации основным физическим параметром для расчленения толщи грунтов и разделения неоднородных слоев является диэлектрическая проницаемость [13–14]. Для осадочных пород при естественной влажности значения диэлектрической проницаемости в метровом диапазоне электромагнитных волн колеблются от 12 до 30, а для кристаллических пород значения диэлектрической проницаемости составляют 3–6 [15]. Следовательно, между кристаллическими коренными отложениями и осадочным комплексом наблюдается значительный контраст свойств. Это позволяет предположить эффективность использования георадарной съемки и определения отражений от коренных пород, которые определяют поверхность карьера во время его эксплуатации.

В работе проведено геофизическое исследование медного карьера бронзового века «Воровская Яма». С помощью метода георадиолокации определены отражающие границы между рыхлыми отложениями, скопившимися за прошедшие века на дне карьера, и скальными породами. В результате удалось восстановить рельеф древнего карьер, определить места разработок и оценить объем добытой руды.

Описание рудника

Рудник расположен в степной зоне Южного Урала, в 5 км к северо-востоку от поселка Зингейский. Форма карьера округлая с диаметром 30–40 м и глубиной 3–4 м (рис. 1, А). Его окружает прерывистый вал высотой 0,8–1,5 м и шириной 5–15 м. Название рудника «Воровская Яма» связано с его использованием на равнинной открытой местности как

[*] ubistu@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-0765-0183
[**] nataliavf50@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0648-0768



Рисунок 1. Рудник «Воровская Яма». А – современный вид рудника; Б – разбивка георадарных профилей на дне карьера.
Figure 1. "Vorovskaya Yama" ore district. А – up-to-date look of the ore district; Б – marking of ground-penetrating radar profiles at the bottom of the pit.

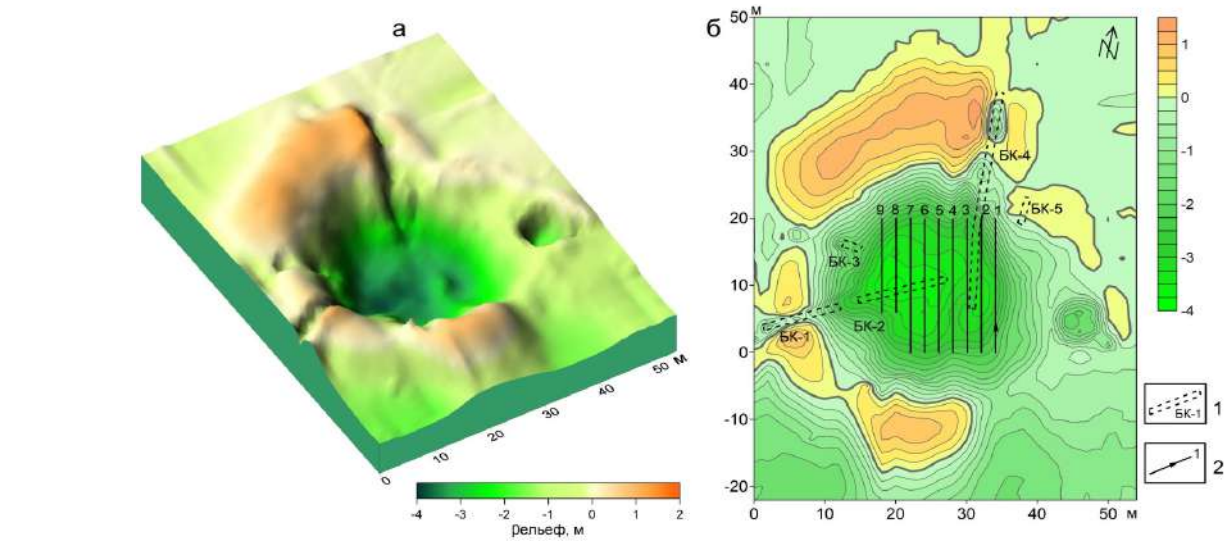


Рисунок 2. Современный рельеф рудника. а – рельеф рудника в 3D-формате; б – карта с изолиниями отметок рельефа. 1 – канавы и их обозначения согласно [9]; 2 – положение георадарных профилей и их номера, стрелка указывает направление съемки.
Figure 2. Up-to-date relief of the ore district. а – relief of the ore district in 3D-format; б – map with structural contour of the relief. 1 – ditches and their keys according to [9]; 2 – position of ground-penetrating radar profiles and their numbers, the arrow indicates the survey direction.

