

РУБРИКА: ИНЖЕНЕРНАЯ И РУДНАЯ ГЕОФИЗИКА

Сравнительные результаты 2D и 3D электротомографии на примере курганного могильника Конево-10

И.О. Шапаренко* (ИНГГ СО РАН), Ю.Г. Карин (ИНГГ СО РАН), Е.В. Балков (ИНГГ СО РАН), А.Е. Шалагинов (ИНГГ СО РАН), Кузина З.Я. (ИНГГ СО РАН)

Аннотация

Активное развитие метода электротомографии привело к возможности использования трехмерных сетей наблюдения. Однако ввиду различных причин, такие установки используются нечасто. В работе рассматривается сравнение набора 2D и 3D расстановок на примере одного археологического объекта. На данном объекте в более крупном масштабе также была применена технология малоглубинного электромагнитного картирования для поиска и локализации древнего антропогенного объекта, детальное изучение которого выполнялась методом электротомографии с использованием аппаратуры «Скала». По результатам проведенных работ можно отметить, что результат инверсии данных набора 2D расстановок дает бóльшую детальность исследования, чем набор данных системы трехмерных наблюдений. Однако, и по 3D измерениям можно определить структуру объекта. Преимуществом трехмерных измерений является меньшее количество заземлений электродов, необходимых для покрытия одной и той же площади исследования.

Ключевые слова электротомография, археогеофизика, курган, 3D инверсия

Comparative results of 2D and 3D electrical resistivity tomography on the example of the burial mound Konevo-10

The authors are in English. First, write the initials, then the last name, and in parentheses for each co-author is the name of the organization. Example: I.O. Shaparenko* (IPGG SB RAS) Yu.G. Karin (IPGG SB RAS) E.V. Balkov (IPGG SB RAS), A.E. Shalaginov (IPGG SB RAS)

Abstract

Active development of the electrical resistivity tomography method has led to the possibility of using three-dimensional observation networks. However, due to various reasons, such installations are used infrequently. The paper compares the set of 2D and 3D arrangements using one archaeological site as an example. At this site, shallow-depth electromagnetic mapping technology was also used on a larger scale. Electrical resistivity tomography was performed using the «Skala» equipment. Based on the results of the work, it can be said that the 2D arrangement provides better research detail than the three-dimensional observation system. However, the structure of the object can also be determined by 3D measurements. The advantage of three-dimensional measurements is a smaller number of electrode groundings required to cover the same area of research.

Key words electrical resistivity tomography, archaeogeophysics, mound, 3D inversion

Введение

Метод электротомографии активно развивается с конца 20-го века. Изначально измерения проводились вдоль линии (профиля), далее по мере развития технологий появились работы с набором параллельных профилей, а затем и полностью трехмерные системы наблюдения. В настоящее время трехмерные системы наблюдения используются нечасто. Причин тому несколько: во-первых, для плотной сети наблюдения требуется аппаратура, поддерживающая подключение большого количества электродов; во-вторых, не так много задач, где трехмерная система наблюдений имеет преимущество перед плотной сетью параллельных профилей; в-третьих, создание протоколов для трехмерных систем наблюдения слабо развито и требует усовершенствования. И тем не менее, 3D системы измерения применяются для различных задач. Например, для исследования грунта под зданиями [1,2], для изучения локальных геоэлектрических аномалий [3], для решения археогеофизических задач [4, 5].

Метод и объект исследования

В ходе опытно-методических полевых работ сезона 2023 года применялась технология малоглубинного электромагнитного картирования (ЭМК), особенностью которой являются три индукционных прибора, зафиксированных с равным расстоянием на специальных стеклопластиковых санях, что в совокупности с высокоточной спутниковой привязкой измерений способствует равномерному распределению точек наблюдения при сохранении достаточно высокой производительности. В качестве единичного прибора используется аппаратура для малоглубинного ЭМК Геовизер, созданная на базе ИНГГ СО РАН [6]. Для детализации аномальных объектов был использован метод электротомографии, которому посвящена основная часть этой работы.



Рисунок 1. Измерительная установка в полевых условиях на курганном могильнике Конево-10. Аппаратура Скала 64К15Е.

При проведении исследований набором параллельных профилей была использована 32-х электродная 4-х канальная аппаратура «Скала 32К4». Были проведены исследования по системе параллельных профилей длиной 31 м, с шагом 1 м по профилю и 2 м между профилями, всего 20 расстановок, использовалась дипольная установка. На каждом профиле из 32-х электродов было записано по 385 измерений. Итого, с использованием 640 электродов было получено 12320 точек записи.

