

УДК 550.837:902

© И.В. Журбин, С.Е. Догадин

И.В. Журбин, С.Е. Догадин

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ СВОДНЫХ КАРТ ПРИ МАЛОГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ

Введение

Малоглубинная электроразведка применяется для изучения структуры приповерхностных слоев грунта при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях, экологическом мониторинге и почвенно-мелиоративных изысканиях, а также при обследовании исторических территорий [1-4]. Если естественная структура приповерхностных слоев грунта изменена в результате антропогенного или техногенного воздействия, задача исследований состоит в локализации и диагностике состояния объектов искусственного происхождения. В настоящее время малоглубинная электроразведка рассматривается в качестве самостоятельного направления со специализированной методикой измерений, методами предварительной обработки и анализа измерительной информации.

Специфика малоглубинной электроразведки при исследовании исторических территорий

Эффективным методом неразрушающих исследований погребенных объектов историко-культурного наследия является площадное электропрофилирование, которое применяется для определения границ и восстановления планировки археологических памятников.

Методика измерений, ориентированная на задачи полевой археологии, предполагает проведение *последовательных измерений* [5] в соответствии с границами *планшетов* (координатно-увязанных участков априорно заданной формы и размера). Последовательные измерения основаны на геометрическом приеме выбора глубины исследований – чем больше расстояние между питающими электродами, тем больший объем грунта влияет на результаты измерений. Следовательно, каждое измеренное значение условно соотносится не только с координатами (x_j, y_j) на поверхности планшета, но и с некоторой эффективной глубиной z_j . Если провести серию измерений при неизменном расстоянии между питающими электродами, то полученный массив данных будет отражать горизонтальный «срез» приповерх-

ностного слоя грунта (культурного слоя археологического памятника). В текущем массиве данных эффективная глубина z_i – постоянная величина; координата точки измерений x_j последовательно изменяется в диапазоне $[X_{min}, X_{max}]$; координата y_j – в диапазоне $[Y_{min}, Y_{max}]$, где значения $X_{min}, X_{max}, Y_{min}$ и Y_{max} определяются границами планшета. После чего, изменяя расстояние между питающими электродами и повторяя описанный алгоритм перебора координат x_j и y_j , получаем «срез» культурного слоя на глубине z_{i+1} . Таким образом, последовательное изменение эффективной глубины Z обеспечивает формирование набора пространственно упорядоченных массивов данных $\rho(x, y, z)$. Совокупность этих массивов позволяет предварительно оценить изменение структуры культурного слоя по глубине и, соответственно, относительное распределение объектов поиска в грунте.

После завершения измерений на всех априорно определенных планшетах для каждой из эффективных глубин z_i производится объединение полученных массивов данных и формирование *сводной карты* распределения удельного электрического сопротивления грунта на всей территории исследований. Сравнительный анализ сводных карт позволяет оценить взаимное расположение объектов поиска, их форму, пространственные и геометрические параметры.

Зачастую на смежных планшетах наблюдаются скачкообразные изменения среднего уровня значений сопротивления (*площадные скачкообразные искажения*). Учитывая, что границы планшетов определяются априорно, очевидно, что аномалия сопротивления, вызванная единым объектом поиска, может быть «разделена» между смежными планшетами. В данном случае скачкообразные искажения существенно затрудняют выявление объектов поиска, соответствующих геофизическим аномалиям, оценку их формы и геометрических параметров. Следовательно, для анализа планировки археологических памятников и предварительной классификации выявленных объектов необходимо приведение всех

массивов данных малоуглубинной электроразведки к единому среднему уровню информативного сигнала.

Необходимость таких преобразований наглядно демонстрируют результаты малоуглубинного электропрофилирования на территории археологического памятника Улак-1 (Республика Башкортостан). Измерения проводились геофизической экспедицией Физико-технического института УрО РАН (г. Ижевск) в течение трех полевых сезонов. На сводной карте распределения удельного сопротивления грунта (рис. 1а) фиксируются границы между Планшетом 4 и Планшетами 1, 2, 5 и 6, а также Планшетами 3 и 5 (рис. 1б). Схема расположения планшетов показана в нижнем правом углу рисунка. В большинстве случаев границы площадных скачкообразных искажений фиксируются визуально. Кроме того, диагностика наличия искажения возможна на основе вычисления коэффициента корреляции между смежными столбцами и строками в сводном массиве данных [6]. При этом используется априорная информация о конфигурации планшетов и последовательности проведения измерений.

