

**Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации:
аппаратура, методики, программное обеспечение и перспективы развития.**

Электроразведка методом сопротивлений остается одним из основных геофизических методов при малоглубинных исследованиях. Развитие этого метода обусловлено как развитием аппаратуры и вычислительной техники, так и появлением новых технологий полевых работ, обработки данных и интерпретации. Все это привело к появлению новой методики – двумерной электроразведки (“2D resistivity”, электротомография). В табл. 1 приведено сравнение метода ВЭЗ и двумерной электроразведки.

Таблица 1. Сравнение «классического» метода ВЭЗ и 2Д электроразведки

Метод ВЭЗ	2D (3D) электроразведка
одноканальная аппаратура	многоэлектродная аппаратура
логарифмический шаг по разносам	линейный шаг по разносам
редкая сеть наблюдений (шаг по профилю сравним с максимальным разносом)	плотная сеть наблюдений (шаг по профилю равен минимальному раз- носу)
установка Шлюмберже или дипольная	произвольная установка, комбинирование установок
1D интерпретация	2D (3D) автоматическая инверсия (Res2dInv, SensInv2D и т.п.)

Многоэлектродные зондирования

2D электроразведка основана на методике многоэлектродных зондирований. Эта методика отличается от “классического” метода ВЭЗ в первую очередь высокой плотностью наблюдений, которая достигается применением соответствующих схем наблюдения, а использование многоэлектродной аппаратуры (рис. 1А) обеспечивает эффективность полевых работ [Griffiths and Barker, 1993; Бобачев и др., 1996; Dahlin, 2001]. Другой составляющей двумер-

ной электроразведки является автоматическая двумерная инверсия данных, прежде всего в рамках “гладких” моделей [Loke and Barker, 1996]. В целом использование такого подхода позволяет получать удовлетворительные результаты даже при минимальной квалификации пользователя. За последние 15 лет эта методика получила на Западе повсеместное распространение. В России из-за практического отсутствия многоэлектродной аппаратуры внедрение такого подхода только начинается. На сегодняшний день существует только комплекс «Иднакар» на базе измерителя и генератора «ЭРА» [Журбин и Груздев, 2004]. Кроме того, к этой методике близка технология сплошных электрических зондирований, разработанная на кафедре геофизики Геологического факультета МГУ [Бобачев и др., 1995].

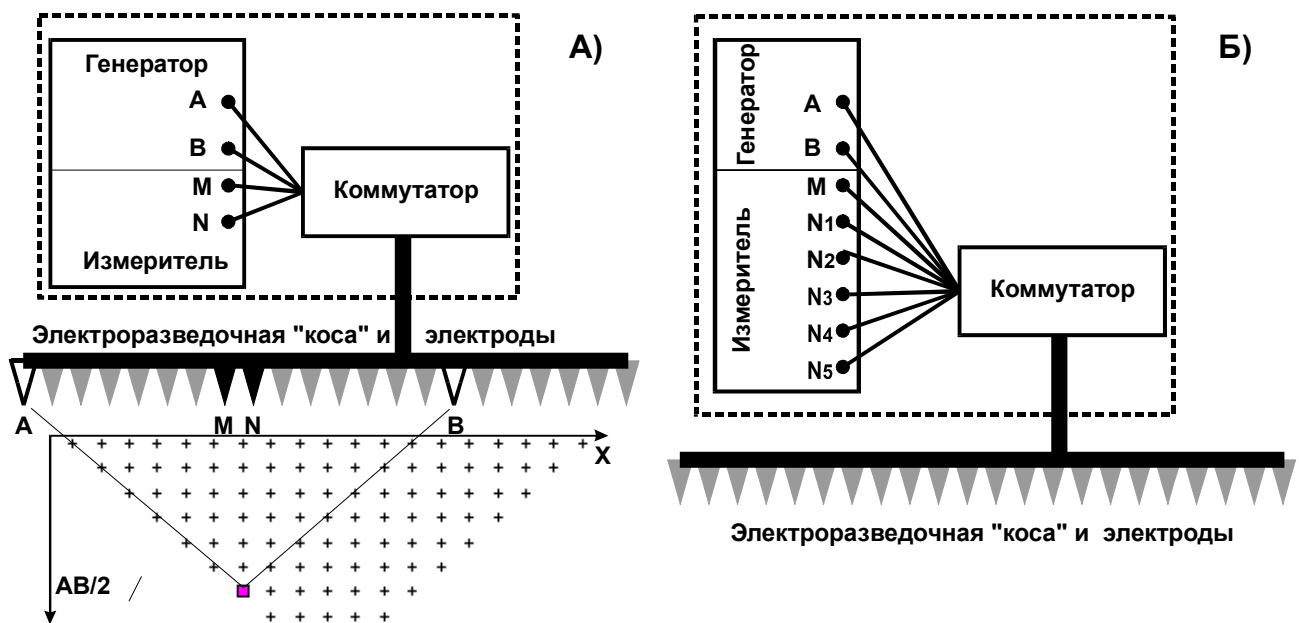


Рис. 1. Схемы многоэлектродной (А) и многоканальной (Б) аппаратуры.

