

## МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 550.8.05

А. Г. Злобина, аспирант  
И. В. Журбин, доктор исторических наук, кандидат технических наук  
Физико-технический институт УрО РАН

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА В ГРУНТЕ\*

*Предложена методика оценки пространственных параметров объектов в грунте на основе данных многоразностного площадного электропрофилирования. Применение метода нечеткой кластеризации Fuzzy c-means позволяет восстановить границы объектов в горизонтальной плоскости и оценить диапазон глубин их залегания. Результаты подтверждены компьютерным моделированием и данными полевых экспериментов.*

**Ключевые слова:** электропрофилирование, метод нечеткой кластеризации, граница объекта, диапазон глубин.

#### Введение

Малоглубинная геофизика применяется при неразрушающих исследованиях структуры приповерхностных слоев грунта и поиска в них погребенных объектов. Информация о пространственном положении объектов поиска, их форме и размерах необходима для решения разнообразных инженерно-технических и экологических задач. Одним из методов геофизики является площадное электропрофилирование, основанное на оценке распределения кажущегося удельного электрического сопротивления грунта на участке исследований.

Измерительная установка состоит из двух питающих электродов  $A$  и  $B$ , через которые вводится электрический ток в грунт, и двух измерительных электродов  $M$  и  $N$ , между которыми измеряется разность потенциалов. Зная разность потенциалов и силу тока, а также взаимное расположение электродов (*конфигурация установки*), рассчитывается кажущееся удельное сопротивление грунта (КС), которое относится к условной точке привязки результатов – обычно к геометрическому центру установки при текущем измерении.

Методика площадного электропрофилирования предполагает перемещение измерительной установки по территории исследований с постоянным шагом (*шаг измерений*), который определяет детальность восстановления границы объекта поиска в горизонтальной плоскости, параллельной поверхности грунта. Глубина исследования обычно постоянна и пропорциональна расстоянию между питающими электродами  $b$  (*разнос*). При этом под *эффективной глубиной исследований*  $l$  понимают глубину проникновения основной части тока, которая влияет на результат измерений. Для дипольной экваториальной установки (рис. 1)  $l \approx b/2$  [1]. При электропрофилировании такой установкой шаг измерений совпадает с разносом.

Перемещение установки по территории исследования позволяет сформировать массив значений КС,

расположение элементов которого соответствует взаимному расположению точек измерений. По результатам измерений строится геофизическая карта, на которой в зависимости от структуры грунта объекты поиска могут проявляться как аномалии повышенного или пониженного сопротивления относительного фонового значения – КС вмещающего грунта.

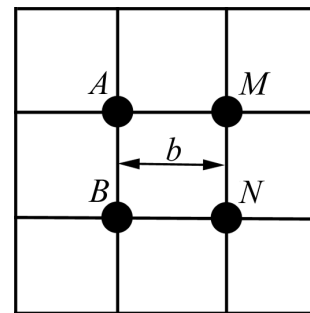


Рис. 1. Конфигурация дипольной экваториальной установки

#### Интерпретация результатов электропрофилирования

Интерпретация предполагает соотнесение выявленных аномалий с предполагаемыми объектами поиска, оценку их формы, размеров и глубины залегания. Для решения данной задачи, как правило, используют метод подбора, который сводится к сопоставлению экспериментальных геофизических карт с теоретическими [2, с.184]. Ввиду того, что обратная задача электроразведки относится к классу некорректных, данный способ эффективен только при наличии достоверной априорной информации о структуре участка исследований и параметрах объектов поиска (например, по результатам бурений).

Для повышения информативности измерения могут проводиться при последовательном изменении разноса (соответственно, и шага измерений), что обеспечивает получение набора массивов данных, совокупность которых позволяет оценить простран-

ственное положение объектов поиска [3, с. 25–26]. Каждый горизонтальный «срез» отражает распределение КС на заданной глубине. Выделение аномалий на каждом из «срезов» позволит, с одной стороны, восстановить форму объекта в горизонтальной плоскости на соответствующей глубине, а с другой – оценить диапазон глубин залегания объекта поиска. Следовательно, совместный анализ позволяет получить представление о трехмерной структуре грунта на основе набора двумерных массивов данных. Для выявления аномалии и оценки границ объекта на каждом из «срезов» может быть использован метод нечеткой кластеризации [4, с. 2].

