

# **ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ: АППАРАТУРА, МЕТОДИКА И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ**

УДК 550.837.31

**Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., Белобородов В. А.**

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск*

## **АННОТАЦИЯ**

В работе авторы описывают современное состояние метода электротомографии, выполняют сравнительный анализ существующих аппаратных комплексов и программного обеспечения для электротомографии на постоянном токе. Приводится сравнительное описание особенностей различных многоэлектродных установок и методики работы с ними. На основе математического моделирования делаются выводы о разрешающей способности измерительных установок. Авторами излагаются результаты собственной разработки многоэлектродного комплекса «Скала-48». Дается его структурное описание и основные технические характеристики. В качестве полевых примеров приведены результаты работ по неразрушающему контролю гидротехнических сооружений, работ на акваториях и вулканогенных структурах. Результаты представлены в виде изоповерхностей удельного электрического сопротивления.

*Электротомография, метод сопротивлений, многоэлектродные установки, разрешающая способность, инверсия данных.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящее время характеризуется бурным развитием геофизических методов и их активным применением в различных смежных областях, таких как экология, археология, инженерная геология, гидрогеология, инженерно-геологические изыскания для строительства, городское коммунальное хозяйство и т.п. В частности в последнее время получил развитие и внедрение такой метод как электротомография.

Метод сопротивлений является одним из самых старых электроразведочных методов, его история насчитывает уже около ста лет [Schlumberger, 1920]. На

протяжении многих десятилетий ограниченное количество электродов заземлялось и переносилось вручную, что определяло производительность электроразведочных работ. В 1980-х появились многоэлектродные системы измерений, сначала с ручным [Barker, 1981], а позже с автоматическим переключением [Dahlin, 1989]. Такие системы позволяли выполнять полностью автоматические измерения и контроль качества данных [Overmeeren and Ritsema, 1988; Griffiths et al., 1990; Dahlin, 1993]. Таким образом, в конце 20-го века электроразведка методом сопротивлений вышла на качественно новый уровень. На смену или в дополнение к традиционным вертикальным электрическим зондированиям и электропрофилированию были разработаны так называемые сплошные электрические зондирования [Бобачев и др., 1996]. В иностранной литературе чаще всего употребляются два термина – *Resistivity Imaging* и *Electrical resistivity tomography*. В работе [Dahlin, 2001] приведен краткий обзор развития метода. В России к настоящему времени был закреплен термин электротомография, который вошел в «Свод правил» Госстроя России [СП 11-105-97, 2004]. Электротомография позволяет решать с высокой степенью экономической эффективности широкий круг задач. Детальное изучение строения грунта на глубину до нескольких сотен метров, разведка рудных полезных ископаемых, картирование плотика россыпных месторождений, определение рельефа коренных пород при проектировании фундаментов зданий, изучение состояния промышленных объектов таких как дамбы, плотины, хвостохранилища ГОК и т.п. Электротомография основана на применении многоэлектродных электроразведочных кос, подключаемых к аппаратуре, способной коммутировать токовые и измерительные электроды на произвольные выводы косы. Такая технология на порядок увеличивает производительность и разрешающую способность исследований методом сопротивлений, особенно если аппаратура имеет несколько измерительных каналов, позволяющих измерять разность потенциалов одновременно с нескольких приемных линий.

В России до недавнего времени (2008-2009 г.) аппаратура для электротомографии не производилась, что в совокупности с отсутствием нормативной документации приводит к тому, что методика практически не применяется в отрасли. Таким образом, соответствующая ниша, активно развивающаяся за рубежом, в отечественной геофизике практически пустует.

В то же время, правительством Российской Федерации уделяется серьезное внимание вопросам безопасности окружающей среды, предупреждения и ликвидации последствий техногенных катастроф, аварий. Об этом свидетельствует значительное количество принятых федеральных законов, регламентирующих различные мероприятия по надзору за безопасностью гидротехнических сооружений, разработку декларации промышленной безопасности, осуществление целевых и научно-технических программ, направленных на предупреждение чрезвычайных ситуаций. Организацию наблюдения и контроля над состоянием окружающей природной среды и потенциально опасных объектов, прогнозирование чрезвычайных ситуаций. Осуществляется экологический контроль над размещением опасных промышленных отходов.

Для обеспечения оптимального исполнения обозначенных выше мероприятий необходима методика, опирающаяся на эффективные, хорошо известные методы инструментальных измерений, современную аппаратуру и программное обеспечение отечественного производства, которая могла бы быть внедрена на предприятиях, выполняющих проектирование, строительство, реконструкцию и эксплуатацию гидротехнических сооружений. Кроме того, необходимо, чтобы такая методика поддерживалась специалистами, подготовленными в учебных заведениях РФ.

Основываясь на публикациях иностранных геофизиков, можно сделать заключение о том, что различные геофизические методы для мониторинга загрязнений грунтовых вод жидкими отходами, контроля состояния насыпных дамб и других гидротехнических сооружений, обеспечивающих производственные процессы горнорудной и обогатительной промышленности, применяются в Европе и США уже более двадцати лет. Известны единичные подобные работы и в России.

В подавляющем большинстве случаев индикатором, указывающим на наличие нежелательных процессов в теле гидротехнического сооружения и на наличие загрязнений, является пространственное перераспределение жидкости или изменение ее минерализации. Количество и уровень минерализации жидкости в грунте влияют на его удельное электрическое сопротивление, распределение которого в большинстве ситуаций может быть быстро и достоверно определено методом электротомографии.