места для укрытия ворованного скота. Вал и карьер покрыты степной растительностью и имеют достаточно мощный гумусный слой.

Первые исследования рудника проведены В. В. Зайковым, Г. Б. Здановичем и А. М. Юминовым в 1995 г. [16]. Непосредственно в карьере, а также по его бортам геологами было пройдено несколько канав и шурфов, отобраны пробы руд и пород на минералогические, петрографические и геохимические анализы. По результатам исследований составлены геологические разрезы [17]. В настоящее время канавы на дне карьера, пройденные геологами, затянуты грунтом (рис. 1).

С тектонических позиций рудник расположен в восточном борту Магнитогорской островодужной системы девонского возраста. В древнем карьере обнаружен серпентинитовый меланж и на дне выработок вскрыт элювий гранатовых пород. Рудные минералы представлены в основном малахитом и азуритом. Малахитовые гнезда и небольшие жилки малахита содержатся в обломках родингитов коры выветривания. В котловане среди песчано-глинистых слоев обнаружена дресва, щебень, обломки базальтов и серпентинитов. Карьер имеет плоское дно и асимметричные борта: пологий восточный имеет небольшую крутизну 20°–30° и крутой западный склон, крутизна которого достигает 70°–80°. На западном склоне обнаружены остатки древесины, по-видимому, в период разработки этот край котлована был закреплен. Мощность наносов оценена в 1–2 м. По мнению авторов работы [17], рельеф карьера и отвалов свидетельствуют об одной технологической эпохе их формирования.

При археологических исследованиях была найдена керамика. Культурный слой длиной около 8 м был обнаружен на северном отвале рудника в его восточной части. Слой включал два горизонта, перекрытых отработанной породой. В нижнем горизонте были найдены кости домашних животных и зола, а в верхнем – остатки строительных конструкций.

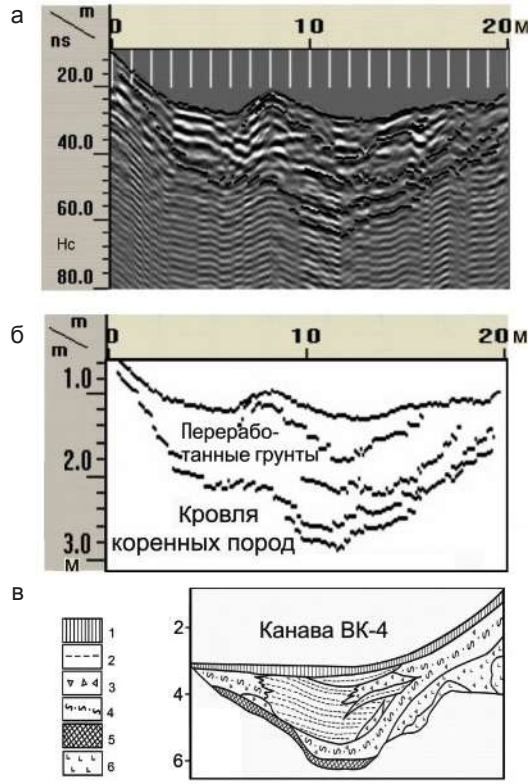


Рисунок 3. Результаты георадарных исследований по профилю 2. а – радарограмма; б – разрез, построенный по границам интенсивных отражении радиоволн; в – геологический разрез по канаве ВК-4 [3]; 1 – современный почвенно-растительный слой; 2 – прослои погребенных почв; 3 – дресва и щебень; 4 – суглинки; 5 – родингиты с примазками медных руд; 6 – базальты.

Figure 3. Results of ground-penetrating radar studies on profile 2. а – radargram; б – section built along the boundaries of intense reflection of radio waves; в – geologic cross-section along the VK-4 ditch [3]; 1 – up-to-date topsoil; 2 – interlayers of fossil soil; 3 – rotted rock and breakstone; 4 – loams; 5 – rodingites with adhesion of copper ores; 6 – basalts.

