

ПРИВОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

📄 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-42-1-223-238>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 550.3



Опыт применения неинвазивных методов геофизики при решении задач археологии

И. Р. Янбухтин*, А. Ш. Закиров*

Центр передовых технологий при Министерстве Инновационного развития Республики Узбекистан, Узбекистан, 100174, , г. Ташкент, Талабалар шаҳарчаси, 3А

Аннотация. На сегодняшний день в мировой практике применение неинвазивных геофизических методов при решении археологических задач является неотъемлемой частью работ на начальном этапе исследований. В статье рассматривается опыт применения малоглубинной геофизики на различных археологических объектах Наманганской, Джизакской и Сурхандарьинской областей Республики Узбекистан. Целью работ являлось изучение древних погребений курганного типа, выделение культурного слоя на местах стоянок древних людей, а также исследование построек и объектов жизнедеятельности городищ Кушанского периода территории Северной Вактрии. Исследования проводились лабораторией «Геофизики и наноминералогии» Центра передовых технологий комплексом геофизических методов, включающем в себя магниторазведку, георадиолокационную съемку и электротомографию (ЭТ). Магнитная съемка проводилась с помощью протонных магнитометров Geometrics 856AX (США), при этом расстояние между датчиками составляло 50 см, таким образом шаг между точками измерений и профилями составлял 50 см. Георадарные измерения выполнялись георадаром PulseEKKO PRO компании Sensors & Software (Канада) по системе сеточных профилей с шагом между профилями 1 м и антенной с центральной частотой 100 МГц. При электротомографических измерениях методом ЭТ использовался 72 электродный георезистивиметр М.А.Е. X-612ЕМ (Италия) различными расстановками с учетом глубины и размеров объекта исследований. Применение геофизических методов позволяет определять различные археологические объекты в соответствии с изучаемым физическим полем, тем самым комплексирование методов дает возможность получить объектно-направленную информацию, при этом не нарушая целостность изучаемых объектов. В результате обработки и интерпретации полевого материала были получены карты, схемы, разрезы и глубинные срезы по геофизическим данным в пределах исследованных площадок с выделением аномалий, которые могут быть связаны с археологическими объектами. Результаты проведенных раскопок, подтверждают достоверность исследований.

Ключевые слова: археология, георадар, электроразведка, магниторазведка.

Получение: 20.02.2023; Исправление: 26.03.2023; Принятие: 10.04.2023; Публикация онлайн: 17.04.2023

Для цитирования. Янбухтин И.Р., Закиров А.Ш. Опыт применения неинвазивных методов геофизики при решении задач археологии // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2023. Т. 42. № 1. С. 223-238. EDN: GUDNJO. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-42-1-223-238>.

Финансирование. Статья выполнена в рамках прикладного гранта АЛМ-202109013 Министерства инновационного развития Республики Узбекистан.

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция: ✉ E-mail: ilyas_7@mail.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Янбухтин И. Р., Закиров А. Ш., 2023

© ИКИР ДВО РАН, 2023 (оригинал-макет, дизайн, составление)





Experience in the Application of Non-Invasive Geophysical Methods in Solving Problems of Archeology

*I. R. Yanbukhtin**, *A. Sh. Zakirov**

Center for Advanced Technologies under the Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan, Uzbekistan 100174, Tashkent, Talabalar Shaharchasi 3A.

Abstract. To date, in world practice, the use of non-invasive geophysical methods in solving archaeological problems is an integral part of the work at the initial stage of research. In the article the experience of using near-surface geophysics on different archaeological sites of Namangan, Djizak and Surkhandarya regions of the Republic of Uzbekistan is considered. The aim of the work was to study ancient burials of kurgan type, to identify cultural layer at the sites of ancient people standing and to study constructions and objects of vital activity of the Kushan period sites in the territory of Northern Bactria. Researches were carried out by the laboratory "Geophysics and nanomineralogy" of the Center of Advanced Technologies by a complex of geophysical methods including magnetic surveying, georadiolocation surveying and electrotomography (ET). The magnetic survey was carried out using Geometrics 856AX proton magnetometers (USA), with a distance of 50 cm between the sensors, so the step between the measurement points and the profiles was 50 cm. GPR measurements were carried out with a PulseEKKO PRO georadar of Sensors&Software company (Canada) using a grid profile system with a step between profiles of 1 m and an antenna with a central frequency of 100 MHz. During the electrical prospecting measurements by ET method a 72-electrode M.A.E. georesistivity meter was used. X-612EM (Italy) was used with different formations taking into account depth and size of the investigation object. Application of geophysical methods allows to determine different archaeological objects in accordance with the physical field under study, thereby the combination of methods makes it possible to obtain object-directed information, while not violating the integrity of the objects under study. As a result of processing and interpretation of field material were obtained maps, diagrams, sections and depth sections on geophysical data within the investigated sites with the allocation of anomalies that may be associated with archaeological objects. The results of the excavations, confirm the reliability of the research.

Key words: archeology, ground penetrating radar, electrical prospecting, magnetic prospecting.


Received: 20.02.2023; Revised: 26.03.2023; Accepted: 10.04.2023; First online: 17.04.2023

For citation. Yanbukhtin I.R., Zakirov A.Sh. Experience in the application of non-invasive geophysical methods in solving problems of archeology. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2023, 42: 1, 223-238. EDN: GUDNJO. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-42-1-223-238>.

Funding. The article was made within the framework of the applied grant ALM-202109013 of the Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan.

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: ilyas_7@mail.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Yanbukhtin I. R., Zakirov A. Sh., 2023

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2023 (original layout, design, compilation)



Введение

Использование неинвазивных геофизических методов стало неотъемлемой частью работ на начальном этапе археологических исследований. Такой подход способствует эффективному и быстрому обнаружению погребенных объектов, а также решению ряда задач при изучении исторических объектов, подвергшихся антропогенным, техногенным и природным воздействиям. Данный метод позволяет получить различные характеристики элементов изучаемого объекта, уточнить полученную в результате раскопок информацию и решить широкий спектр проблем, связанных с анализом и интерпретацией археологических объектов и материалов [1].