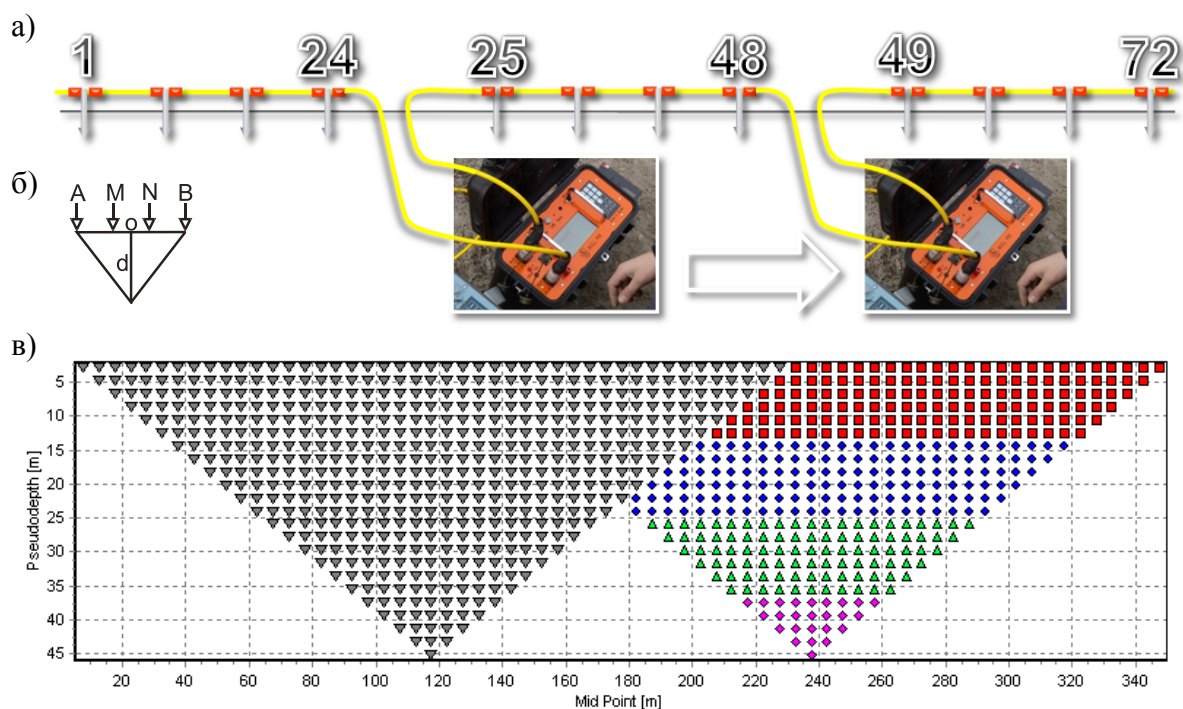


Рис. 1. (а) Типичная схема расположения двух сегментов 24х-электродных кос с последующим переносом первого сегмента для непрерывного продолжения профиля. (б) Схема привязки результата измерения для симметричной установки. (в) Вид протокола измерений для электротомографии. Установка Шлюмберже, 48 электродов, расположенных с постоянным шагом 5 м. Каждому маркеру на диаграмме соответствует одно положение четверки электродов АВМN. При этом маркер отнесен по горизонтали к центру установки, а по вертикали к эффективной глубине.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

К настоящему времени аппаратная база и методические аспекты электротомографии хорошо развиты. Seriously проработана теоретическая основа метода, опубликованы методические приемы и созданы программы для многомерного моделирования и инверсии данных [Loke and Barker, 1996a,b]. Производительность аппаратуры растет с каждым годом: в некоторых электроразведочных станциях количество каналов доведено до 10-12; количество электродов в пассивных системах достигает сотен, в активных – может насчитывать несколько тысяч. В настоящем разделе приведен обзор современного технического и программно-алгоритмического обеспечений метода электротомографии, а также методические аспекты.

**Методика выполнения измерений.** Основным отличием электротомографии от классических вертикальных электрических зондирований является использование многоэлектродных электроразведочных кос и полная автоматизация измерений. На

рис. 1а приведена схема расположения электродов и подключения двух 24-электродных кос к электроразведочной станции. На рис. 1б измеренное значение соответствует глубине  $d$ . Так, например, для симметричной четырех электродной установки точка записи относится по горизонтали к центру измерительной пары MN, а по вертикали к эффективной глубине исследования [L.S. Edwards, 77], либо к величине кратной разнесу АВ. Типичная последовательность измерений (протокол) для электротомографии приведена на диаграмме рис. 1в. В работах [Loke and Barker, 1996a,b] показано, что для метода электротомографии область, характеризующаяся наибольшей чувствительностью измеряемого на поверхности потенциала к параметрам среды, сосредоточена в окрестности позиции, к которой относятся измерения. Таким образом, эта область представляет собой трапециевидную фигуру (см. рис. 1в). При использовании четырехэлектродных симметричных установок для исследований вдоль одного профиля, именно эта область участвует в инверсии и в ней выполняется интерпретация. Однако в случае применения трехэлектродных установок, а также площадных работ, используется расширенная до прямоугольной область (примеры инверсии будут даны ниже).

Приведем определения понятий регулярной и нагоняющей расстановок. При разделении многоэлектродной электроразведочной косы на два сегмента (например, как упоминалось выше, по 24 электрода), регулярной называется расстановка, расположенная на двух первых сегментах косы и использующая полную систему измерений (серый цвет маркеров на рис. 1в). После измерений на регулярной расстановке первый сегмент косы перемещается, и измерения проводятся на втором и третьем сегментах (см. рис. 1а), при этом измерения, дублирующие таковые на регулярной системе, исключаются (см. цветные маркеры, рис. 1в). Такая расстановка называется нагоняющей (roll along). Таким образом, при полевых работах составляются профили необходимой длины.

**Типы установок для электротомографии и особенности их использования.** Современное аппаратное и программное обеспечение электротомографии, как правило, поддерживает типы установок, представленные на рис. 2 [Dahlin and Zhou, 2004].

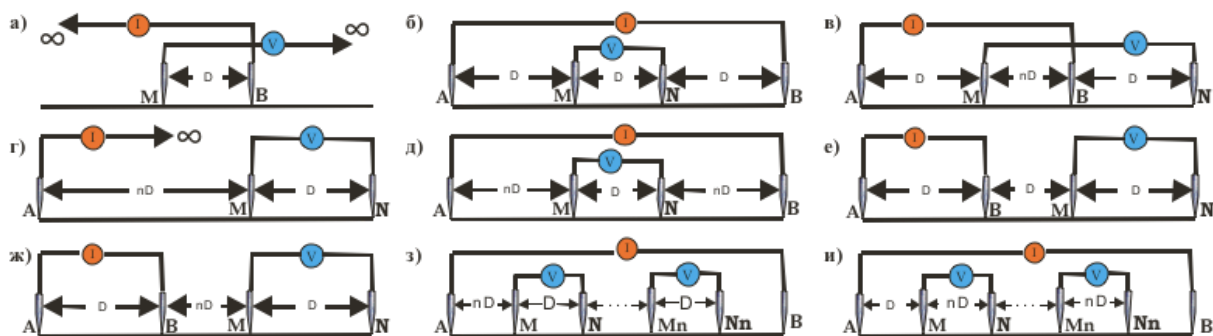


Рис. 2. Стандартные установки, применяемые в электротомографии: (а) двухэлектродная, (б) Веннера, (в) гамма-типа, (г) трехэлектродная, (д) Шлюмберже, (е) Веннера  $\beta$ -типа, (ж) дипольная осевая, (з) градиентная, (и) градиентная срединная.

