

УДК 550.8.05 : 004.93

МЕТОД СЕЛЕКТИВНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОГО ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЯ

А. Г. Злобина, И. В. Журбин, О. М. Немцова

*Физико-технический институт УрО РАН,
426000, г. Ижевск, ул. Кирова, 132
E-mail: ELF54@yandex.ru*

Разработан метод селективной сегментации, обеспечивающий корректное восстановление границы объекта в плане и оценку диапазона глубины его залегания. Метод предполагает обработку комплекса данных электроразведки: малоглубинного электропрофилирования и векторных картин преимущественных направлений изменения сопротивления среды. Оценка границы объекта производится на основе применения алгоритма нечёткой кластеризации fuzzy *c*-means, адаптированного для анализа данных многоразносного электропрофилирования. Оценка диапазона глубины залегания объекта в грунте основана на применении функции скалярного произведения к смежным по глубине векторным картинам преимущественных направлений. Эффективность метода подтверждена результатами компьютерного моделирования и примером обработки данных натурального эксперимента на археологическом памятнике — средневековом укреплённом поселении.

Ключевые слова: электропрофилирование, компьютерное моделирование, нечёткая кластеризация, векторные картины преимущественного направления, метод селективной сегментации, граница объекта, диапазон глубины залегания.

DOI: 10.15372/AUT20180404

Введение. Малоглубинная геофизика ориентирована на изучение верхней части геологического разреза, структура которого изменена в результате антропогенного и техногенного воздействий и содержит объекты искусственного происхождения (подземные инженерные сооружения и коммуникации, места захоронения промышленных и бытовых отходов, объекты историко-культурного наследия и пр.). Такие исследования направлены на поиск и оценку состояния объектов, местоположение которых не выражено в рельефе местности. Для повышения достоверности интерпретации геофизических данных в малоглубинных исследованиях используется комплекс методов: электро- и магниторазведка, георадар, сейсморазведка и пр. Это связано с избирательной чувствительностью геофизических методов к различным типам объектов поиска и неочевидностью интерпретации объекта по геофизической аномалии (природная неоднородность грунта или объект искусственного происхождения).

Для изучения приповерхностной части грунта в горизонтальном направлении применяют малоглубинное электропрофилирование (глубина исследования составляет единицы метров). Методика исследований предполагает последовательное перемещение измерительной установки постоянного размера и конфигурации по выбранной сети наблюдений. По результатам измерений формируется массив данных — массив значений кажущегося удельного сопротивления грунта (кажущееся сопротивление ρ_k). При каждом текущем положении измерительной установки значение ρ_k является интегральной характеристикой объёма грунта — от поверхности до расчётной эффективной глубины l [1]. Анализ данных базируется на двумерной карте распределения ρ_k в плане — карте распределения кажущегося сопротивления. Интерпретация предполагает априорное понимание условности приведения объёмного изменения электрических свойств грунта в диапазоне $[0; l]$ к горизонтальному «разрезу» на глубине l .

Эффективная глубина пропорциональна размеру измерительной установки и зависит от её конфигурации. Поэтому последовательное изменение размеров установки (при сохранении её конфигурации) обеспечивает проведение измерений для нескольких глубин — многоразное электропрофилирование. При этом формируется набор горизонтальных разрезов. Массив данных каждого разреза включает значения кажущегося сопротивления, полученные измерительной установкой постоянного размера. Такая методика применяется для повышения достоверности интерпретации за счёт оценки относительного распределения объектов поиска в приповерхностном слое грунта по глубине [2, рис. 9].

В большинстве случаев интерпретация данных электропрофилирования предполагает определение местоположения объектов поиска по выявленным аномалиям ρ_k . При наличии эталонных объектов с известными статистическими свойствами используют методы распознавания образов с обучением [3, с. 107–112; 4]: методы математической логики, корреляционного и регрессионного анализа, теории статистических решений. Эффективность их применения зависит от полноты априорной информации о предполагаемых объектах поиска или связанных с ними аномалиях. При этом практически исключается возможность использовать существующий набор априорных сведений при изучении других участков грунта, различающихся своими физическими свойствами (плотностью, влажностью, пористостью и пр.) [5, с. 224], что ограничивает применимость данного подхода.

