

УДК 550.837.312:902.21

## ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ДЕТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ СТРОЕНИЯ ОБЪЕКТА НА ПРИМЕРЕ КУРГАНА ЭПОХИ СРЕДНЕВЕКОВЬЯ

К.С. Сергеев<sup>1</sup>, С.А. Стефутин<sup>2</sup>, В.В. Новиков<sup>3</sup>, И.В. Кураев<sup>2</sup>,  
А.А. Бобачев<sup>4</sup>, А.Д. Горин<sup>1</sup>, А.В. Туренина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. 119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65, корп. 1;  
e-mail: sergeev.k@gubkin.ru

<sup>2</sup> Государственный исторический музей. 109012, Россия, г. Москва, Красная пл., д. 1; e-mail: s.stefutin@mail.ru

<sup>3</sup> ООО «НИПИИ ЭТ «Энерготранспроект». 119435, Россия, г. Москва, Саввинская наб., д. 15;  
e-mail: archeo.svet@yandex.ru, vasily.novikov@gmail.com

<sup>4</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова. 119234, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы; e-mail: bobachev@gmail.com

**Аннотация.** В статье представлены результаты геофизических изысканий методом электротомографии на кургане, расположенном в комплексе археологических памятников около деревни Шниткино. Результаты были сопоставлены с данными, полученными в ходе полного археологического обследования кургана, что позволило сделать выводы о высокой эффективности проводимых на объектах археологического наследия геофизических исследований.

**Ключевые слова.** Геофизика, археология, электротомография, 3D-электротомография, раскопки.

## PRACTICAL EXPERIENCE OF USING 3D ELECTROTOMOGRAPHY FOR A DETAILED STUDY OF THE STRUCTURE OF AN OBJECT USING THE EXAMPLE OF A BARROW OF THE MIDDLE AGES

K.S. Sergeev<sup>1</sup>, S.A. Stefutin<sup>2</sup>, V.V. Novikov<sup>3</sup>, I.V. Kuraev<sup>2</sup>, A.A. Bobachev<sup>4</sup>, A.D. Gorin<sup>1</sup>, A.V. Turenina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gubkin University. Leninsky prospekt, 65, bld. 1, Moscow, Russia, 119991; e-mail: belousov.a@gubkin.ru

<sup>2</sup> State Historical Museum. 109012, Moscow, Krasnaya pl., 1; e-mail: s.stefutin@mail.ru

<sup>3</sup> LLC RDSI ET ETP. Savvinskaya nab., building 15, Moscow, Russia, 119435; e-mail: archeo.svet@yandex.ru, vasily.novikov@gmail.com

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University. 119234, Russian Federation, Moscow, GSP-1, Lenin Hills; e-mail: bobachev@gmail.com

**Abstract.** The article presents the results of geophysical surveys of the mound located in a complex of archaeological sites near the village of Shnitkino. Investigations were carried out by methods of electrotomography. Geophysical research was carried out in conjunction with archaeological excavations, which allowed to confirm the effectiveness of archaeological geophysics.

**Key words.** Geophysics, archeology, electrotomography, 3D electrotomography, excavations.

Комплекс археологических памятников около деревни Шниткино расположен на левом берегу р. Торопы, правого притока Западной Двины, на территории Западнодвинского района Тверской области, на отрезке летописного торгового пути «из варяг в греки» IX–XI веков.

С 2016 года Раннесредневековая археологическая экспедиция совместно с кафедрой разведочной геофизики и компьютерных систем РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина проводит совместные неинвазивные исследования на поселенческих объектах в составе археологического комплекса. В 2019 году на территории курганной группы Юшково был исследован курган № 1, который впоследствии подвергся археологическим исследованиям. В задачи комплексного изучения входило определение характера курганной насыпи и хронологических рамок ее сооружения (рис. 1).

Курган № 1 располагался в юго-западной оконечности курганной группы и до начала археологических работ имел высоту 1,6–1,7 м и диаметр около 8 м. Визуально ровики вокруг кургана не прослеживались. Поверхность кургана была покрыта мелким подлеском и слабо задернована (рис. 2).

Для изучения характера курганной насыпи и особенностей ее сооружения была использована электроразведка в модификации трехмерной электротомографии [1], которая имеет принципиально иной подход к методике проведения полевых работ



Рис. 1  
Курганная группа Юшково. Местоположение





**Рис. 2**  
Курган № 1 в курганной группе Юшково

и алгоритму обработки данных по сравнению с двумерной электротомографией.