В работе [Loke, 2009] приводится следующая характеристика стандартных установок. Установка Веннера характеризуется высоким уровнем сигнала, хорошей чувствительностью к горизонтальным границам, плохой чувствительностью к вертикальным границам, средней эффективной глубиной ( $a/2$ ) и малым горизонтальным покрытием, изучаемой области. Дипольная установка характеризуется низким уровнем сигнала, хорошей чувствительностью к вертикальным границам, средней чувствительностью к горизонтальным границам, глубиной на 20 % меньшей, чем у Веннера и средним горизонтальным покрытием. Установка Шлюмберже обладает одинаковой чувствительностью к горизонтальным и вертикальным границам, являясь компромиссом между установками Веннера и дипольной, глубиной на 10% большей, чем у Веннера и средним горизонтальным покрытием. Двухэлектродная установка обладает наибольшим горизонтальным покрытием и глубиной, однако имеет наихудшее разрешение и существенную зашумленность. Трехэлектродная установка, также как и двухэлектродная, имеет хорошее горизонтальное покрытие и большую глубину, сочетая это с помехоустойчивостью и высоким уровнем сигнала. Аналогично дипольной трехэлектродная установка имеет большую чувствительность к горизонтальным неоднородностям. Асимметрия установки может привести к асимметрии результата инверсии, однако этого можно избежать, комбинируя измерения «прямой и обратной» трехэлектродными установками.

В публикации [Dahlin and Zhou, 2004] проводится теоретический анализ разрешающей способности десяти различных типов установок для 2D электротомографии. В результате подробного анализа на различных синтетических

моделях делается вывод о том, что наиболее эффективными необходимо считать градиентные, трехэлектродную, дипольную установки, а также установку Шлюмберже.

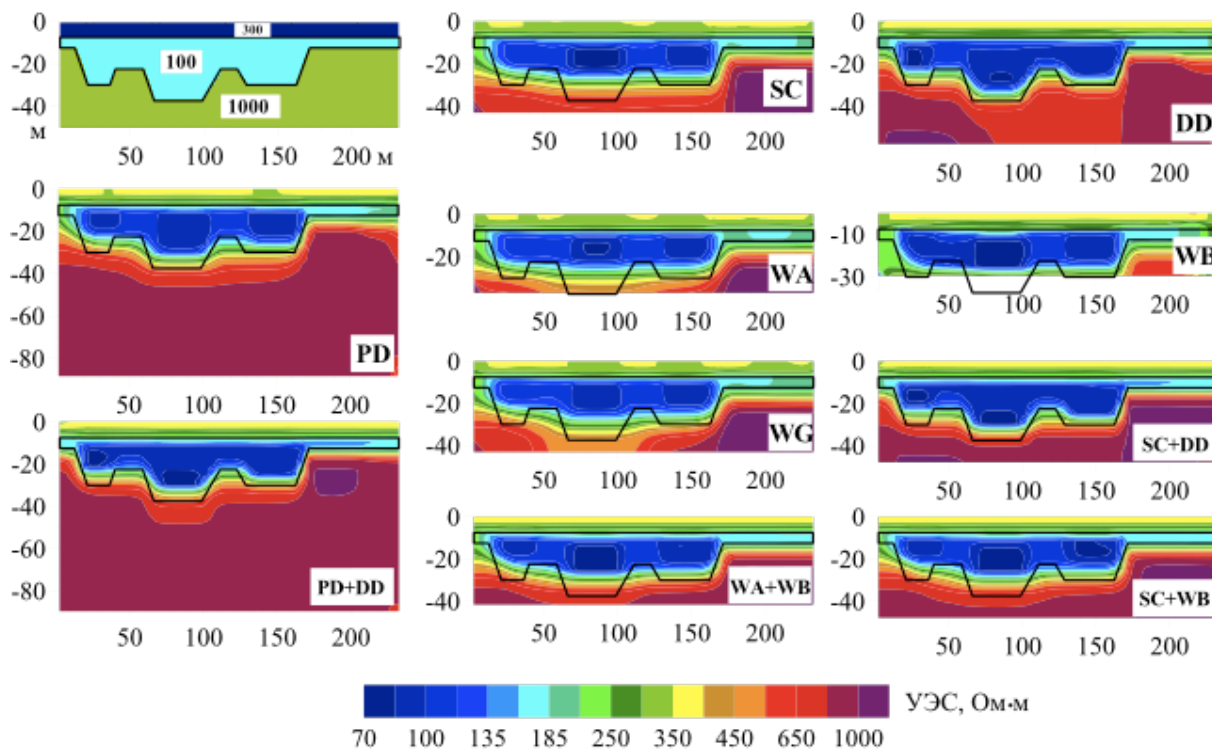


Рис. 3. Геоэлектрическая модель, имитирующая изменяющийся рельеф плотика (УЭС 1000 Ом·м), перекрытого двухслойными аллювиальными отложениями (УЭС 300 и 100 Ом·м). Результаты индивидуальной и комбинированной инверсии синтетических данных, рассчитанных для различных установок: Шлюмберже (SC), дипольной (DD), трехэлектродной (PD) и Веннера  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -типов (WA, WB, WG).

В работе [Бобачев и др., 2005] проводится аналогичная классификация стандартных установок с близкими по существу выводами, дополнительно гласящая о том, что основным путем повышения эффективности полевых наблюдений является комбинированная съемка с несколькими установками и совместная обработка полученных данных. Наиболее эффективным является комбинирование прямой и обратной трехэлектродной установки, альтернативой является комбинирование установок Шлюмберже и дипольной.

В результате теоретических и экспериментальных исследований [Candansayar and Basokur, 2001] авторы рекомендуют использование прямой и обратной трехэлектродной установки, которая обеспечивает наибольшую глубину и разрешающую способность среди стандартных установок. В последующей своей работе [Candansayar, 2008] автор показывает, что комбинированная инверсия произвольных пар стандартных установок повышает разрешающую способность по сравнению с индивидуальной

инверсией. Кроме того, показано, что комбинированная инверсия прямой и обратной трехэлектродной установки с дипольной установкой дает результат, превосходящий результаты комбинированной инверсии любой пары стандартных установок.