Систематизация источников происхождения искажений малоуглубинной электроразведки

Скачкообразные искажения площадного электропрофилирования могут быть связаны с *инструментальной погрешностью*, либо с *погрешностью изменений условий измерений*. Основной инструментальной погрешностью является различие в регулировке аппаратуры на смежных планшетах [7; 8, р. 191]. Такие ошибки одинаково влияют на все результаты измерений в пределах планшета. Традиционно, корректировка осуществляется за счет линейного преобразования всего массива данных «искаженного» планшета. Под линейной фильтрацией понимается свертка весовой функции h и входного (исходного) сигнала $\rho(x, y, z)$. Коэффициенты функции h фиксированы и не зависят от текущих значений $\rho(x, y, z)$ [9, с. 309]. В случае электроразведки корректировка условно «искаженных» массивов данных производится путем введения поправочного множителя для всех измеренных значений удельного электрического сопротивления грунта, то есть в логарифмическом масштабе – путем параллельного

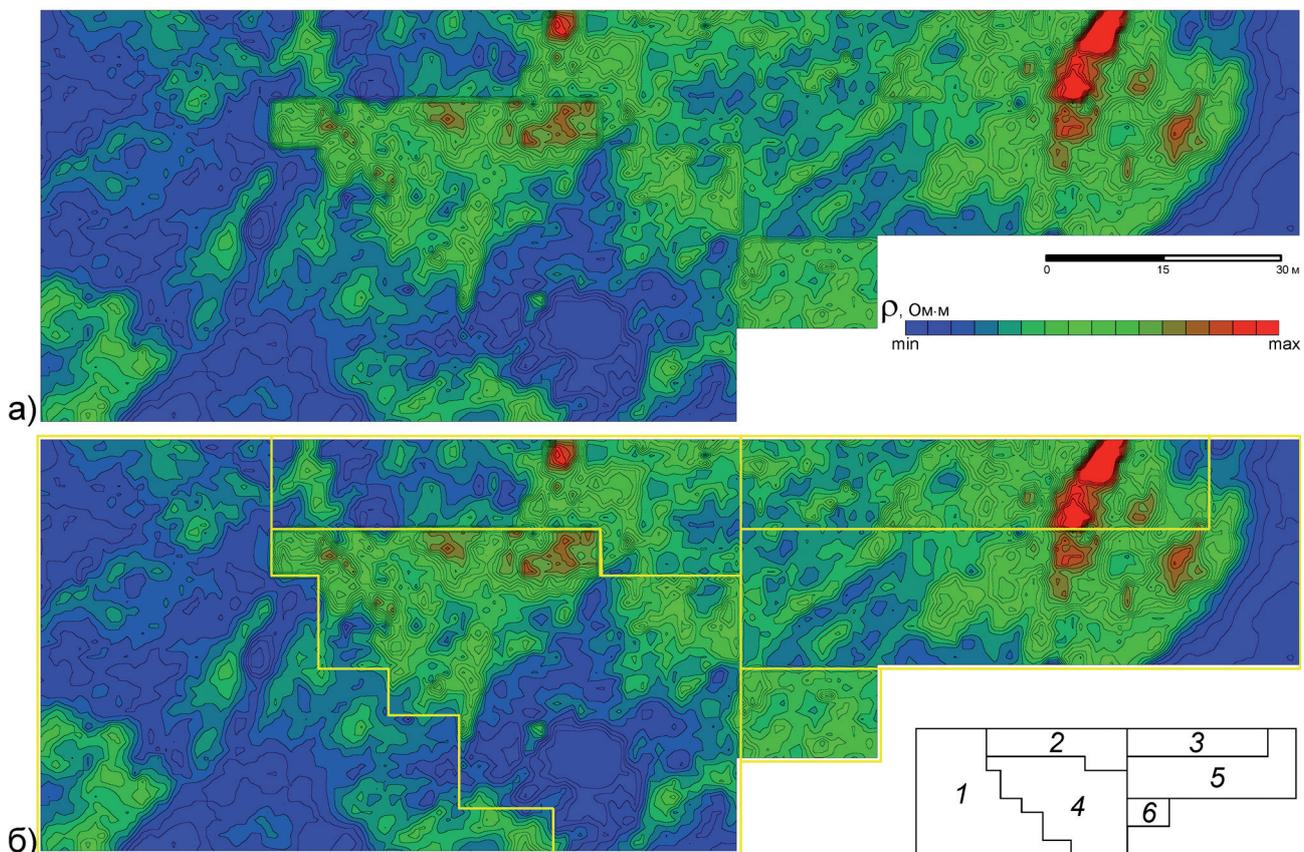


Рис. 1. Результаты площадного электропрофилирования на территории археологического памятника Улак-1: а) сводная карта распределения удельного сопротивления (эффективная глубина 0,5 м); б) расположение планшетов