Трехмерная система наблюдений, измеренная с помощью 64-х электродной 15-ти канальной аппаратуры Скала 64К15Е, состояла из двух параллельных кабелей по 32 электрода на расстоянии 4 м друг от друга – всего 9 расстановок. При 3D измерениях использовались различные дипольные установки, что позволило кроме точек записи непосредственно под линиями профилей получить дополнительные данные в пространстве между профилями. На рисунке 2 (а,б,в) представлено облако точек записи для 3D расстановки из двух параллельных профилей. На рисунке 2г показано как располагались последовательно измеренные 3D расстановки. В каждой расстановке из 64-х электродов было записано по 1810 измерений. Итого по 3D измерениям с использованием 320 электродов было получено 16290 точек записи. Измерительный протокол создавался в программе ERTLab Sequencer.

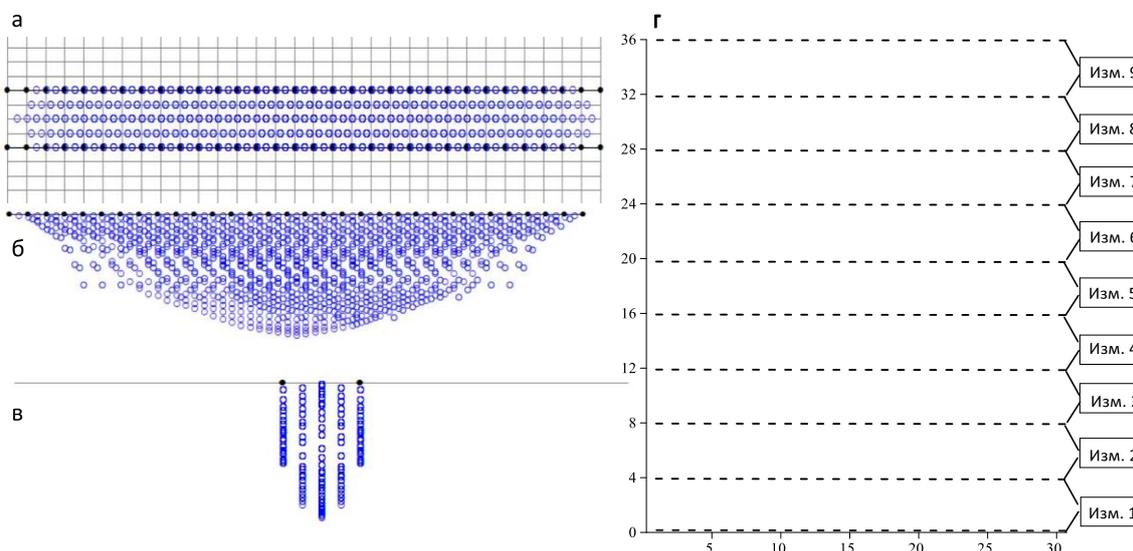


Рисунок 2. Система 3D измерений, синим – точки записи, черным – электроды. Слева общее облако точек записи, где, а – плоскость XY, б – плоскость XZ, в – плоскость ZY; г – схема трехмерных измерений (вид сверху), пунктирные линии – схематично показаны электроразведочные косы.

В качестве объекта, на котором проводились опытно-методические работы был выбран Курганный могильник Конево-10 (рис.3а), который расположен в Краснозерском районе Новосибирской области, в окрестностях одноименного села. Памятник открыт в 2015 г. и по характеру подъемного археологического материала отнесен к тасмолинской культуре раннего железного века (VII-VI вв. до н.э.) [7]. Памятник длительное время подвергается распашке. По рельефным признакам на его территории выделяются три курганных насыпи, диаметром до 30 м, высотой 0.8–1 м. Весьма вероятно, что рельефные признаки других курганов могли быть полностью уничтожены в ходе сельскохозяйственной деятельности. Таким образом, применение высокопроизводительной технологии ЭМК давало возможность в короткие сроки получить дополнительную информацию об известных археологических объектах и обнаружить новые.