В процессе развития метода сопротивлений было предложено и практически опробовано большое число различных установок. Каждая из них имеет свои особенности и предназначена для решения определенного рода задач. В работе [Szalai and Szarka, 2008] в результате широкого анализа научной литературы проведена классификация всех опубликованных типов установок. Работа описывает 102 установки. Классификация ведется по трем основным признакам – линейности системы электродов (коллинеарности), присутствию более 2х токовых электродов (фокусирующие установки), присутствию более 2х измерительных электродов (дифференциальные установки) – и их пересечениям. В силу того, что многоэлектродная электроразведочная коса для электротомографии имеет фиксированный арифметический шаг между электродами, на применяемые в этом методе установки должны быть наложены соответствующие ограничения. Поэтому вполне актуально провести анализ выделенных в упомянутой классификации установок на предмет применимости для электротомографии, а также изучить особенности их применения и разрешающую способность.

**Сравнение установок электротомографии на синтетических данных.** Для исследования возможностей стандартных установок метода электротомографии при картировании рельефа плотика было проведено моделирование и последующая инверсия на модели золотосодержащего месторождения. Геоэлектрическая модель россыпного месторождения, построенная на базе опорного геологического профиля с априорными значениями удельного сопротивления слоев, представлена на рис. 3.

С помощью программного обеспечения Res2DMod (v 3.0; Табл. 2) было проведено моделирование сигналов для шести типов установок (см. рис. 3). Далее синтетические данные для этих установок и некоторых их комбинаций были обращены с помощью программы Res2DInv (v. 3.55). Использовался алгоритм робастной инверсии с семью итерациями и расширенной до прямоугольной пространственной сеткой. Результаты инверсии в виде геоэлектрических разрезов для 10 различных установок и их комбинаций приведены на рис. 3.

Наилучшее воспроизведение исходной модели, а значит и разрешающая способность, достигается дипольной установкой (DD). Разрешающая способность



трехэлектродной (PD) несколько ниже. Разрешение, полученное установками Шлюмберже и Веннера – значительно ниже, при несущественном превосходстве Шлюмберже и Веннера  $\gamma$ -типа. Трехэлектродная установка имеет существенно большую эффективную глубину исследования, превосходя остальные установки в 1.5-2.5 раза. Однако, необходимо отметить, что так как сигнал от дипольной установки является второй пространственной производной потенциала, то она чувствительна к подповерхностным неоднородностям. Этот недостаток при наличии неоднородностей верхней части разреза существенно снижает разрешающую способность и глубинность дипольной установки.

Результаты комбинированной инверсии превосходят по качеству воспроизведения исходной модели результаты соответствующих индивидуальных инверсий. Так комбинирование трехэлектродной и дипольной (PD+DD) установок при сохранении глубины исследования повышает итоговую разрешающую способность. Совместная инверсия установок Шлюмберже и дипольной (SC+DD) повышает вертикальное разрешение дипольной установки. Использование установок Веннера актуально в случае высокого уровня помех и, аналогичным образом, в комбинациях приводит к улучшению результата инверсии.

**Современные аппаратурные достижения для электротомографии.** Аппаратура может быть классифицирована по различным свойствам. Существуют одноканальные и многоканальные станции. Последние позволяют при одном положении пары токовых электродов измерять одновременно разность потенциалов на нескольких парах приемных электродов [Бобачев и др., 2008], существенно повышая производительность. Разделяют также аппаратуру по способу коммутации: в некоторых устройствах коммутация (переключение) электродов происходит вне многоэлектродного кабеля (пассивные системы), в других – непосредственно на кабеле (активные кабельные системы). В некоторых из электроразведочных станций реализован также метод вызванной поляризации, что дает дополнительные возможности при интерпретации данных электротомографии [Dahlin, 2002].

На европейском и американском рынках в настоящий момент широко представлены одноканальные и многоканальные аппаратуры для двух- и трехмерной электротомографии. Российские производители геофизической аппаратуры только начинают выходить на этот рынок. На специализированных выставках в 2008 и 2009 г. были продемонстрированы несколько прототипов электроразведочных станций для

электротомографии. В настоящей работе в табл. 1 приведены современные коммерческие системы для электротомографии с их краткими характеристиками.

**Современное программное обеспечение для моделирования и инверсии данных электротомографии.** До внедрения в практику профильных и площадных томографических систем измерений, работы методом сопротивлений проводились по пакетно и использовались, в основном, системы 1D и 1.5D инверсии. С появлением электроразведочных станций, реализующих плотные 2D и 3D томографические измерения, назрела необходимость многомерной инверсии. Так в 1996 году публикуются работы [Loke and Barker, 1996a; 1996b], в которых приводятся алгоритмы для практической 2D и 3D инверсии. В то же время выходят первые версии программ Res2DInv, Res3DInv (см. табл. 2), реализующие эти алгоритмы. К настоящему времени насчитывается множество программ, специализированных для моделирования и инверсии данных электротомографии. В табл. 2 приведен список коммерческого программного обеспечения для моделирования и инверсии 1D, 2D и 3D данных электротомографии.