смещения значений $\rho(x, y, z)$ на «искаженном» участке по оси ρ [10, с. 59]. Различие известных методов заключается в алгоритмах вычисления поправочного множителя данных «искаженного» планшета. Обычно в качестве «эталонного» планшета выбирается участок наибольшей площади, измерения на котором проводились при стабильных погодных условиях. Остальные планшеты, на границах которых фиксируются скачкообразные искажения данных относительно «эталонного», считаются «искаженными». Понятия «эталонного» и «искаженного» участков являются условными и вводятся для выбора «эталонного» планшета, данные которого не будут подвергаться обработке.

Другой причиной площадных скачкообразных искажений является погрешность изменения условий измерений (воздействие внешних факторов). Учитывая, что измерения на археологических памятниках проводятся в течение нескольких полевых сезонов (в том числе и в разные времена года), фоновая влажность приповерхностных слоев грунта на смежных планшетах геофизической съемки может отличаться. Кроме того, скачкообразные искажения могут быть вызваны вариацией погодных условий в процессе измерений [7; 11, pp. 187-188; 12, p. 41]. Грунты с различной пористостью и глинистостью, из которых сформированы археологические объекты, характеризуются различными фильтрационными свойствами, что определяет сложный характер изменения их влажности с течением времени [1, с. 34-39]. В результате изменяется не только величина удельного сопротивления, но и контрастность объектов поиска на фоне вмещающего грунта [13, p. 115; 14, p. 27]. Это приводит к нелинейным искажениям распределения удельного электрического сопротивления приповерхностных слоев. Методы корректировки, ориентированные на линейные преобразования массива данных, в данной ситуации не эффективны. Устранение таких искажений требует нелинейной фильтрации на основе определения функции коррекции для каждой аномалии сопротивления – преобразования, когда в качестве весовой функции h выступают сами значения $\rho(x, y, z)$ или их комбинации [9, с. 309].

Анализ условий проведения измерений на территории археологического памятника Улак-1 позволяет предположить, что большинство скачкообразных искажений связано с воздействием внешних факторов. Исследования на Планшете 2 и Планшетах 1, 5 и 6 проводились в разные полевые сезоны, но при стабильных погодных условиях, а на Планшетах 3 и 4 – при периодических ливневых дождях. С другой стороны, при стабильных условиях измерений фиксируется граница между Планшетами 5 и 6, что, вероятно, связано с инструментальной погрешностью

измерений. Границы искажений совпадают с границами планшетов (показаны линиями желтого цвета на рис. 16). Это позволяет предположить, что площадные скачкообразные искажения не связаны с археологическими объектами.

Очевидно, что процедуры корректировки массивов данных для выделенных вариантов площадных скачкообразных искажений должны различаться. Следовательно, для корректного устранения таких искажений данных малоглубинного электропрофилирования необходимо определить причину их возникновения.

Способ определения источника искажений

Определение искажений различных типов основано на анализе относительного изменения удельного сопротивления грунта при изменении эффективной глубины исследований [15]. Инструментальная погрешность, связанная с регулировкой аппаратуры, является постоянной систематической погрешностью и одинаково влияет на результаты измерений при различных глубинах зондирования z_i . С другой стороны, влияние внешних факторов (время года, осадки) определяет нелинейный характер искажений при изменении эффективной глубины: отличия фоновой влажности слоев грунта и особенности распределения влаги в каждом i -м слое в зависимости от структуры составляющих его грунтов. Следовательно, оценка динамики изменения удельного электрического сопротивления грунта позволяет прогнозировать причину возникновения площадных скачкообразных искажений на каждом «искаженном» планшете сводной карты.

Для этого может быть применено следующее решающее правило: если для каждой пары массивов $\rho(x, y, z)$, измеренных при смежных значениях эффективных глубин z_i и z_{i+1} , в пределах погрешности измерений выполняется условие:

$$\rho(x_j, y_l, z_i) / \rho(x_j, y_l, z_{i+1}) = const$$

при $x_j \in [X_{min}, X_{max}]$; $y_l \in [Y_{min}, Y_{max}]$,

то «искажения» данных на планшете вызваны инструментальной погрешностью и подлежат линейной фильтрации, иначе – вызваны погрешностью изменений условий измерений.