В условиях отсутствия априорной информации об объектах поиска используют методы распознавания, основанные на принципах самообучения [3, с. 112–115]. Среди них выделяют эвристические, корреляционные и статистические подходы. Эффективность их применения зависит от амплитуды зафиксированного сигнала — абсолютного значения определённого параметра среды. Следовательно, случайные ошибки измерений и влияние регионального фона [6, с. 167] в значительной степени усложняют истолкование полученных результатов.

Использование методов кластеризации предполагает анализ относительного уровня изменения изучаемого параметра среды. Наибольшее распространение получил простой в реализации алгоритм *k*-means [7]. Ограничения применения методов кластеризации связаны с искажениями исходных данных, вызванными неоднородной структурой приповерхностного слоя грунта (накопление отходов, перепланировка территории при строительстве и пр.). Поэтому перед процедурой кластеризации также необходима фильтрация искажений, которая изменяет форму и сглаживает контрастность аномалий, связанных с объектами поиска.

Основная проблема состоит в том, что традиционный подход к интерпретации данных электропрофилирования направлен на выявление объектов поиска по их аномалиям, а форма объекта поиска определяется визуально, что существенно зависит от опыта интерпретатора. При этом для объектов искусственного происхождения принципиально возможна оценка их геометрических параметров по выявленной аномалии, так как они расположены в приповерхностном слое грунта, их минимальный линейный размер в плане значительно больше глубины залегания верхней кромки объекта поиска и размеров измерительной установки. В связи с этим возникает необходимость разработки формальной процедуры для построения границы объекта поиска и оценки диапазона глубины его залегания. Такая количественная оценка геометрических параметров объекта поиска по данным малоглубинного электропрофилирования может быть получена на основе методов кластеризации.

Восстановление формы границы объекта в плане. Решение этой задачи сводится к сегментации геофизической карты (классификации элементов исходного массива данных). Обычно сегментация проводится в целях декомпозиции изображения на части, области или сегменты, удобные для дальнейшего анализа. С точки зрения малоглубинного электропрофилирования данная процедура предполагает выделение локальных аномалий и определение их границ. При этом локальные аномалии ρ_k могут быть связаны не только с

объектами искусственного происхождения (объектами поиска), но и со случайными ошибками измерений. Выделение такого рода аномалий приводит к чрезмерной сегментации данных и усложняет дальнейшее истолкование. Этим определяется необходимость разработки метода селективной сегментации, который позволяет по результату сегментации (основа метода) выявлять достоверные локальные аномалии, обусловленные объектами поиска, и получать количественную оценку их геометрических параметров.

Для выявления достоверных локальных аномалий используется критерий достоверности, принятый в геофизике [5, с. 75]: локальная аномалия достоверна, если она пересекается с не менее чем 2–3 профилями сети наблюдений и отображается на каждом из них не менее чем 2–3 точками с амплитудой, превышающей 3σ (среднеквадратическое отклонение) относительно фонового или среднего уровня. Именно эти локальные аномалии являются объектами рассмотрения при поиске объектов искусственного происхождения.

Основой метода селективной сегментации выбран алгоритм нечёткой кластеризации fuzzy *c*-means (FCM). Согласно алгоритму все элементы массива данных разбиваются на заданное число нечётких классов, описываемых матрицей нечёткого разбиения. Элементы матрицы определяют степень принадлежности соответствующих элементов исходного массива к выделяемому классу. В отличие от других подходов (методы пороговой сегментации, градиентные методы, методы наращивания областей, методы на основе кластеризации) [8] применение алгоритма FCM наиболее эффективно для выделения локальных аномалий при наличии регионального фона и помех в исходных данных.

Инициализация алгоритма FCM требует априорного задания параметра останова ε , экспоненциального веса нечёткой кластеризации m и количества выделяемых классов c . Первый параметр задаёт необходимую точность вычислений ($\varepsilon > 0$), которая не должна превышать точности исходных данных. Второй параметр влияет на матрицу нечёткого разбиения. При обработке данных геофизики ему присваивают значение равное 2 ($m = 2$) [9]. Выбор третьего параметра — количества выделяемых классов c — определяется с использованием априорной информации о структуре участка исследования или индекса Хие — Бени [10].