В 2018 году по инициативе академика АН РУз А.А. Аскарлова была организована экспедиция в Нарынский район Наманганской области, с целью изучения кургана - древнего памятника эпохи 3-2 столетия до нашей эры, на действующем кладбище «Булокмозор». Это и являлось первым опытом лаборатории «Геофизики и наноминералогии» применения геофизических методов в археологии. Для совершенствования навыков в рассматриваемой сфере в 2019 году лаборатория «Геофизики и наноминералогии» с привлечением коллег из лаборатории «Инженерной геофизики» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина организовала экспедицию в Байсунский район Сурхандарьинской области с целью изучения стоянки каменного века в среднем течении реки Мачай-дарья. С этого времени начинается тесная взаимосвязь с археологами и выполняются научно-исследовательские работы на различных объектах и памятниках Республики Узбекистан. Вместе с этим, лабораторией был подан проект на получение целевого гранта, финансируемого Министерством инновационного развития Республики Узбекистан, с целью развития данного направления.

В 2021 году получен грант АЛМ-202109013 на тему: «Применение инновационных геофизических, биологических, физико-химических технологий для исследования археологических памятников (на примере городищ Хайрабадтепа, Далварзинтепа, Каратепе и Лойлаганского могильника). В рамках проекта в октябре 2021 года совместно с институтом искусствознания АН РУз (доктор Леонид Сверчков) и Немецким археологическим институтом (доктор Николай Бороффка, отдел Евразии DAI), а также геофизическим отделом Мюнхенского университета Людвига-Максимилиана (доктор Йорг Фассбиндер) были проведены опытно-методические работы на курганных комплексах Могул и Аччи расположенных в Зааминском районе Джизакской области. С 2022 года начинаются планомерные исследования археологических объектов в Сурхандарьинской области.

Материалы и методы

Одними из эффективных методов для обнаружения археологических объектов в плане является площадная магнитная и георадиолокационная съемки,

которые выявляют аномалии, связанные с остаточной намагниченностью и диэлектрической проницаемостью археологических объектов. При изучении глубинной структуры сложнопостроенных объектов в условиях изменчивого рельефа хорошо себя зарекомендовал метод ЭТ [2].

Методика магниторазведочных исследований. При исследовании археологических объектов рекомендуемое расстояние датчика магнитометра от дневной поверхности не должно превышать 30 см. Это обусловлено влиянием общего фона магнитного поля на локальные измерения в каждой точке замера.

Магнитная съемка проводилась с помощью протонных магнитометров Geometrics 856AX (США). С целью повышения эффективности работ при полевых замерах использовались два датчика, подключенных к одному магнитометру, что позволило проводить измерения одновременно по двум профилям. Расстояние между датчиками составило 50 см, таким образом шаг между точками измерений и профилями составил 50 см.

Методика георадиолокационных исследований. При археологических исследованиях целесообразным является применение площадной георадарной съемки. Для повышения детальности исследований расстояние между параллельными профилями устанавливается в пределах 0,5-1 м, а шаг зондирования - 0,1 или 0,15 м. В зависимости от глубины залегания объектов исследования выбирают антенны с центральной частотой 100 или 250 МГц.

Измерения проводились георадаром PulseEKKO PRO компании Sensors&Software (Канада) по системе сеточных профилей (шаг между профилями составлял 1 м). Использовалась антенна с центральной частотой 100 МГц, с глубиной исследования до 5 м в различных грунтовых условиях.

Методика электроразведочных исследований. Электроразведочные работы методом ЭТ проводились с помощью 72 электродного георезистивиметра М.А.Е. X-612ЕМ (Италия). Измерения проводились различными расстановками с учетом глубины и размеров объекта исследований. Таким образом шаг между электродами составлял от 0,5 до 1 метра, а расстояние между профилями - 1 м. При измерениях использовались протоколы Диполь-Диполь, Веннер-Шлюмберже, Польш-Диполь, Польш-Польш. Наиболее эффективным показал себя протокол Диполь-Диполь, так как он является наиболее чувствительным.

Результаты

Обработка магниторазведочных данных. При обработке данных, были использованы стандартные процедуры, которые включали в себя: вычет суточного геомагнитного фона, привязку полученных результатов, построение карт аномалий геомагнитного поля. Первичная обработка данных проводилась в программе Mag-Map2000 (Geometrics). Передискретизация производилась в программных комплексах MagPick (Geometrics, США), Geoplot (Fa. Geoscan Ltd. Великобритания) и Surfer (Golden Software, США). Визуализация в виде

изображения в градациях серого позволяет отслеживать даже самые мелкие аномалии, возникающие из-за единичных точек или полигонов под поверхностью.

Обработка данных георадиолокационной съемки. Обработка полевого материала проводилась с использованием программного комплекса ЕККО_Project и состояла из следующих процедур: вычитание среднего значения радарограмм; приведение к нулевому отсчету; усиление; вычитание фоновых помех, создаваемых отражением в интервале грунт-прибор.

Обработка электроразведочных данных. Обработка данных была выполнена в программном комплексе x2ipr, в котором были отредактированы данные и присвоены значения высотных отметок каждой точке наблюдений. В редактирование данных входило исключение аномальных результатов замеров, ликвидация Р- и С-эффектов, вызванных слабым заземлением питающих и приемных электродов. Дальнейший процесс обработки данных заключался в расчете инверсии, основанной на модели, в программном комплексе Res2DInv. В процессе обработки использовались различные процедуры фильтрации, сглаживания и коррекции. Применялись различные методы расчета моделей исходя из специфики каждого профиля: его длина, соответствующее количество электродов и, как следствие, глубина исследования. С учетом трапециевидной формы получаемого разреза изоом, использовалось максимальное количество итераций при подсчете моделей для получения наиболее эффективного и достоверного результата.

