

**П.С. Осипова¹✉, А.Ю. Федорченко²✉, М.И. Фокин¹,
М.В. Селецкий², Д.А. Тоцкий², Н.Е. Белоусова²,
А.И. Лебединцев³, П.С. Гребенюк³, А.В. Пташинский⁴**

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
Новосибирск, Россия

²Институт археологии и этнографии СО РАН
Новосибирск, Россия

³Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский
институт им. Н.А. Шило ДВО РАН
Магадан, Россия

⁴Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга
Петропавловск-Камчатский, Россия
E-mail: osipovaps@ipgg.sbras.ru; winteralex2008@gmail.com

Первые результаты электротомографии археологического памятника Домашнее озеро в Центральной Камчатке

В статье представлены результаты геофизических исследований методом электротомографии, проведенных в полевом сезоне 2023 г. на памятнике Домашнее озеро – одном из важнейших археологических объектов эпохи неолита в долине р. Камчатки. Электротомография осуществлялась параллельно с поисковыми археологическими работами, позволившими уточнить стратиграфию стоянки и культурно-хронологическую последовательность ее заселения. Геофизическое исследование проводилось на объекте впервые, его целью была оценка эффективности электротомографии на изучаемой территории. Основные задачи исследования заключались в определении мощности рыхлых отложений и выявлении геоэлектрических признаков, вызванных деятельностью древнего человека. Зондирования проведены на двух перпендикулярных профилях. Шаг измерений составил 0,2 и 0,5 м, что позволило изучить разрез до глубин 1 и 4 м соответственно. Основываясь на полученных данных о стратиграфии памятника, была осуществлена интерпретация полученных двумерных геоэлектрических разрезов. Обнаружено, что линзы высокого (800–1 800 Ом·м) удельного электрического сопротивления (УЭС) на геоэлектрическом разрезе соответствуют слоям супесей, содержащим тефру вулкана Шивелуч. Высказана гипотеза о наличии связи между пониженными значениями УЭС (до 90–100 Ом·м) и углистостью антропогенного происхождения в отложениях. По результатам зондирований установлена мощность рыхлых отложений, равная 2,5–3 м. Сделан вывод о целесообразном применении электротомографии на памятнике Домашнее озеро, однако более качественная интерпретация требует дополнительных данных о вещественном составе отложений и изучении их электрических свойств в лабораторных условиях. Результаты геофизического исследования будут использованы при планировании последующих археологических работ на данном объекте.

Ключевые слова: Камчатка, Домашнее озеро, электротомография, удельное электрическое сопротивление, вулканические пеплы, мезолит, неолит.

**P.S. Osipova¹✉, A.Y. Fedorchenko²✉, M.I. Fokin¹,
M.V. Seletsky², D.A. Totsky², N.E. Belousova²,
A.I. Lebedintsev³, P.S. Grebenuk³, A.V. Ptashinsky⁴**

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia

²Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS
Novosibirsk, Russia

³Northeastern Interdisciplinary Research Institute FEB RAS
Magadan, Russia

⁴Vitus Bering Kamchatka State University
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

E-mail: osipovaps@ipgg.sbras.ru; winteralex2008@gmail.com

First Results of Electrotomography at the Domashnee Ozero Site in Central Kamchatka

