

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЯ

ЗЛОБИНА А. Г., НЕМЦОВА О. М., ЖУРБИН И. В.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,  
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

**АННОТАЦИЯ.** Предложен способ определения пространственной формы погребённого в грунт объекта искусственного происхождения, который предполагает последовательную обработку векторных картин преимущественных направлений изменения сопротивления среды и данных многоразностного электропрофилирования. Показана эффективность его применения на примере исследования археологического памятника – Кушманского III селища.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** археологический памятник, форма объекта, векторная картина, многоразностное электропрофилирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Электроразведка в различных её модификациях [1] является одним из основных методов археологической геофизики [2, с. 237 – 242], ориентированной на поиск объектов историко-культурного наследия в приповерхностном слое грунта. Возможность их обнаружения до проведения раскопок имеет важное практическое значение при исследовании археологических памятников, утративших отличительные рельефные признаки. Изучение руинированных археологических объектов по данным электроразведки осложнено неочевидностью происхождения связанных с ними геофизических аномалий. Такие аномалии могут иметь сложную конфигурацию и, как следствие, не могут быть однозначно интерпретированы. Для решения данной проблемы предлагается не только определять местоположение предполагаемых объектов поиска, но и моделировать их форму в пространстве культурного слоя. Такой подход позволит существенно повысить достоверность интерпретации археологических объектов по параметрам вызванных ими аномалий и, соответственно, улучшить качество неразрушающих исследований структуры грунта.

### МНОГОРАЗНОСНОЕ ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЕ

В большинстве случаев при картировании территории археологического памятника используется метод многоразностного электропрофилирования [3], который заключается в последовательном увеличении глубины зондирования (разноса между питающими электродами) при сохранении дискретности выбранной сети наблюдений. Результат измерений традиционно отображается в виде набора горизонтальных «разрезов» – нескольких карт распределения кажущегося удельного сопротивления грунта  $\rho_k$ , каждая из которых соотносится с определённой глубиной исследования  $l$  [4, Fig. 9].

При интерпретации полученных данных предполагается, что форма и простираание аномалии  $\rho_k$  соответствует положению в плане источника её возникновения. Следовательно, выделение аномалии на наборе горизонтальных «разрезов» позволит оценить как изменяется форма погребённого объекта с глубиной, то есть восстановить его пространственный образ [5]. Такой способ обработки результатов многоразностного электропрофилирования имеет ограничения, обусловленные неоднозначностью определения нижней кромки объекта поиска. Иными словами, при глубине исследования  $l_i$  выявляются объекты, расположенные в диапазоне глубин  $[0, l_i]$ , при глубине  $l_{i+1}$  –  $[0, l_{i+1}]$  и так далее. Значит, для корректного определения формы объекта необходимо выделять аномалию не на всем наборе горизонтальных «разрезов», а лишь на глубинах, соответствующих его расположению.

## ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

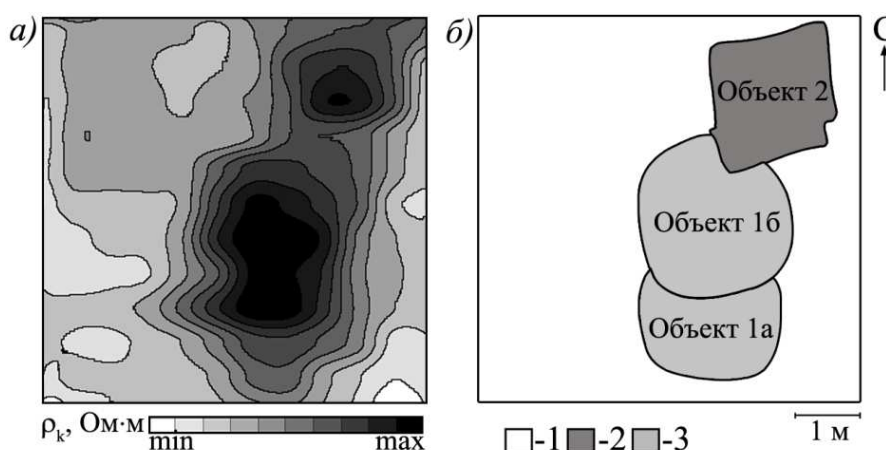
Для получения априорной информации о диапазоне глубин залегания объекта поиска предлагается использовать другую методику электрометрических измерений, применяемую для построения векторных картин преимущественных направлений изменения сопротивления среды [6]. Векторные картины, как и в случае с картами распределения  $\rho_k$ , являются одним из способов отображения данных электроразведки при разных глубинах исследования  $l$ .

