

УДК 550.34.052: 550.837

С. Е. Догадин, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
И. В. Журбин, доктор исторических наук, кандидат технических наук, Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск

МЕТОДИКА ФИЛЬТРАЦИИ ДАННЫХ ПЛОЩАДНОГО ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЯ: ТРЕБОВАНИЯ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Предлагается методика фильтрации ступенчатообразных искажений данных малоглубинной электроразведки. Отличительной особенностью является адаптивный подход, позволяющий учитывать причины возникновения искажений. Разработанная последовательность этапов обработки данных позволяет эффективно компенсировать влияние искажающих факторов при проведении полевых измерений.

Ключевые слова: ступенчатообразные искажения, нормализация, аномалия.

Малоглубинная геофизика, в частности метод электроразведки, используется при решении задач строительства, поиска и диагностики трубопроводов, геозкологических исследованиях, изучении археологических памятников. Применение геофизики для решения задач археологии дает возможность оперативного получения информации о расположении интересующих объектов без проведения трудоемких раскопок на значительных территориях. Получаемые карты распределения удельного электрического сопротивления грунта позволяют оптимально планировать археологические исследования.

В большинстве случаев в качестве основного метода малоглубинной электроразведки используется электропрофилеирование. Последовательное перемещение измерительной установки по участку исследований позволяет сформировать двумерный массив значений удельного сопротивления грунта $\rho(x, y)$. В пределах массива выделяются участки, значение сопротивления которых отличается от сопротивления однородного грунта. Координаты расположения

таких участков определяют вероятное местоположение археологических объектов поиска.

Корректной интерпретации результатов площадного электропрофилеирования зачастую препятствуют ступенчатообразные искажения измерительных данных, представляющие собой скачкообразные изменения среднего уровня значений удельного сопротивления грунта на смежных участках измерений. Ввиду значительной площади обследования (единицы – десятки гектаров) измерения обычно проводятся в течение нескольких полевых сезонов, в том числе и в разное время года. Следовательно, при геофизической съемке смежных участков одного памятника (планшетов) условия измерений могут существенно отличаться (например, фоновая влажность грунта). Это определяет различие в среднем уровне сопротивления грунта каждого из участков и, соответственно, вызывает ступенчатообразные искажения на границе участков. Такие искажения приводят к ошибочной идентификации археологических объектов, искажению их формы, а также к невозможности корректного анализа сводной карты исследуемой территории (рис. 1).

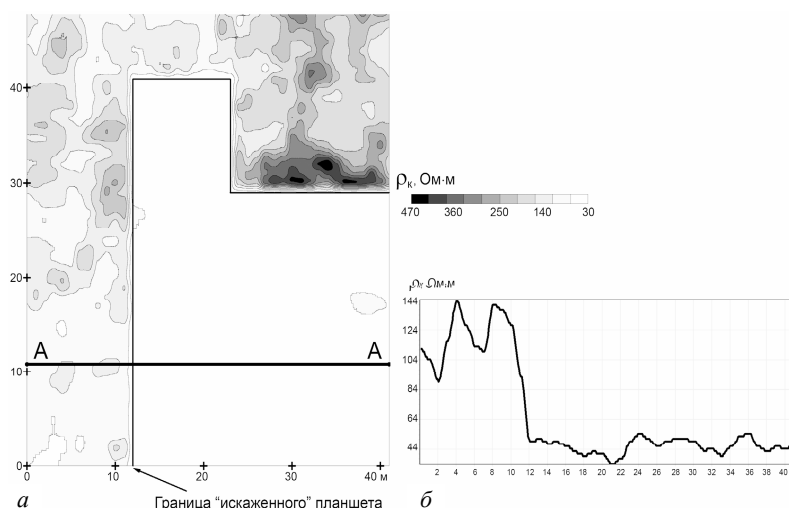


Рис. 1. Ступенчатообразные искажения данных площадного электропрофилеирования (средневековое селище Весь-5, Владимирская область):

a – сводная карта распределения удельного сопротивления грунта; *б* – изменение сопротивления по профилю А-А

В общем случае ступенчатообразные искажения могут быть вызваны различием в калибровке аппаратуры, а также воздействием внешних факторов: фоновая влажность грунта, температура, осадки и пр. [2]. При этом характер искажений различается. Изменения в калибровке оборудования влияют на распределение геофизического поля одинаково во всех точках измерений. Воздействие таких искажений носит мультипликативный характер, что связано с изменением чувствительности оборудования [3, с. 160–163]. Воздействие внешних факторов проявляется в виде нелинейных искажений. Это объясняется различиями в структуре и свойствах грунтов, из которых сформированы археологические объекты: пористость, глинистость, фильтрационные свойства [1, с. 34–39; 5, с. 26–30]. При обработке таких искажений необходимо учитывать особенности каждого объекта.