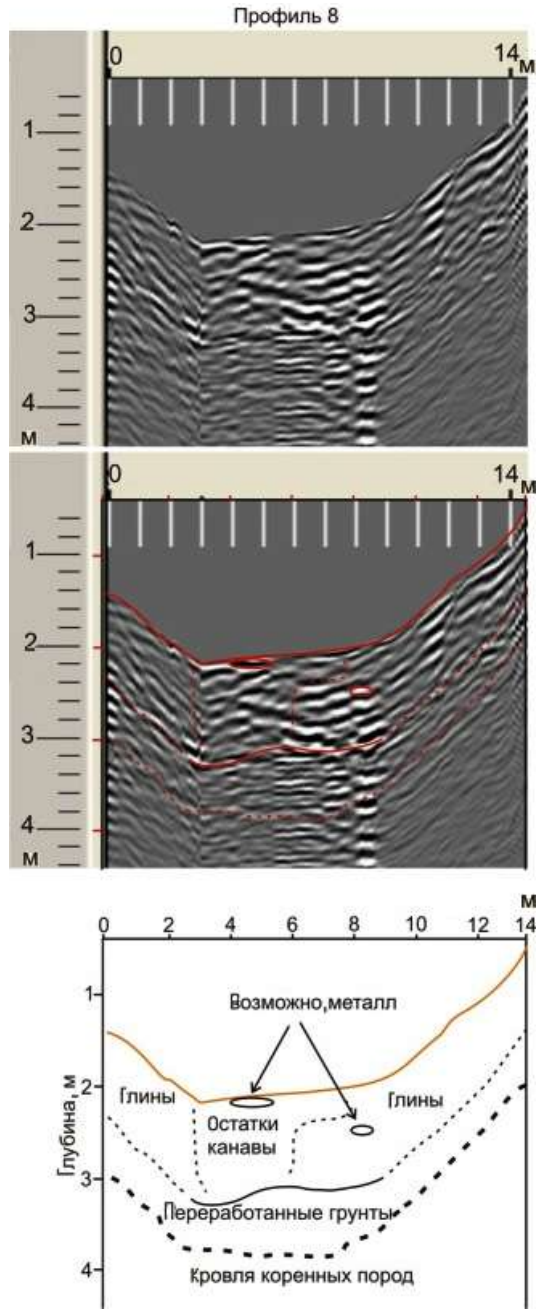


Рисунок 4. Результаты обработки и интерпретации по профилю 8.
Figure 4. Results of processing and interpretation according to profile 8.

В ямках были найдены фрагменты керамики срубно-алакульского типа. Фрагменты посуды относились к синташтинско-петровской культуре, что дало возможность археологам отнести этапы разработки карьера к эпохам средней и поздней бронзы (около 1700–1300 лет до нашей эры).

Методика георадарной съемки

Для георадарной съемки использовался георадар SIR-3000 (GSSI) с антенной 400 МГц. Предварительно для построения карты современного рельефа рудника проведена нивелировка карьера. Топографическая съемка проведена на площади 3500 м^2. Расстояние между профилями топографической съемки было 2 м, а между точками измерений по профилю – 1 м. Современный рельеф рудника показан в виде объемного изображения (рис. 2, а) и на плане в виде изолиний (рис. 2, б). Карьер имеет максимальную глубину 4 м в западной части котлована. А максимальная высота вала 1,3 м установлена в северном отвале. На рис. 2, а с объемным изображением карьера можно отчетливо увидеть остатки от прокопанных в 1995 г. разведочных канав. Георадарная съемка была проведена на пологом дне карьера на площади 16 × 20 м. Наблюдения выполнены на 9 профилях, длина которых варьировалась от 9 до 20 м. Межпрофильное расстояние – 2 м, а шаг по профилю между точками наблюдения – 0,1 м. Перед сбором данных были выбраны следующие параметры съемки: окно времени – 90 нс, число выборок на каждую трассу – 1024, формат сбора данных – 16 разрядов, число трасс на метр – 10, число трасс в секунду на каждой точке профиля – 64.

