

И.В.ЖУРБИН, д-р ист. наук, канд. техн. наук, зав. лабораторией, zhurbin@udm.ru

Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск

С.Е.ДОГАДИН, аспирант, semen.dogadin@mail.ru

Ижевский государственный технический университет

I.V.ZHURBIN, Dr in hist. sc., PhD in eng. sc., laboratory head, zhurbin@udm.ru

Physical-Technical Institute Ural Branch of RAS, Izhevsk

S.E.DOGADIN, post-graduate student, semen.dogadin@mail.ru

Izhevsk State Technical University

МЕТОД КОРРЕКТИРОВКИ ИСКАЖЕНИЙ ДАННЫХ ПЛОЩАДНОГО ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЯ

Разработанный метод предполагает нормализацию наблюдаемого поля, разделение карты распределения сопротивления между аномалиями и сглаживающую коррекцию вдоль границ аномалий. Описанный подход позволяет эффективно корректировать искажения данных площадного электропрофилирования.

Ключевые слова: квазиконформные искажения, нормализация, аномалия, сглаживающая коррекция.

METHOD OF DISTORTION'S CORRECTION OF MAPPING ELECTRICAL PROFILING DATA

The developed method assumes normalization of measured electrical field, division of a map of resistance distribution between anomalies and smoothing edge matching along borders of anomalies. The described approach allows to correct effectively distortions of mapping electrical profiling data.

Key words: quasi-conformal distortion, normalization, anomaly, smoothing edge matching.

Малоглубинные геофизические исследования применяются для восстановления планировки археологических памятников. Исследования на больших территориях проводятся последовательно, в соответствии с границами планшетов. Дальнейшей задачей является объединение данных со всех планшетов и интерпретация полученной сводной геофизической карты. При этом наблюдаются скачкообразные изменения среднего уровня значений поля на смежных планшетах. Контраст между планшетами существенно усложняет выявление аномалий и анализ их формы.

В случае сплошных электрических зондирований аналогом данного типа искажений является *P*-эффект, вызванный припо-

верхностными неоднородностями (вертикальный сдвиг всей кривой зондирования или ее сегментов по оси сопротивления без изменения формы). По принятой классификации такие искажения относятся к квазиконформным [1, с.59-63].

При электропрофилировании искажения могут быть связаны с методическими ошибками: различия в калибровке аппаратуры на смежных планшетах или погрешность в расположении перемещаемых элементов установки [3; 4, с.191]. В этом случае корректировка сдвига производится в соответствии с предположением, что погрешность носит аддитивный характер [3; 5, с.64]. Кроме методической погрешности, искажение сводных карт электрического

поля может быть вызвано воздействием внешних факторов. Обычно на археологических памятниках измерения проводятся в течение нескольких полевых сезонов, в том числе в разные времена года. В соответствии с этим отличается фоновая влажность грунта. Кроме того, квазиконформные искажения могут быть вызваны вариацией погодных условий в процессе измерений [3; 5, с.41]. После интенсивных атмосферных осадков резко уменьшается величина электрического сопротивления приповерхностных слоев, а также контрастность объектов поиска на фоне вмещающего грунта. Преобразования, ориентированные на устранение аддитивной погрешности, в данной ситуации не эффективны. Необходимо учитывать не только амплитуду, но и форму кривой изменения электрического поля вдоль границ «искаженного» планшета. Следовательно, разработка методов фильтрации квазиконформных искажений данных малоглубинной электроразведки остается актуальной.

Разработан метод корректировки искажений данных площадного электропрофилирования. Пересчету подвергаются результаты измерений на «искаженном» планшете с учетом особенностей изменения сопротивления в «эталонной» области (планшеты, измерения на которых проводились при относительно стабильных погодных условиях).

Нормализация наблюдаемого поля. Особенности изменения кажущегося удельного сопротивления ρ_k на участке исследований могут быть описаны статистической функцией распределения $F(\rho_k)$. Полагаем, что при одинаковых погодных условиях и при схожей структуре культурного слоя функции «искаженного» и «эталонного» участков должны быть близки. Однако повышенная влажность приповерхностных слоев грунта на «искаженном» планшете определяет уменьшение диапазона изменения сопротивления и, как следствие, увеличение угла наклона $F(\rho_k)$ относительно оси ρ_k (рис.1, а). Приведение $F_{иск}(\rho_k)$ к $F_{эт}(\rho_k)$ основано на аппроксимации функций распределения линейной моделью. Условием близости принимаем равенство уравнений регрессии. Осуществляя преобразования