This article presents results of geophysical research using electrical resistivity tomography in 2023 at the Domashnee Ozero site which is one of the most important Neolithic archaeological sites in the Kamchatka River valley. Electrotomography was done in parallel with archaeological works, making it possible to clarify the stratigraphy, and cultural and chronological sequence at the site. The geophysical survey was aimed at establishing the thickness of loose sediments and identifying geoelectric features caused by ancient human activities. In addition, it also intended to evaluate effectiveness of electrotomography in the area, and it was done at the site for the first time. Two profiles orthogonal to each other were scanned. The distances between electrodes were 0.2 m and 0.5 m so the section could be examined at 1 m and 4 m respectively. Two-dimensional geoelectric sections were interpreted using the data on the stratigraphy of the site. Lenses of high resistivity (800–1800 Ohm-m) on the geoelectric section corresponded to sand-clay layers with Shiveluch tephra. It was suggested that there could be a correlation between reduced electrical resistivity (up to 90–100 Ohm-m) and anthropogenic charcoal in the sediments. The thickness of loose sediments was determined to be 2.5–3 m on the basis of probe results. The geophysical survey has shown usefulness of electrotomography at the Domashnee Ozero site, but a more qualitative interpretation requires additional data on the material composition of the sediments and study of their electrical properties in a laboratory. The geophysical results will be used for planning further archaeological works at the site.

Keywords: Kamchatka, Domashnee Ozero, electrotomography, electrical resistivity, volcanic ashes, Mesolithic, Neolithic.

Введение

Стоянка Домашнее Озеро является одним из важнейших археологических объектов тарьинской культуры эпохи неолита Камчатки [Диков, 1977, 1979]. В полевом сезоне 2023 г., в рамках реализации программы комплексного изучения древнейших памятников региона, участниками Камчатского палеолитического отряда ИАЭТ СО РАН осуществлялись археологические и геофизические работы на стоянке. Геофизические работы на Домашнем озере проводились впервые с момента его открытия. Их целью являлась оценка информативности метода электротомографии для определения мощности рыхлых отложений и обнаружения в них аномалий, связанных с деятельностью человека.

Метод электротомографии (ЭТ) основан на различии горных пород по удельному электрическому сопротивлению (УЭС). ЭТ широко зарекомендовала себя в практике археологической деятельности для решения различных задач [Модин, 2010; Deiana, Leucci, Martorana, 2018]. В частности, установлено, что электрические зондирования дают положительные результаты при оконтуривании тел вулканического пепла [Xia et al., 2010; Di Giuseppe et al., 2015], которые повсеместно встречаются в отложениях Камчатки. Кроме того, в местах обитания человека, как правило, присутствуют отложения, содержащие признаки древних кострищ в виде углистости, которая демонстрирует характерные аномалии на данных электрических зондирований [Magiera et al., 2019; Ермолаев, Оленченко, 2023].

Материалы и методы

Археологический памятник Домашнее озеро расположен на юго-восточном берегу оз. Домашнее на северо-восточной окраине пос. Козыревск Усть-Камчатского р-на Камчатского края. По результатам осмотра памятника археологами был выбран участок для проведения исследований (см. статью А.Ю. Федорченко и др. «Новые данные о культурно-хронологической последовательности памятника Домашнее озеро в Центральной Камчатке» в этом сборнике). В обнажении берегового обрыва реализована зачистка, геофизические исследования проведены на террасе. На площадке находится деревянное строение и тропа, деревянный забор (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения профилей электротомографии на участке исследований памятника Домашнее озеро.

Зондирования методом ЭТ проведены на двух профилях (рис. 1). Профиль № 1 расположен по линии северо-восток – юго-запад параллельно основной стенке зачистки. Линия удалена на расстояние 4,5 м от края обрыва для предотвращения влияния «воздушного пространства» на измерения. Профиль № 2 перпендикулярен береговому обрыву, стенке зачистки и профилю № 1.

Электротомография выполнена многоэлектродной аппаратурой «Скала-64к15» с использованием установок дипольной и Шлюмберже [Бобачев и др., 2013, с. 27–29]. Вследствие ограниченности участка исследований, в расстановке использованы только 48 электродов (с 8 по 56). Расстояние между электродами составило 0,2 м на профиле № 1 и 0,5 м на профиле № 2. Так, длина профилей составила 9,4 и 24 м, глубина исследований не превышала 1,5 и 4 м соответственно. Сопротивления заземлений изменялись в диапазоне 3–7 кОм. Первичная обработка данных ЭТ проведена

в программе Xeris, обратная задача (инверсия) решена с помощью программы ZondRes2D.