Таким образом, нужна такая методика фильтрации, с помощью которой возможно разделять причины возникновения искажений и проводить коррекцию, используя соответствующий алгоритм. Кроме того возможно возникновение нескольких искаженных участков на территории исследований. В этом случае необходимо определять последовательность обработки фрагментов сводной карты. Известные методические рекомендации и программные продукты, предназначенные для обработки данных площадных геофизических исследований, в том числе мало-глубинной электроразведки, не позволяют учитывать приведенные особенности искажений данных [6, 7].

Разработанная методика фильтрации ступенчатообразных искажений подразумевает последовательное выполнение ряда этапов обработки данных.

Предварительная обработка данных

При электропрофилеировании электроды измерительной установки должны располагаться в строгом соответствии с координатной сеткой на участке исследований. При этом возникают ситуации, когда невозможно обеспечить качественный контакт электрода с грунтом в заданной точке (норы грызунов, выходы скальных пород, корни деревьев). На картах распределения удельного сопротивления грунта это проявляется в виде локальных аномалий с экстремальным уровнем сопротивления. Их наличие оказывает существенное влияние на результаты коррекции искажений, особенно если они расположены на границах участков. Для фильтрации таких искажений в большей степени применим подход «точечной» фильтрации, основанный на таксономии [4, с. 37–40]. Использование метода таксономии для поиска искаженных точек обеспечивает компромисс между сохранением детальности на участках без локальных искажений и эффективной фильтрацией зашумленных зон.

Определение характера искажений

Для получения информации о структуре грунта в пространстве приповерхностного слоя методика электропрофилеирования предполагает проведение измерений на всей изучаемой территории с последовательным изменением конфигурации измерительной установки. Такой методический прием позволяет получить данные о распределении удельного сопротивления грунта при нескольких глубинах зондирования (рис. 2, а, б).

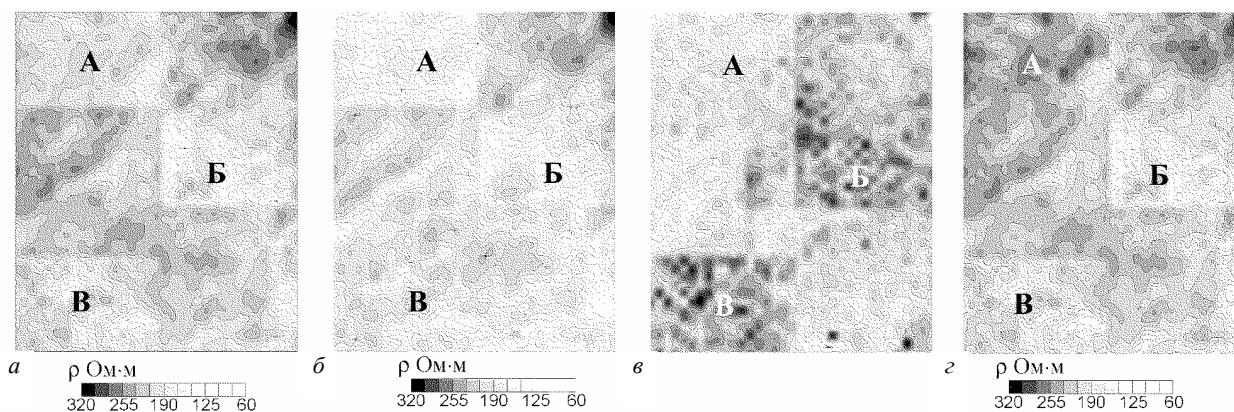


Рис. 2. Определение характера искажений данных площадного электропрофилеирования (поселение Улак-1, Республика Башкортостан): а, б – исходные карты распределения удельного сопротивления грунта; в – карта отношения значений удельного сопротивления грунта на смежных глубинах; г – результаты фильтрации искажения, связанного с погрешностью калибровки оборудования для карты а

Искажающий фактор, связанный с погрешностью калибровки оборудования, одинаково влияет на результаты всех измерений вне зависимости от глубины зондирования. Следовательно, учитывая мультипликативный характер искажений, отношение значений удельного сопротивления грунта на смежных глубинах зондирования $\Delta(x, y)$ свободно от влияния искажающего фактора. Это дает возможность отли-

чать искажения, вызванные калибровкой оборудования, от прочих искажений. Признаком является отсутствие скачкообразных изменений среднего уровня удельного сопротивления грунта на карте распределения $\Delta(x, y)$ (рис. 2, в, участок искажения А).

Если искажения вызваны воздействием внешних факторов, искажения на полученной карте сохраняются (рис. 2, в, участки искажения Б и В).