Комплексирование данных. В результате проведения геофизических исследований на различных объектах были построены разрезы и карты аномалий геофизических полей. На них отчетливо наблюдаются аномалии, характеризующие объекты, находящиеся на глубине и скрытые покровными отложениями. Сопоставляя результаты магниторазведки, георадиолокационной съемки и электротомографии можно отметить, что выделенные области аномальных значений физических полей хорошо коррелируются между собой. Геометрические формы этих аномалий (угловатость, протяженность или округлость) выделяют их на фоне других [2,3]. Такое проявление аномалий может соответствовать постройкам или другим объектам жизнедеятельности в прошлом.



Рис. 1. Курган на кладбище «Булокмозор»
Figure 1. Barrow in the cemetery «Bulokmozor»

Проведенные исследования на кургане, расположенном на действующем кладбище «Булокмозор» в поселке Учтепа, расположенном в 30 километрах от современного г. Наманган, показали эффективность применения георадиолокационной съемки при обнаружении археологических объектов (рис. 1). Достоверность полученных результатов подтверждена археологическими раскопками (рис. 2).



Рис. 2. Результаты геофизических исследований и археологических раскопок кургана на кладбище «Булокмозор». А) формы объектов на срезе по глубине 2,25-2,50м по данным георадиолокационной съемки; В) фрагмент участка археологических раскопок
Figure 2. The results of geophysical research and archaeological excavations of the mound at the Bulokmozor cemetery. A) the shape of objects on the cut at a depth of 2.25-2.50 m according to georadar survey data; B) a fragment of an archaeological site

Как видно на рис. 2, объекты, проявляющиеся на срезах, полученных по данным георадарной съемки, имеют четкие геометрические формы, которые подтверждены археологическими раскопками и являются стенами религиозного объекта зороастризма.



Рис. 3. Общий вид ущелья Танги-Сарт
Figure 3. General view of the Tangi-Sart gorge

При изучении стоянки древнего человека каменного века, расположенного в ущелье Танги-Сарт, в среднем течении реки Мачай-дарья Сурхандарьинской области (рис. 3), был проведен комплекс геофизических исследований, включающий в себя магниторазведку, георадиолокационную съемку и электротомографию.

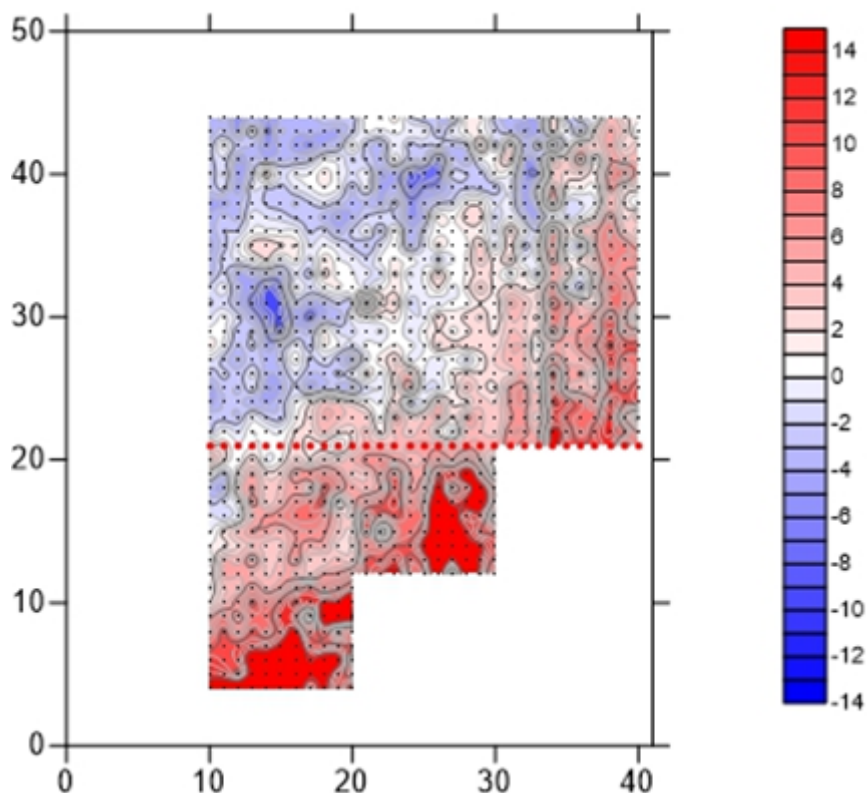


Рис. 4. Карта аномалий магнитного поля, нТл
Figure 4. Map of magnetic field anomalies, nT

По данным магниторазведки (рис. 4) выделены аномалии, возможно связанные с канавами и ямами, которые были выкопаны в древнее время и погребены под верхним слоем почвы. Эти аномалии характеризуются положительными значениями, тогда как кладки из менее магнитного материала, находящиеся в слабомагнитной почве, могут быть найдены по отрицательным магнитным сигналам [4].

По данным электротомографии в верхней части склона видна площадь с ярко выраженными пониженными значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) длиной около 20 м и толщиной 5 м. Низкие значения УЭС (рис. 5) связаны с тем, что культурные слои представлены низкоомными серыми глинами и гумусом, что можно видеть по данным археологического шурфа. Также следует отметить, что в средней части профиля наблюдается вторичный культурный слой длиной 11 м и средней мощностью 4 м, вымытый в сторону русла реки. Он также характеризуется пониженными значениями УЭС, так как породы схожи по составу с описанным выше культурным слоем. Пониженные значения

УЭС в конце профиля связаны с тем, что в этой области происходит прилегание к руслу реки, в связи с чем породы влагонасыщены. В целом, наблюдается достаточно яркая оползневая система.