Данные, полученные на профилях, обрабатывались по одинаковой схеме с помощью программного обеспечения RADAN 7 (GSSI) (*Radan 7, User Manual, Geophysical Survey Systems. New Hampshire: Inc. (GSSI), 2015. 273 p.*). Так как пе-

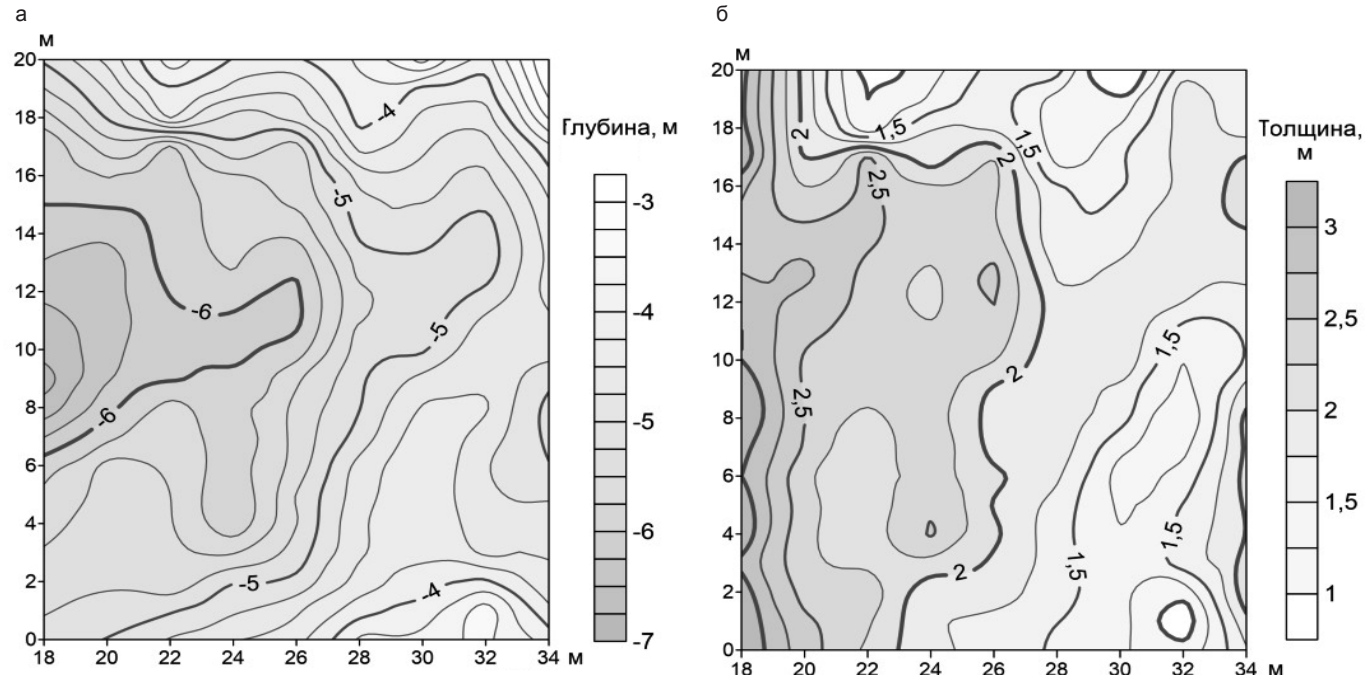


Рисунок 5. Модель рудника. а – рельеф древнего рудника в период его эксплуатации на плане в виде изолиний; б – мощность современных наносов. Глубины даны относительно современной поверхности.
Figure 5. Model of the ore district. а – relief of an ancient ore district during its operation on the plan in the form of structural contours; б – thickness of recent fluvial sediments. Depths are given relative to the recent surface.

репад высот на профилях достигал 1,5 м, то для корректной интерпретации результатов в наблюдения вводились поправки за рельеф. Редактирование записанной на профилях информации заключалось в коррекции позиции нулевой глубины. Кроме того, проведена фильтрация данных, использовались вертикальный фильтр в диапазоне 100–800 МГц, а также для удаления фона горизонтальный фильтр, максимальная длина фильтра выбиралась в соответствии с числом трасс (сканирований).

Результаты исследований

После обработки и интерпретации результатов георадарной съемки были построены разрезы на профилях, а затем построена модель древнего карьера. В качестве примера на рис. 3, а показан георадарный волновой разрез по профилю 2. Профиль частично совпадает с канавой ВК-4, пройденной ранее геологами [18]. На радарограммах показаны амплитуды отраженных электромагнитных волн, причем положительная часть волны закрашена черным цветом, а отрицательная – белым (рис. 3, а). По оси ординат приведено время прохода волн от антенны до отражающей границы и обратно к приемнику. Для перехода от временной шкалы к шкале расстояний (или глубин) необходимо оценить скорости электромагнитных волн, которые зависят от диэлектрической проницаемости в грунтах. Для этих целей были использованы результаты геологической съемки в шурфе, пройденном до коренных пород. Методом подбора параметров были найдены необходимые коэффициенты перевода времени в расстояния. Шкала глубин на радарограммах приведена относительно самой высокой отметки на профиле.