Аппаратура

Для получения данных, пригодных к двумерной интерпретации используется многоэлектродная аппаратура. Такая аппаратура производится практически всеми ведущими производителями геофизической аппаратуры.

Такая аппаратура обеспечивает:

- повышение производительности и качества полевых наблюдений;
- возможность двумерной интерпретации данных;
- применимость для задач мониторинга и межскважинных наблюдений;
- возможность проведения работ в дождь.

Конечно, за эти возможности приходится платить:

- большой вес (~ 100 кг) за счет кабелей и электродов и малая мобильность
- ограниченный диапазон разносов
- слабая помехозащищенность из-за высокой скорости измерений
- относительно высокая стоимость аппаратуры (>\$25000). Появилась и стала активно

применяться многоканальная многоэлектродная аппаратура: 10-канальная Syscal-Pro (Iris Instruments), 4-канальная SAS4000 (ABEM) и др. Такие измерители позволяют за один цикл измерения получать значения разности потенциалов на нескольких приемных диполях (рис. 1Б). За счет этого удалось в несколько раз увеличить скорость полевых наблюдений, что всегда было принципиальным ограничением геофизики на постоянном токе. При многоэлектродных зондированиях при одном положении установки проводят сотни и тысячи измерений, поэтому скорость наблюдений играет очень важную роль. Кроме того, быстрые измерения открывают новые возможности для использования электроразведки при мониторинге различных геологических и технических процессов.

Методика наблюдений двумерной электроразведки

Большое внимание уделяется выбору оптимальной методики наблюдений (Dahlin and Zhou, 2004). Сравнение различных методик показало, что качество получаемых результатов

зависит не только от точности измерений, но и от выбранной методики. В табл. 2 дается оценка возможностей основных установок.

Таблица 2. Качественное сравнение электроразведочных установок применительно к многоэлектродным зондированиям.

Установки	Глубинность	Уровень сигнала	Разрешающая способность	число измерений	Многоканальные измерения	аппаратуре и программах	проблемы с бесконечностью
Потенциал	+++	+++	+	+	++	+++	+++
Веннера	+	+++	+	+	нет	+++	нет
Шлюмберже	++	++	++	++	+	++	нет
Дипольная осевая	++	+	+++	++	+++	++	нет
Трехэлектродная	+++	+	+++	+++	+++	+	+

Основным путем повышения эффективности полевых наблюдений является комбинированная съемка с несколькими установками с последующей совместной инверсии всех полученных данных. Наиболее эффективным является использование комбинированной трехэлектродной установки. К сожалению, она плохо поддерживается производителями аппаратуры и программного обеспечения. Альтернативой этой установкой является использование дипольной установки совместно с установкой Шлюмберже или Веннера [Stummer et al., 2004].

Максимальное число электродов в одной расстановке – от 48 до 96. Малое число разносов ограничивает максимальный разнос, большое – увеличивает стоимость и габариты аппаратуры. Расстояние между электродами обычно составляет 2 – 10 метров. Оно определяет интервал изучаемых глубин и детальность наблюдений. В табл. 3 приведены параметры типичных многоэлектродных систем наблюдений.

Таблица 3. Производственные характеристики многоэлектродных зондирований.

Число электродов	Расстояние между электродами	Длина профиля	Интервал разностей	Примерное время подготовки	Число измерений	Время измерений	
						Одно-канальная станция	10-канальная станция
48	2	94	3 - 47	40 мин	300 – 1000	30 минут – 1.5 часа	6 – 20 минут
	10	470	15 - 235				
96	2	190	3 - 95	1.5 часа	1000 - 3000	1.5 – 4.5 часа	30 минут – 1.5 часа
	10	950	15 - 475				

Двумерная автоматическая инверсия и другое программное обеспечение

Первые версии программ автоматической двумерной инверсии данных работали в рамках “гладких” моделей [Loke and Barker, 1996]. Это наиболее простой способ регуляризации обратной задачи часто приводит к появлению ложных аномалий в результирующем разрезе. Поэтому стали использоваться другие алгоритмы регуляризации (рис. 2). Кроме того, стала очевидной необходимость учета априорных данных при инверсии через введение некоторых границ и закрепления сопротивлений блоков.

Опыт практического применения многоэлектродных зондирований показал, что сама по себе высокая плотность наблюдений недостаточна для получения качественных результатов инверсии. Поэтому перед использованием программ автоматических инверсий необходимо проводить обработку полевых данных для подавления различных помех и методических ошибок [Dahlin, 2000].