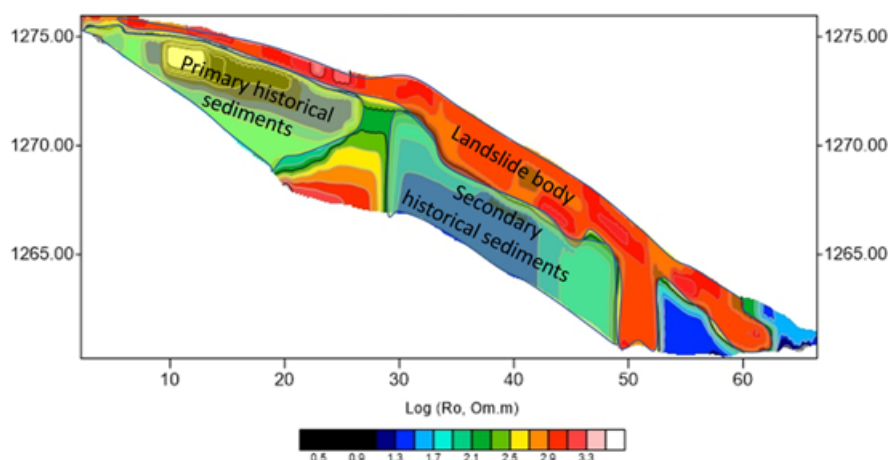


Рис. 5. Разрез сопротивлений по линии I

Figure 5. Section of resistance along line I

Геофизические исследования курганов около поселка Аччи Джизакской области предусматривали применение высокоточной магнитометрии и электротомографии. Курганы на исследуемой территории представляют собой круглые грунтовые насыпи диаметром от 3 до 30 м и высотой от 30–40 см до 2–2,5 м [5].

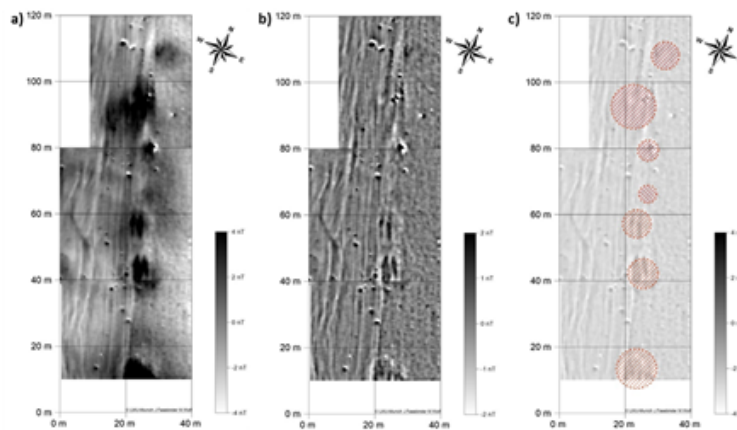


Рис. 6. Площадь Аччи. Магнитометрическое измерение площади Аччи. (Йорг Фассбиндер, 2021). а, б – полное магнитное поле Земли в Аччи 10/2021, 52.700 ± 40 нанотесла, чувствительность ± 10 пикотесла, плотность выборки 25×50 см, интерполяция до 25×25 см, динамика в 256 градаций серого, полное поле в сочетании с фильтром верхних частот; с – интерпретация магнитометрического измерения области Аччи

Figure 6. Acci Square. Magnetometric measurement of the area of Acci. (Jörg Fassbinder, 2021). а, б - Earth's total magnetic field at Acci 10/2021, 52.700 ± 40 nanotesla, sensitivity ± 10 picotesla, sampling density 25×50 cm, interpolation up to 25×25 cm, dynamics in 256 gradations grey, full field combined with a high-pass filter; с - interpretation of the magnetometric measurement of the Acci region

В результате проведения магнитометрической съемки и ее обработки были выявлены аномалии полного вектора магнитного поля (рис. 6). На карте магнитометрической съемки четко наблюдается наличие группы курганов, палеорусла рек и каналов, а также выделяются линии недавней вспашки поля [2].

Электроразведочные работы были проведены на кургане №15 площади Аччи. В результате исследований на кургане были получены разрезы сопротивлений. Разрез по профилю 2, пересекающий центр кургана (рис. 7), наиболее полно отражает его строение.

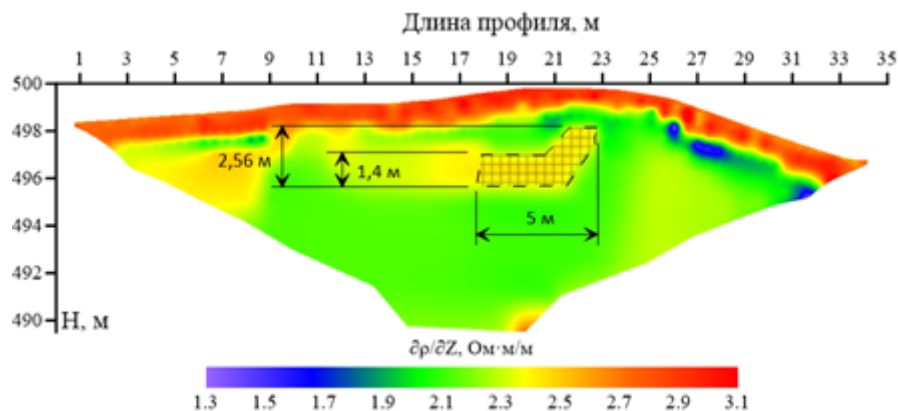


Рис. 7. Результаты электротомографических исследований. Профиль 2 (СВ-ЮЗ) магнитометрического измерения области Аччи

Figure 7. Results of electro-tomographic studies. Profile 2 (NE-SW) of the magnetometric measurement of the Achchi area

На разрезе наблюдаются высокие значения сопротивлений по всей поверхности кургана, связанные с современными покровными отложениями. По краям кургана наблюдаются характерные аномалии, которые указывают на наличие ровиков. С глубины 2 м от поверхности наблюдается аномалия, вероятно связанная с захоронением камерного типа. Аномалия имеет характерную форму «сапожка», которая может представлять собой спуск, дромос и саму камеру с размерами около 3 м в глубину и размером аномалии в сечении около 1,4 м [6].



Рис. 8. Площадь Аччи. Фото вскрытого кургана №20
Figure 8. Acci Square. Photo of the opened barrow No. 20

По данным археологов, захоронения того времени имели вертикальный спуск на глубину, а далее уже в горизонтальном направлении производилось выкапывание самой камеры, куда и погружалось тело. На рис. 8 видно захоронение, вскрытое археологами на кургане № 20. Исходя из этого, можно предположить, что аномалия, полученная на кургане №15, соответствует реальной камере захоронения [5].