#### Алгоритм нечеткой кластеризации при выделении аномалии

Метод нечеткой кластеризации Fuzzy c-means [5] позволяет рассчитать степени принадлежности каждого элемента массива данных ко всем выделяемым классам. Присвоение элемента данных к конкретному классу осуществляется путем сравнения его степени принадлежности с заданным предельным значением –  $\alpha$ -сечением. В ходе моделирования установлено, что при выборе значения  $\alpha$ , равным 0,5–0,8, абсолютная погрешность восстановленного контура границы объекта не превышает  $b/2$ . Данное значение принято в качестве порогового при оценке корректности восстановления границы объекта.

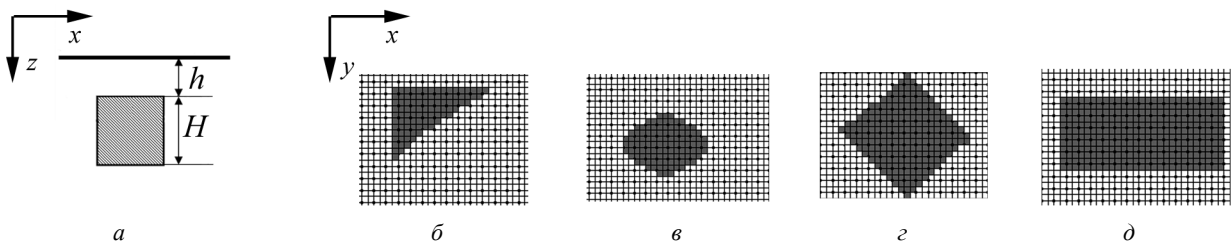


Рис. 2. Модель среды и горизонтальные сечения моделей объектов: а – параметры расположения объекта; б – треугольная призма; в – цилиндр; z – параллелепипед 1; д – параллелепипед 2

Последовательно изменялся шаг измерений  $b$  (соответственно, разнос между питающими электродами и эффективная глубина  $l$ ). Динамика изменения абсолютной погрешности восстановления границы на основе применения алгоритма Fuzzy c-means позволяет оценить диапазон глубин залегания объекта. Увеличение абсолютной погрешности более порогового значения  $b/2$  свидетельствует об уменьшении влияния объекта поиска при текущем разnose  $b$ , что является признаком отсутствия объекта на соответствующей глубине  $l$ .

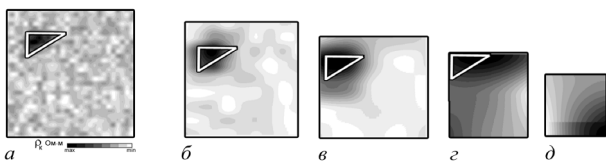


Рис. 3. Геофизические «срезы» среды, содержащей треугольную призму: а –  $b = 0,25$  м; б –  $b = 0,75$  м; в –  $b = 1,5$  м; z –  $b = 2,25$  м; д –  $b = 2,5$  м

Оценка эффективности применения алгоритма Fuzzy c-means проведена на основе моделирования прямой задачи электроразведки для однородной среды, содержащей псевдотрехмерные объекты. Использовалась программа Res3dmod (Geotomo Software) для случая электропрофилеирования дипольной экваториальной установкой (рис. 1) с добавлением белого шума 5 % [6, с. 8].

#### Модели объектов поиска

В качестве моделей объектов поиска выбраны прямоугольные призмы с различными формами основания, высотой  $H = 0,75$  м, расстоянием от поверхности грунта до верхнего основания объекта  $h = 0,25$  м, отношением сопротивлений объекта и вмещающей однородной среды 10 (рис. 2, а):

1. Прямая треугольная призма (далее – треугольная призма). Основание – прямоугольный треугольник с катетами 8 и 5 м (рис. 2, б).
2. Цилиндр. Радиус основания  $R = 4$  м (рис. 2, в).
3. Прямоугольный параллелепипед, стороны основания которого повернуты на  $45^\circ$  относительно ориентации линий профилей (далее – параллелепипед 1). Основание:  $8 \times 8$  м (рис. 2, z).
4. Прямоугольный параллелепипед, основание которого ориентировано вдоль профилей (далее – параллелепипед 2). Основание:  $6 \times 13,5$  м (рис. 2, д).