Результатом работы алгоритма FCM является конечная матрица нечёткого разбиения. Основание включения текущего элемента массива данных в конкретный класс — сопоставление его степени принадлежности с заданным порогом (α -сечением). Под α -сечением для классов Фон и Аномалия будем понимать следующее: если степень принадлежности элемента массива данных к классу Фон больше заданного α , то этот элемент присваивается фону, иначе — локальной аномалии.

В зависимости от выбора α -сечения конфигурация аномалии может существенно различаться. Например, на рис. 1 показано, что изменение значения α -сечения от 0,5 до 0,9 приводит к увеличению площади выявленной локальной аномалии (серый цвет) более чем в 2 раза. Этим обусловлена необходимость адаптации алгоритма FCM к задаче корректного восстановления границы объекта по данным малоуглубинного электропрофилирования на базе обоснованного выбора порогового значения α .

Адаптация алгоритма FCM как основы метода селективной сегментации проводилась по результатам компьютерного моделирования и натурного эксперимента. Для оценки степени искажения конфигурации восстановленной границы относительно истинной границы объекта использованы следующие критерии:

1. $H(I_t, I_s)$ — Hausdorff's distance [11]:

$$H(I_t, I_s) = \max(h(I_t, I_s), h(I_s, I_t)),$$

где $I_t = \{t_1, t_2, \dots, t_l\}$ и $I_s = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ — множества точек на сегментированной карте, принадлежащих истинной и восстановленной границам соответственно; $h(I_t, I_s)$ —

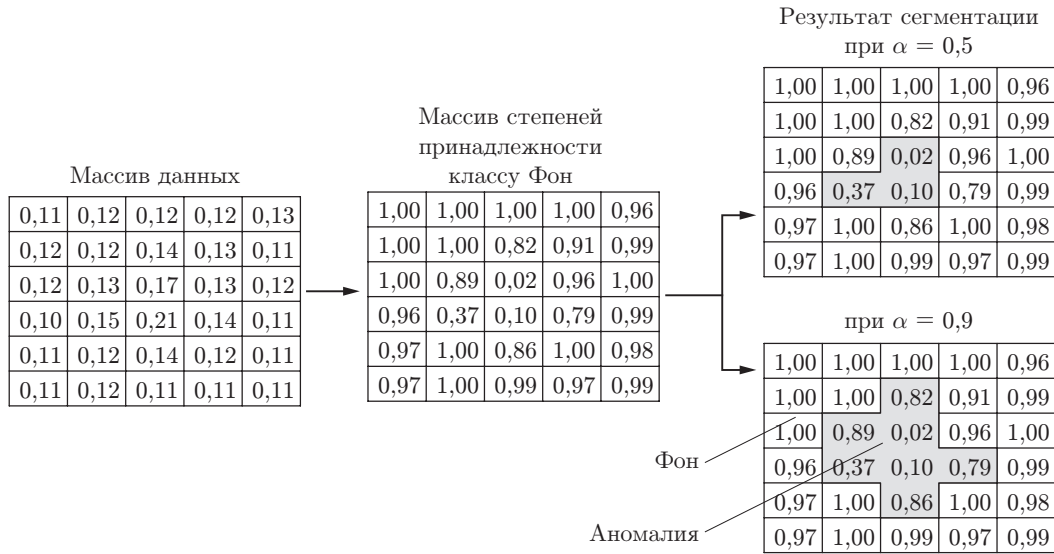


Рис. 1. Пример результата сегментации данных электропрофилерования алгоритмом FCM при $\alpha = 0,5$ и $\alpha = 0,9$

максимальное расстояние от точки из множества I_t до ближайшей к ней точки из множества I_s . Аналогичным образом определяется величина $h(I_s, I_t)$.

2. ε — pixel distance error [12]:

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^N d_i^2 / L},$$

где N — количество ошибочно классифицированных точек на сегментированной карте, отнесённых к восстановленной границе; L — общее количество точек, принадлежащих истинной границе; d_i — расстояние между i -й ошибочно классифицированной точкой, отнесённой к восстановленной границе, и ближайшей к ней точкой, принадлежащей истинной границе.

