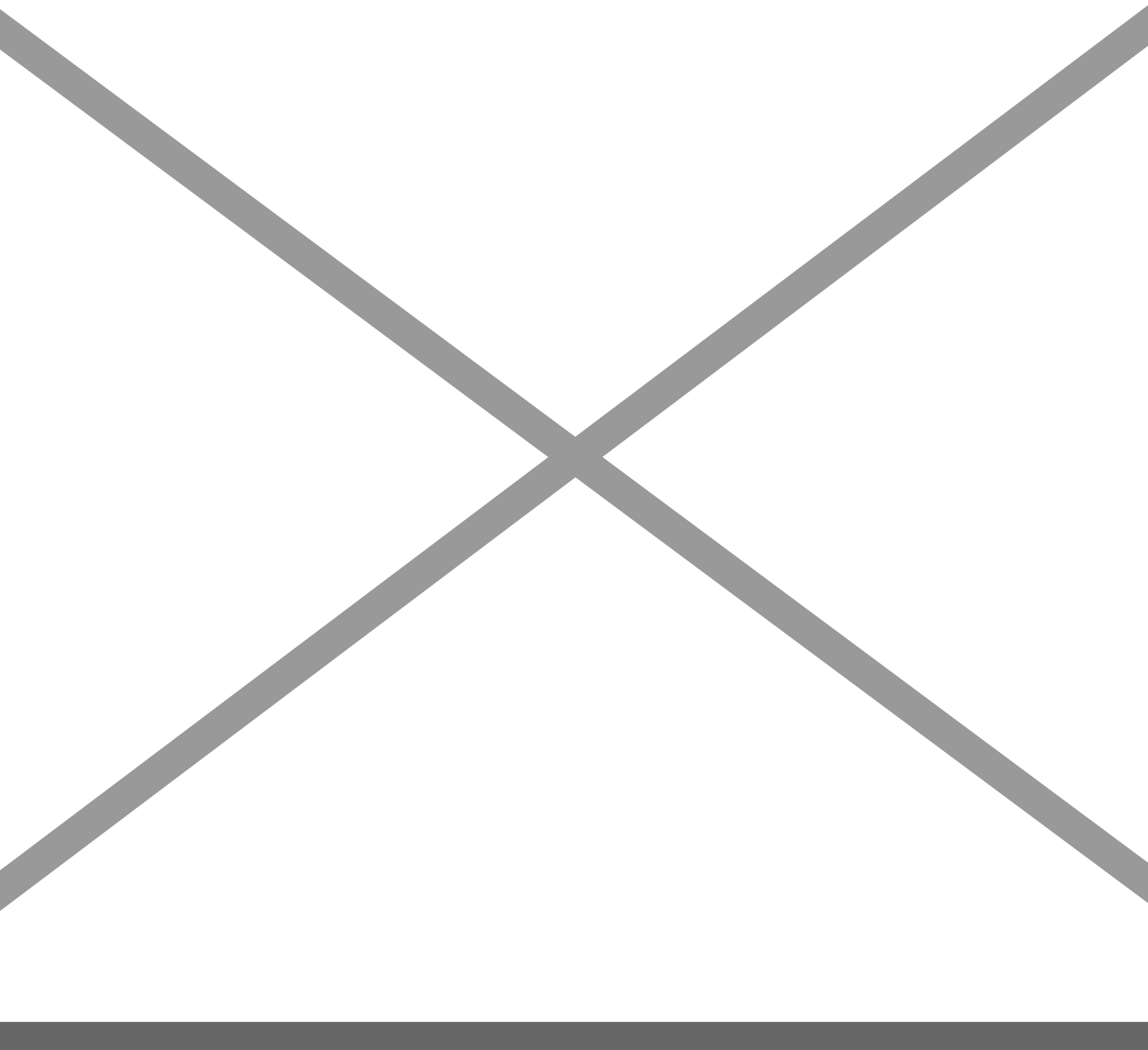


## **Введение**

Метод электротомографии активно развивается с конца XX 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 64K15E»

При проведении исследований набором параллельных профилей была использована 32-электродная 4-канальная аппаратура «Скала 32K4». 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 электродов было записано по 385 измерений. Итого с использованием 640 электродов было получено 12 320 точек записи.