При исследованиях археологического памятника Улак-1 оценка динамики изменения сопротивления показала, что скачкообразные искажения между Планшетами 5 и 6 определяются инструментальной погрешностью (отсутствие границы между Планшетами 5 и 6 на результирующей карте). При этом контрастно проявляются границы искажений между Планшетом 4 и Планшетами 1, 2, 5 и 6, а также Планшетом 3 и Планшетами 2 и 5, которые, вероятно, связаны с влиянием внешних факторов (рис. 2).

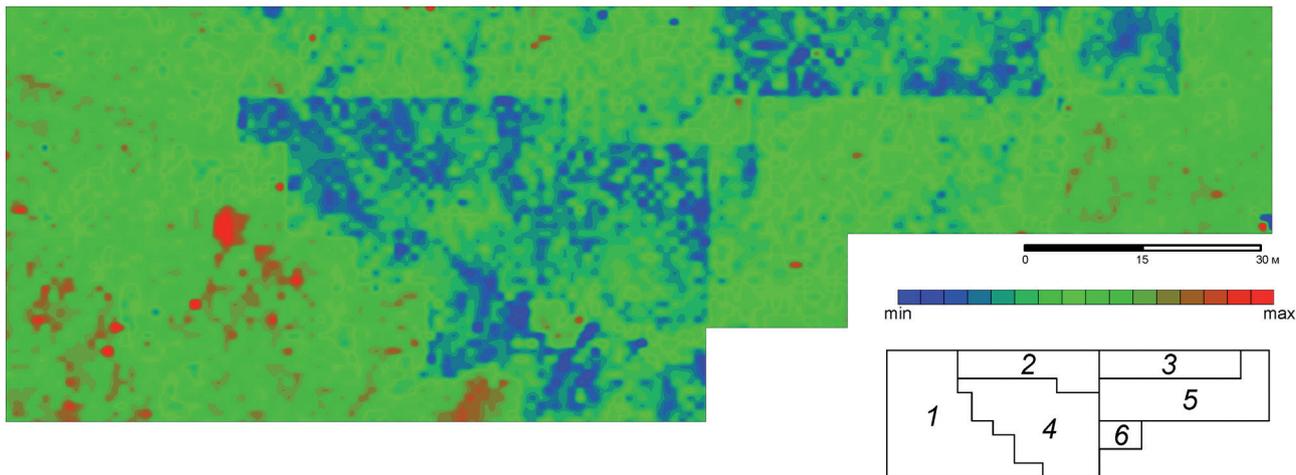


Рис. 2. Оценка относительного изменения удельного сопротивления грунта в глубину (эффеkтивные глубины 0,35 м и 0,5 м)

Корректировка искажений, вызванных инструментальной погрешностью

Корректировка данных на «искаженном» планшете производится путем введения поправочного множителя (либо поправки) для всех значений удельного сопротивления. Предположим, что измерения проводятся на прямоугольных планшетах *A* и *B* размером $M \times N$ точек измерений (рис. 3). Каждый участок включает *N* профилей по *M* точек измерений в каждом. Планшеты имеют общую границу, которая расположена между *n*-м профилем участка *A* и 1-м профилем участка *B*.

Вычисление смещения искаженного участка *B* относительно планшета *A* производится исходя из среднего значения точек измерений вдоль смежных профилей объединяемых участков [12, 16]. Тогда значение поправочного множителя *K* для всех значений участка вычисляется в соответствии с выражением:

$$K = \frac{1}{M} \left(\sum_{m=1}^M \rho_{A,n}(m) - \sum_{m=1}^M \rho_{B,1}(m) \right),$$

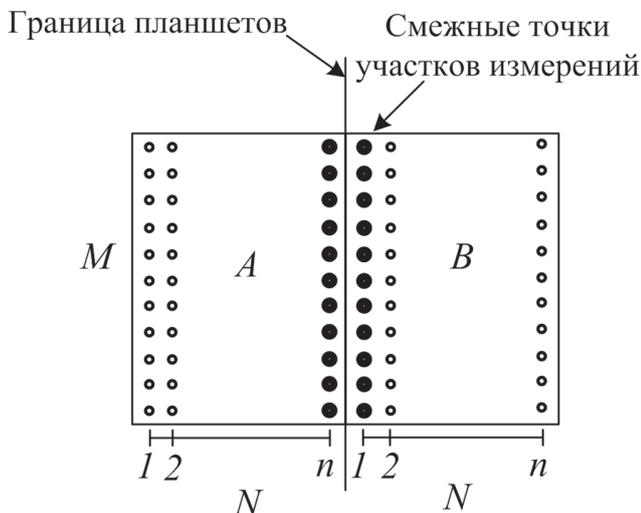


Рис. 3. Схема расположения планшетов и точек измерений

где $\rho_{A,n}(m)$ – удельное сопротивление в *m*-й точке *n*-го профиля участка *A*; $\rho_{B,1}(m)$ – удельное сопротивление в *m*-й точке 1-го профиля участка *B*.