Производитель	Allied Associates (Великобритания)	ABEM (Швеция)	GF Instruments (Чехия)	AGI (США)	Scintrex (Канада)	DMT (Германия)	IRIS Instruments (Франция)	КБЭ (Россия)	ЛОГИС (Россия)	СибГео физ Прибор (Россия)
Продукт	TIGRE/MultiRes	Terrameter LS	ARES	SUPERSTING R8 IP	SARIS	RESECS	SYSCAL Pro 48 / 72 / 96 / 120	СКАЛА 48	Омега-48	SGD-ETT
ВЭЗ	да / нет	нет	да*	да	да	нет	да	Да	нет	нет
Электротомография	да	да	да	да	да	да	да	Да	да	да
Вызванная поляризация	нет	да	да	да	да	нет	да	Да	да	нет
Входной сигнал	-	600 В	5 В, 10 В*	10 В	40 В	10 В	15 В	200 В	12 В	2В
Макс. Выходной ток	200 мА	2.5 А	2 А	2 А	1 А	2.5 А	2.5 А	1.5 А	5 А	2 А
Макс. Выходное напряжение	180 В	600 В	550 В	400 В	500 В	400 В	800 В	750 В	500 В	500 В
Выходная Мощность	-	250 Вт	300 Вт	200 Вт	100 Вт	250 Вт	250 Вт	200 Вт	500 Вт	500
Входное сопротивление	22 МОм	0.3, 20, 200 МОм	20 МОм	150 МОм	11 МОм	30 МОм	100 МОм	10 МОм	10 МОм	5
Циклы измерений (сек)	2.1, 4.2, 8.4	0.1 - 30**	0.3 - 30**	0.2 - 14.4	0.2, 0.17	0.3 - 4**	0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8	0.25, 0.5	0.2 - 52.4	0.0016 - 1.66
Циклы ВП (сек)	нет	любые	любые	0.5, 1, 2, 4, 8	1, 2, 4, 8	нет	0.5, 1, 2, 4, 8	0.2, 0.4, 1, 2, 4, 8	-	-
Измерительные установки	STD + USR	STD + MG + USR	STD + MG + USR	STD + USR	STD	STD	STD + USR	STD + USR	STD + USR	STD
Связь с ПК	RS232, упр. ПК	USB, LAN	RS232, USB	RS232	RS232, USB	RS232, USB, LAN	RS232	USB	упр. ПК	упр. ПК
Экран	-	TFT (8.4")	LCD	LCD (16 стр. x 30 зн.)	LCD (320 x 240)	TFT (12")	LCD (240 x 128)	LCD (240 x 128)	-	-
Вес (кг)	6	12	4.5	10.2	10.3	-	13	12	-	3.3
Размеры (см)	40 x 34 x 20	39 x 21 x 32	15 x 21 x 40	18 x 41 x 27	34 x 19 x 27	-	31 x 23 x 36	45 x 35 x 23	-	-
Внешнее питание	12 В	12 В	12 В	12 В, 2x12 В	нет	12 В	12 В	12 В	24 В	24 В
Внутреннее питание	12 В, 7 А·ч	-	12 В	12 В	24 В	12 В	12 В, 7.2 А·ч	12 В, 7 А·ч	нет	нет
Число каналов	1/8	12	1	8	1	8	10	1	10	1
Косы	пассив.	актив. / пассив.*	актив. / пассив.*	актив.	актив.	актив.	пассив.	пассив.	пассив.	актив.
Электроды в сегменте косы	32	64 / 64	8 / 12	28	4	-	24, 12 / 18, 9 / 16, 8 / 10, 5	24	24	12
Общее число электродов	до 128	до 16320	до 200 / 48	до 65536	до 8192	до 960	до 48 / 72 / 96 / 120; 4000*	до 48	до 48	-

Табл. 1. Коммерческие системы для метода электротомографии (\* – опциональная возможность; \*\* – любые значения по выбору; STD – WA, WB, WG, SC, DD, PD, PP; MG – градиентная срединная установка; USR – пользовательские установки).

Название ПО	Описание	Разработчик	Сайт
Res2DInv, Res3DInv	Первое и наиболее популярное ПО для 2D и 3D инверсии данных ЭТМ	GEOTOMO SOFTWARE (Малайзия)	www.geoelectrical.com
Res2DMod, Res3DMod	ПО для моделирования данных ЭТМ		
SensInv1D, SensInv2D, SensInv3D	ПО для 1D, 2D, 3D моделирования и инверсии данных ЭТМ	Geotomographie GmbH (Германия)	www.geotomographie.de
DC2DInvRes, DC3DInvRes	ПО для 2D, 3D инверсии и оценки разрешающей способности данных ЭТМ	Thomas Günther (Германия)	www.resistivity.net
ZondIP1D, ZondRes2d, ZondRes3d	ПО для 1D, 2D, 3D моделирования и инверсии данных ЭТМ	Александр Каминский (Россия)	www.kaminae.narod.ru
Earth Imager 1D, 2D, 3D	ПО для 1D, 2D, 3D моделирования и инверсии данных ЭТМ	Advanced Geophysics (США)	www.agiusa.com
ERT Lab	ПО для 3D инверсии данных ЭТМ	MPT & GEOSTudi Astier (Италия)	www.ertlab.com
Emigma	ПО для 3D моделирования и 1D инверсии данных ЭТМ	PETROSEIKON Inc. (Канада)	www.petroseikon.com
Ie2Dp, X2ipi, Ip2Win	ПО для 1D и 2D моделирования и обработки, 1D инверсии данных ЭТМ	МГУ (Россия)	www.geoelectric.ru

**Табл. 2. Программное обеспечение для моделирования и инверсии данных электротомографии.**

## ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНАЯ СТАНЦИЯ «СКАЛА-48»

Среди ряда современных российских разработок, реализующих метод электротомографии, можно выделить аппаратуру «Скала-48». Аппаратура разработана в лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН и к настоящему моменту несколько комплектов «Скала-48» успешно применяются при решении различного рода научных и инженерных задач. Ниже будут приведены технические характеристики аппаратуры и некоторые результаты полевых работ.



Рис 4. Внешний вид аппаратуры «Скала-48».

**Аппаратурное исполнение.** Прибор смонтирован в компактном (43 x 28 x 33 см) ударопрочном плавающем корпусе. Вес аппаратуры 12 кг. В дополнение к внутреннему аккумулятору (12 В, 7 А·ч) через разъёмы на лицевой панели к прибору можно подключить внешнее питание (12 В). Управление осуществляется при помощи плёночной клавиатуры. Прибор снабжен монохромным жидкокристаллическим пятидюймовым графическим дисплеем с разрешением 240 на 128 точек с синей подсветкой.

Основа аппаратуры -микроконтроллер Philips NXP LPC2378 с ядром ARM7 и программируемая логическая матрица (ПЛИМ) Xilinx Spartan-3E (см. рис. 5). Аппаратура включает матричный релейный коммутатор 4 линии на 48, осуществляющий коммутацию, как приемных, так и питающих линий. Такая конфигурация рассчитана на работу с двумя электроразведочными кабелями, по 24 электрода каждый. Для их подключения на лицевой панели прибора предусмотрены два разъёма. Дополнительно

на панель выведены клеммы питающей и приёмной линий, предназначенные для работой с традиционной четырехэлектродной установкой и выносными электродами.

Источник тока изолирован от всей схемы и имеет мощность до 200 Вт. Максимальный выходной ток источника 1.5 А, максимальное напряжение 750 В. Входные цепи защищены от перенапряжения до 1000 В, а выходные - от короткого замыкания.

Измерительный канал выполнен с применением изолирующего усилителя постоянного тока, аналогичный канал используется и для измерения рабочего тока. В аппаратуре применяется прецизионный 24х-разрядный сигма-дельта АЦП AD7799.