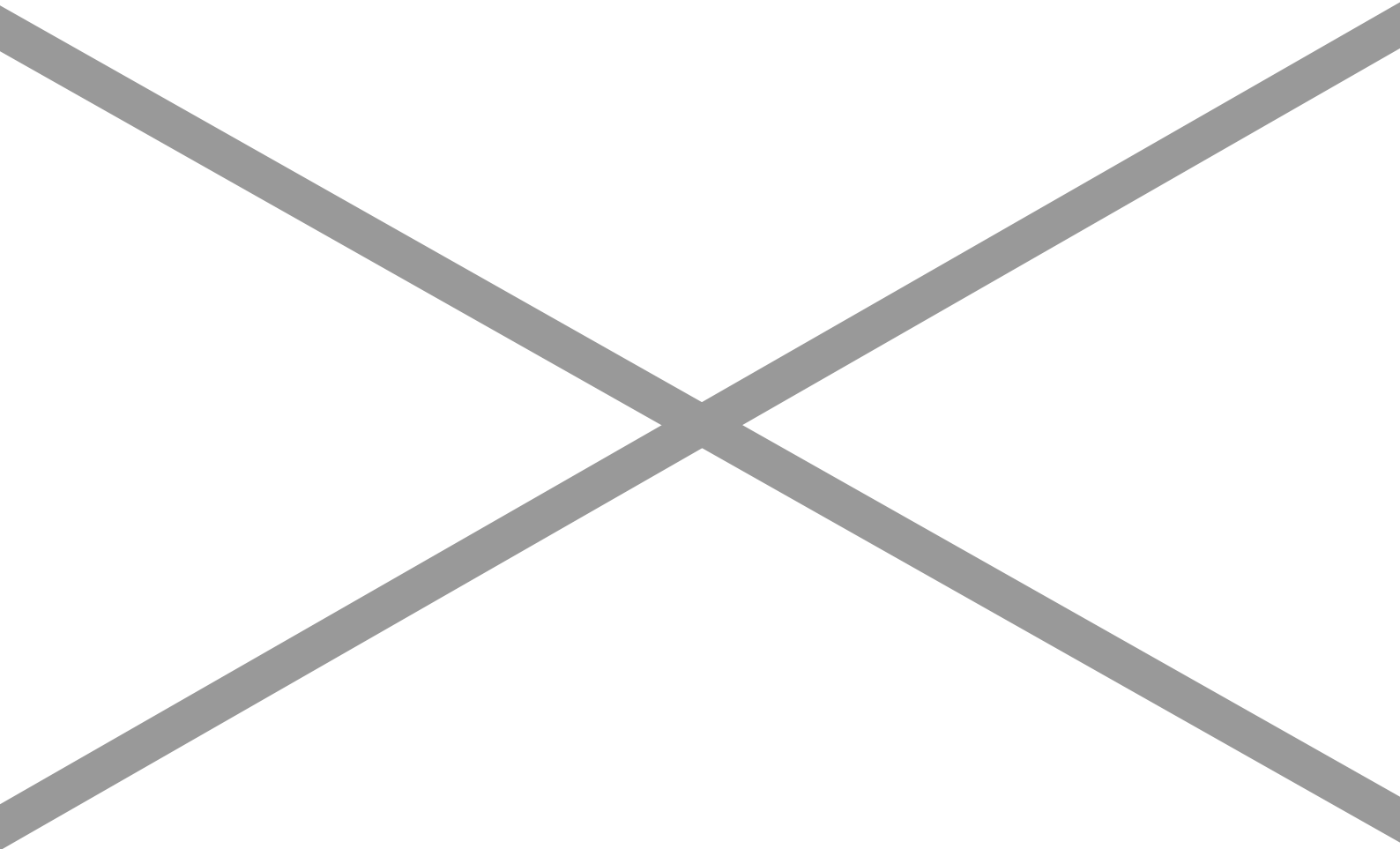
Трехмерная система наблюдений, измеренная с помощью 64-электродной 15-канальной аппаратуры «Скала 64K15E», состояла из двух параллельных кабелей по 32 электрода на расстоянии 4 м друг от друга — всего 9 расстановок. При 3D-измерениях использовались различные дипольные установки, что позволило кроме точек 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 электродов было записано по 1810 измерений. Итого по 3D-измерениям с использованием 320 электродов было получено 16 290 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  $126^\circ$  и  $29^\circ$  (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 запаханные 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.