Применимость предложенного подхода наглядно демонстрируют результаты компьютерного эксперимента (на рис. 3 граница объекта показана белым). При  $l < h$  (рис. 3, а) объект практически не фиксируется на геофизической карте, погрешность восстановления границы объекта в 2 раза превышает пороговое значение и равна  $b$ . При увеличении глубины исследования (рис. 3, б, в) аномалия однозначно фиксируется, при этом кластеризация позволяет выделить границу объекта с требуемой точностью. Когда  $l > h + H$  (рис. 3, z), аномалия «сливается» с фоном, выделенная граница аномалии искажена относительно истинной границы объекта более чем на  $b/2$ . Очевидно, что при  $l \gg h + H$  (рис. 3, д) объект практически не влияет на результат измерения, соответственно, не проявляется на горизонтальном «срезе». Для всех рассмотренных моделей зависимость максимальной абсолютной погрешности восстановления контура границы объекта от шага и глубины исследований аналогична (рис. 4).

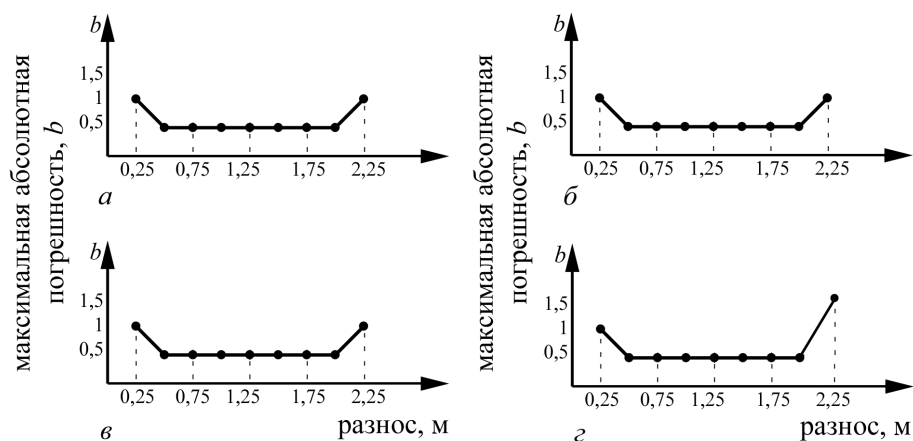


Рис. 4. Зависимость максимального отклонения восстановленной границы от разнosa: а – треугольная призма; б – цилиндр; в – параллелепипед 1; г – параллелепипед 2

Таким образом, компьютерный эксперимент показал, что при эффективной глубине, соответствующей диапазону глубин залегания объекта ( $h < l < h + H$ ), конфигурация границы аномалии, восстановленная методом нечеткой классификации, практически не изменяется, а максимальное отклонение не превышает половины шага измерений. При увеличении эффективной глубины ( $l \geq h + H$ ) существенно искажается форма аномалии на геофизических срезах, абсолютная погрешность превышает пороговое значение  $b/2$ .

**Анализ полевых данных**

При геофизических исследованиях на территории средневекового городища Уччакар (Удмуртия) была выявлена группа аномалий повышенного сопротивления, предположительно, соответствующих хозяйственным ямам древних сооружений. По имеющимся археологическим аналогиям, ямы прямоугольной или округлой формы были заглублены в материковый слой (глина) и заполнены гумусом с прослойками глины, угля и золы. Таким объектам соответствуют локальные аномалии повышенного КС (рис. 5, 6).

Поскольку аномалия 1 выявлена на всех геофизических «срезах» (рис. 5), глубина залегания объекта более 0,75 м. На рис. 5 слева показаны геофизические срезы с восстановленной границей объекта, а справа – соответствующие результаты раскопок. Аномалия вызвана ямой, заполненной суглинком с включениями гумуса, углей, прослойками глины. Яма выявлена на глубине 0,20–0,25 м от поверхности, ее глубина – около 1,60 м, что согласуется с результатами электропрофилирования. Для всех эффективных глубин погрешность отклонения границы объекта, восстановленной алгоритмом Fuzzy c-means, от истинной границы не превышает значение  $b/2$ .

Аномалия 2 выявлена только на двух эффективных глубинах – 0,35 и 0,50 м (рис. 6). Поэтому можно оценить расстояние от поверхности до верхнего основания объекта как  $h \leq 0,35$  м, а расстояние до нижнего основания –  $h+H \leq 0,75$  м. Данная аномалия вызвана ямой, расположенной в диапазоне глубин 0,25–0,60 м от поверхности. В раскоп попал только юго-восточный сектор этой ямы. Восстановленная граница аномалии показана пунктиром. Погрешность

отклонения границы, восстановленной алгоритмом Fuzzy c-means, от истинной границы объекта не превышает половину шага измерений.