Интерпретация полученных волновых разрезов заключалась в выделении отражающих границ. Для обнаружения границы между техногенным грунтом и коренными породами на георадарных разрезах одними из важнейших признаков являются смена волновой картины отражений в этих средах и угловое несогласие осей синфазности отражений между ними. На приведенном разрезе наиболее контрастные границы мы дополнительно отметили черным цветом (рис. 3, а).

Построенный по данным георадара разрез по профилю 2 (рис. 3, б), на котором приведены границы интенсивных отражении радиоволн, хорошо согласуется с разрезом (рис. 3, в), построенным геологами по канаве ВК-4 [18]. Четко прослеживается нижняя граница между наносами и кристаллическими породами, отмеченными на геологическом разрезе как родингиты и базальты. Эта граница погружается на 3 м в середине разреза. Выше выделено много прерывистых границ, созданных осадочными породами (суглинки), и техногенными или переработанными грунтами (дресва и щебень).

По результатам интерпретации георадарных данных на всех профилях выделено два комплекса: нижний, соответствующий кровле коренных пород, и верхний, связанный с наносами. Глубина до нижней границы варьирует от 3 до 7 м. На профилях 7–9 в осадочном комплексе отмечаются слабоконтрастные отражающие границы и угловое несогласие осей синфазности слоев, вызванные следами отвалов, погребенных канав и шурфов, которые были пройдены при геологическом изучении рудника.

На рис. 4 приведены результаты обработки и интерпретации профиля 8 с положением погребенных отвалов и канавы, пересекающих профиль.

Полученные на профилях данные о положении отражающих границ от кровли коренных пород были использованы для построения модели рудника во время его работы (рис. 5, а). Глубина карьера древнего рудника в восточной части со-

ставляла 4 м, в центральной части – 6 м, а максимальная глубина 7 м отмечена в западной части. Следовательно, можно сделать вывод, что ультрабазитовый массив и рудное тело имеют западное падение.

Сопоставление современных и древних границ рудника позволяет оценить мощность наносов, образовавшихся к настоящему времени (рис. 5, б). Толщина этих грунтов варьирует в пределах от 0,5–1 м на бортах карьера и до 3 м в котловане. Причем мощность наносов увеличивается от 1 м в восточной части до 3 м в западной части котлована. Возможно, основная добыча медной руды проводилась в западном крае карьера. Объем наносов в пределах площади георадарной съемки составляет примерно 700 м^3. По данным, приведенным в работах [18–19], проведена оценка количества добытой руды, которая составляла ориентировочно 4700 т медной руды. При содержании в руде от 1 до 3 % меди и коэффициенте извлечения 10 % из этого рудника могло быть получено приблизительно 5–15 т меди.

Выводы

По результатам проведенных геофизических исследований на руднике «Воровская Яма» под толстым слоем осадочных пород и переработанных грунтов удалось уверенно определить рельеф коренных пород. Построена модель древнего карьера, определено место наиболее интенсивного места добычи руды. Эти данные позволили установить, что во время разработки карьера в бронзовом веке глубина рудника достигала 7 м, а из добытой руды могло быть выплавлено от 5 до 15 т меди.