Недостатком данного метода является существенное влияние экстремальных значений $\rho_{A,n}(m)$ и $\rho_{B,1}(m)$ на величину *K*. Для уменьшения влияния вычисляют выборочное среднее [11] или медианные значения удельного сопротивления вдоль граничных профилей [1; 11, p. 189].

В [8] вводится функция, характеризующая рассогласование значений сопротивления в смежных точках граничных профилей соседних участков измерений. Для этого принимается, что отклонение между смежными точками соседних участков *D*:

$$D = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M | \rho_{A,n}(m) - \rho_{B,1}(m) |.$$

Далее, строится целевая функция, учитывающая разброс значений удельного сопротивления вдоль граничных профилей. Минимизация целевой функции методом наименьших квадратов приводит к выравниванию среднего уровня сопротивления смежных участков измерений между собой.

При корректировке искажений данных, вызванных инструментальной погрешностью, на археологическом памятнике Улак-1 в качестве «эталонного» выбран планшет, который содержит большее количество точек измерений (Планшет 5). Корректировка предполагает линейное преобразование данных всего Планшета 6 (рис. 4), при дальнейшей обработке Планшеты 5 и 6 объединяются в сводный Планшет (5-6). Здесь и далее последовательность преобразований сводной карты показана на схеме расположения планшетов областями с серой заливкой.

Кроме того, сравнение значений *D*, рассчитанных по «искаженной» (до проведения корректировки «искаженного» планшета) и откорректированной

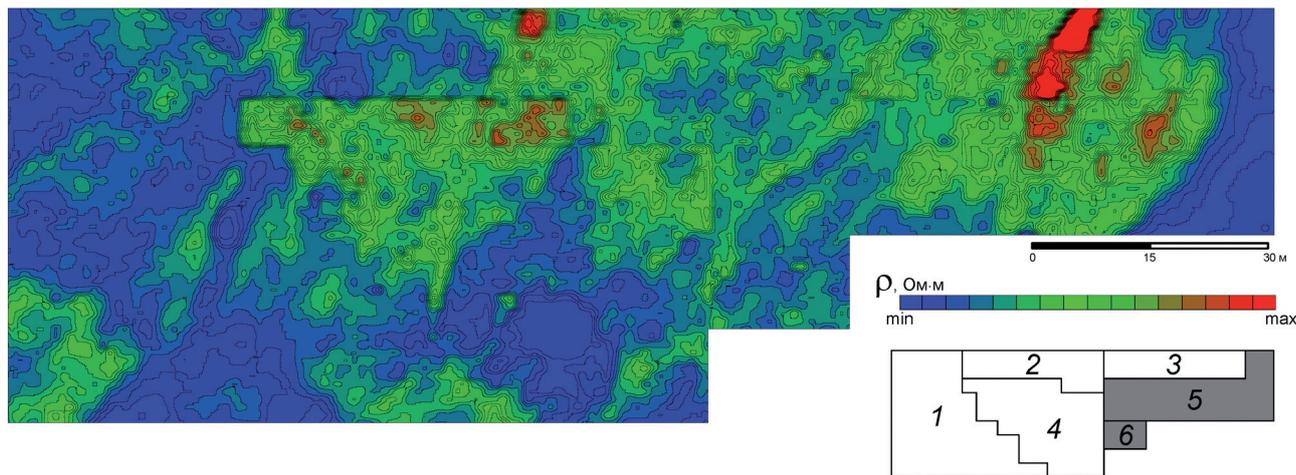


Рис. 4. Сводная карта распределения сопротивления после корректировки площадных скачкообразных искажений Планшетов 5 и 6

картам, позволяет численно оценить качество устранения искажения на границе планшетов и сравнивать результаты работы различных методов корректировки данных малоглубинной электроразведки.