Результаты

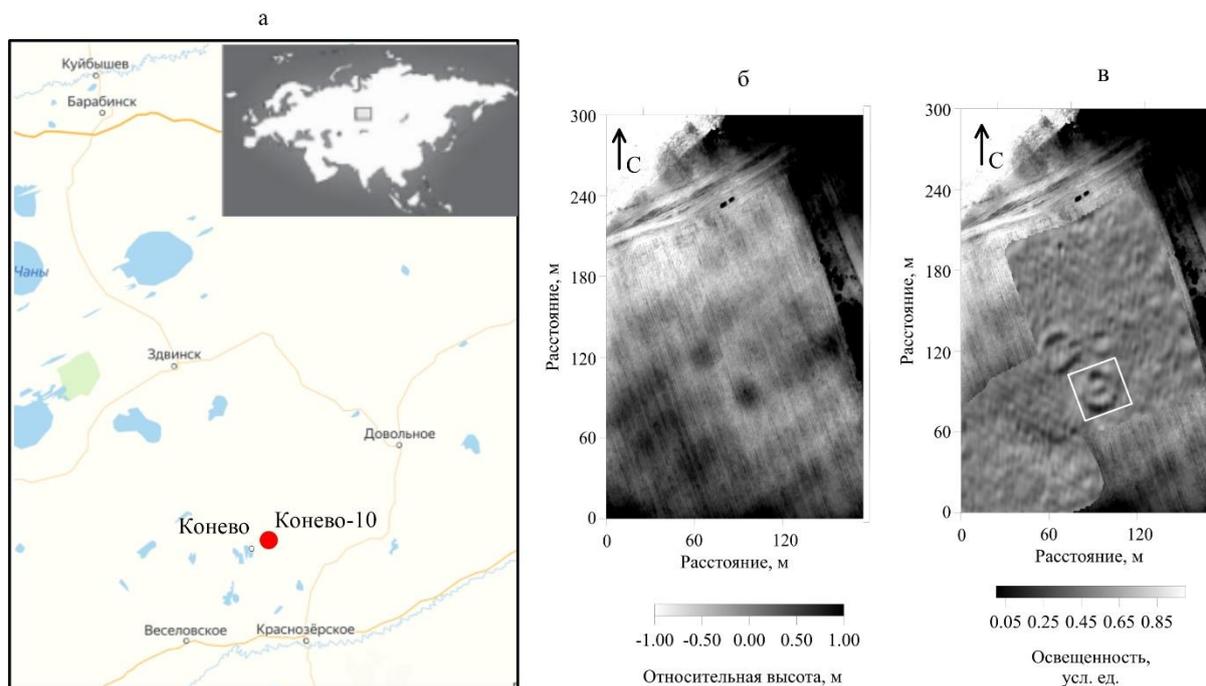


Рисунок 3. Карта района работ (а). Карта относительных высот археологического памятника (б) и теневая карта распределения реальной компоненты сигнала с горизонтальным и вертикальным углами искусственного освещения в 126° и 29° (в).

Съемка по технологии ЭМК, а также последующая детализация методом ЭТ позволили в течение одного рабочего дня получить информацию о внутреннем устройстве изученных памятников [8].

Вокруг двух рельефно выраженных насыпей могильника Конево-10 выделяются кольцевые аномалии, которые можно интерпретировать как запаханые рвы (рис. 3в). В центре южного кургана фиксируется аномалия, которая по знаку и уровню сигнала совпадает с кольцевыми аномалиями рвов. Вероятнее всего, она связана с центральным захоронением. В непосредственной близости от этих курганов обнаружен еще один ров. Характерная кольцевая структура отчетливо прослеживается на теневой карте, построенной по результатам ЭМК (рис. 3в). Выраженных рельефных признаков данный объект не имеет и, по-видимому, представляет собой остатки полностью распаханного кургана. Под курганом, расположенным в восточной части площадки, аномалии, характерные для рвов и погребений не обнаружены (рис. 3в), однако по данным аэрофотосъемки на этом месте выделяется возвышение (рис. 3б). Вполне вероятно, что оно имеет естественное происхождение.

Далее рассмотрим результаты, полученные при детализации методом ЭТ. Работы проводились по приведенной выше системе наблюдений. Трехмерная модель, полученная в результате инверсии данных 2D и построенная в программе Voxler, представлена на рисунке 4.