ЛИТЕРАТУРА

1. Multidisciplinary investigations of the Bronze Age settlements in the Southern Trans-Urals / ed. by. R. Krause and L. Koryakova. Bonn: Verlag Dr. Rudolf Habelt GmbH, 2013. 352 p. ResearchGate
2. Elsayed I. S., Alhussein A. B., Gad E., Mahfooz A. H. 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. 2014. Vol. 2. № 2. P. 31–43. http://dx.doi.org/10.4236/ad.2014.22005
3. Conyers L. B. Ground-penetrating Radar for Geoarchaeology. Analytical Methods in Earth and Environmental Science. N. Y.: Wiley, 2016. 160 p. ISBN 978-1-118-94994-8. URL: https://www.wiley.com/en-ru/Ground+penetrating+Radar+for+Geoarchaeology-p-9781118949948
4. Tkachev V. V. An Alakul funeral and ritual site in the Eastern Orenburg region // Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia. 2012. Vol. 40, issue 1. P. 49–57. https://doi.org/10.1016/j.aeae.2012.05.006
5. Zaykov V. V., Yuminov A. M., Tkachev V. V. Copper mines, chromite copper ores and slags of the Ishkinino bronze age archaeological microregion, the Southern Urals // Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia. 2012. Vol. 40, issue 2. P. 37–46. https://doi.org/10.1016/j.aeae.2012.08.004
6. Berseneva N. A., Epimakhov A. V., Noskevich V. V., Fedorova N. V., Tkachev V. V. Reconstruction of the ancient bronze age copper quarries using GPR // 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience. Barcelona, 2016. P. 1–4. http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.201602028
7. Zaykov V. V., Yablonsky L. T., Dashkovsky P. K., Zaykova E. V., Yuminov A. M. Platinoid microinclusions of a native osmium group in ancient gold artifacts from Siberia and the Urals as a source of geoarchaeological information // Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia. 2016. № 44(1). P. 93–103. http://dx.doi.org/10.17746/1563-0102.2016.44.1.093-103
8. Zaykov V. V., Kotlyarov V. A., Zaykova E. V., Melekestseva Y. U. The Phenomenon of the Influence of Gold Melt on Microinclusions of Platinum Group Minerals in Ancient Gold Objects // Archaeometry. 2016. № 59(1). P. 96–104. http://dx.doi.org/10.1111/arcm.12234
9. Tkachev V. V. Cultural landscape formation within the Ural-Mugodzhary Region in the Late Bronze Age: Development of copper ore resources and a strategy of adaptation to the mountain-steppe ecosystem // Stratum Plus. 2017. № 2. P. 205–230.
10. Юминов А. М., Зайков В. В., Коробков В. Ф., Ткачев В. В. Добыча медных руд в бронзовом веке в Мугоджарах // Археология, этнография и антропология Евразии. 2013. № 55(3). С. 87–96.
11. Зайков В. В., Юминов А. М., Анкушев М. Н., Ткачев В. В., Носкевич В. В., Епимахов А. В. Горно-металлургические центры бронзового века в Зауралье и Мугоджарах // Изв. ИГУ. Сер. «Геоархеология. Этнография. Антропология». 2013. № 1 (2). С. 174–195.
12. 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. URL: http://geofdb.com/articles/view?id=1869
13. Conyers L. B. Interpreting Ground-penetrating Radar for Archaeology. London: Taylor and Francis, 2016. 220 p.
14. Ground penetrating radar theory and applications / ed. by M. H. Jol. Amsterdam: Elsevier, 2009. 544 p. ISBN 978-0-444-53348-7. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4
15. Финкельштейн М. И., Кутев В. А., Золотарев В. П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 128 с.
16. Зайков В. В., Зданович Г. Б., Юминов А. М. Медный рудник бронзового века «Воровская яма» на Южном Урале // Россия и Восток: проблемы взаимодействия: материалы конференции. Челябинск: ЧГУ, 1995. С. 157–162.
17. Зайков В. В., Зданович Г. Б., Юминов А. М. Воровская яма – новый рудник бронзового века на Южном Урале // Археологический источник и моделирование древних технологий: тр. музея-заповедника Аркаим. Челябинск: Археологический центр Аркаим, 2000. С. 112–130.
18. Ткачев В. В. Кожумбердынская культурная группа в контексте концепции культурного ландшафта и индоиранской проблематики // Изв. ИГУ. Сер. «Геоархеология. Этнология. Антропология». 2016. Т. 16. С. 66–87.
19. Зайков В. В. Геолого-минералогические исследования древних медных рудников на Южном Урале // Археология, этнография, антропология Евразии. 2005. № 4(24). С. 101–114.

Статья поступила в редакцию 10 мая 2018 г.

УДК 550.8.056 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-61-67

Using the ground penetrating radar method for research of the ancient "Vorovskaya Yama" copper mine in the South Ural

Vladislav Vital'evich NOSKEVICH[*], **Natal'ya Vasil'evna FEDOROVA**[**]

Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Relevance. Integral to research in archeology, geophysical methods allow the study of buried monuments without destroying the soil layer and provide an opportunity to more accurately determine the place of future expensive and laborious archaeological excavations. In the steppe zone of the Southern Urals and the Mugodzhar Hills, about three dozen ancient copper mines are known, the development of which took place in the Bronze Age. At present, the bottom is covered with a thick layer of sediment, and the sides of an open pit have earthflows. In the study of ancient mines, it is important to determine the relief of pits and localise the sites of ore mining during their operation, which allows us to estimate the amount of ore mined and copper smelted.