При изучении городища Далварзинтепа выполнялись геофизические измерения методами магниторазведки, георадиолокации и электротомографии. Далварзинтепа – древнее городище, расположенное на юге Узбекистана (рис. 9). Общая площадь 47 га и представлена в форме прямоугольника. Городище окружено высокими стенами, с наружной стороны высотой 8-10 м, с наклоном 55-60°, с внутренней стороны стены достигают высоты 3-3,5 м от поверхности [7].



Рис. 9. Обзор участка и области измерения. (а) Местоположение городища Далварзинтепа на схеме Google Maps; (б) Изображение с сайта Google Earth. Область исследований показана красным квадратом

Figure 9. Site overview and measurement area. (a) Location of Dalvarzintepa settlement on Google Maps; (b) Image from the Google Earth website. The research area is shown as a red square

В результате исследований были построены карты магнитных аномалий, разрезов и срезов УЭС по площади, а также глубинных срезов по данным георадиолокации (рис.10).

На рис. 10 видны аномалии, описывающие определенные объекты, расположенные на глубине и перекрытые покровными отложениями. Эти аномалии отличаются от других определенными геометрическими признаками - угловатость, длина или округлость. Аномалия в форме круга вызвала наибольший интерес. После проведения геофизических измерений были начаты археологические раскопки в квадратах 5х5 м с шириной бровки 1 м в пределах площади исследований (рис. 11).

Результаты археологических раскопок в квадратах № 7, 8, 10 и 11 подтвердили наличие объекта в форме круга (рис. 11с). На рис. 11а показано, как увеличивается толщина слоя в области квадратов 8 и 11, близких к центральному краю.

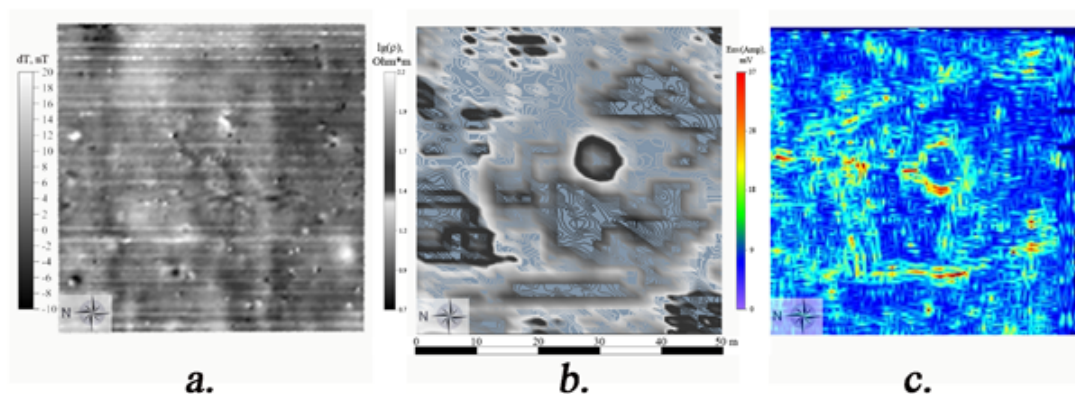


Рис. 10. Карты геофизических аномалий в пределах площади исследований, полученные по данным: а) магниторазведки, б) электротомографии (разрез 1-1,25 м), с) георадара (разрез 1-1,25 м)

Figure 10. Maps of geophysical anomalies within the study area, obtained from the data of: a) magnetic prospecting, b) electrotomography (section 1-1.25 m), c) georadar (section 1-1.25 m)

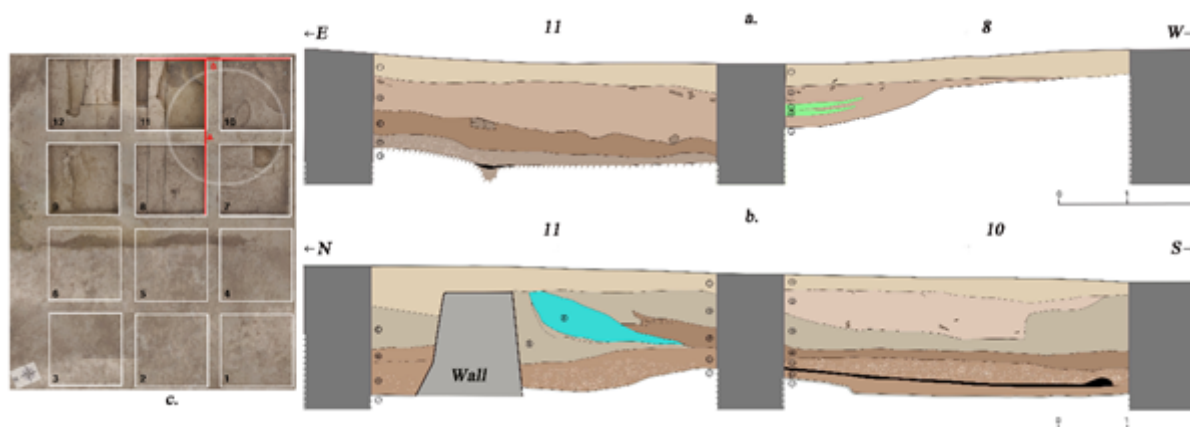


Рис. 11. Результаты раскопок. а) участок южного края. 1 - надувной слой; 2 - слой золы и золы с большим количеством обломков керамики и костей; 3 - остатки круглого очага из обожженной глины с кусками кирпича; 4 - остатки круглого глиняного очага; 5 - обожженная глина; 6 - плотный слой натечного характера; 7 - зольный слой; 8 - пол 1. б) участок восточного края. 1 - надувной слой; 2 - грунт с пеплом и золой, а также с обломками керамики и кирпичей; 3 - слой золы с большим количеством керамики и обломков кирпичей; 4 - плотный слой натечного характера; 5 - горелый слой с пеплом; 6 - зольный слой; 7 - пол 1; 8 - слой пепла; 9 - слой комковатой глины. с) обзор района раскопок (ортофото: А. Закиров)