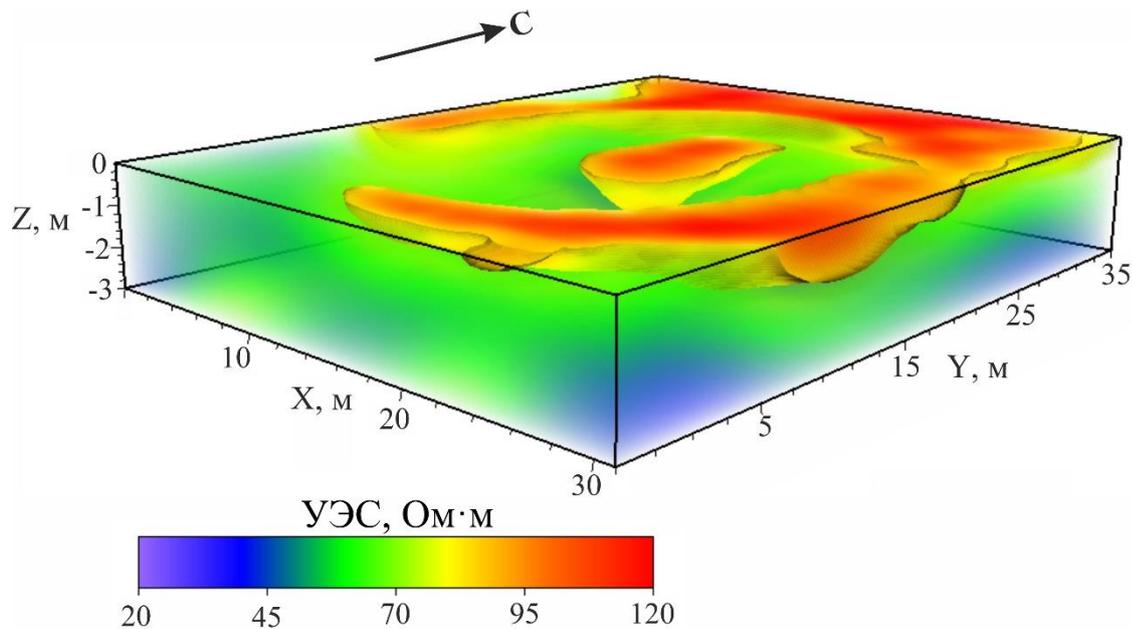


Рисунок 4. Трёхмерная геоэлектрическая модель кургана на могильнике Конево-10 по результатам 2D измерений.

На трехмерной модели ярко выделяются ров и центральная аномалия, причём они имеют близкие значения по УЭС, также, как и по данным ЭМК. Прерывание рва в южной части кургана с высокой вероятностью связано со входом на курган. Центральная аномалия, выделяемая также по результатам ЭМК, связана с основным центральным захоронением. Метод ЭТ позволяет определить мощности рва и центрального захоронения: оба объекта прослеживаются до глубины 1 м.

Для сравнения результатов по 2D и 3D измерениям инверсия данных выполнялась с помощью программы Res3D. Наиболее информативные срезы на глубинах 0.5 и 1 м показаны на рисунке 5. На срезах представлены результаты, полученные при использовании установки Шлюмберже.