Критерий Hausdorff's distance характеризует максимальное абсолютное отклонение восстановленной границы от истинной (максимальная абсолютная погрешность), а критерий pixel distance error — среднее отклонение восстановленной границы от истинной (среднее отклонение). При $H(I_t, I_s) = 0$ и $\varepsilon = 0$ восстановленная и истинная границы совпадают.

Исследование характера изменения значений критериев $H(I_t, I_s)$ и ε в зависимости от выбора α -сечения проводилось на основе решения прямой задачи электроразведки для однородной среды, содержащей псевдотрёхмерные объекты конечной высоты. Компьютерное моделирование (программа Res3Dmod, Geotomo Software, Малайзия) выполнено для электропрофилерования дипольной экваториальной установкой с добавлением 5 % белого шума. В качестве моделей объектов выбраны прямые призмы, расположенные в диапазоне глубины 0,35–0,95 м и имеющие разную форму основания: треугольная призма, цилиндр, параллелепипед (рис. 2, а). Для моделей выявлен единый характер зависимости изменения численных значений критериев $H(I_t, I_s)$ и ε от выбора α -сечения (рис. 2, б). Выбор α -сечения в диапазоне 0,5–0,7 обеспечивает корректное восстановление границы объекта ($H(I_t, I_s) = 0, \varepsilon = 0$).

Эффективность селективной сегментации данных электропрофилерования при выборе α -сечения из этого диапазона также подтверждена при натурном эксперименте на средневековом городище Учкакар (Удмуртская Республика, Россия). Сегментация обеспечила

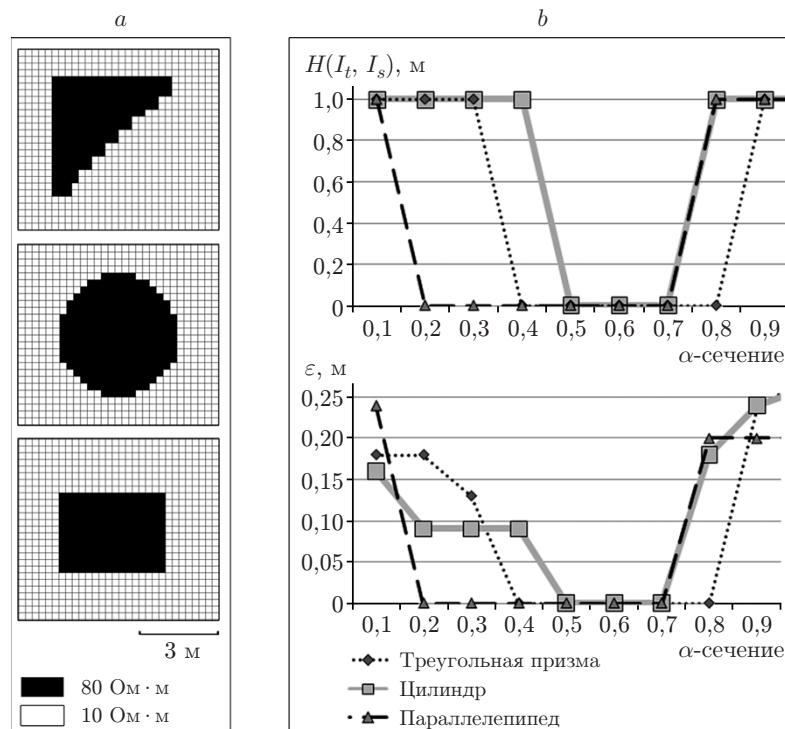


Рис. 2. Оценка искажения конфигурации восстановленной границы для моделей: *a* — горизонтальные сечения моделей; *b* — зависимости значений критериев Hausdorff's distance $H(I_t, I_s)$ и pixel distance error ε от α -сечения

корректное восстановление границы заглублённой части производственного сооружения во всём диапазоне глубины его залегания [13].