Результаты исследования

Мощность полученного разреза в зачистке составила 1,75 м, вскрыты 21 стратиграфический слой. Отложения представлены супесями, песками и суглинками, содержащими разновозрастную тефру вулканов Шивелуч, Ксудач и Хангар. Кроме того, в разрезе выявлены два культурных горизонта, где присутствуют углистые отложения.

Результатами электротомографии являются геоэлектрические разрезы (рис. 2, а, б, в). УЭС на разрезах изменяется в широком диапазоне от 70 до 2000 Ом·м. На разрезе по профилю № 1 (рис. 2, а) выделены четыре горизонта. Приповерхностный слой мощностью 0,05–0,15 м имеет УЭС до 300 Ом·м. Ниже залегает горизонт повышенного УЭС (450–1 800 Ом·м) мощ-

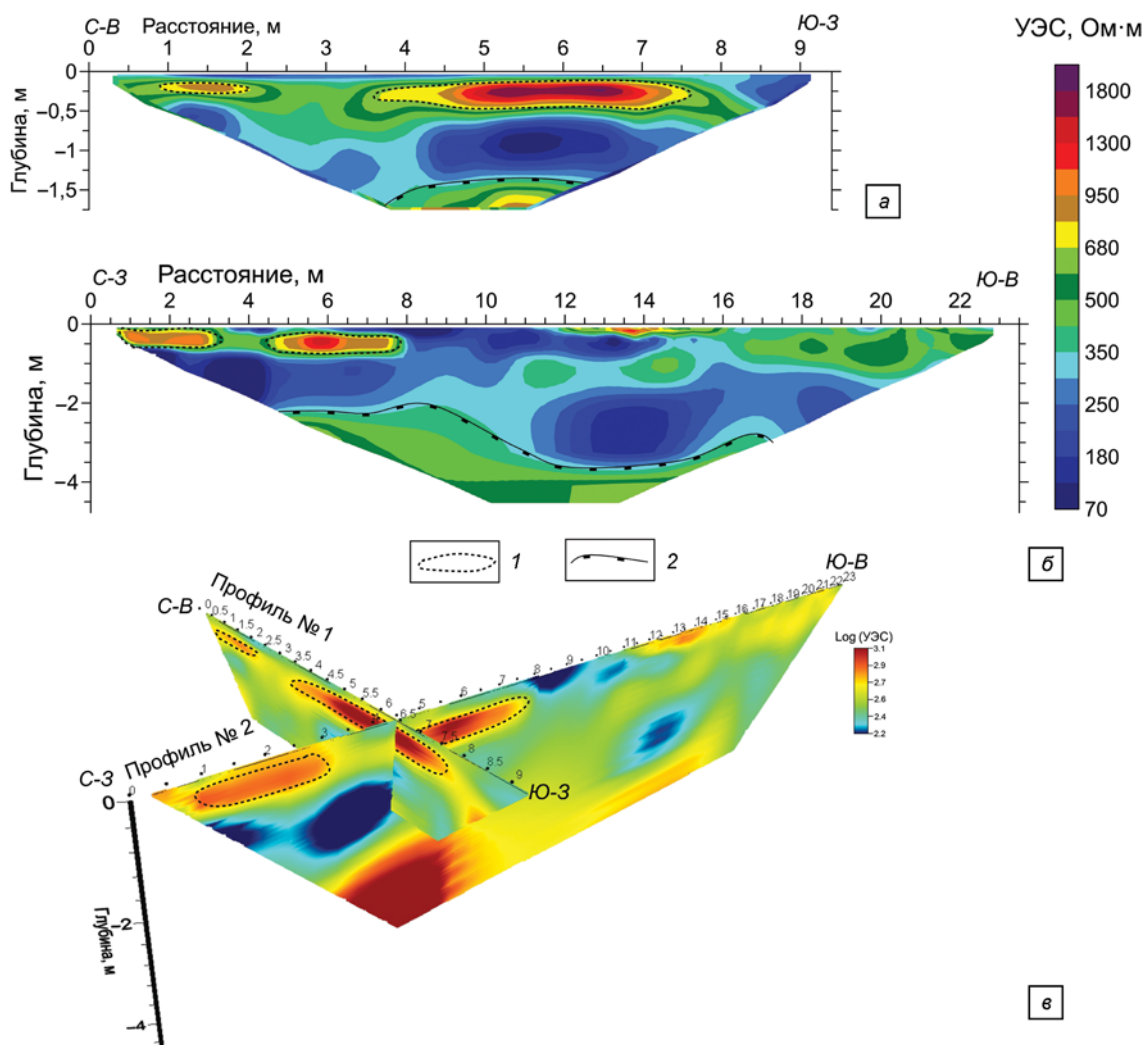


Рис. 2. Геоэлектрические разрезы УЭС на профиле № 1 (а) и № 2 (б) и их вид в трехмерном пространстве относительно друг друга (в).

1 – высокоомные аномалии, интерпретируемые как линзы тефры; 2 – кровля коренного основания.

ностью 0,25–0,65 м, где в интервалах 0,5–2,3 и 3,5–8 м локализуются аномалии более 700 Ом·м. Третий слой, залегающий до глубины 1,4–1,6 м, имеет УЭС менее 300 Ом·м. Ниже его подстилает слой с УЭС 300–1 000 Ом·м.

Точка пересечения двух профилей расположена на пикете (пк) 6,5 м на профиле № 1 и на 4,5 м на профиле № 2 (рис. 2, в). Геоэлектрический разрез по профилю № 2 неоднородный по УЭС (рис. 2, б). Из-за большого шага между электродами приповерхностный слой не определяется. В интервале профиля 0–8 м на глубине 0,1–0,8 м отмечаются линзы высокого УЭС (400–1 400 Ом·м). Ниже глубины 1 м горизонт имеет низкое УЭС (100–300 Ом·м), что