Диапазон регистрируемых напряжений в измерительной линии лежит в пределах от 0.05 мВ до 200 В. Точность измерения полезного сигнала не хуже 2.5 % и зависит от величины питающего тока. Диапазон усиления входного усилителя изменяется автоматически.

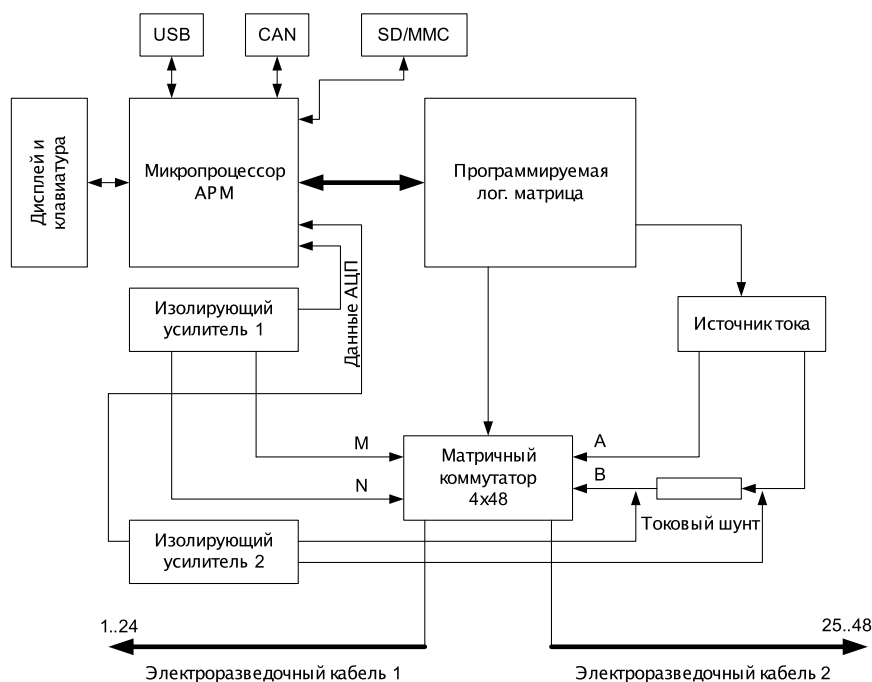


Рис 5. Структурная схема аппаратуры «Скала-48»

Результаты измерения сохраняются на встроенной флэш-карте формата SD/MMC объёмом до 4 Гб с файловой системой FAT32. Данные содержат полную информацию о токе, напряжении, относительном стандартном отклонении и используемой рабочей конфигурации. В аппаратуре реализована возможность выбора числа накоплений и времени интегрирования при измерениях.

**Программно-алгоритмическая составляющая.** Аппаратура «Скала-48» может работать в режимах электротомографии, вызванной поляризации,

электропрофилирования и вертикального электрического зондирования. В аппаратуре реализован развитый пользовательский интерфейс, позволяющий полностью контролировать процесс работы. В рабочем состоянии на дисплее отображается соответствующая режиму таблица, по которой можно определять расположение и геометрию текущей измерительной установки и просматривать результаты измерений. Прибор работает с установками Веннера (типов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), Шлюмберже, дипольной (осевой и экваториальной), трёхэлектродной и двухэлектродной.

Для работы на ПК разработано программное обеспечение SiBER Tools, предназначенное для создания и редактирования файлов с описанием установок, а также первичной обработки данных - фильтрации, компоновки и экспорта в распространённые форматы. Программа позволяет создавать шаблоны измерений как для электротомографии, так и для традиционных четырёхэлектродных зондирований с линейным или геометрическим шагом по разносам.

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ**

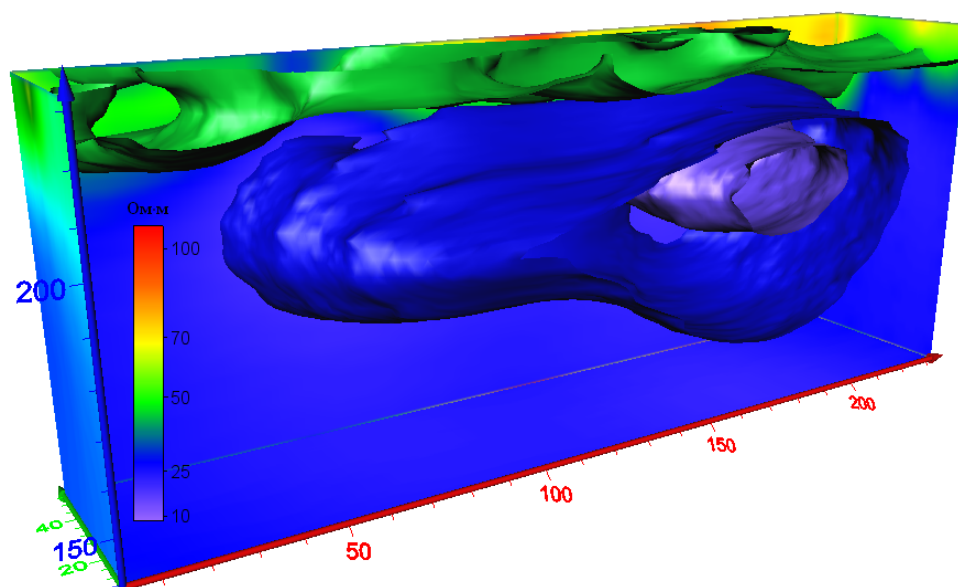
Являясь практически стандартом при решении ряда геофизических задач за рубежом, в России метод электротомографии применялся в основном группами из МГУ [Бобачев и др., 1996; 2006] и Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН [Эпов и др., 2005, 2006; Панин, 2008] для решения структурных, инженерных и археологических задач. Автоматизация многоэлектродной электроразведки разрабатывалась в Институтах СО РАН [Булгаков и Манштейн].

В мировой практике электротомография применяется при решении следующих задач экологической и археологической геофизики; разведки углеводородов; геотермальных исследований; инженерных изысканий; гидрогеологии; мониторинга хранилищ радиоактивных отходов; рудной разведки [Dahlin, 1996, 1999, 2002; Barker and Moore, 1998; Pellerin, 2002].

В настоящем разделе будут приведены результаты электротомографии, выполненной аппаратурными комплексами «Скала-48» и «SYSCAL Pro» (IRIS Instruments) для решения различных задач. Для инверсии была использована программа Res3DInv (v 2.15).