Анализ двух векторных картин, смежных по глубине, осуществляется за счёт применения к ним функции скалярного произведения. Максимальные значения скалярного произведения определяют переходную зону между объектом и фоном, а минимальные значения являются признаком однородного участка грунта (фон или внутренняя область объекта). В соответствии с этим, непрерывность и замкнутость области максимальных значений скалярного произведения можно принять в качестве критерия наличия объекта в текущем диапазоне глубин исследования.

Полученная таким образом информация о расположении объекта поиска необходима для выбора наиболее информативных горизонтальных «разрезов» при последующем моделировании его формы в плане.

## НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

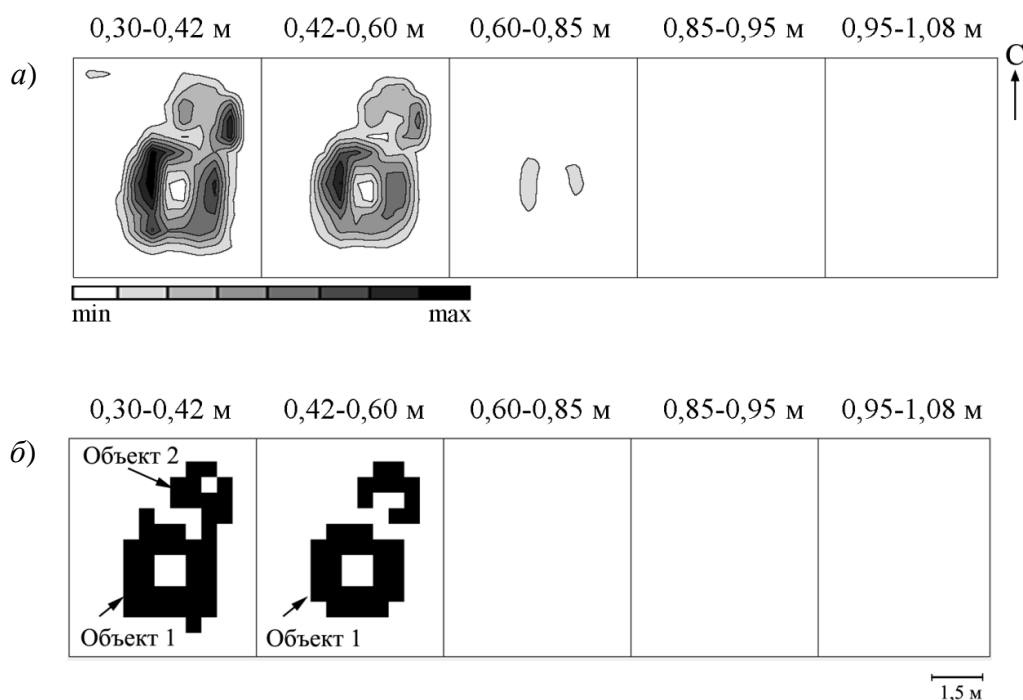
В течение полевых сезонов 2016 – 2017 гг. на участке археологического памятника – Кушманское III селище (Ярский район Удмуртской Республики) – были проведены электроразведочные работы, по результатам которых выявлена аномалия повышенного сопротивления (рис. 1, а). Поскольку аномалия имеет достаточно сложную форму, сделано предположение, что источником её возникновения являются несколько близкорасположенных объектов, аномалии от которых сливаются в единую область. Для повышения достоверности первоначальной интерпретации выполнены дополнительные электрометрические измерения, необходимые для построения векторных картин преимущественных направлений изменения сопротивления среды и карт распределения  $\rho_k$ .