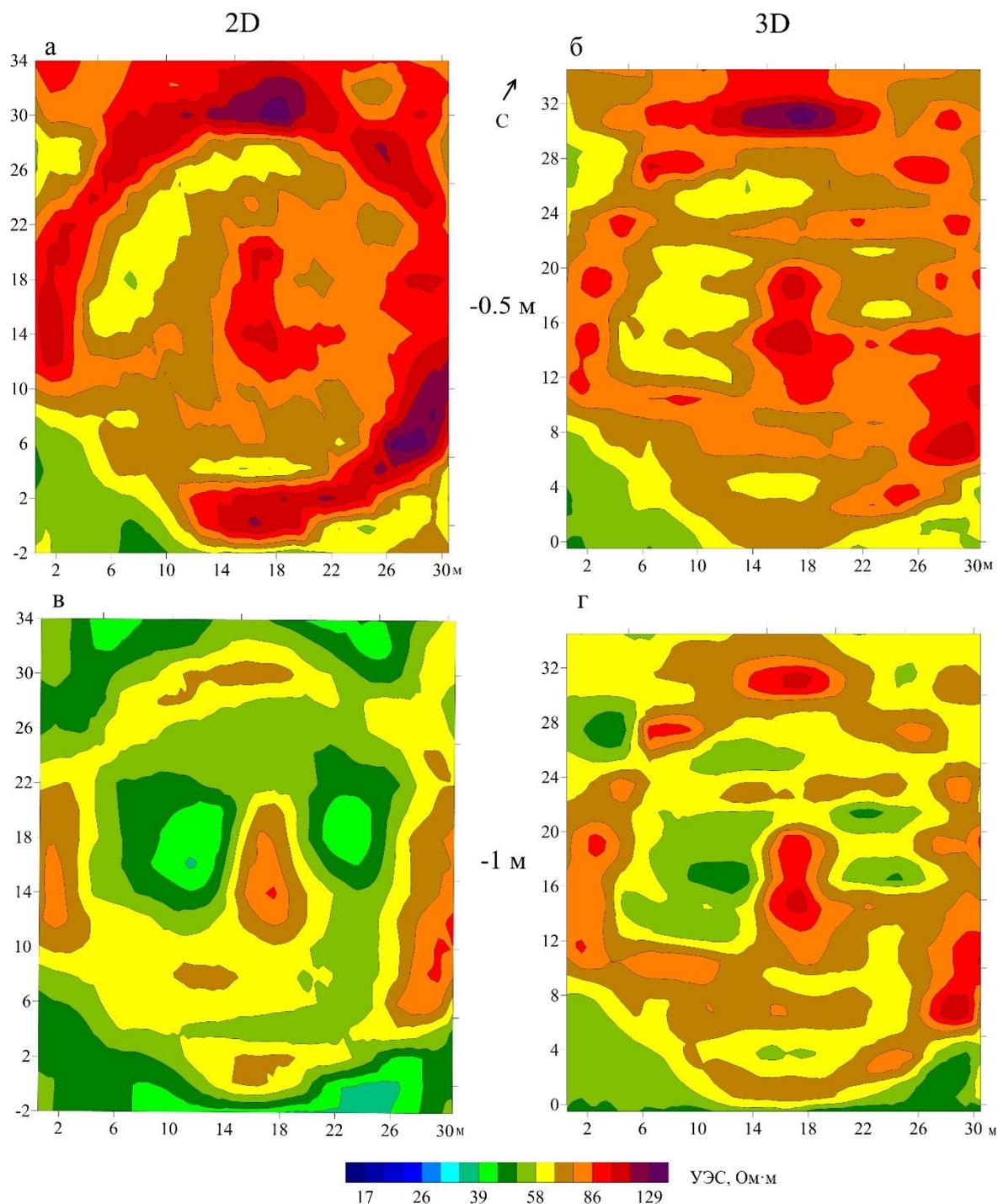


Рисунок 5. Срезы для массивов двумерных и трехмерных данных на двух глубинах: а – 2D данные на глубине 0.5м, б – 3D данные на глубине 0.5м, в - 2D данные на глубине 1м, г – 3D данные на глубине 1м.

Концентрический контур рва, явно выделяющийся по результатам инверсии набора 2D данных (рис. 5а), на 3D данных сильнее искажен локальными аномалиями. Центральное захоронение хорошо проявляется по результатам обеих систем наблюдения. На глубине 1 м кольцевая структура рва еще больше искажена, вероятно это связано с тем, что его глубина не превышает

1 м. Общая картина по 2D данным более гладкая, однако контур рва и центральная аномалия также выделяются по 3D системе наблюдений.

Выводы

По результатам проведенных работ можно сказать, что инверсия данных набора параллельных профилей дает большую детальность исследования, чем система трехмерных наблюдений. Однако, и по 3D измерениям можно определить структуру археологического объекта, выделить центральное захоронение. В рассмотренном случае сокращение количества профилей за счёт межкабельных измерений - это основное преимущество трехмерной системы наблюдения, так как экономически выгодно сокращать количество заземлений без потери плотности точек наблюдения. Поэтому следует продолжить исследование возможностей 3D наблюдений: изучать чувствительность, создавать новые измерительные протоколы, проводить математическое и физическое моделирование, ускорять процесс измерений.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках проекта НИР FWZZ-2022-0025. Полевые работы выполнены при технической поддержке ООО «КБ Электрометрии». Авторы выражают благодарность сотруднице ИАИЭ СО РАН Ольге Поздняковой за предоставление информации об объекте исследования.