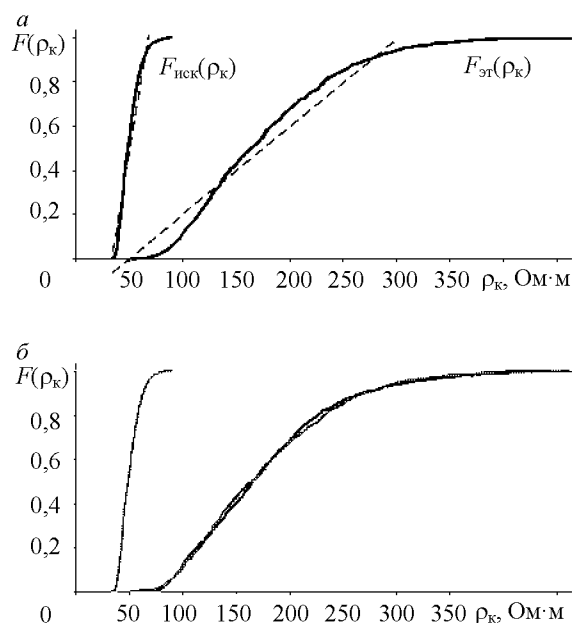


Рис.1. Метод нормализации наблюдаемого поля: а – представление массива $\rho_k(i, j)$ статистической функцией распределения $F(\rho_k)$; б – приведение $F_{иск}(\rho_k)$ к $F_{эт}(\rho_k)$. Штриховые линии – линии регрессии

смещения и сдвига приводим $F_{иск}(\rho_k)$ к $F_{эт}(\rho_k)$ (рис.1, б). Это не обеспечивает полного совпадения статистических функций распределения «искаженного» и «эталонного» планшетов, что связано с особенностями структуры приповерхностного слоя грунта. Тем не менее на предварительном этапе устранения искажения описанная процедура достаточно эффективна (рис.2).

По сути, описанный метод близок методам нормализации кривых вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), которые предполагают приведение (смещение) кривых, полученных при разных условиях заземлений MN , к некоторому фоновому уровню, наиболее свободному от влияния локальных объектов, расположенных вблизи электродов MN [1, с.63; 2, с.115-119].

Выделение аномалий. Нормализация наблюдаемого поля не всегда корректирует искажения вдоль границ планшетов (см. выделенные области на рис.2). Поэтому предлагается сглаживающая коррекция аномалий, прилежащих к границе «эталонного» планшета, при минимальном изменении уровня ρ_k внутренних аномалий «искажен-

ного» планшета. Для этого необходимо предварительное определение границ аномалий.

При площадном электропрофилировании результаты измерений представлены матрицей значений $\rho_k(i, j)$, расположение элементов которой соответствует взаимному положению точек наблюдений на планшете. Таким образом, массив данных может рассматриваться в трехмерном пространстве, где в качестве аппликаты принимается значение $\rho_k(i, j)$. Представление результатов измерений в виде поверхности позволяет одновременно учитывать амплитуду ρ_k и взаимное положение точек наблюдений.

Полагаем, что каждая аномалия имеет локальный экстремум по оси ρ_k , которому соответствует элемент матрицы со значением большим (или меньшим), чем сопротивление восьми ближайших элементов. Метод выделения аномалий предполагает управляемое «растекание» границ аномалий от экстремумов. Принадлежность текущей точки наблюдаемого поля к одной из выделенных аномалий определяется по расстоянию по оси сопротивлений ($\Delta\rho_k \rightarrow \min$) между рассматриваемой точкой и смежных с ней точек выделенных аномалий (рис.3). При программной реализации использован волновой алгоритм Ли.

Сглаживающая коррекция. Процедура предполагает два этапа: коррекцию ρ_k в точках наблюдений, прилежащих к границе, и коррекцию в точках, находящихся внутри «искаженной» области. Достоверной информацией для сглаживающей коррекции являются значения сопротивления на границе между «искаженной» и «эталонной» областями. Метод основан на определении ошибки изменения среднего уровня удельного сопротивления вдоль границы. Вычисляются $k_{\text{эт}}$ и $k_{\text{иск}}$ – угловые коэффициенты прямых, проходящих через точки $\rho(i-2, j)$ и $\rho(i-1, j)$, расположенные вне области искажения, и через точки $\rho(i, j)$ и $\rho(i+1, j)$ внутри «искаженной» области (рис.4). Угловой коэффициент k прямой на участке между точками $\rho(i-1, j)$ и $\rho(i, j)$ может быть вычислен как $k_{\text{кор}} = (k_{\text{эт}} + k_{\text{иск}})/2$. Такое усреднение обеспечивает сглаживание на границе искажения.

После коррекции значений ρ_k в точках, прилежащих к границе областей, получим значения наблюдаемое $\rho_k(i, j)$ и скорректированное $\rho_{k, \text{кор}}(i, j)$. Учитывая мультипликативность влияния параметра влажности в модели сопротивления, значение функции коррекции f для каждой откорректированной точки l можно определить как $f_l = \rho_{k, \text{кор}}(i, j) / \rho_k(i, j)$.