Корректировка искажений, вызванных изменением условий измерений

Нелинейный характер зависимости удельного электрического сопротивления приповерхностного слоя от внешних факторов и структуры составляющих его грунтов определяет необходимость учета особенностей изменения удельного сопротивления вдоль границ «искаженного» планшета [17]. Разработанная адаптивная процедура предполагает следующую последовательность обработки данных «искаженного» планшета:

1. Нормализация – преобразование статистической функции распределения удельного электрического сопротивления грунта «искаженного» планшета к функции «эталонного».
2. Сегментация – управляемое «растекание» границ аномалий от локальных экстремумов.
3. Сглаживающая коррекция – пересчет «искаженных» значений в пределах аномалий, прилежащих к границе между «искаженным» и «эталонным» планшетами, и последующая коррекция значений в точках, находящихся внутри выделенных аномалий «искаженной» области.

Данная процедура позволяет эффективно корректировать искажения данных площадного электропрофилеирования на двух смежных планшетах. При формировании сводной карты распределения сопротивления, включающей нескольких «искаженных» планшетов, данные преобразования последовательно применяются к каждому из них.

Для массива данных археологического памятника Улак-1, обработка искажений проводилась в следующей последовательности. В качестве «эталонного» выбран Планшет 1 – участок максимальной площади, исследования которого проводились при стабильных погодных условиях. Планшет 1 граничит с Планшетами 2 и 4, при этом площадное скачкообразное искажение фиксируется только на границе с Планшетом 4. Поэтому Планшеты 1 и 2 объединены в сводный Планшет (1-2).

Сводный Планшет (1-2) граничит с Планшетами 3, 4 и (5-6). Несмотря на то что участки (1-2) и (5-6) получены в различных полевых сезонах, искажение на их границе не фиксируется, следовательно, дополнительная обработка данных не требуется. В результате, карта распределения удельного сопротивления грунта содержит три планшета: сводный «эталонный» Планшет (1-2-5-6), а также «искаженные» Планшеты 3 и 4.

Исходя из значений отклонения D (см. табл. 1), первым корректируется массив данных Планшета 3 (рис. 5а), далее – Планшета 4 (рис. 5б).

Таблица 1

Оценка отклонения данных на границе «эталонного» и «искаженных» планшетов

	$D((1-2-5-6) \leftrightarrow 3)$	$D((1-2-5-6) \leftrightarrow 4)$
До обработки	1,54 Ом·м	3,19 Ом·м
После обработки	0,72 Ом·м	0,45 Ом·м