Figure 11. Excavation results. a) south end. 1 - inflatable layer; 2 - a layer of ash and ash with a large number of fragments of ceramics and bones; 3 - the remains of a round hearth made of baked clay with pieces of brick; 4 - remains of a round clay hearth; 5 - burnt clay; 6 - dense layer of sinter character; 7 - ash layer; 8 - floor 1. b) section of the eastern edge. 1 - inflatable layer; 2 - soil with ash and cinders, as well as fragments of ceramics and bricks; 3 - a layer of ash with a large amount of ceramics and fragments of bricks; 4 - dense layer of sinter character; 5 - burnt layer with ash; 6 - ash layer; 7 - floor 1; 8 - a layer of ash; 9 - layer of lumpy clay. c) overview of the excavation area (orthophoto: A. Zakirov)

Стены также хорошо видны пространственно и гипсометрически на рис. 11b и 11c, в плане и в разрезе, и совпадают с аномалиями, обнаруженными по геофизическим данным.

В пределах городища Хайрабадтепа, расположенного в Сурхандарьинской области, которое является памятником кушанского времени на территории Северной Бактрии [7,8], геофизические работы проводились методами магниторазведки и электротомографии. Древняя постройка располагается в 1 км к юго-западу от города Ангора, в 30 км к северо-западу от города Термез (рис. 12).

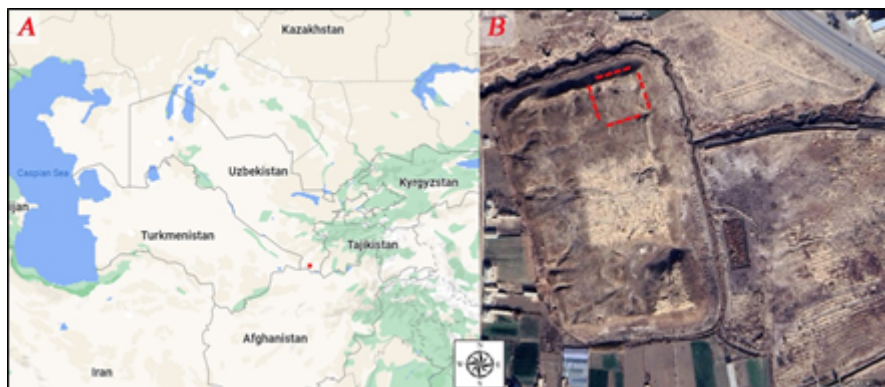


Рис. 12. Местоположение древнего поселения Хайрабадтепа: А - изображение на схеме Google Maps; В - изображение с сайта Google Earth

Figure 12. Location of the ancient settlement of Khairabadtepa: A - image on the Google Maps scheme; B - image from Google Earth

Исследования с применением геофизических методов были сконцентрированы в северо-восточном углу городища, с целью изучения узла обороны, а именно фортификации стен, башен, а также примыкающей внутригородской застройки [7]. Для создания трехмерной модели площади работ была выполнена фотограмметрическая съемка (рис. 13).

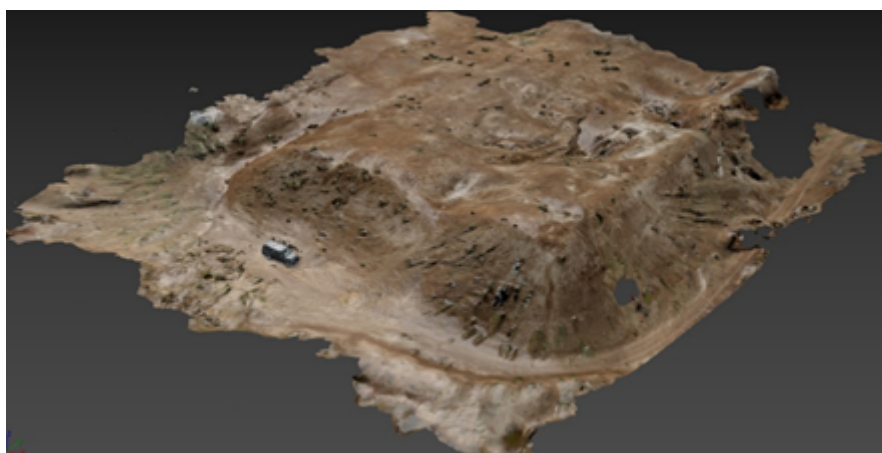


Рис. 13. Трехмерная модель рельефа площади работ

Figure 13. 3D relief model of the work area

В результате комплексной интерпретации магниторазведочных и электроразведочных данных были выделены наиболее ярко выраженные участки (рис.14).

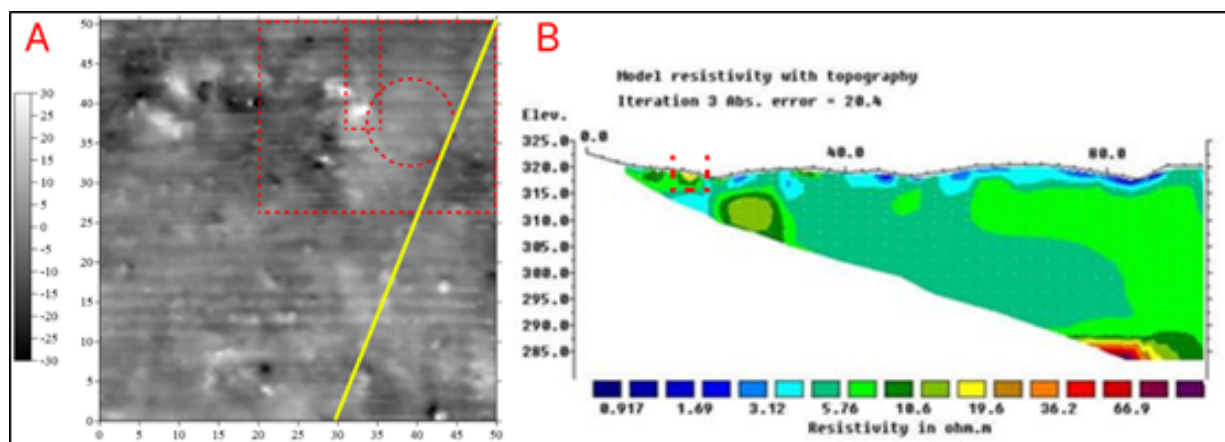


Рис. 14. Сопоставление результатов магниторазведки и электротомографии (профиль I): А - карта магнитных аномалий на площади (желтым цветом обозначен профиль I ЭТ); В - фрагмент разреза сопротивлений