Оценка диапазона глубины залегания объекта. При многоразном электропрофилировании объект поиска фиксируется в виде локальных аномалий практически на всём наборе горизонтальных разрезов, в том числе и вне диапазона залегания объекта. Эта ситуация определяется известными ограничениями методов сопротивлений. Кажущееся сопротивление является интегральной характеристикой удельного сопротивления грунта и отражает совокупный вклад нормального электрического поля в однородном пространстве и аномальной составляющей электрического поля, вызванной влиянием неоднородности (объекта поиска). Соответственно при многоразном электропрофилировании увеличение размера установки (эффективной глубины l) проецирует влияние неоднородностей верхних слоёв грунта на результаты текущих измерений. Следовательно, необходимо развитие метода селективной сегментации для оценки диапазона глубины залегания объекта поиска.

Предлагается использовать подход, основанный на анализе векторных картин преимущественных направлений изменения сопротивления среды [14]. Векторные картины формируются по результатам измерений двухэлектродной установкой Pole-Pole. Далее, по измеренным значениям вычисляется радиус-вектор, характеризующий тенденцию изменения сопротивления грунта для каждой эффективной глубины. В результате для любого горизонтального разреза получается собственная векторная картина преимущественных направлений изменения сопротивления (рис. 3). Моделирование векторных картин выполнено для цилиндра, расположенного в однородной среде в диапазоне глубины 0,20–0,95 м (рис. 3, *a*). Сопротивление объекта равно 80 Ом·м, вмещающей среды — 10 Ом·м. Построено 13 векторных картин для глубин исследования (0,30; 0,42; 0,60; 0,67; 0,85; 0,90; 0,95; 1,08; 1,20; 1,24; 1,27; 1,34; 1,50 м), две из которых представлены на рис. 3, *b, c*.

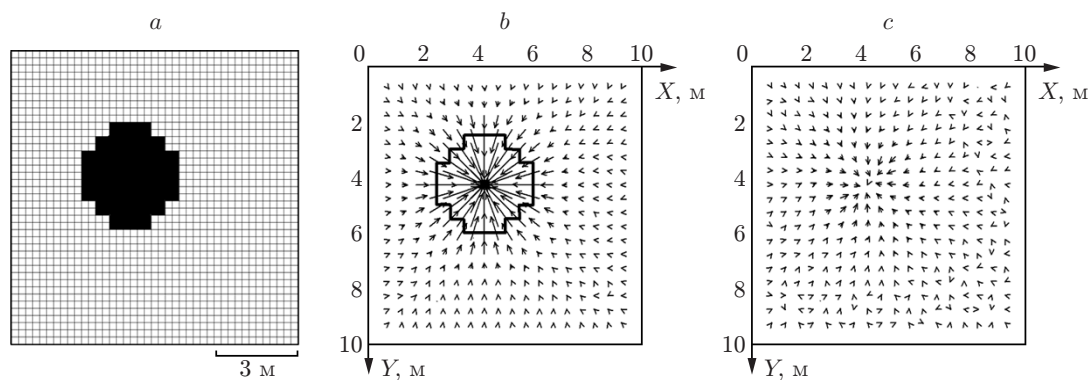


Рис. 3. Векторные картины преимущественных направлений: *a* — горизонтальное сечение модели; *b* — глубина 0,67 м, есть объект; *c* — глубина 1,08 м, нет объекта

Максимальной длине радиусов-векторов соответствует переходная зона между объектом и вмещающей средой (см. рис. 3, *b*), а минимальной длине — однородный участок вмещающей среды или внутренняя область объекта (см. рис. 3, *c*). Поэтому даже визуальный анализ позволяет оценить местоположение объекта на горизонтальных разрезах и по глубине.

Для получения количественной оценки диапазона глубины залегания объекта используется анализ изменения векторных картин на смежных по глубине разрезах с применением функции скалярного произведения (рис. 4, *a*). Скалярное произведение отражает изменение длины и направления радиуса-вектора при переходе от одного горизонтального разреза к другому. Значительные изменения скалярного произведения являются признаком верхней границы объекта (переход от однородной среды к разрезу, содержащему объект) либо нижней (переход от разреза с объектом к однородной среде). Для выделения области максимальных значений скалярного произведения используется адаптированный алгоритм FCM (рис. 4, *b*). Критерием наличия объекта принята непрерывность и замкнутость