**Рис. 1. Геофизические и археологические исследования участка Кушманского III селища:**  
 а) карта распределения  $\rho_k$ , б) результат раскопок на глубине 0,30–0,40 м.  
 Условные обозначения: 1 – красная материковая глина, 2 – темно-серый суглинок с включениями рыжей глины, 3 – темно-серый суглинок

Векторный анализ данных электроразведки проводился на шести глубинах исследования: 0,30 м; 0,42 м; 0,60 м; 0,85 м; 0,95 м и 1,08 м от поверхности. За счёт обработки построенных векторных картин с использованием функции скалярного произведения (рис. 2, а) определена область наиболее контрастного изменения сопротивления (рис. 2, б, чёрный цвет) – границная область между предполагаемым

объектом поиска и вмещающей его средой. Непрерывность и замкнутость такой области, выделенной алгоритмом fuzzy c-means [7], принята в качестве критерия наличия объекта в грунте. Таким образом, установлено, что источником искомой аномалии (рис. 1, а) являются два смежных объекта. Объект 1 расположен на глубине 0,30 – 0,60 м, а Объект 2 – на 0,30 – 0,42 м.



**Рис. 2. Оценка диапазона глубин залегания объекта поиска:**  
 а) изображения скалярного произведения векторных картин со смежных глубин,  
 б) результат сегментации матриц скалярного произведения алгоритмом fuzzy c-means

Полученная оценка диапазона глубин залегания археологического объекта позволила выбрать наиболее информативные глубины (0,32 м; 0,45 м; 0,68 м) для проведения дальнейшего исследования многоразносным электропрофилированием. Результат моделирования формы Объекта 1 и Объекта 2 с применением алгоритма fuzzy c-means на соответствующем наборе горизонтальных «разрезов» представлен на рис. 3. Исходя из формы аномалии, было высказано предположение, что Объект 1, имеющий округлые очертания, является хозяйственной ямой, а Объект 2, подпрямоугольной формы, связан с жилым или производственным сооружением. Такая интерпретация согласуется с результатами археологических раскопок 2017 года [8].

По результатам раскопок обнаружено три прорезающих друг друга объекта (рис. 1, б) – 1а, 1б и 2. Объекты 1а и 1б представляют собой два разновременных однотипных объекта – крупные хозяйственные ямы диаметром 2,4 и 2,8 м, заполненные тёмно-серым суглинком. С точки зрения строения грунта, эти неоднородности определяют один объект поиска (Объект 1 на рис. 3). С северной стороны от ям выявлена заглублённая часть производственного сооружения с каменным очагом и подочажной ямой (Объект 2). Верхняя часть постройки представляет собой массив тёмно-серого суглинка с включениями рыжей глины. Очевидно, что типы обнаруженных археологических объектов не противоречат интерпретации электрометрических измерений.

Для сравнения результатов раскопок (рис. 1, б) с результатами моделирования (рис. 3) использован критерий Hausdorff's distance [9]. Данный критерий характеризует максимальное абсолютное отклонение восстановленной границы объекта поиска от истинной. В приведённом натурном эксперименте его численное значение не превышает 0,25 м при шаге измерений 0,5 м, что свидетельствует о корректном определении формы границ выявленных объектов по данным электропрофилирования.

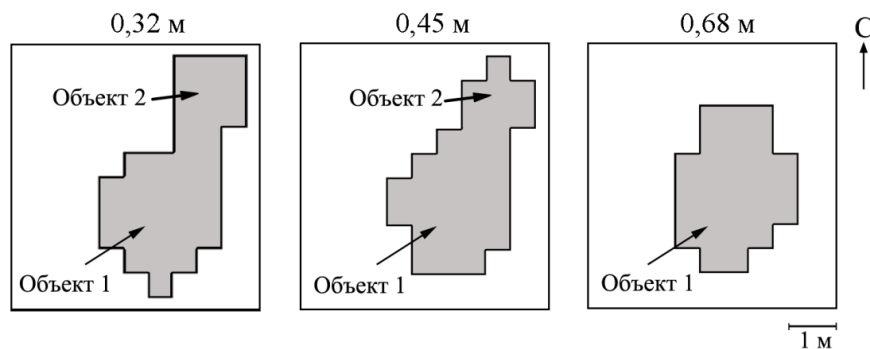


Рис. 3. Моделирование формы археологического объекта в плане на разных глубинах исследования алгоритмом fuzzy c-means