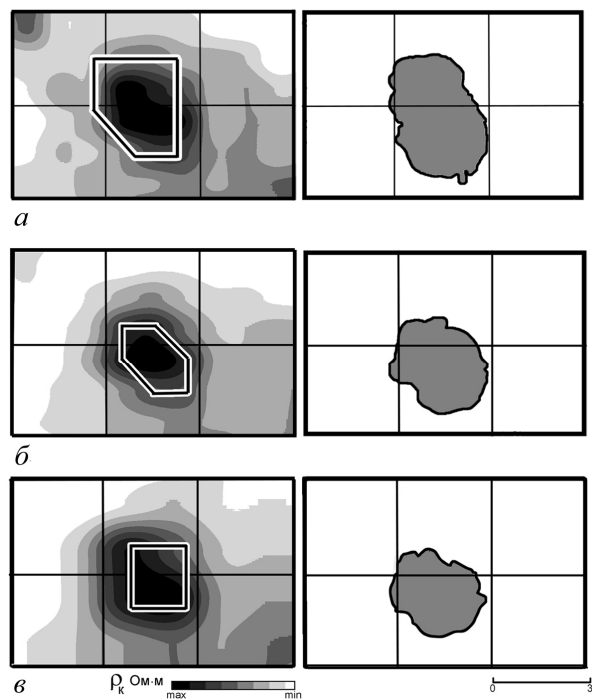


Рис. 5. Результаты геофизических и археологических исследований аномалии 1 при различных глубинах: а – 0,35 м; б – 0,50 м; в – 0,75 м

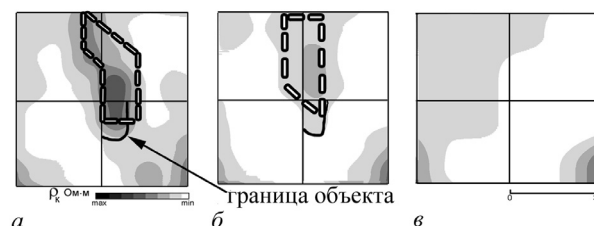


Рис. 6. Результаты геофизических и археологических исследований аномалии 2 при различных глубинах: а – 0,35 м; б – 0,50 м; в – 0,75 м

### Заключение

Компьютерное моделирование и результаты обработки данных малоуглубинного площадного электропрофилирования, полученные в рамках натурного эксперимента, доказали эффективность разработанного подхода к восстановлению пространственных характеристик объекта поиска. Применение нечеткой классификации позволяет восстановить форму объекта на наборе горизонтальных «срезов» и оценить диапазон глубин залегания объекта поиска.

### Библиографические ссылки

1. Loke M. H. Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys. – 2012. – 161 p.
2. Электроразведка : учебное пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / под ред. проф. В. К. Хмелевского, доц. И. Н. Мо-

дина, доц. А. Г. Яковлева. – М. : МГУ им. Ломоносова, геологический факультет, 2005. – 311 с.

3. Geophysical survey in archaeological field evaluation. – English Heritage, 2008. – 60 p.

4. Comparison of Fuzzy Clustering Methods and Their Applications to Geophysics Data / David J. Miller et al. // Applied Computational Intelligence and Soft Computing. – 2009. – Vol. 2009. – P. 1–16.

5. Минахметов Р. М., Цымблер М. Л. Интеграция алгоритма кластеризации Fuzzy c-means в PostgreSQL // Вычислительные методы в программировании. – 2012. – Т. 13. – С. 46–52.

6. Некоторые вопросы метрологического обеспечения инженерно-геофизических изысканий. Электроразведка методами сопротивления и ВП / М. Н. Марченко, В. И. Станкевич, А. Ю. Терещенко и др. – М. : МГУ им. Ломоносова. – 2013. – 28 с.

\* \* \*

A. G. Zlobina, Post-graduate, Physical-Technical Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

I. V. Zhurbin, Doctor of Science (History), PhD in Engineering, Physical Technical Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

### Application of fuzzy clustering method in evaluation of spatial characteristics of the object in the ground

*The technique of evaluating the spatial parameters of objects in the ground on the basis of data of multi-spacing area electric profiling is offered. The application of fuzzy clustering "Fuzzy c-means" allows restoring the borders of objects in the horizontal plane and evaluating the range of their occurrence depths. The results are confirmed by the data of computer simulation and field investigations.*

**Keywords:** electric profiling, method of fuzzy clustering, boundary of the object, range of depths.

Получено: 27.03.15