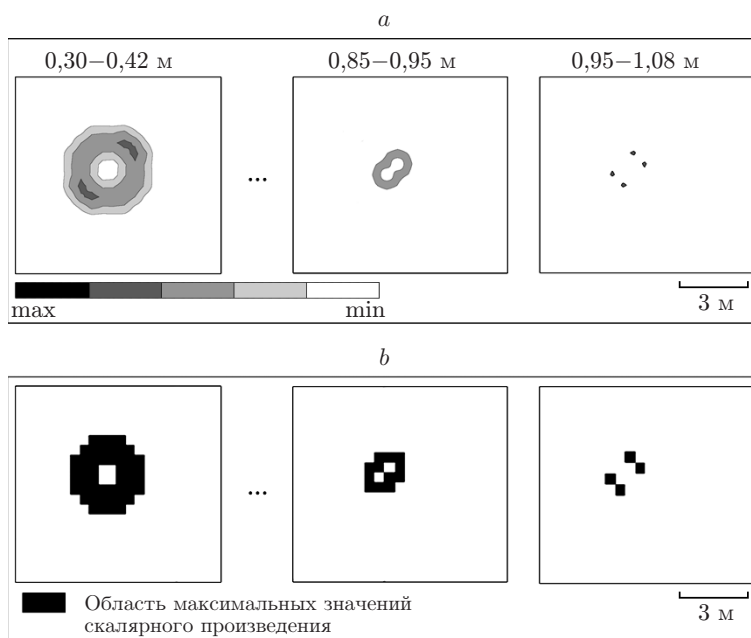


Рис. 4. Оценка диапазона глубины для модели цилиндра: *a* — изображения скалярного произведения векторных картин со смежных глубин; *b* — результат сегментации матриц скалярного произведения алгоритмом FCM

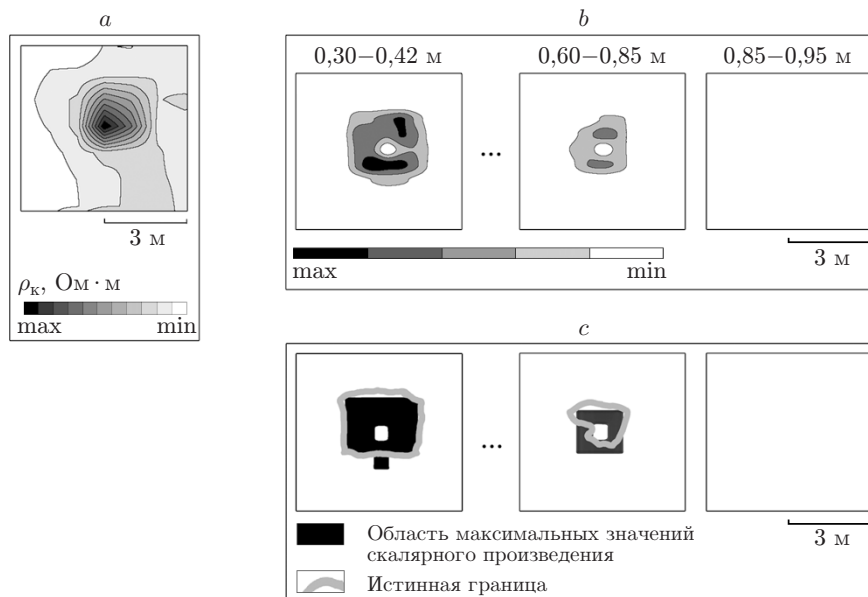


Рис. 5. Экспериментальные исследования на городище Уччакар: *a* — карта распределения кажущегося сопротивления участка; *b* — изображения скалярного произведения векторных картин со смежных глубин; *c* — результаты их сегментации

области максимальных значений скалярного произведения на сегментированном изображении. Полученная оценка диапазона глубины 0,30–0,95 м хорошо согласуется с моделью (цилиндр расположен на глубине 0,20–0,95 м).

На участке археологического памятника Уччакар выявлена аномалия повышенного сопротивления (рис. 5, *a*). Источником данной аномалии является хозяйственная яма [15, с. 142–143]. Для оценки диапазона глубины залегания объекта в грунте вычислены значения скалярного произведения (рис. 5, *b*). Применение алгоритма FCM (рис. 5, *c*) позволило получить следующую оценку: объект поиска расположен на глубине 0,30–0,85 м от поверхности. Эта оценка согласуется с данными раскопок (0,20–0,95 м).