Purpose of the research. The determination of reflecting boundaries using the ground penetrating radar method between loose sediment deposits and copper-bearing rocks of the Bronze Age copper mine called 'Vorovskaya Yama', design of a three-dimensional model of an ancient open-pit mine and determination of the ore mining site.

Justification of the ground penetrating radar method and research methods. The effectiveness of the ground penetrating radar method depends on the contrast of the dielectric permittivity of the layers in the studied environment. In this case, it is a sedimentary complex represented by man-made soils, and bedrock, which determine the surface of the pit during its development. The bedrock has a significant contrast in dielectric permittivity compared with the sedimentary complex at least twice. This circumstance makes it possible to determine the reflection response from the bedrock boundary. The ground penetrating radar survey at the Vorovskaya Yama open pit was conducted by radar SIR-3000 in nine parallel profiles with a length of 9–20 m and a distance of 2 m between the profiles. In the profiles, the survey was carried out with a step between surveyor stations of 0.1 m. To correctly interpret the results and take into account the current topography, a topographical survey was carried out. After processing the survey data, geological radar sections were formed in the profiles.

Results of the research. After interpretation, two georadar complexes were identified in the sections: the lower, which is caused by the roof of the bedrock, and the upper one associated with man-made or processed soils. There are weak reflecting boundaries in the zone of the upper complex, which are presumably caused by traces of surface dumps, buried ditches and pits. In identifying the boundary between man-made soil and bedrocks on georadar sections, the main 'indicators' are the change in wave patterns of reflections in these environments, as well as the angular unconformity of the axes of synphasic reflections between them. After interpolating the boundaries between the profiles, a three-dimensional model of the relief of the mine was designed during the period of its development. The thickness of sediment varies within an open pit at the edge of the working from 0.5–1 m to 3 m at the bottomhole. The maximum depth of the pit in antiquity was 7 m.

Conclusion. According to the results of the georadar survey at the mine, it was possible to confidently determine the relief of bedrock under a thick layer of later sediments. A three-dimensional model of an ancient open-pit mine was designed and the place of ore mining was localised. This data allowed us to estimate the depth and volume of workings during the development of a copper deposit in the Bronze Age.

Keywords: geophysical methods, georadar, ground penetrating radar, model, copper mine, Bronze Age, South Ural.

REFERENCES

1. 2013, Multidisciplinary investigations of the Bronze Age settlements in the Southern Trans-Urals. Ed. by R. Krause and L. Koryakova. Bonn: Verlag Dr. Rudolf Habelt GmbH, 352 p.
2. Elsayed I. S., Alhussein A. B., Gad E., Mahfooz 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*, vol. 2, no. 2, pp. 31–43. http://dx.doi.org/10.4236/ad.2014.22005
3. Conyers L. B. 2016, Ground-penetrating Radar for Geoarchaeology. Analytical Methods in Earth and Environmental Science. N. Y., 160 p. ISBN 978-1-118-94994-8. URL: https://www.wiley.com/en-ru/Ground+penetrating+Radar+for+Geoarchaeology-p-9781118949948
4. Tkachev V. V. 2012, An Alakul funeral and ritual site in the Eastern Orenburg region. *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii* [Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia], vol. 40, issue 1, pp. 49–57. https://doi.org/10.1016/j.aeae.2012.05.006
5. Zaykov V. V., Yuminov A. M., Tkachev V. V. 2012, Copper mines, chromite copper ores and slags of the Ishkinino bronze age archaeological microregion, the Southern Urals. *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii* [Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia], vol. 40, issue 2, pp. 37–46. https://doi.org/10.1016/j.aeae.2012.08.004
6. 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. *22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience*. Barcelona, pp. 1–4. http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.201602028
7. Zaykov V. V., Yablonsky L. T., Dashkovsky P. K., Zaykova E. V., Yuminov A. M. 2016, Platinoid microinclusions of a native osmium group in ancient gold artifacts from Siberia and the Urals as a source of geoarchaeological information. *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii* [Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia], no. 44(1), pp. 93–103. http://dx.doi.org/10.17746/1563-0102.2016.44.1.093-103
8. Zaykov V. V., Kotlyarov V. A., Zaykova E. V., Melekestseva Y. U. 2016, The Phenomenon of the Influence of Gold Melt on Microinclusions of Platinum Group Minerals in Ancient Gold Objects. *Archaeometry*, no. 59(1), pp. 96–104. http://dx.doi.org/10.1111/arcm.12234
9. Tkachev V. V. 2017, Cultural landscape formation within the Ural-Mugodzhary Region in the Late Bronze Age: Development of copper ore resources and a strategy of adaptation to the mountain-steppe ecosystem. *Stratum Plus*, no. 2, pp. 205–230. URL: https://www.e-anthropology.com/English/Catalog/Archaeology/STM_DWL_vUnZ_klNw8zpC5PiY.aspx