Список литературы

1. Trogu A., Ranieri G., Fischanger F. 3D Electrical Resistivity Tomography to Improve the Knowledge of the Subsoil below Existing Buildings. // Environmental Semeiotics. – 2011. - 4 (4). – p. 63-70.
2. Tejero-Andrade A., Cifuentes G., Chavez R.E., Lopez-Gonzales A.E., Delgado-Solorzano C.D. L- and CORNER-arrays for 3D electric resistivity tomography: an alternative for geophysical surveys in urban zones //Near Surface Geophysics. – 2015. – Т. 13. – №. 4. – p. 355-368. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2015015>
3. Бобачев А. А. Применение дипольной экваториальной установки для 3D электротомографии //Инженерная и рудная Геофизика 2023. – 2023. – С. 619-622.
4. Оленченко В. В., Шнайдер С.В., Осипова П.С., Калганов А.С., Марковский Г.И., Алишер кызы С., Гермес Т., Тишкин А.А. Результаты геофизических исследований на памятнике Усть-Бийке-I (Алтай) //Теория и практика археологических исследований. – 2021. – Т. 33. – №. 1. – С. 73-84.
5. Karaoulis M., Tsokas G.N., Tsourlos P., Vardemezis G. 3D Electrical Resistivity Tomography Using a Radial Array and Detailed Topography for Tumuli Prospection //Archaeological Prospection. – 2025. – Т. 32. – №. 1. – С. 197-208. <https://doi.org/10.1002/arp.1966>
6. Балков Е.В., Фадеев Д.И., Карин Ю.Г., Манштейн А.К., Манштейн Ю.А., Панин Г.Л. Новый подход к малоглубинным электромагнитным зондированиям //Геология и геофизика. 2017. – Т. 58. – № 5. – С. 783-791.
7. Автушкова А.Л., Плахута Д.О. Памятники тасмолинской культуры на территории Новосибирской области (по материалам 2014–2017 гг.) // Российская археология. – 2020. – Вып. 2. – С. 142-150.

8. Карин Ю. Г., Балков Е.В., Позднякова О.А., Шапаренко И.О., Панин Г.Л., Фадеев Д.И. Высокопроизводительная технология малоглубинного электромагнитного картирования // Вестник КРАУНЦ. – 2024. – т. 44. – №4. – с. 50-58.

References

1. Trogu A., Ranieri G., Fischanger F. 3D Electrical Resistivity Tomography to Improve the Knowledge of the Subsoil below Existing Buildings. // Environmental Semeiotics. – 2011. - 4 (4). – p. 63-70.
2. Tejero-Andrade A., Cifuentes G., Chavez R.E., Lopez-Gonzales A.E., Delgado-Solorzano C.D. L- and CORNER-arrays for 3D electric resistivity tomography: an alternative for geophysical surveys in urban zones //Near Surface Geophysics. – 2015. – V. 13. – №. 4. – p. 355-368. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2015015>
3. Bobachev A. A. Application of a dipole equatorial installation for 3D electrical resistivity tomography // Engineering and Ore Geophysics 2023. – 2023. – p. 619-622.
4. Olenchenko V.V., Schneider S.V., Osipova P.S., Kalganov A.S., Markovsky G.I., Alisher kyzy S., Hermes T., Tishkin A.A. Results of geophysical research at the Ust'-Biyke-I site (in Altai) //Theory and practice of archaeological research. – 2021. – V. 33. – №. 1. – p. 73-84.
5. Karaoulis M., Tsokas G.N., Tsourlos P., Vardemezis G. 3D Electrical Resistivity Tomography Using a Radial Array and Detailed Topography for Tumuli Prospection //Archaeological Prospection. – 2025. – V. 32. – №. 1. – p. 197-208. <https://doi.org/10.1002/arp.1966>
6. Balkov E.V., Fadeev D.I., Karin Yu.G., Manstein A.K., Manstein Yu.A., Panin G.L. A new approach to shallow-depth electromagnetic sounding //Geology and geophysics. 2017. – V. 58. – № 5. – p. 783-791.
7. Avtushkova A.L., Plakhuta D.O. Monuments of the Tasmola culture in the Novosibirsk region (based on materials from 2014–2017) // Russian archaeology. – 2020. – №2. – p. 142-150.
8. Karin Yu. G., Balkov E. V., Pozdnyakova O. A., Shaparenko I. O., Panin G. L., Fadeev D. I. High-productivity technology of shallow electromagnetic mapping // Kraunts Messenger. – 2024. – V. 44. – №4. – p. 50-58.