соотносится с разрезом на профиле № 1. Понижение сопротивления до 150–200 Ом·м до глубины 1 м на ПК 9–14 м, вероятно, связано с изменением вещественного состава или физических свойств отложений – профиль здесь пересекал тропу. Приповерхностная высокоомная аномалия в интервале 12–16 м вызвана муравейником на поверхности. Шаг между электродами на профиле № 2 был увеличен с целью оценки глубины залегания кровли основания памятника – аллювиальных отложений крупной фракции. Вероятно, слой с УЭС 350–550 Ом·м, залегающий с глубины 2 м, и является этим основанием. На раз-

резе видно, что кровля слоя неровная, глубина верхней границы варьирует от 2 до 3,5 м.

Наложение кривых зондирования (кривых ρ_k) с пикетов 4, 5, 6 и 7 м профиля № 1 на стратиграфический разрез показывает (рис. 3), что максимальные значения 550–800 Ом·м кажущегося УЭС соответствуют 3–6 выделенным литологическим слоям – супесям, в т.ч. пылеватым, с линзами вулканического пепла. Литологические слои 6–11, где слои 8–11 представлены тефрой вулканов, соотносятся с переходной зоной УЭС. Минимальные значения 360–470 Ом·м определяют литологические слои 13–18, где слои 16–17 представлены тефрой, а слои 12 и 16 являются углеродсодержащими и включают углистые отложения.

Общая структура отложений на площадке памятника Домашнее озеро следующая. В верхней части разреза с глубины 0,1 м присутствуют линзовидные тела с УЭС более 600 Ом·м мощностью 0,15–0,35 м. Их подстилает горизонт пониженного до 70–300 Ом·м УЭС. Кровля основания на площадке определяется на глубинах от 2 до 3,5 м по повышенным до 450–600 Ом·м УЭС.