Figure 14. Comparison of the results of magnetic prospecting and electro-tomography (profile I): A - map of magnetic anomalies in the area (profile I ET is indicated in yellow); B - fragment of the section of resistances

Как видно на рис. 14, в плане отчетливо наблюдаются аномалии, характеризующие различные объекты, скрытые покровными отложениями, которые формируют различные геометрические фигуры. В частности, в северо-восточной части карты магнитных аномалий наблюдаются объекты, повторяющие форму круга и прямоугольника. Сопоставляя результаты магниторазведки и электротомографии, можно отметить, что область повышенных значений магнитного поля, выделенная по данным магниторазведки, хорошо коррелируется с результатами ЭТ. Геометрические формы этих аномалий выделяют их на фоне других [8–10]. Такое проявление аномалий может соответствовать постройкам или же другим объектам жизнедеятельности в прошлом. По данным археологов в северо-восточной части стены предполагается наличие оборонительной башни, что может соответствовать выделяемым аномалиям в форме круга.

Археологические раскопки на площади проводились после тщательной обработки данных магниторазведки и электротомографии с использованием априорной археологической информации о геометрии (форме, глубине залегания, азимутальности) интересующего объекта. Сопоставление геофизических данных с результатами раскопа представлено на рис. 15.

На рис. 15 видно, что посредством раскопок обнаружены два объекта. Первый это основание башни, контур которого пространственно совпадает с ее положением магнитной аномалии на карте. Также эту область мы можем проследить на трехмерной модели рельефа, созданной с помощью фотограмметрии. Второй объект в форме прямоугольника, вытянутой формы, выявленный по данным

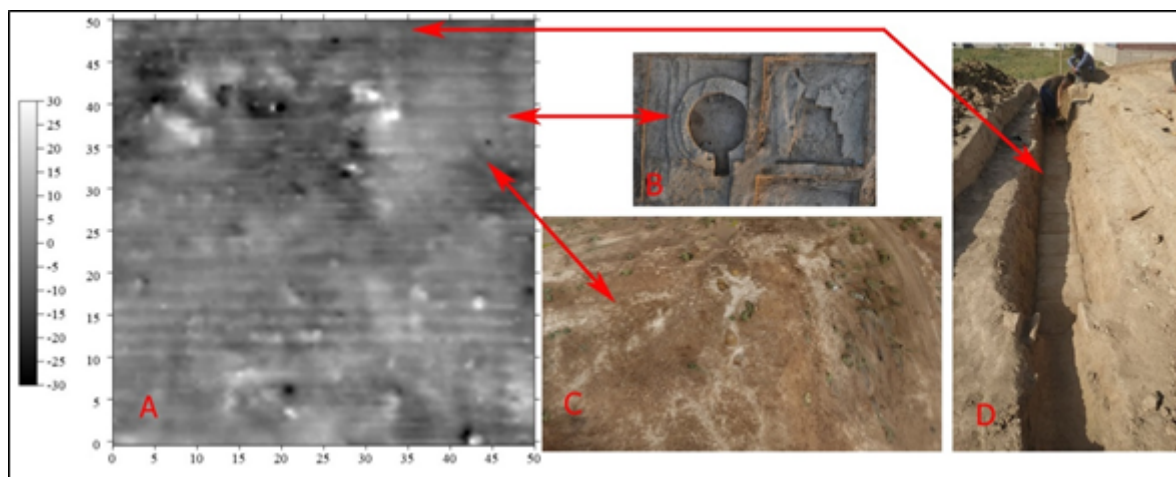


Рис. 15. Совместный анализ результатов раскопок и геофизических методов исследуемой площади: А - карта аномалии геомагнитного поля; В - предполагаемое основание оборонительной башни, С - результат фотограмметрии на поверхности местности; D - предположительно дренажное сооружение

Figure 15. Joint analysis of the results of excavations and geophysical methods of the study area: A - map of the anomaly of the geomagnetic field; B - the expected base of the defensive tower, C - the result of photogrammetry on the surface of the area; D - presumably a drainage structure

магниторазведки, скорее всего, является дренажным сооружением. На 11 и 15 метрах профиля I электротомографии наблюдаются аномалии высоких сопротивлений относительно вмещающих пород.

Заключение

Междисциплинарный подход к решению естественно-научных задач имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными методами. Применение неинвазивных методов геофизики в археологии несомненно является подобным походом, который позволил открыть новый вектор в деятельности лаборатории. Благодаря совместной работе специалистов Узбекистана, России и Германии в области археологии и геофизики были организованы экспедиции на различные археологические объекты Узбекистана. Опыт совместных работ позволил оптимизировать процесс выполнения геофизических работ на местности и повысить детальность измерений.

По результатам обработки и интерпретации полевого материала были получены карты, схемы, разрезы и глубинные срезы по геофизическим данным в пределах исследованных площадок с выделением аномалий, которые могут быть связаны с древними объектами строительства или другими объектами жизнедеятельности человека.

Таким образом, можно сделать вывод, что методы разведочной геофизики, такие как магниторазведка, георадиолокационная съемка и электротомография, позволяют эффективно решать самые сложные археологические задачи.