**Неразрушающий контроль состояния гидротехнических сооружений.** С целью изучения геоэлектрического строения насыпной дамбы перемычки гидроотвала были выполнены площадные работы аппаратурой «Скала-48». Объект состоит из рыхлых

пород, преимущественно песчаников с глинистым цементом. Основание сооружения заполнено песчаной пульпой, намытой в процессе обогащения добываемого в карьере угля. По предварительным данным, в связи с отсыпкой пород на параллельно существующей дамбе, в ней стали образовываться трещины и промывные каналы, по которым вода и песчаная пульпа проникают через дамбу. Появился риск прорыва плотины. На изменение строения дамбы также указывает натяжение проводов ЛЭП, проходящей через плотину. Отсыпные работы были приостановлены.



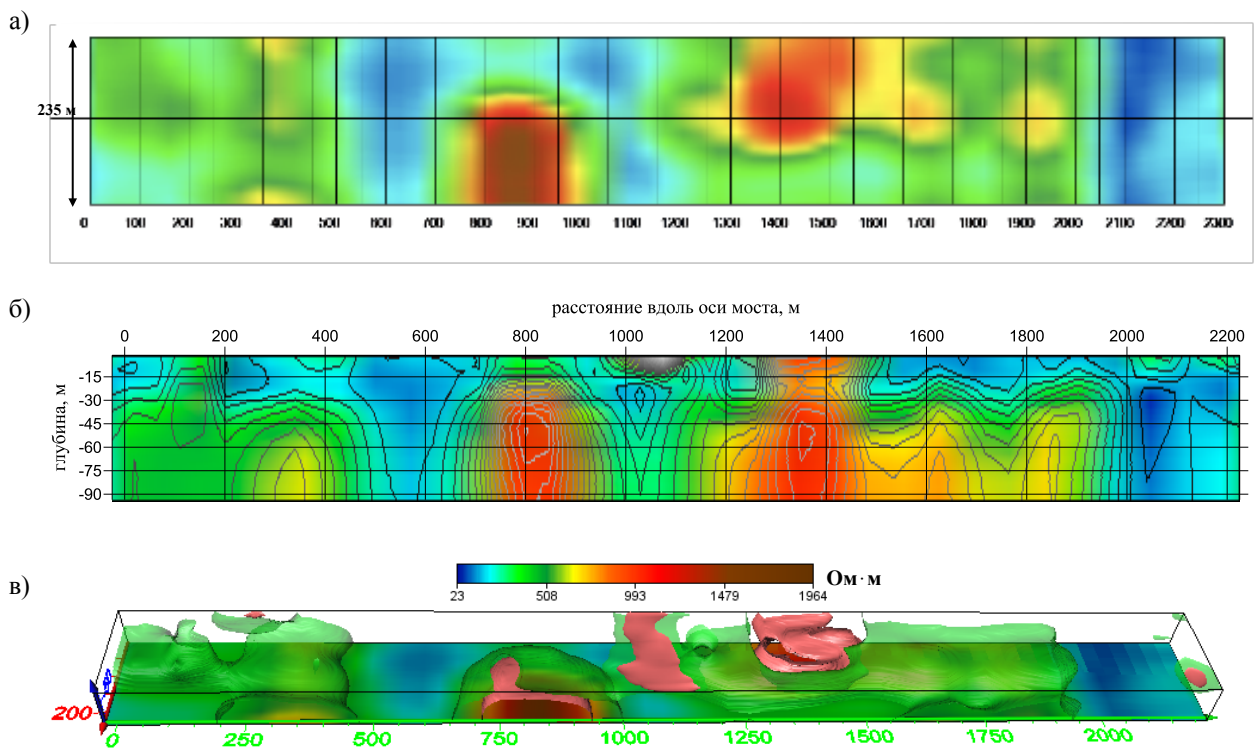
**Рис. 8.** Исследование дамбы. Трехмерное представление результата инверсии данных электротомографии. Справа приведена шкала значений удельных сопротивлений. Видна структура канала утечек. Вертикальная ось показывает высоту над уровнем моря.

Был изучен прямоугольный участок дамбы шириной 60 м и длиной 235 м. Результат трехмерной инверсии в виде изоповерхностей различного уровня представлены на рис. 8. Анализируя полученные результаты, можно предположить, что основную роль в изменении строения, сыграла песчаная намывная пульпа, которая под действием вышележащих масс поднялась в менее плотную часть дамбы и тем самым, создала под насыпью каналы, по которым вода вымывает песок из основания сооружения и, следовательно, разрушает плотину. Изоповерхность зеленого цвета, соответствующая значению 45 Ом\*м, отображает примерную нижнюю границу насыпи. Изоповерхность синего цвета (20 Ом\*м) показывает зону водонасыщения плотины. Уменьшение удельного сопротивления также может быть связано с увеличением глинистости. Изоповерхность фиолетового цвета (15 Ом\*м) изображает структуру основного канала, по которому, предположительно, вода и пульпа движется



поперек дамбы. Для более точного определения зон необходимы пробы воды и другая информация.