Выбор последовательности обработки искаженных участков

Территория геофизических исследований предварительно делится на условные участки, как правило, прямоугольной формы (планшеты), на которых последовательно проводятся измерения. В результате объединения данных со всех планшетов создается сводная карта распределения удельного сопротивления в пределах исследуемой территории. Предлагаемая методика подразумевает выбор одного из участков в качестве «эталонного» на основе априорных данных об условиях проведения измерений. Остальные участки, на границах которых фиксируются ступенчатообразные искажения данных относительно «эталонного», считаются «искаженными». В первую очередь обрабатываются искажения, вызванные погрешностями в калибровке оборудования, что связано с линейным характером таких искажений. При коррекции искажений, вызванных влиянием внешних факторов, обрабатываются планшеты, имеющие общую границу с «эталонным» либо с уже скорректированными участками. При этом в первую очередь обрабатывается участок, имеющий наименьшие отличия среднего уровня данных относительно скорректированной области.

Фильтрация искажений, вызванных различиями в калибровке

Задача фильтрации искажений, связанных с изменениями в калибровке оборудования, сводится к поиску коэффициента коррекции – одного для всех точек области. Особенности изменения значений удельного сопротивления вдоль границы «искажен-

ной» и «эталонной» областей могут быть представлены графиками $F(\rho)$, где по оси абсцисс отложены значения сопротивлений ρ в точках измерений на границах соответствующих планшетов, а по оси ординат – точки, значение ρ которых не больше заданного. В случае отсутствия искажений построенные таким образом графики должны быть близки друг к другу. Однако воздействие искажающего фактора приводит к растяжению либо сжатию графика вдоль оси абсцисс. Коэффициент коррекции вычисляется так, чтобы отклонение между графиками $F(\rho)$ «эталонной» и скорректированной областей было минимальным (рис. 2, *з*, искажение А).

Фильтрация искажений, вызванных воздействием внешних факторов

Фильтрация искажений, вызванных воздействием внешних факторов, осложнена нелинейным характером искажений. Предлагаемый подход к их фильтрации позволяет учитывать особенности искажений объектов, находящихся вдоль границ областей. Последовательно проводятся три этапа обработки данных.

Процедура *нормализации геофизического поля* аналогична фильтрации искажений, связанных с различиями в калибровке оборудования, однако помимо растяжения графика $F(\rho)$ возможен его сдвиг вдоль оси абсцисс. Параметры сдвига и растяжения вычисляются аналогично. Такой подход не обеспечивает полного совпадения графиков $F(\rho)$ «искаженного» и «эталонного» планшетов, тем не менее на предварительном этапе фильтрации описанная процедура достаточно эффективна (рис. 3, *а*).

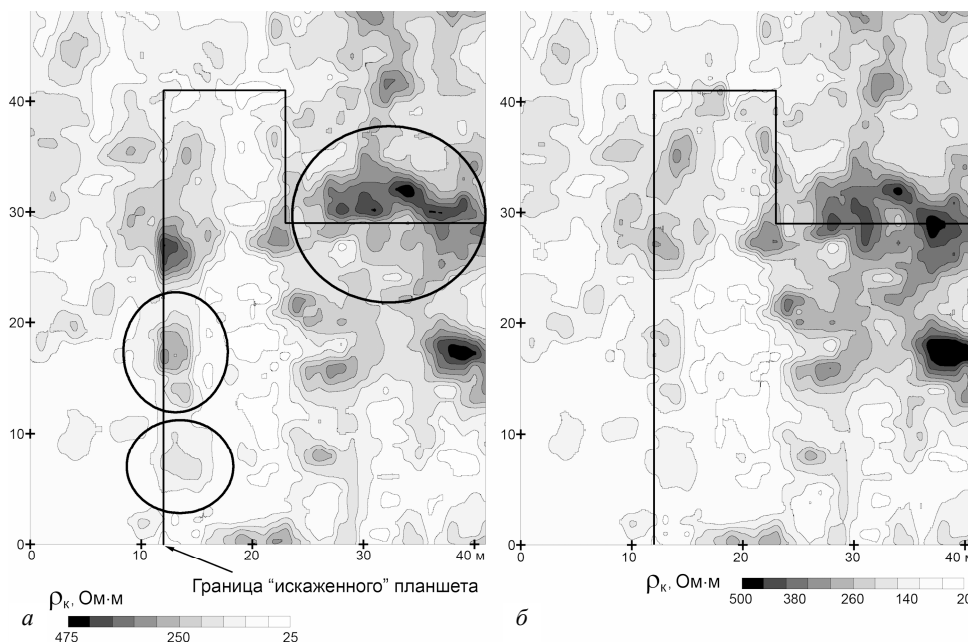


Рис. 3. Фильтрация искажений, вызванных воздействием внешних факторов (селище Вель-5, Владимирская область): *а* – искажение после нормализации геофизического поля; *б* – результат выравнивающей коррекции

Этап *выделения аномалий* предполагает разделение всех точек «искаженной» и «эталонной» областей между аномалиями. Полагается, что каждая анома-

лия имеет локальный экстремум по оси сопротивлений. Выделение основано на управляемом «растекании» границ аномалий от экстремума. Принадлеж-