Традиционно электроразведка применяется для решения большого количества задач, позволяя с помощью электромагнитных полей изучать различные объекты. Аномалии, которые могут быть археологическими объектами, на данных электроразведки хорошо выделяются в виде локальных изменений сопротивлений.

Геофизические исследования на кургане выполнены по схеме многоэлектродных зондирований (электротомография). Особенностью метода является большое число измерений и высокая плотность наблюдений, поскольку используется многоэлектродная аппаратура.

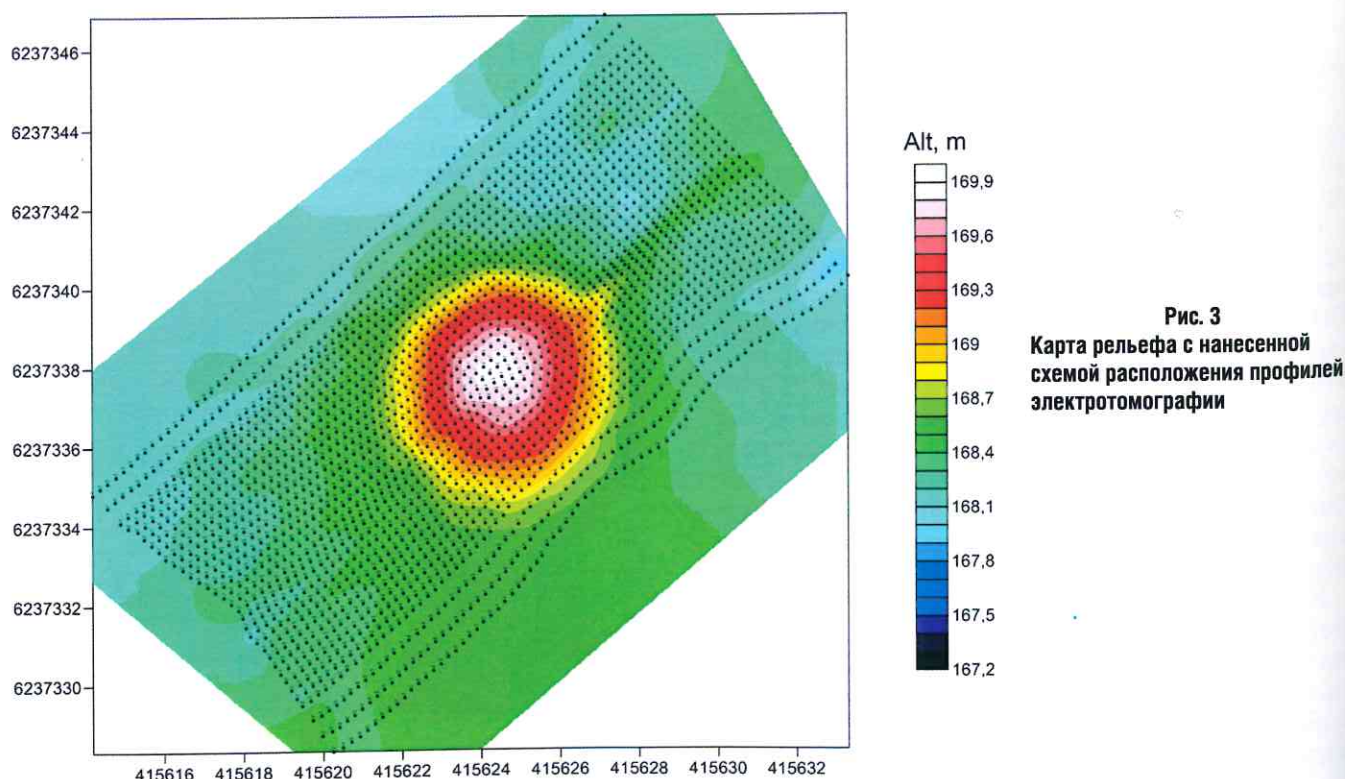
Работы проведены с использованием комбинированной трехэлектродной установки Шлюмберже, которая обеспечила максимальную глубину и детальность электротомографических исследований.