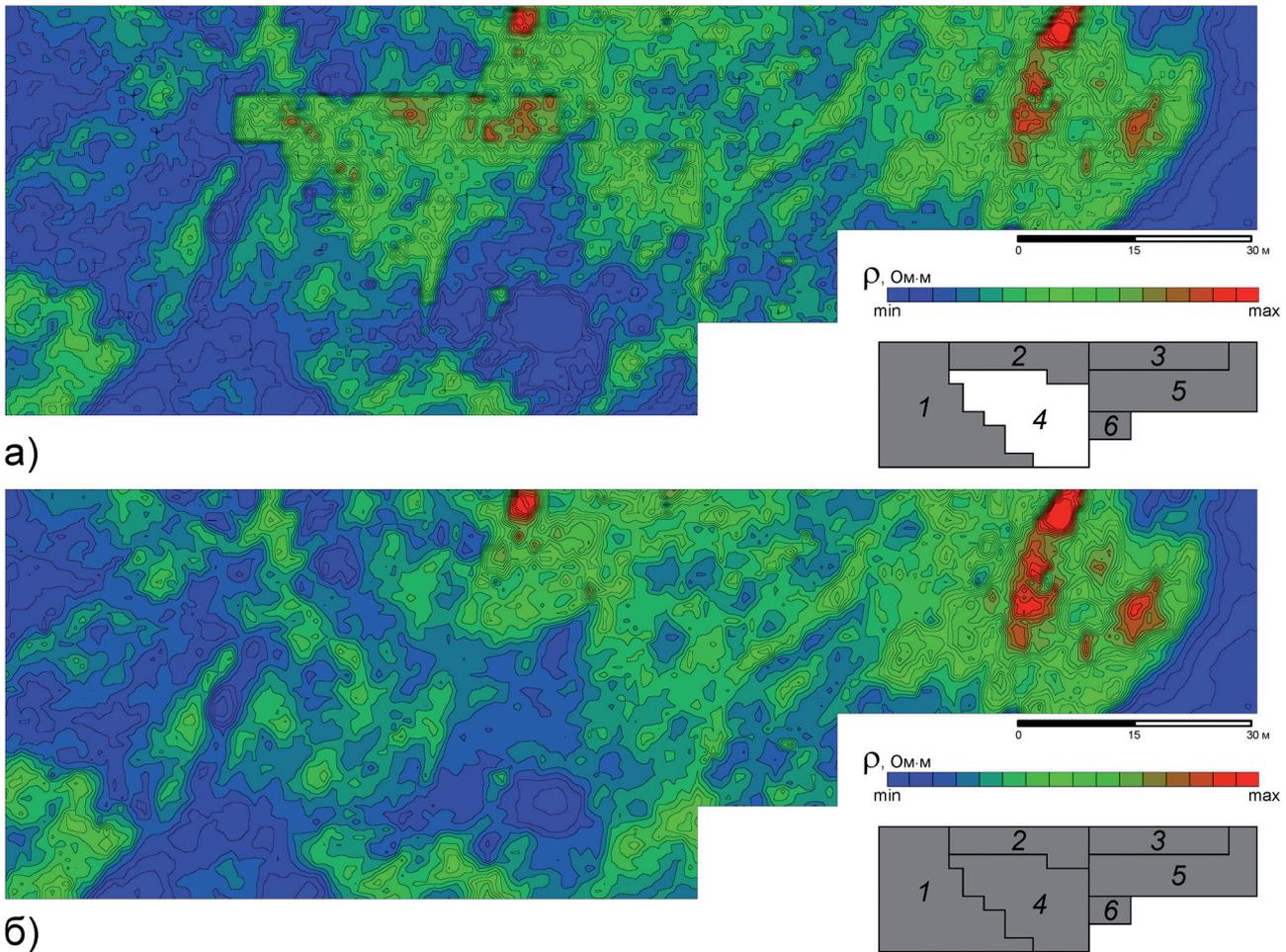


Рис. 5. Корректировка площадных скачкообразных искажений, вызванных изменением условий измерений: а) Планшет (1-2-5-6) и Планшет 3; б) Планшет (1-2-3-5-6) и Планшет 4

Результаты обработки данных площадного электропрофилирования территории поселения Улак-1 подтверждают эффективность разработанного алгоритма корректировки площадных скачкообразных искажений. Устранение искажений между планшетами происходит при сохранении формы аномалий геофизического поля, находящихся на их границе.

Алгоритм формирования сводных карт распределения удельного сопротивления грунта

Разработанный алгоритм включает в себя четыре этапа (рис. 6). Входными данными работы являются сводные массивы значений удельного сопротивления грунта $\rho(x, y, z)$, измеренных на наборе эффективных глубин z_i . При этом методика измерений обеспечивает одинаковую размерность массивов данных $\rho(x, y, z_i)$.

На первом этапе производится фильтрация локальных выбросов удельного сопротивления грунта во всех массивах измерительных данных. Локальные выбросы могут приводить к существенным искажениям при последующей обработке, особенно

в случае их расположения на границе планшетов. Для устранения локальных выбросов могут быть использованы известные методы фильтрации, в частности основанные на применении скользящего окна и априорно заданного порогового значения и пр. Помимо точечных выбросов, интерпретацию осложняет влияние регионального фона. Для его фильтрации могут быть применены методы, основанные на преобразовании Фурье, методах регрессионного анализа, а также методе скользящих средних.

На втором этапе осуществляется определение причины скачкообразных искажений данных. Результатом является разделение в сводных массивах $\rho(x, y, z_i)$ всех планшетов со скачкообразными искажениями на две группы: искажения, связанные с инструментальной погрешностью, и искажения, связанные с погрешностью изменений условий измерений. Это дает возможность адаптивно выбирать процедуру коррекции данных.

На третьем этапе осуществляется устранение искажений, связанных с инструментальной погрешностью. При этом осуществляется корректировка среднего уровня удельного сопротивления грунта



Рис. 6. Алгоритм формирования сводных карт распределения удельного сопротивления грунта

на «искаженном» планшете в соответствии с «эталонным». Для объединения планшетов могут быть использованы методы выравнивания средних значений. После применения выбранного метода, «искаженный» и «эталонный» планшеты объединяются и в дальнейшем рассматриваются как единый планшет.