Функция коррекции для других точек «искаженной» области определяется по результатам коррекции уже обработанных точек, как взвешенное среднее значение функций коррекции соседних скорректированных точек в пределах некоторого окна усреднения ($a \times a$). При этом большим весом будут обладать функции коррекции близлежащих точек, а также точек, находящихся в пределах одной аномалии с корректируемой. Вес функции коррекции каждой точки в пределах окна

$$w_l = [(x - x_l)^m + (y - y_l)^m] K,$$

где x и y – координаты обрабатываемой точки на планшете; x_l и y_l – координаты скорректированных точек в пределах окна усреднения; m – показатель степени, определяющий зависимость веса функции коррекции l -й точки от расстояния; K – коэффициент, учитывающий принадлежность l -й и корректируемой точек к одному объекту (в этом случае $K > 1$, иначе $K = 1$). Параметры K и m задаются эмпирически.

Функция коррекции значения в текущей точке наблюдения:

$$f = \sum_{l=1}^L f_l w_l / \sum_{l=1}^L w_l,$$

где L – количество уже откорректированных точек, находящихся в пределах окна обрабатываемой точки; f_l – их функции коррекции, w_l – веса функции коррекции.

Таким образом, разделив карту распределения сопротивления между аномалиями (см. рис.3) и проведя сглаживающую коррекцию в пределах каждой из аномалий, можно устранить искажения (рис.5).