Стоит отметить, что большая часть работ при помощи электротомографии выполняется по двумерным профилям [4]. Но во многих случаях двумерная модель является достаточно грубой аппроксимацией трехмерных геологических объектов. Трехмерная электротомография позволяет повысить качество интерпретации, особенно для изометричных структур и объектов, что является важным фактором при изучении курганных насыпей и археологических объектов в целом. Однако для проведения полноценных трехмерных измерений современная аппаратура не обладает достаточным количеством электродов. В этой связи основным способом трехмерных измерений с ограниченным числом электродов на больших площадях является плотная сеть наблюдений по двумерным профилям.

Современная многоканальная аппаратура позволяет проводить измерения с достаточно высокой скоростью (5–15 профилей в день). Программы 3D-инверсии (Res3dinv, Geotomosoftware [3]) могут работать с сетками, имеющими высокую частоту наблюдений (например, 100 на 100 электродов). Такая сетка позволяет работать с большим диапазоном разносов, обеспечивает необходимую глубину исследования при сохранении детальности.

Такой подход к методике проведения работ и системе наблюдений позволил провести работы на изучаемом объекте по сетке 0,25 на 0,25 метров. Длина участка работ – около 18 метров (72 электрода на профиль), ширина – около 7 метров (28 профилей электротомографии). Общий объем наблюдений составил более 5300 измерений с трехэлектродной установкой Шлюмберже.

Особенности рельефа и залесенность кургана не позволили работать по традиционной прямоугольной сетке, принятой в трехмерной электро-



**Рис. 3**  
Карта рельефа с нанесенной схемой расположения профилей электротомографии



томографии. В связи с этим все профили имеют разную длину из-за разного проявления рельефа и искривление (отклонение от проектного положения профиля) при пересечении кургана. Для учета этих факторов на этапе обработки данных были проведены геодезические наблюдения с дифференциальной GNSS-системой. Они позволили определить плано-высотные положения всех электродов на участке исследований. Перепад высот на курганной насыпи составил около полутора метров. На рисунке 3 изображена карта рельефа с нанесенной схемой расположения профилей.

Для работы с такими криволинейными профилями в программе трехмерной инверсии *ges3dinv* предусмотрена трапециевидная сетка наблюдений [2]. Это позволяет ввести в программу данные, полученные по криволинейной сетке наблюдений, и выполнить 3D-инверсию по всему объему данных. Исходные данные были получены по двумерной сети наблюдений в координатах профиль – координата вдоль профиля наблюдений. Топографическая привязка электродов была выполнена в геодезической системе координат. Для создания исходного файла для трехмерной

инверсии была написана программа преобразования координат и подготовки входных данных. В результате инверсии было получено трехмерное распределение удельного электрического сопротивления. Невязка 3D-инверсии составила 6,2%.

На этапе интерпретации данных геофизики было сделано несколько предположений:

1. Курган не потревожен грабительскими раскопками или другими нарушениями;

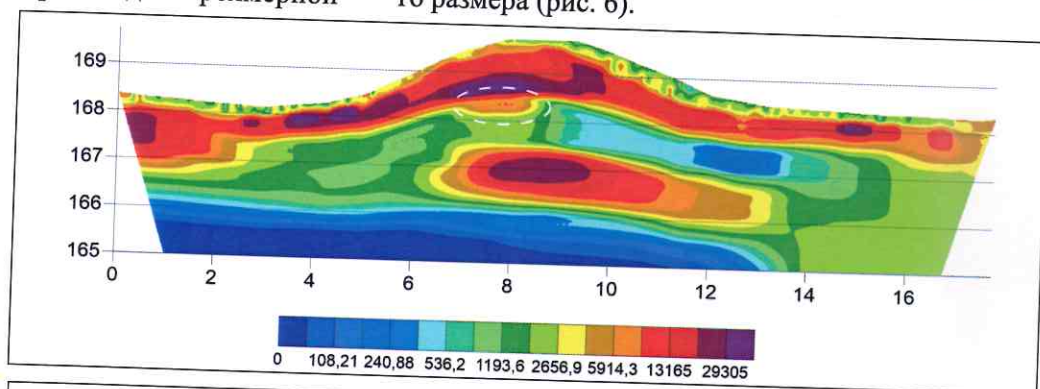
2. В теле насыпи присутствуют многочисленные высокоомные аномалии, связанные с каменными выкладками и панцирной конструкцией в теле насыпи;