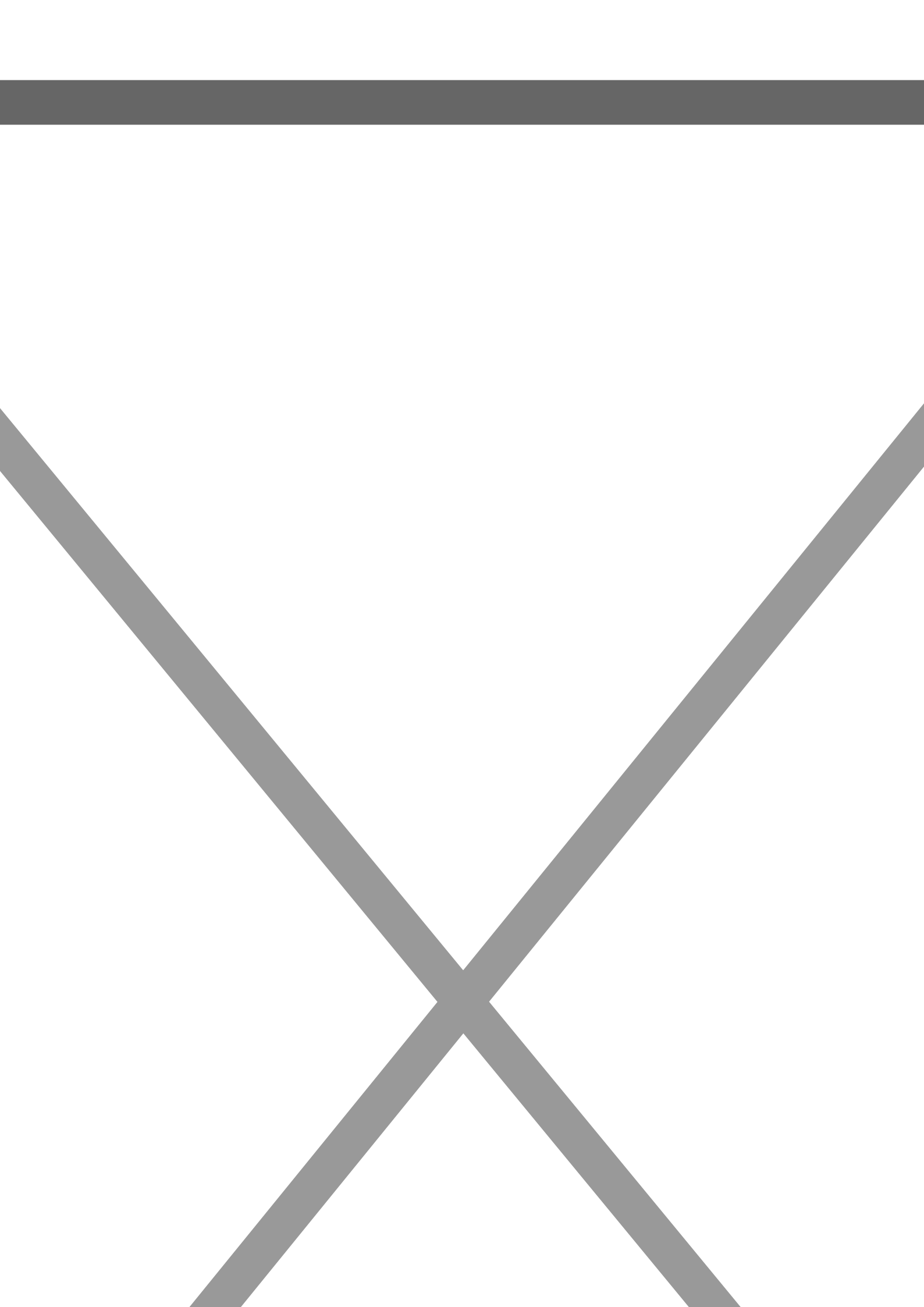
Далее рассмотрим результаты, полученные при детализации методом ЭТ. Работы проводились по приведенной выше системе наблюдений. Трехмерная модель, полученная в результате инверсии данных 2D и построенная в программе Voxler, представлена на рисунке 4.



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

На трехмерной модели ярко выделяются ров и центральная аномалия, причем они имеют близкие значения по УЭС, так же, 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 0.5 м, (б) — 3D-данные на глубине 0.5 м, (в) — 2D-данные на глубине 1 м, (г) — 3D-данные на глубине 1 м

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 счет 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.