Обсуждение и заключение

Результаты рекогносцировочных зондирований методом электротомографии позволили дополнить данные о стратиграфической

последовательности памятника Домашнее озеро, в частности, определить общую мощность рыхлых отложений, составившую на изученном участке от 2,5 до 3 м. В рамках проведенного исследования на геоэлектрических разрезах были выявлены аномалии различного типа. На настоящем этапе изысканий проведенная корреляция между значениями УЭС и выявленными на стоянке стратиграфическими подразделениями базировалась на литературных данных и опыте исследователей. Как и для любых пород и грунтов, УЭС прослоев тефры варьируется в зависимости от различных факторов – прежде всего его состава, влажности и уплотнения. Известно, что вулканический пепел в основном состоит из мельчайших частиц пыли и песка. Плотная упаковка частиц, как правило, приводит к плохой проводимости, поэтому УЭС пепла выше по сравнению с более рыхлыми отложениями – например почвами и глинами [Xia et al., 2010; Siddique, 2011; Li et al., 2017]. Предполага-

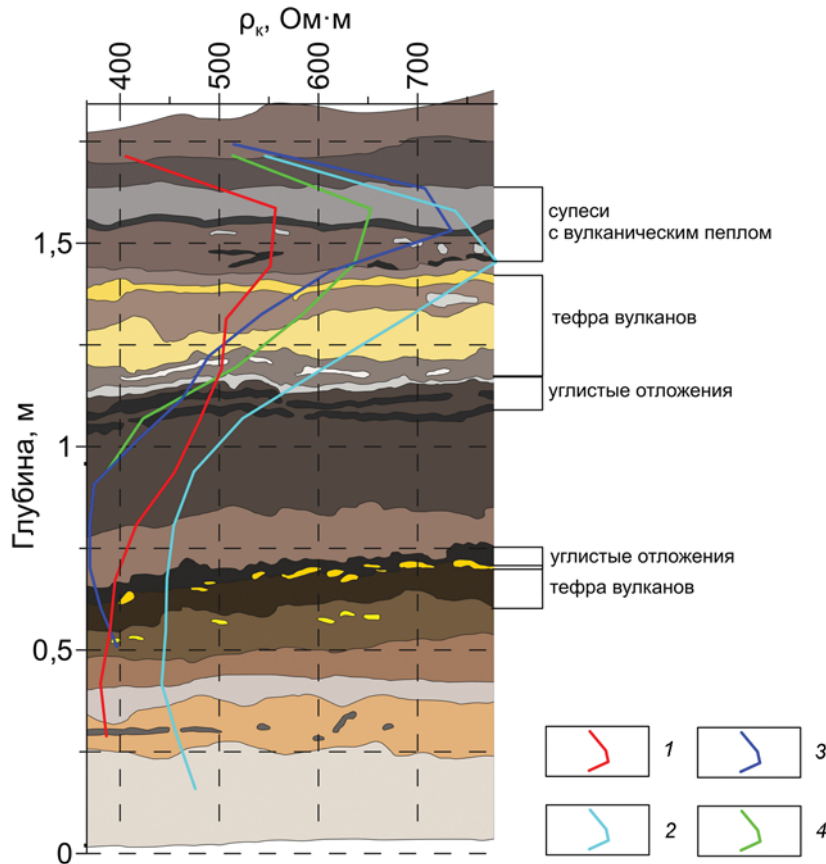


Рис. 3. Сопоставление кривых ρ_k на профиле № 1 со стратиграфическим разрезом. 1 – пикет 4 м; 2 – пикет 5 м; 3 – пикет 6 м; 4 – пикет 7 м.

ется, что на исследованной площадке высокоомные линзы в интервале глубин 0,15–0,6 м соответствуют супесям, содержащим тефру вулкана Шивелуч возрастом извержения менее 1 000 ¹⁴C л.н. В таком случае неясно, почему тефра в слоях 8–12 не создает высокоомной аномалии. Это может быть связано с изменением состава пепла, его возрастом или отличными вмещающими отложениями. Понижение УЭС в нижележащем горизонте может быть связано с присутствием углистости [Шнайдер и др., 2021; Ермолаев, Оленченко, 2023], но также следует учитывать увеличение влажности на глубине.