3. Кольцевидный ровик имеет неоднородное строение с отдельными углубленными участками;

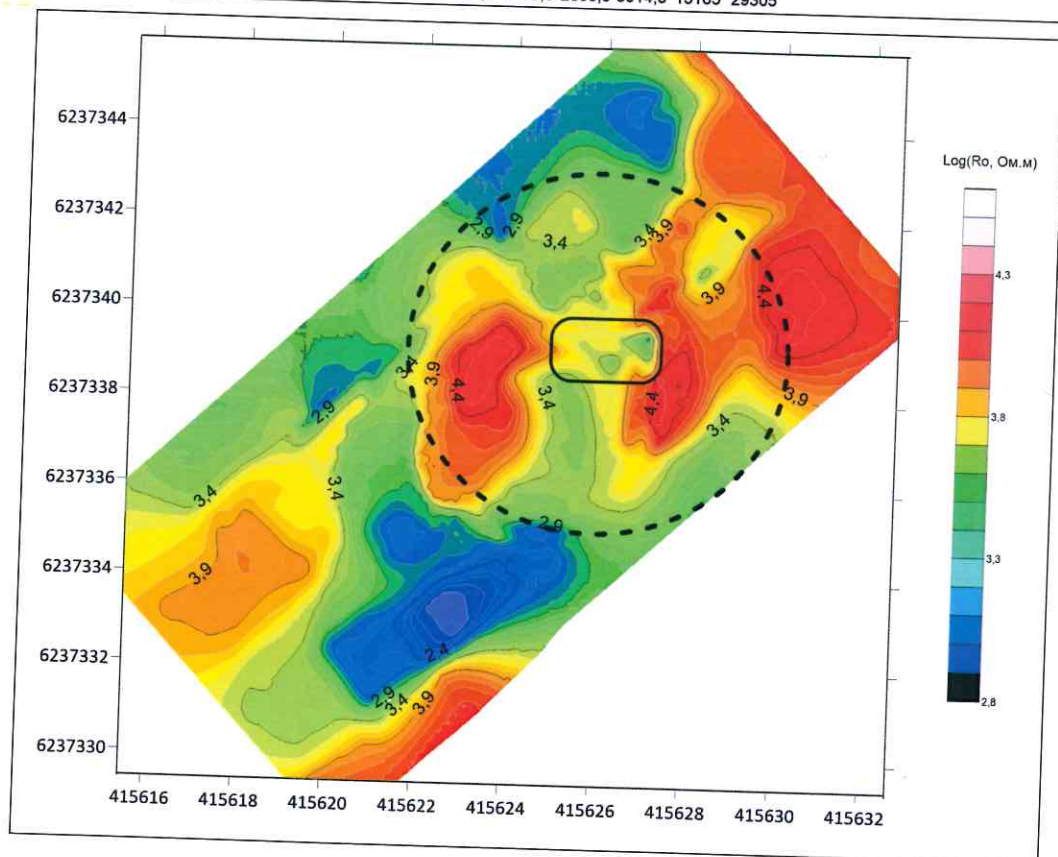
4. В центральной части зафиксирована аномалия на глубине 1,6 м от поверхности; она имела овальную форму размером 2,4 x 1,35 м и может быть погребальной ямой (рис. 5, 6).

В результате археологических изысканий были получены данные о характере погребения. Тело курганной насыпи было сформировано из песчаного и супесчаного грунта с включениями камней разного размера (рис. 6).

**Рис. 4**  
Центральный профиль УЭС  
на кургане № 1  
(белым контуром выделена  
могильная яма)



**Рис. 5**  
Распределение УЭС  
на глубине 1,6 м  
(пунктиром выделены  
контуры кургана,  
прямоугольником –  
место погребения)





Сверху курганная насыпь в момент сооружения была обложена камнями, которые сформировали панцирь. Часть камней со временем частично сползла в ровики кургана. По центру кургана вертикально был установлен продолговатый камень размерами 0,6 x 0,4 м (рис. 7).

Ровик окружал курганную насыпь и имел ширину 1,2–3,5 м и глубину до 1,6 м. Ровик имел две прерывающиеся его перемычки с южной и юго-западной стороны, а также три крупные углубленные ямы.