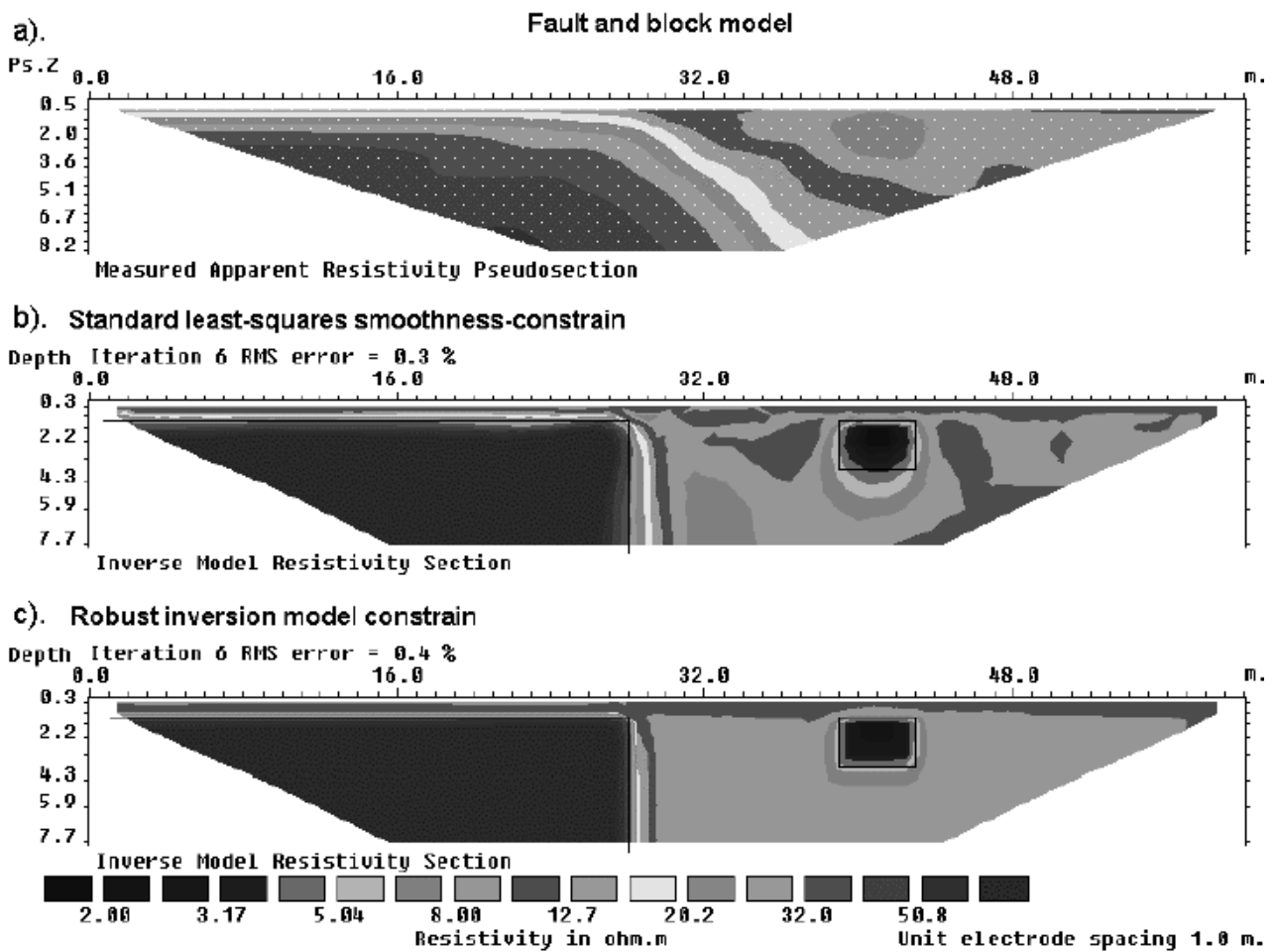


Рис. 2. Модель контакта и блока: а) разрез кажущегося сопротивления; результаты инверсия в рамках гладких (b) и контрастных моделей (c) (из инструкции к программе Res2Dinv (Loke)).

Таблица 4. Некоторые программы для двумерной электроразведки.

ПРОГРАММА	НАЗНАЧЕНИЕ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬ
Res2dInv	Стандарт de facto для 2D инверсии, Geotomo, Малазия
SensInv2D	2D инверсия, Geotomographie, Германия
ZondRes2D	2D инверсия, СПбГУ, Санкт-Петербург, РФ
x2ipi	Подготовка, обработка, визуализация данных, МГУ, Москва, РФ
Res2dMod	2D прямая задача, Geotomo, Малазия
IE2DP1, ТОК_LINE	2D прямая задача, расчет токовых линий МГУ, Москва, РФ

Особое внимание приходится уделять подавлению искажений от приповерхностных неоднородностей. Обычно это необходимо при одномерной интерпретации [Shevnin et al., 1999], однако такая обработка существенно улучшает результаты и для двумерной инверсии, особенно для глубинной части разреза [Ritz et al., 1999]. Для подавления эффектов приповерхностных неоднородностей могут применяться статистические методы – метод главных компонент или медианная полировка.