Электротомография позволила определить мощность рыхлых отложений на участке раскопок, что важно для планирования дальнейших полевых работ. Корреляция результатов геофизического мониторинга с данными стратиграфии способствует пониманию строения и истории формирования отложений на памятнике. Однако для более точной интерпретации требуются дополнительные лабораторные исследования образцов, включая изучение их вещественного состава и электрических свойств. По результатам ЭТ выявлены аномалии УЭС, указывающие на вероятное присутствие культуросодержащих отложений. Эти данные полезны для выбора перспективных участков и определения глубины залегания археологического материала при последующих раскопках. Таким образом, электротомография археологического памятника Домашнее озеро предоставила новую информацию о строении представленных здесь отложений, что повышает эффективность археологических работ и шансы на обнаружение жилищ, очагов и других элементов пространственных структур.

Благодарности

Полевые геофизические исследования выполнены при поддержке гранта РФФ № 22-18-00319 «Генезис древних культур крайнего Северо-Востока Азии», <https://rscf.ru/project/22-18-00319/> (руководитель – А.И. Лебединцев, исполнители – П.С. Гребенюк, А.В. Пташинский), анализ археологических материалов – в рамках проекта НИР ИАЭТ СО РАН № FWZG-2022-0003 «Северная Азия в каменном веке: культурная динамика и экологический контекст» (исполнители – А.Ю. Федорченко и Н.Е. Белоусова).

Список литературы

Бобачев А.А., Большаков Д.К., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. – М.: Моск. гос. ун-т, 2013. – Т. II. Малоглубинная электроразведка. – 123 с.

Диков Н.Н. Археологические памятники Камчатки, Чукотки, Верхней Колымы. – М.: Наука, 1977. – 319 с.

Диков Н.Н. Древние культуры Северо-Восточной Азии. – М.: Наука, 1979. – 352 с.

Ермолаев К.А., Оленченко В.В. Геоэлектрические аномалии от кострищ и причины их возникновения // Геофизические исследования. – 2023. – Т. 24, № 1. – С. 61–73.

Модин И.Н. Электроразведка в технической и археологической геофизике: автореф. дис. ... док. тех. наук. – М., 2010. – 49 с.

Шнайдер С.В., Жилич С.В., Федорченко А.Ю., Рендю У., Пархомчук Е.В., Алишер кызы С., Оленченко В.В., Цибилов Л.В., Сердюк Н.В., Зеленков Н.В., Чаргынот Т., Кривошапкин А.И. Сурунгур – новый памятник раннего голоцена в Ферганской долине // *Stratum plus. Археология и культурная антропология*. – 2021. – № 2. – С. 319–337.

Deiana R., Leucci G., Martorana R. New Perspectives on Geophysics for Archaeology: A Special Issue // *Surveys in Geophysics*. – 2018. – Vol. 39. – P. 1035–1038.

Di Giuseppe M.G., Troiano A., Fedele A., Caputo T., Patella D., Troise C., De Natale G. Electrical resistivity tomography imaging of the near-surface structure of the Solfatara crater, Campi Flegrei (Naples, Italy) // *Bulletin of Volcanology*. – 2015. – Vol. 77. – P. 1–15.

Li M., Gao Y., Zhang T., Wu H., Lao X., Chen Z. Analysis of soil resistivity characteristics under meteorological conditions in Haikou City // 2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing). – Beijing: IEEE, 2017. – P. 1–5.

Magiera T., Zogala B., Szuszkiewicz M., Pierwola J., Szuszkiewicz M.M. Combination of different geophysical techniques for the location of historical waste in the Izery Mountains (SW Poland) // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 682. – P. 226–238.