На дневной поверхности площадки кургана (уровень сооружения погребения) были зафиксированы следы погребенной под насыпью почвы, на которую были положены большие камни. Под ними выделялся контур ямы, впущенной в материк, размером 3,4 x 2,4 м (вытянута по линии запад – восток) (рис. 8).



Рис. 6

Курган № 1 после снятия дерна с отдельными участками панцирной выкладки



Рис. 8

Площадка погребения с камнями и контуром могильных ям (выделено красными точками)

Погребение было совершено в двух могильных ямах на разной глубине. Размеры могильных ям составили 2,6 x 1,7 м (южная) и 2,2 x 1 м (северная). Разница по глубине между ними составляла 40–50 см. В обеих могильных ямах были зафиксированы мужские скелеты, в южной яме тело было положено в деревянный гроб. В погребениях был обнаружен инвентарь: горшки, ножи, роговой гребень. По предварительным археологическим данным, погребения датируются концом XI – первой половиной XII века (рис. 9).

Таким образом, результаты археологических изысканий подтвердили предположения, полученные в результате применения электроразведки. Однако ярко выраженные каменные включения не позволили четко оконтурить аномалию, оказавшуюся в итоге могильными ямами.



Рис. 7

Профили насыпи кургана № 1 с вертикальным камнем и камнями в теле насыпи



Рис. 9

Могильная яма № 1 с деревянным гробом (южная), могильная яма № 2 (северная)



## ЛИТЕРАТУРА

1. Dahlin T., Bernstone C., Loke M.H. [2002] A 3D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. *Geophysics*, 67, no. 6 (november-december 2002), 1692–1700.
2. Loke M.H. and Barker R.D. [1996]. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44. Pp. 499–523.
3. Loke M.H. [2008]. Manual for RES3DINV ver. 2.16, pp. 66–69. Web: [www.geotomosoft.com](http://www.geotomosoft.com).
4. Loke M.H. [2018] Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. (Copyright 1996–2018). Part 8, pp. 127–178. Web: [www.geotomosoft.com](http://www.geotomosoft.com).

## REFERENCES

1. Dahlin T, Bernstone C, Loke MH. A 3D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. *Geophysics*. 2002; 67(6): 1692–1700.
2. Loke MH and Barker RD. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*. 1996; (44): 499–523.
3. Loke MH. Manual for RES3DINV ver. 2.16. 2008. Pp. 66–69. Web: [www.geotomosoft.com](http://www.geotomosoft.com).
4. Loke MH. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. (Copyright 1996–2018). 2018. Part 8, pp. 127–178. Web: [www.geotomosoft.com](http://www.geotomosoft.com).

Положительная рецензия от 27.11.2019

## ОБ АВТОРАХ



**СЕРГЕЕВ**  
Константин Сергеевич

*Старший преподаватель кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем, руководитель лаборатории инженерной геофизики РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. Окончил РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина по направлению «Геология и разведка полезных ископаемых» в 2008 г. В 2018 г. присвоена ученая степень кандидата технических наук. Стаж работы по специальности с 2007 г.*



**СТЕФУТИН**  
Сергей Александрович

*Хранитель отдела археологических памятников ГИМ. С 2003 г. участвует в археологических раскопках. С 2005 г. руководит раскопками и отдельными объектами. Начальник Раннесредневековой археологической экспедиции ГИМ с 2014 г.*



**НОВИКОВ**  
Василий Васильевич

*Начальник отдела археологии ООО «НИПИИ ЭТ «Энерготранс-проект», научный сотрудник института этнологии и антропологии РАН. Кандидат исторических наук. В 2010 г. защитил диссертацию на кафедре археологии МГУ имени М.В. Ломоносова.*



**КУРАЕВ**  
Игорь Валентинович

*Сотрудник экспозиционно-выставочного отдела Государственного исторического музея. Выпускник и аспирант археологической кафедры МГУ. Сотрудник Гнездовской и Раннесредневековой археологических экспедиций.*



**БОБАЧЕВ**  
Алексей Анатольевич

*Доцент на факультете геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Автор более 130 научных работ.*



**ГОРИН**  
Алексей Дмитриевич

*Инженер кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. В 2016 г. окончил РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, горный инженер. Стаж работы по специальности с 2015 г.*



**ТУРЕНИНА**  
Анастасия Валерьевна

*Лаборант кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. В 2018 г. окончила РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, горный инженер. Стаж работы по специальности с 2018 г.*