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ проведения электроразведочных работ, основанный на построении векторных картин преимущественных направлений изменения сопротивления среды и карт распределения кажущегося удельного сопротивления, позволяет практически однозначно соотнести выявленную геофизическую аномалию с реальным археологическим объектом. Это достигается за счёт моделирования формы предполагаемого объекта поиска на наборе горизонтальных «разрезов» в пределах диапазона глубин его залегания, определённого по результатам векторного анализа. Применимость такого подхода показана на примере обработки данных натурального эксперимента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроразведка: Справочник геофизика. В двух книгах / под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. Книга первая. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1989. 438 с.
2. Никитин А. А., Хмелевской В. К. Комплексирование геофизических методов. Тверь: ООО «Издательство ГЕРС», 2004. 294 с.
3. Zhurbin I. V., Malyugin D. V. On the method of visualization of electrometric data // Archaeological prospection, 1998, vol. 5, iss. 2, pp. 73-79.
4. David A., Linford N., Linford P. Geophysical Survey in Archeological Field Evaluation. London: English Heritage, 2008. 59 p.
5. Журбин И. В., Злобина А. Г. Моделирование методики электрометрических исследований структуры грунта природно-антропогенных сред // Химическая физика и мезоскопия. 2017. Т. 19, № 2. С. 299-305.
6. Немцова О. М., Журбин И. В., Злобина А. Г. Векторный анализ геофизических данных малоглубинной электроразведки с целью определения 3D границ объекта с аномальным сопротивлением // Инженерная физика. 2017. № 1. С. 76-87.
7. Злобина А. Г., Журбин И. В. Восстановление границы объекта по данным малоглубинной электроразведки методом нечёткой кластеризации // Геоинформатика. 2015. № 3. С. 19-25.
8. Иванова М. Г. Отчет об исследованиях на Кушманском городище Уччакар и Кушманском III селище в Ярском районе Удмуртской Республики в 2017 г. // Научно-отраслевой архив Удмуртского института истории, языка и литературы УрО РАН (НОА УИИЯЛ УрО РАН). Ф. РФ. Оп. 2-н. Д. 1706.
9. Zhang Y. J. Advances in image and video segmentation. IBM Press, 2006. 473 p. <http://bookre.org/reader?file=466676&pg=1> (дата обращения 02.11.2018).

## MODELING OF SPATIAL PARAMETERS OF THE OBJECT BY ELECTRICAL PROFILING DATA

Zlobina A. G., Nemtsova O. M., Zhurbin I. V.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

**SUMMARY.** A method for determining the spatial parameters (a range of depths and boundaries in the plan) of buried in the soil search objects according to electrical data is proposed. This method is based on more detailed measurements of electric properties of soil necessary for the construction of vector pictures of the main directions of soil resistance changes and the apparent resistivity distribution maps (a set of horizontal «sections»). According to a measurement technique each of the received images corresponds to a certain depth of a research. The vector analysis of electrical data

is carried out due to a consecutive application of function of a scalar product to two vector pictures, adjacent on depth. The continuity and closeness of the domain of the maximum values of the scalar product is a sign of the presence of the object in the current range of depths of a research. The fuzzy c-mean algorithm was used to select this domain. The information obtained as a result of vector analysis of electrical data about the location of the object in the host soil is used as a priori information for choosing the most informative depths of the research for carrying out multispatial electric profiling. By results of multispatial electric profiling, a set of horizontal «sections» corresponding to the obtained estimation of the depth range of the search object is constructed. On each of apparent resistivity distribution maps from such set, the boundary of the object in the plan is modeled. Modeling is carried out using a fuzzy C-means algorithm. The effectiveness of the proposed method for determining the spatial parameters (the range of depths and boundaries of the object in the plan on a set of horizontal «sections») is shown by the example of the study of the archaeological site – Kushmanskoe III settlement. Modeling of a form of the intended object of the search allowed to uniquely interpret a source of origin of the revealed anomaly. The resulting interpretation is consistent with the later archaeological excavations.