Siddique R. Effect of volcanic ash on the properties of cement paste and mortar // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2011. – Vol. 56, N 1. – P. 66–70.

Xia J., Ludvigson G., Miller R. D., Mayer L., Haj A. Delineation of a volcanic ash body using electrical resistivity profiling // *J. of Geophysics and Engineering*. – 2010. – Vol. 7, N 3. – P. 267–276.

References

Bobachev A.A., Bolshakov D.K., Modin I.N., Shevnin V.A. *Elektrozvedka: posobiye po elektrozvedochnoy praktike dlya studentov geofizicheskikh spetsial'nostey*. Vol. II. Maloglubinnaya elektrozvedka. Moscow: Moskovskij gosudarstvennyj universitet, 2013. 123 p. (In Russ.).

Deiana R., Leucci G., Martorana R. New Perspectives on Geophysics for Archaeology: A Special Issue. *Surveys in Geophysics*, 2018. Vol. 39. P. 1035–1038.

Di Giuseppe M.G., Troiano A., Fedele A., Caputo T., Patella D., Troise C., De Natale G. Electrical resistivity tomography imaging of the near-surface structure of the Solfatara crater, Campi Flegrei (Naples, Italy). *Bulletin of Volcanology*, 2015. Vol. 77. P. 1–15.

Dikov N.N. Ancient cultures of Northeast Asia. Moscow: Nauka, 1979. 352 p. (In Russ.).

Dikov N.N. Archaeological sites of Kamchatka, Chukotka, Upper Kolyma. Moscow: Nauka, 1977. 319 p. (In Russ.).

Ermolaev K.A., Olenchenko V.V. Geoelectrical anomalies from hearths and causes of their appearance. *Geophysical research*, 2023. Vol. 24, N 1. P. 61–73. (In Russ.).

Li M., Gao Y., Zhang T., Wu H., Lao X., Chen Z. Analysis of soil resistivity characteristics under meteorological conditions in Haikou City. In *2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*. Beijing: IEEE, 2017. P. 1–5.

Magiera T., Zogala B., Szuszkiewicz M., Pierwola J., Szuszkiewicz M.M. Combination of different geophysical techniques for the location of historical waste in the Izery Mountains (SW Poland). *Science of the Total Environment*, 2019. Vol. 682. P. 226–238.

Modin I.N. Electric prospecting in archeological and technical geophysics: dr. tech. sc. dissertation abstract. Moscow, 2010. 49 p. (In Russ.).

Shnaider S.V., Zhilich S.V., Fedorchenko A. Yu., Rendu W., Parkhomchuk E.V., Alisher kyzy S., Olenchenko V.V., Tsibizov L.V., Serdyuk N.V., Zelenkov N.V., Charginov T., Krivoshapkin A.I. Surungur – New Early

Holocene Archaeological Site in Fergana Valley. *Stratum plus. Archaeology and Cultural Anthropology*, 2021. N 2. P. 319–337. (In Russ.).

Siddique R. Effect of volcanic ash on the properties of cement paste and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011. Vol. 56, N 1. P. 66–70.

Xia J., Ludvigson G., Miller R. D., Mayer L., Haj A. Delineation of a volcanic ash body using electrical resistivity profiling. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2010, Vol. 7, N 3. P. 267–276.

Осипова П.С. <https://orcid.org/0000-0003-0510-6333>

Федорченко А.Ю. <https://orcid.org/0000-0001-7812-8037>

Фокин М.И. <https://orcid.org/0000-0003-2090-7155>

Селецкий М.В. <https://orcid.org/0000-0003-2581-8792>

Тоцкий Д.А. <https://orcid.org/0009-0009-9461-5471>

Белоусова Н.Е. <https://orcid.org/0000-0001-7054-3738>

Лебединцев А.И. <https://orcid.org/0000-0003-2714-2116>

Гребенюк П.С. <https://orcid.org/0000-0002-2003-5417>

Пташинский А.В. <https://orcid.org/0000-0002-9206-4823>