[*] ubistu@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-0765-0183
[**] nataliavf50@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0648-0768

10. Yuminov A. M., Zaykov V. V., Korobkov V. F., Tkachev V. V. 2013, Bronze Age mining of copper ores in the Mugodzhar Hills. *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii* [Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia], no. 55 (3), pp. 87–96. (*In Russ.*) URL: https://journal.archaeology.nsc.ru/jour/article/view/37
11. Zaykov V. V., Yuminov A. M., Ankushev M. N., Tkachev V. V., Noskevich V. V., Epimakhov A. V. 2013, Mining and metallurgical centers of the Bronze Age in the Trans-Urals and Mugodzhar Hills. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [The bulletin of Irkutsk State University] Series "Geoarchaeology. Ethnography. Anthropology", no.1 (2), pp. 174–195. (*In Russ.*)
12. Noskevich V. V., Fedorova N. V., Tkachev V. V., Baitleu D. A., Yuminov A. M. 2017, Reconstruction of the ancient copper open pit mines of the Bronze Age according to ground-penetrating radar data. *Geofizika* [Russian Geophysics], no. 1, pp. 56–62. (*In Russ.*) URL: http://geofdb.com/articles/view?id=1869
13. Conyers L. B. Interpreting Ground-penetrating Radar for Archaeology. London: Taylor and Francis, 2016. 220 p.
14. Jol M. H. (ed.) 2009, Ground penetrating radar theory and applications. Amsterdam: Elsevier, 544 p. ISBN 978-0-444-53348-7. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4
15. Finkelstein M. I., Kutev V. A., Zolotarev V. P. 1986, *Primeneniye radiolokatsionnogo podpoverkhnostnogo zondirovaniya v inzhenernoy geologii* [The use of radar subsurface sensing in engineering geology]. Moscow, 128 p.
16. Zaykov V. V., Zdanovich G. B., Yuminov A. M. 1995, *Mednyy rudnik bronzovogo veka "Vorovskaya yama" na Yuzhnom Urale* [Bronze Age copper mine called "Vorovskaya yama" in the Southern Urals]. *Rossiya i vostok: problemy vzaimodeystviya* [Russia and the East: cooperation problems]. *Materialy konferentsii* [Proceedings of the conference]. Chelyabinsk, pp. 157–162.
17. Zaykov V. V., Zdanovich G. B., Yuminov A. M. 2000, *Vorovskaya yama – novyy rudnik bronzovovo veka na Yuzhnom Urale* [The Vorovskaya Yama is a new Bronze Age mine in the South Urals]. *Arkheologicheskiy istochnik i modelirovanie drevnikh tehnologiy* [Archaeological source and modeling of ancient technologies]. *Trudy muzeya-zapovednika "Arkaim"* [Works of Arkaim culture preserve]. Chelyabinsk, pp. 112–130.
18. Tkachev V. V. 2016, Kozhumberdyn cultural group in the context of the concept of cultural landscape and Indo-Iranian perspectives. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [The bulletin of Irkutsk State University]. Series "Geoarchaeology. Ethnology. Anthropology", vol. 16, pp. 66–87. URL: http://izvestiageoarh.isu.ru/assets/articles/4918264635616704478.pdf
19. Zaykov V. V. 2005, Geological and mineralogical studies of ancient copper mines in the southern Urals. *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii* [Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia], no. 4 (24), pp. 101–114. (*In Russ.*) URL: http://www.archaeology.nsc.ru/ru/publish/journal/doc/2005/244/7.pdf

The article was received on May 10, 2018