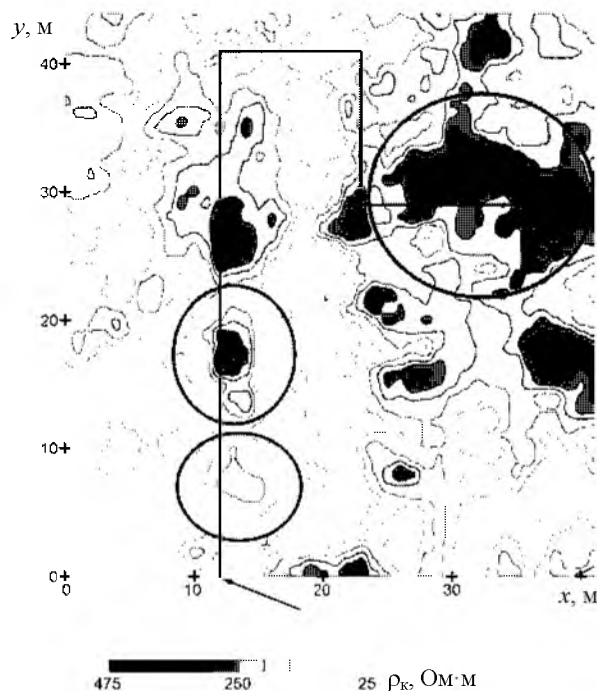


Рис.2. Нормализация данных площадного электропрофилирования

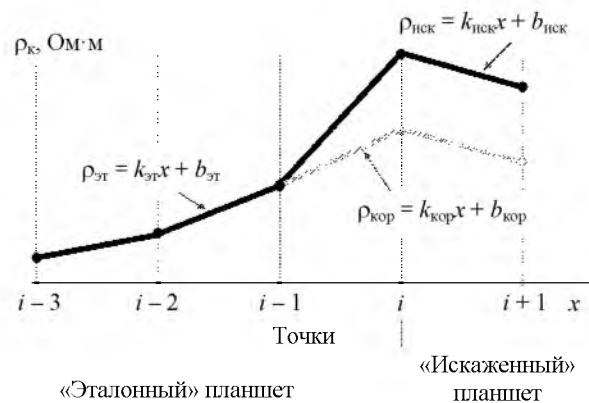


Рис.4. Метод коррекции $\rho_k(i, j)$ в точках наблюдений, прилежащих к границе

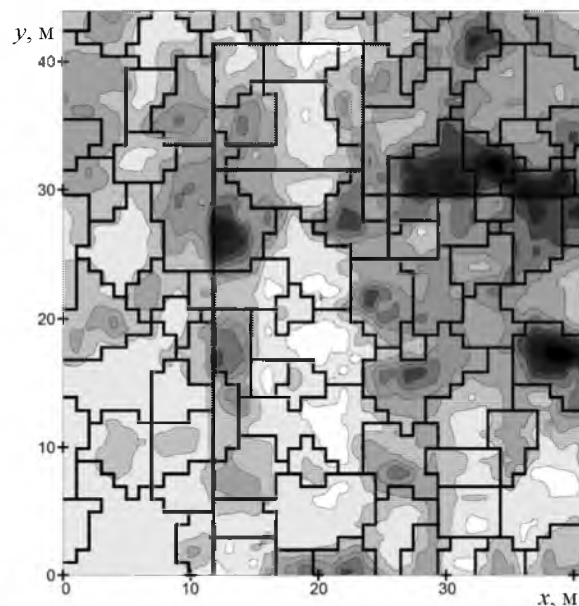


Рис.3. Определение границ аномалий на карте распределения ρ_k

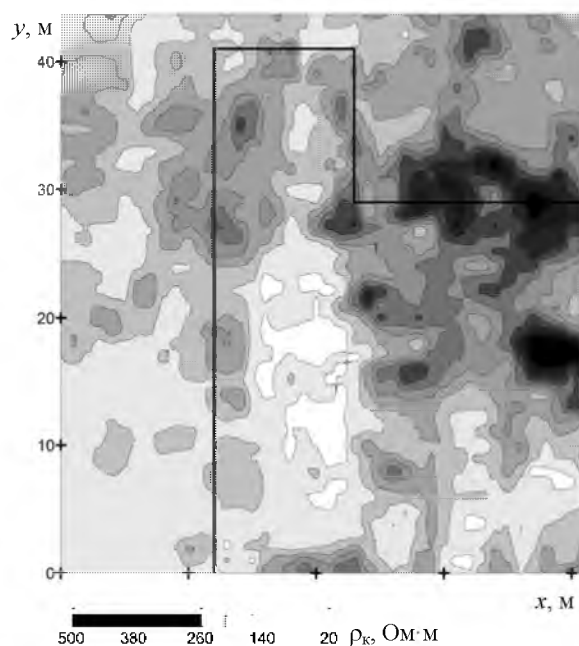


Рис.5. Корректировка данных площадного электропрофилирования

Оценка качества коррекции. Степень искажения на каждом этапе обработки оценивалась средним значением разбросов сопротивления между граничными профилями планшетов «искаженного» $\rho_{иск}(i, j)$ и «эта-

лонного» $\rho_{эт}(i, j)$ [4]. Пусть каждый из граничных профилей имеет K точек наблюдений. Следовательно, образуется K пар точек, позволяющих оценить абсолютную величину разброса d_k между значениями сопротив-

ления в смежных точках наблюдения, расположенных на разных планшетах. Усреднение d_k по всей длине граничного профиля позволяет численно оценить эффективность процедуры коррекции. В частности, в приведенном примере усредненное значение разброса в исходном массиве составило 137 Ом·м, после нормализации – 68 Ом·м, а в результате применения сглаживающей коррекции 31 Ом·м. Следовательно, на каждом из этапов обработки уменьшался разрыв среднего уровня ρ_k между «искаженным» и «эталонным» планшетами. Дополнительно оценивался разброс между соседними профилями, полученными при стабильных погодных условиях («эталонный» планшет). В данном случае разброс составил 28 Ом·м, что хорошо согласуется с итоговыми результатами обработки искажения.

Разработанный метод позволяет эффективно корректировать искажения данных площадного электропрофилирования. Отличительной особенностью является селективный подход, при котором функция коррекции практически неизменна в пределах аномалии. Следствием выбора этого является устранение искажения на границах смежных планшетов при минимальных изменениях данных внутренних областей.

Исследования поддержаны Программой интеграционных и междисциплинарных проек-

тов фундаментальных исследований УрО РАН на 2009-2011 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности / Под ред. В.А.Шевнина и И.Н.Модина. М., 1999. 511 с.
2. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований М., 2007. 248 с.
3. GEOPLOT, Instruction Manual, Geoscan Research. – [http // www.geoscan-research.co.uk](http://www.geoscan-research.co.uk).
4. Haigh J.G.B. Automatic grid balancing in geophysical survey // Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology – 1991. Oxford, 1992. P.191-196.
5. Somers L.E., Hargrave M.L., Simms J.E. Geophysical Surveys in Archaeology: Guidance for Surveyors and Sponsors; Engineer research and development center, Construction engineering research laboratory. SR-03-21. 2003. 122 p.

REFERENCES

1. Geoecological survey the enterprises of a petroleum industry / Ed. by V.A.Shevnin, I.N.Modin. Moscow, 1999. 511 p.
2. Kolesnikov V.P. Bases of interpretation electric sounding. Moscow, 2007. 248 p.
3. GEOPLOT, Instruction Manual, Geoscan Research. – [http // www.geoscan-research.co.uk](http://www.geoscan-research.co.uk).
4. Haigh J.G.B. Automatic grid balancing in geophysical survey // Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology – 1991. Oxford, 1992. P.191-196.
5. Somers L.E., Hargrave M.L., Simms J.E. Geophysical Surveys in Archaeology: Guidance for Surveyors and Sponsors; Engineer research and development center, Construction engineering research laboratory. SR-03-21. 2003. 122 p.