Список литературы

1. Gorka T., Fassbinder J.W.E. Classification and Documentation of Kurgans by magnetometry / *Proceedings of the Archaeological Prospection, Extended Abstracts, 9th International Conference on Archaeological Prospection, Izmir, Turkey, 19–24 September 2011*, pp. 183–186.
2. Закиров А.Ш., Янбухтин И.С., Мамарозиков Т.У., Йорг Фассбиндер В.Э., Сергеев К.С., Севостьянов М.В. Комплексование магниторазведки и электротомографии при изучении курганных насыпей на территории республики Узбекистан, *Геофизика*, 2022. № 1, С. 72-76.
3. Новиков В.В., Каинов С.Ю., Власов Д.А., Сергеев К.С., Горин А.Д. Результаты электроразведочных и археологических исследований Лесной курганной группы Гнёздовского археологического комплекса, *Геофизика*, 2018. № 6, С. 82-90.
4. Fassbinder J.W.E., Gorka T.H. Beneath the desert soil -archaeological prospecting with a cesium magnetometer, in new technologies for archaeology / *Multidisciplinary investigations in Palpa and Nasca, Peru, First, Natural Science in Archaeology*, Springer, pp. 49-69.
5. Сверчков Л. М. Горная Уструшана и некоторые вопросы исторической географии Средней Азии, *Российская археология*, 2013. № 3, С. 80-91.
6. Hegyi A., Diaconescu D., Urdea P., Sarris A., Pisz M., Onaca A. Using Geophysics to Characterize a Prehistoric Burial Mound in Romania, *Remote Sens.*, 2021. no.13, pp. 842 <https://doi.org/10.3390/rs13050842>.
7. Пугаченкова Г.А. *О недавних открытиях в Южном Узбекистане (к проблеме Бактрийской городской культуры)*, Памятники культуры: новые открытия. М., 1975.
8. Тошбоев Ф.Э., Пардаев М.Х., Грицина А.А. Изучение Гульбинского могильника, *Культура номадов Центральной Азии*, 2008, С. 184-189.
9. Chen R., Tian G., Zhao W., Wang Y., Yang Q. Electrical resistivity tomography with angular separation for characterization of burial mounds in southern China, *Archaeometry*, 2018. no. 60, pp. 1122–1134.
10. Tsourlos P., Papadopoulos N., Yi M.-J., Kim J.-H., Tsokas G. Comparison of measuring strategies for the 3-D electrical resistivity imaging of tumuli, *J. Appl. Geophys.*, 2014. no. 101, pp. 77–85.

Информация об авторах



Янбухтин Ильяс Рустамович ✉ – PhD по геолого-минералогическим наукам, старший научный сотрудник лаборатории «Геофизики и наноминералогии» Центра передовых технологий при Министерстве Инновационного развития Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан, <https://orcid.org/0000-0003-0019-9702>.



Закиров Азамат Шухратович ✉ – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Геофизики и наноминералогии» Центра передовых технологий при Министерстве Инновационного развития Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан, <https://orcid.org/0000-0002-9245-6747>.

References

- [1] Gorka T., Fassbinder J.W.E. Classification and Documentation of Kurgans by magnetometry, Proceedings of the Archaeological Prospection, Extended Abstracts, 9th International Conference on Archaeological Prospection, Izmir, Turkey, 19–24 September 2011, 183–186.
- [2] Zakirov A. Sh., Yanbukhtin I. S., Mamarozikov T. U., Jörg Fassbinder V. E., Sergeev K. S., Sevostyanov M. V. Integration of magnetic exploration and electrical tomography in the study of barrow mounds on the territory of the Republic of Uzbekistan, *Geofizika*, 2022, 1, 72-76 (In Russian).
- [3] Novikov V. V., Kainov S. Yu., Vlasov D. A., Sergeev K. S., Gorin A. D. The results of electrical exploration and archaeological research of the Forest Kurgan group of the Gnezdovsky archaeological complex, *Geofizika*, 2018, 6, 82-90 (In Russian).
- [4] Fassbinder J.W.E., Gorka T.H. Beneath the desert soil -archaeological prospecting with a cesium magnetometer, in new technologies for archaeology, Multidisciplinary investigations in Palpa and Nasca, Peru, First, Natural Science in Archaeology, Springer, 49-69.
- [5] Sverchkov L. M. Gornaya Ustrushana i nekotoryye voprosy o porazhenii geografii Sredney Azii, *Rossiyskaya arkheologiya*, 2013, 3, 80-91 (In Russian).
- [6] Hegyi A., Diaconescu D., Urdea P., Sarris A., Pisz M., Onaca A. Using Geophysics to Characterize a Prehistoric Burial Mound in Romania, *Remote Sens.*, 2021, 13, 842, <https://doi.org/10.3390/rs13050842>
- [7] Pugachenkova G. A. O nedavnikh otkrytiyakh v Yuzhnom Uzbekistane (k probleme baktriyskoy gorodskoy kul'tury), *Pamyatniki kul'tury: novyye otkrytiya*, Moskva, 1975 (In Russian).
- [8] Toshboyev F. E., Pardayev M. KH., Gritsina A. A. Izucheniye Gul'binskogo mogil'nika, *Kul'tura nomadov Tsentral'noy Azii*, 2008, 184-189 (In Russian).
- [9] Chen R., Tian G., Zhao W., Wang Y., Yang Q. Electrical resistivity tomography with angular separation for characterization of burial mounds in southern China, *Archaeometry*, 2018, 60, 1122–1134.
- [10] Tsourlos P., Papadopoulos N., Yi M.-J., Kim J.-H., Tsokas G. Comparison of measuring strategies for the 3-D electrical resistivity imaging of tumuli, *J. Appl. Geophys.*, 2014, 101, 77–85.

Information about authors



Yanbukhtin Ilyas Rustamovich ✉ – PhD (Gelog. & Min.), Senior Researcher at the Laboratory of Geophysics and Nanomineralogy of the Center for Advanced Technologies under the Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, <https://orcid.org/0000-0003-0019-9702>.



Zakirov Azamat Shukhratovich ✉ – PhD (Tech.), Senior Researcher at the Laboratory of Geophysics and Nanomineralogy of the Center for Advanced Technologies under the Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, <https://orcid.org/0000-0002-9245-6747>.