**KEYWORDS:** archeological site, object form, vector picture, multispatial electric profiling.

## REFERENCES

1. *Elektrorazvedka: Spravochnik geofizika. V dvukh knigakh* [Electrical survey: manual for geophysicist. In two books]. Pod red. V.K. Khmelevskogo i V.M. Bondarenko. Kniga pervaya. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Nedra Publ., 1989. 438 p.
2. Nikitin A. A., Khmelevskoy V. K. *Kompleksirovanie geofizicheskikh metodov* [Integration of geophysical methods]. Tver: GERS Publ., 2004. 294 p.
3. Zhurbin I. V., Malyugin D. V. On the method of visualization of electrometric data. *Archaeological prospection*, 1998, vol. 5, iss. 2, pp. 73-79. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0763\(19980605\)5:2%3C73::AID-ARP78%3E3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0763(19980605)5:2%3C73::AID-ARP78%3E3.0.CO;2-8)
4. David A., Linford N., Linford P. *Geophysical Survey in Archeological Field Evaluation*. London: English Heritage, 2008. 59 p.
5. Zhurbin I. V., Zlobina A. G. Modelirovanie metodiki elektrometricheskikh issledovaniy strukturyi grunta prirodno-antropogennykh sred [Modeling of a technique of an electrometric survey of soil structure of natural and anthropogenous environments]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2017, vol. 19, no. 2, pp. 299-305.
6. Nemtsova O. M., Zhurbin I. V., Zlobina A. G. Vektornyiy analiz geofizicheskikh dannykh maloglubinnoy elektrorazvedki s tselyu opredeleniya 3D granits ob'ekta s anomalnyim soprotivleniem [Vector analysis of geophysical data of shallow resistivity survey to determine 3d boundaries of resistivity anomalous object]. *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics], 2017, no. 1, pp. 76-87.
7. Zlobina A. G., Zhurbin I. V. Vosstanovlenie granicy ob'ekta po dannym maloglubinnoy ehlektorazvedki metodom nechytokoy klasterizatsii [The restoration of the borders of the object according to the shallow resistivity survey by the method of fuzzy clustering]. *Geoinformatika* [Geoinformatics], 2015, no. 3, pp. 19-25.
8. Ivanova M. G. *Otchet ob issledovaniyah na Kushmanskoy gorodishche Uchkakar i Kushmanskoy III selishche v Yarskom rajone Udmurtskoj Respubliki v 2017 g.* [Report on research at the Kushmanky settlement of Uchkakar and Kushmanky III settlement in the Yar district of the Udmurt Republic in 2017]. NOA UIIYAL UrO RAN. F. RF. Op. 2-n. D. 1706.
9. Zhang Y. J. *Advances in image and video segmentation*. IBM Press, 2006. 473 p. <http://bookre.org/reader?file=466676&pg=1> (accessed November 02, 2018).

---

Злобина Анна Григорьевна, кандидат технических наук, научный сотрудник Физико-технического института УдмФИЦ УрО РАН, тел. 8(952)4018129, e-mail: [ELF54@yandex.ru](mailto:ELF54@yandex.ru)

Немцова Ольга Михайловна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института УдмФИЦ УрО РАН, тел. 8(912)4479582, e-mail: [olganemtsova1968@gmail.com](mailto:olganemtsova1968@gmail.com)

Журбин Игорь Витальевич, доктор исторических наук, кандидат технических наук, главный научный сотрудник Физико-технического института УдмФИЦ УрО РАН, тел. 8(912)8530973, e-mail: [zhurbin@udm.ru](mailto:zhurbin@udm.ru)