В целом по результатам компьютерного моделирования и натурального эксперимента, подтвержденного раскопками, оценка диапазона глубины залегания объекта может быть использована как априорная информация при восстановлении границы объекта в плане по набору массивов данных многоразностного электропрофилеирования.

Эффективность предложенного подхода наглядно демонстрирует сравнительный анализ полученной количественной оценки геометрических параметров объекта поиска с ре-

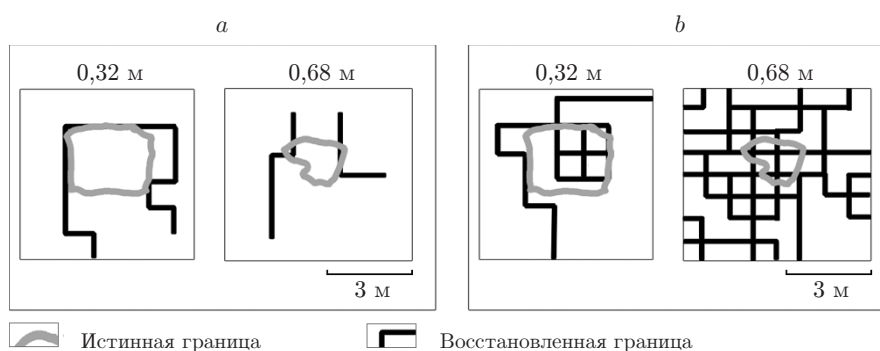


Рис. 6. Экспериментальные исследования на городище Уччакар: *a* — результат обработки данных градиентным методом, *b* — пороговым методом

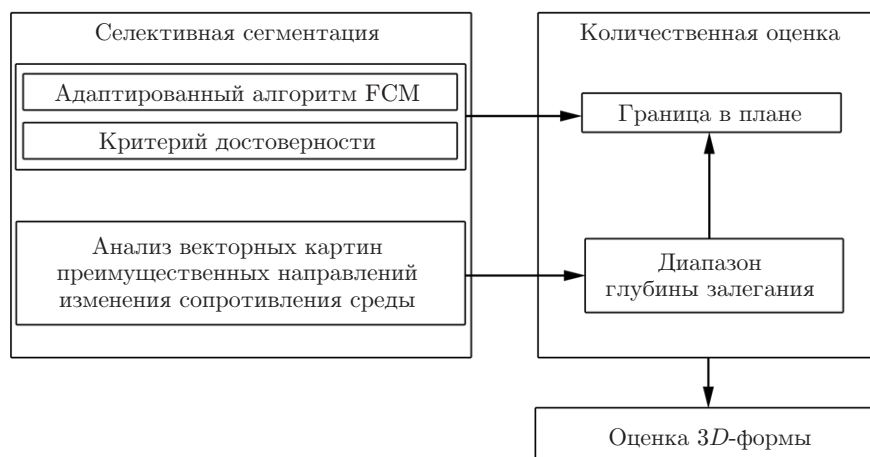


Рис. 7. Метод селективной сегментации данных малоглубинного электропрофилирования

результатами применения других методов обработки. Использование градиентного метода (алгоритм Canny) не позволило полностью зафиксировать границу объекта поиска ввиду наличия ярко выраженного регионального фона (рис. 6, *a*). По этой же причине не эффективен и пороговый метод обработки при выборе количества диапазонов группировки данных с использованием формулы Стерджесса. Его применение привело к чрезмерной сегментации не только фоновой области, но и области объекта (рис. 6, *b*). Это определяет преимущество разработанного метода селективной сегментации.

Метод селективной сегментации. Таким образом, предложенный подход позволяет решить две задачи: построить границу объекта в плане и оценить диапазон глубины его залегания (рис. 7). Решение первой задачи предполагает последовательное применение адаптированного алгоритма FCM и критерия достоверности. С помощью алгоритма FCM проводится сегментация данных малоглубинного электропрофилирования — выделение локальных аномалий и области фона. Адаптация алгоритма предполагает задание α -сечения в пределах диапазона 0,5–0,7 (см. рис. 2), что позволяет не только определить местоположение объекта по выделенной локальной аномалии, но и корректно восстановить его границу в плане. Локальные аномалии, удовлетворяющие критерию достоверности, считаются достоверными, т. е. источник их возникновения — объекты поиска. Выделенные локальные аномалии, не удовлетворяющие критерию достоверности, исключаются из дальнейшего рассмотрения (приписываются к фоновой области). Тем самым обеспечивается селективная сегментация данных малоглубинного электропрофилирования.