Четвертый этап предполагает корректировку искажений, связанных с погрешностью изменения условий измерений (влияние внешних факторов на результаты измерений). В качестве «эталонного» выбирается планшет, полученный при наиболее стабильных и сухих погодных условиях, что определяет наибольшую контрастность объектов поиска на фоне

вмещающих грунтов. Последовательность объединения планшетов определяется в соответствии со средним значением отклонения удельного сопротивления грунта D на границе текущего «искаженного» и «эталонного» планшетов. В первую очередь для обработки выбирается тот планшет, значение характеристики D которого меньше остальных. После фильтрации искажения между выбранным «искаженным» и «эталонным» планшетами полученный сводный участок рассматривается как единый планшет и принимается в качестве «эталонного». Далее осуществляется повторное вычисление D для оставшегося набора планшетов. Описанная последо-

вательность действий повторяется до тех пор, пока присутствуют необработанные планшеты. Такой подход обеспечивает получение дополнительной информации для обработки наиболее сильно искаженных планшетов.

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет обрабатывать измерительные данные, состоящие из произвольного количества планшетов. Определение причины искажений является основанием для выбора метода обработки. Выбор последовательности обработки позволяет уменьшить влияние наиболее искаженных планшетов на результат корректировки сводной карты.

Методы и алгоритм формирования сводных карт распределения удельного сопротивления грунта были успешно применены на территории нескольких археологических памятников: поселение раннего железного века Улак-1 (Республика Башкортостан), средневековые селища Весь-5 (Владимирская область), Шекшово и Большое Давыдовское (Ивановская область), средневековое городище Кушман (Удмуртская Республика). Апробация при корректировке площадных скачкообразных искажений на исторических территориях, расположенных в различных ландшафтных зонах, подтверждает их эффективность.

Исследования выполняются в рамках Программы фундаментальных исследований Уральского отделения РАН, грант 12-М-26-2005.

Ключевые слова: малоглубинная электроразведка, планшет, сводная карта распределения сопротивления, площадные скачкообразные искажения, влияние внешних факторов, метод корректировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности / под ред. В.А. Шевнина и И.Н. Модина. – М. : РУССО, 1999. – 511 с.
2. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. – М. : Научный мир, 2007. – 248 с.
3. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов. – Тверь : ООО «Издательство ГЕРС», 2004. – 294 с.
4. Поздняков А.И. Полевая электрофизика почв. – М : МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 187 с.
5. Zhurbin I.V. Malyugin D.V. On the method of visualization of electrometric data // *Archaeological prospection*. – 1998. – Vol. 5, – № 2. – P. 73-79.

6. Журбин И.В., Коровин А.С. Метод фильтрации пространственных искажений при малоглубинных электрометрических исследованиях грунтов // *Вестник ИжГТУ*. – 2006 – № 1. – С. 30-33.
7. GEOPLOT, Instruction Manual, Geoscan Research. – URL: <http://www.geoscan-research.co.uk> (дата обращения 12.04.2013).
8. Haigh J.G.B. Automatic grid balancing in geophysical survey // *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* 1991. – Oxford, 1992. – P. 191-196.
9. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике : справочник геофизика. – М. : Недра, 1990. – 498 с.
10. Куфуд О. Зондирование методом сопротивлений. Пер. с англ. – М. : Недра, 1984. – 270 с.
11. Eder-Hinterleitner A. Restoring Magnetic Anomalies // *Archaeological Prospection*. – 1996. – Vol. 3, N 4. – P. 185-197.
12. Somers L.E., Hargrave M.L., Simms J.E. *Geophysical Surveys in Archaeology: Guidance for Surveyors and Sponsors*. ERDC/CERL SR-03-21. Arlington, VA: US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center, 2003. 122 p. – URL: <http://www.researchgate.net/publication/> (date of access 04.04.2013).
13. Chanturishvili L., Chelidze T., Tabagua G., Jakhutashvili M., Tarkhnishvili A., Zardalishvili T., Odilavadze D. New results of archaeogeophysical investigations of Armaztsikhe-Bagineti ancient urban area // *Journal of the Georgian Geophysical Society*. – Issue (A), *Physics of Solid Earth*. – 2001. – Vol. 6. – P. 112-117.
14. *Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation*. English Heritage, 2008. 60 p. – URL: <http://www.english-heritage.org.uk/publications/> (date of access 04.04.2013).
15. Догадин С.Е. Методика определения характера искажений малоглубинной электроразведки // *Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. науч. тр. / науч. ред. В.А. Куликов*. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2011. – С. 160-163.
16. TerraSurveyorLite User Manual. DW Consulting, 2013. – 71 p. – URL: http://www.dwconsulting.nl/TerraSurveyor-GSSI_manual30x2.pdf (date of access 12.04.2013).
17. Журбин И.В., Догадин С.Е. Метод корректировки искажений данных площадного электропрофилеирования // *Записки Горного института*. – 2011. – Т. 194. – С. 178-182.