При анализе результатов двумерной электроразведки и их геологической интерпретации, кроме автоматической двумерной инверсии данных, как таковой, полезно использование решения двумерной прямой задачи и других средств анализа геоэлектрических моделей (рис. 3).

В табл. 4 перечислены некоторые программы, используемые в двумерной электроразведке.

Применение двумерной электроразведки

В нашей стране использование двумерной электроразведки рекомендовано Госстроем России (СП 11-105-97). Применение двумерной электроразведки целесообразно при всех детальных (масштаб 1:2000 и крупнее) геофизических исследованиях – при инженерно-геологических и гидрогеологических изысканиях, изучении геологического разреза на малых и средних глубинах при поисках и разведке полезных ископаемых, а также в менее традиционных областях применения малоглубинной геофизики – изучении археологических памятников, решении геоэкологических и других задач.

Двумерная электроразведка необходима при исследовании разрезов, значительно отличающихся от горизонтально-слоистой модели среды – в условиях крутопадающих слоев, при

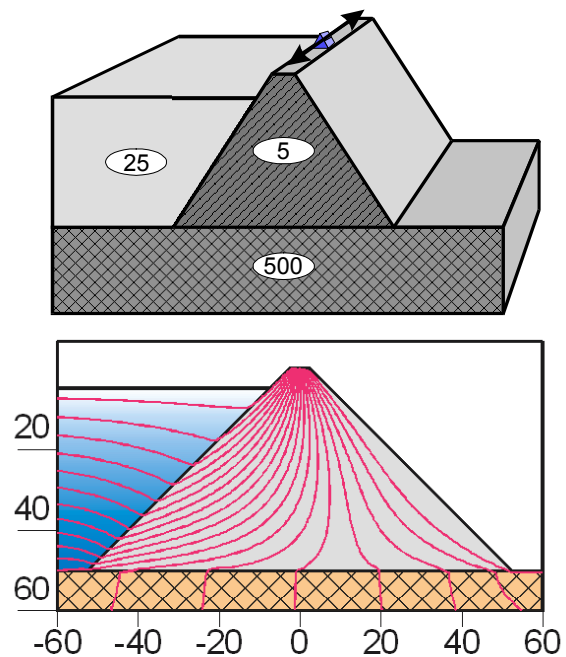


Рис. 3. Объемная модель земляной плотины.

наличии тектонических нарушений, на оползнях, многолетнемерзлых породах, а также при работах в зонах городской застройки.

Заключение

Многоэлектродные зондирования, нацеленные на изучение двумерно и трехмерно неоднородных разрезов, значительно расширяют область применения метода сопротивлений. Актуальной задачей является внедрение таких методик и соответствующей аппаратуры в повседневную практику производственных организаций. Это требует как материальных затрат на приобретение необходимой аппаратуры и обучение персонала, так и организационных мероприятий по дальнейшему нормативному обеспечению этих методик.

Литература.

- Dahlin, T. 2000. Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, , 48, 181-187
- Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences* 27, 1019–1029.
- Dahlin, T., Zhou B.. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52(3), 379-398
- Griffiths, D.H., Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *J. Appl. Geophysics* 29, 211–226.
- Loke, M.H. and Barker, R.D.. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44, p.131-152.
- Ritz M, Robain H, Pervago E, et al. 1999. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. *Geophysical Prospecting* 47 (2): 85-101
- Shevnin V.A., Bobachev A.A., Modin I.N., Pervago E.V. 1999 Interpretation of resistivity sounding data, distorted by geological noise. *Proceedings of EAGE 61th Conference, Vol.2, P27.*

Stummer, P., Maurer, H., Green, A.G., 2004. Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics* 69 (1), 120-139.

Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Урусова А.В., Шевнин В.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред. // *Физика Земли* 1995 - N 12 - с.79-90.

Бобачев А.А., Модин И.Н., Перваго Е.В., Шевнин В.А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред. М., 1996, 50 с. // *Разведочная геофизика. Обзор. АОЗТ "Геоинформмарк". Выпуск 2.*

Журбин И.В., Грудев Д.В. Многоэлектродная аппаратура и программное обеспечение для малоглубинной электроразведки в археологии. // *Разведка и охрана недр.* – 2004 – № 12 – с. 37-38.

СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства геофизических исследований» / Госстрой России. – М.: ПНИИИС Госстроя России, 2004. – 49 стр.