Решение второй задачи — оценка диапазона глубины залегания объекта поиска — предполагает анализ векторных картин преимущественных направлений изменения сопротивления среды. Последовательное применение функции скалярного произведения и адаптированного алгоритма FCM (пороговое значение α -сечения устанавливается равным 0,5) даёт возможность выявить переходную зону между объектом и фоном на каждом горизонтальном разрезе. При этом непрерывность и замкнутость выделенной области на наборе разрезов (признак наличия объекта в грунте) определяет селективную сегментацию матриц скалярного произведения при изменении глубины исследований.

Полученная информация об объекте поиска (граница в плане и диапазон глубины залегания) позволяет оценить 3D-форму предполагаемого объекта поиска.

Заключение. Метод селективной сегментации включает адаптированный алгоритм FCM, критерий достоверности и анализ векторных картин преимущественных направлений изменения сопротивления среды. Разработанный метод решает задачу восстановле-

ния пространственных характеристик объекта поиска на основе оценки диапазона глубины залегания и границы объекта на каждом горизонтальном разрезе в пределах этого диапазона. Комплексное применение предложенных алгоритмов к данным малоглубинного электропрофилирования и матрицам скалярного произведения позволяет получить количественную оценку геометрических параметров объектов и восстановить 3D-форму предполагаемого объекта поиска. Эффективность этого метода подтверждена результатами компьютерного моделирования и натурального эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Edwards L. S.** A modified pseudosection for resistivity and induced polarization // *Geophysics*. 1977. **42**, Is. 5. P. 1020–1036.
2. **Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation** /Ed. D. M. Jones. Swindon: English Heritage, 2008. 60 p.
3. **Никитин А. А., Хмелевской В. К.** Комплексование геофизических методов. Тверь: ООО «Издательство ГЕРС», 2004. 294 с.
4. **Борзов С. М., Потатуркин О. И.** Исследование эффективности спектрально пространственной классификации данных гиперспектральных наблюдений // *Автометрия*. 2017. **53**, № 1. С. 32–42.
5. **Никитин А. А.** Статистические методы выделения геофизических аномалий. М.: Недра, 1979. 280 с.
6. **Никитин А. А.** Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра, 1986. 342 с.
7. **Ogden J., Kaey S., Earl G. et al.** Geophysical prospecting at Portus: An evaluation of an integrated approach to the interpretation of subsurface archaeological features // *Proc. of the 37th Computer Applications to Archaeology Conf. Williamsburg, USA, 22–26 March, 2010*. P. 1–17.
8. **Злобина А. Г., Журбин И. В.** Восстановление границы объекта по данным малоглубинной электроразведки методом нечёткой кластеризации // *Геоинформатика*. 2015. № 3. С. 19–25.
9. **Markovic M.** Joint Inversion of Magnetotelluric and Seismic Data for Crustal Characterization. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2013. 136 p.
10. **Xei X. L., Beni G. A.** Validity measure for fuzzy clustering // *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.* 1991. **13**, N 8. P. 841–847.
11. **Zhang Y. J.** *Advances in Image and Video Segmentation*. Hershey — London — Melbourne — Singapore: IBM Press, 2006. 473 p.
12. **Yasnoff W. A., Miu J. K., Vacus J. W.** Error measures for scene segmentation // *Pattern Recogn.* 1977. **9**, N 4. P. 217–231.
13. **Злобина А. Г., Журбин И. В.** Применение метода нечёткой кластеризации при оценке пространственных характеристик объекта в грунте // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2015. **25**, № 1. С. 5–8.
14. **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.
15. **Иванова М. Г.** Хронология структурных частей городища Уччакар в бассейне р. Чепцы // *Ежегодник финно-угорских исследований*. 2016. **10**, вып. 3. С. 134–146.

Поступила в редакцию 10 января 2018 г.