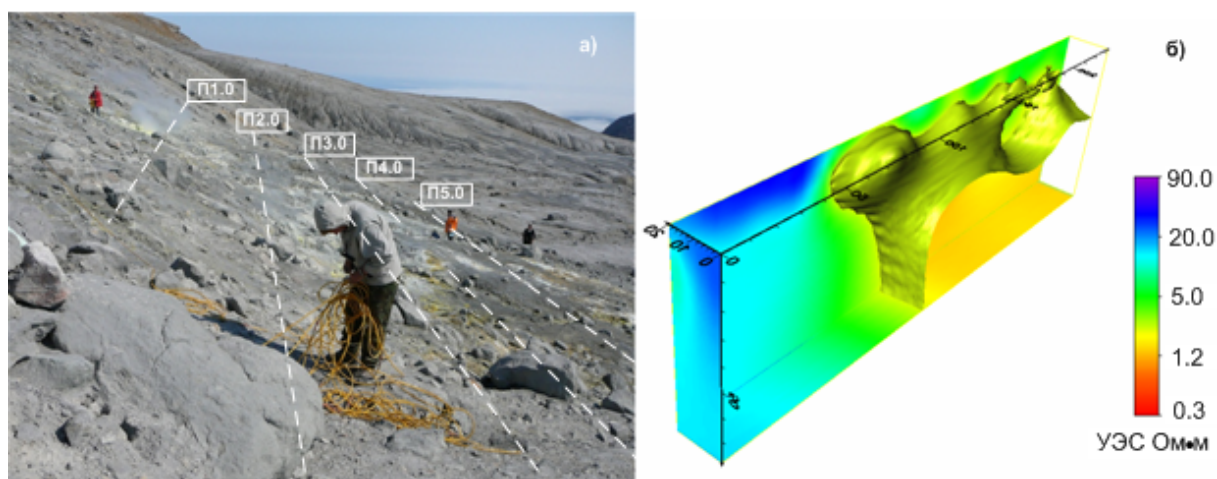
**Исследования под мостовой переход** через крупную реку в Новосибирской области. Выполнено изучение геологического строения осадочного чехла и фундамента берегов и русловой части реки методом электротомографии. Территория исследований – прямоугольный участок шириной 100 м и длиной 2300 м, центральная ось которого совмещена с осью мостового перехода. Согласно априорным данным здесь есть деструктивное нарушение коренных пород. На рис. 9 показаны результаты 3D инверсии: карта распределения УЭС на глубине 50 м (а), разрез по оси моста (б) и изоповерхности фиксированного значения УЭС, предположительно ограничивающие целевые геологические структуры. Значение 400 Ом\*м было выбрано как соответствующее кровле коренных пород в результате соотнесения данных бурения и результатов инверсии. Изоповерхность зеленого цвета соответствует поверхности коренных пород. Отчетливо выделяются два разлома (пикеты 500-700 м и 2000-2300 м), согласующихся с априорными данными и результатами бурения.



**Рис. 9.** Исследование мостового перехода через реку. Распределение удельного сопротивления, полученные в результате трехмерной инверсии. (а) Карта распределения УЭС на глубине 50 м (центральная горизонтальная линия соответствует оси моста). (б) Геоэлектрический разрез по оси моста. (в) Изоповерхности фиксированного значения УЭС. Изоповерхность значения 400 Ом\*м соответствует кровле коренных пород.

**Геофизические исследования в геотермальных регионах.** Комплекс электротомографии на постоянном токе «Скала-48» применялся для исследования структуры различных по составу газо-гидротермальных объектов вулканогенного происхождения активного вулкана Эбеко (о. Парамушир, Сахалинская обл.). Было изучено Северо-Восточное термальное поле (схема показана на рис. 10а).

На рис. 10б демонстрируется распределение удельного сопротивления по результатам 3D инверсии электротомографии до глубины более 50 м. На площадке расположены зоны кипящих котлов и зоны парогазовых выходов. Для построения трехмерной картины внутреннего строения зон парогазовых резервуаров приповерхностного пространства Северо-Восточного поля были проведены измерения по пяти профилям (отмечены белыми линиями на рис. 10а) с максимальным разномом 235 м и шагом между электродами 5 м.



**Рис. 10. (а) Расположение профилей на Северо-Восточном поле вулкана Эбеко. (б) Изоповрхность удельного электрического сопротивления 2.5 Ом·м на Северо-Восточном поле по данным электротомографии.**

Согласно полученным результатам, на исследованном участке удельное сопротивление грунтов колеблется в пределах 0.5 – 100 Ом·м. По видимому, низкое удельное сопротивление среды связано с насыщенностью высокоминерализованными термальными растворами, а высокое (по краям, см рис. 10б) наличием сухих вмещающих пород или газовой составляющей. Для Северо-Восточного поля, по данным электротомографии отчетливо видна конфигурация резервуара питающего систему котлов и фумарол. Электропроводность грунта в зоне резервуара выше у дневной поверхности и можно предположить, что это зона конденсации парогазовой

смеси. Более низкая электропроводность объема у основания говорит о большом наличии непроводящей составляющей, которой может быть газ.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Приведенный в работе анализ существующих подходов дает четкое представление о том, что наиболее эффективными установками для электротомографии следует считать градиентные, трехэлектродную, дипольную установки и установку Шлюмберже. Для увеличения глубинности и разрешающей способности авторы рекомендуют использование прямой и обратной трехэлектродной установки.

Результаты полевых работ аппаратурными комплексами «Скала-48» и «SYSCAL Pro» показывают высокую эффективность электротомографии в задачах неразрушающего контроля гидротехнических сооружений, при проектировании крупных инженерных объектов, структурных исследованиях. В частности удалось провести контроль и выявить вымывания дамбы на начальной стадии. Результат инверсии представлен в виде изоповерхности и дает представление о процессе разрушения и месте его нахождения. Детальное восстановление кровли коренных пород при проектировании мостового перехода предельно важно для расположения и обустройства мостовых опор.

Методикой электротомографии при помощи аппаратуры «Скала-48» без нарушения структуры были получены детальные карты, а также изоповерхности удельного электрического сопротивления для газо-гидротермальных объектов активного вулкана Эбеко. Новые данные об их структуре помогли составить представление о зональности процессов газо-гидротермальной разгрузки в верхней части разреза на глубинах 5-30 м.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов: РФФИ №№ 09-06-00204, 09-06-10006, «Интеграция» СО РАН № 16; Государственного контракта № П1270 в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

**Бобачев А.А., Горбунов А.А.** Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр, 2005 , N12, с. 52–54.

**Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А.** Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики, 2006, N02, с. 14–17.

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

**Бобачев А.А., Модин И.Н.** Электротомография со стандартными электро-разведочными комплексами // Разведка и охрана недр, 2008, N1, с. 43–47.

**Булгаков А.Ю. Манштейн А.К.** Геофизический прибор для автоматизации многоэлектродной электроразведки // Приборы и техника эксперимента, 2006, N04, с. 123–125.

**Панин Г.Л.** Многоэлектродная аппаратура методов сопротивлений «Скала-48» // Материалы конференции: инженерная и рудная геофизика, Геленджик, 2008, 2 с.

**Эпов М.И., Молодин В.И., Манштейн А.К., Манштейн Ю.А., Балков Е.В., Чемякина М.А., Шурина Э.П., Ковбасов К.В.** Геофизические исследования археологических памятников в Северо-Западной Монголии в 2005 г. // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий, Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2005, Том XI, с. 503–508.

**Эпов М.И., Манштейн А.К., Манштейн Ю.А., Чемякина М.А., Балков Е.В., Молодин В.И., Слюсаренко И.Ю.** Электроразведочное картирование «замерзших» пазырыкских курганов Алтая // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий, Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2006, Т. XII, с. 510–515.

**Barker R., Moore J.** The application of time lapse electrical tomography in groundwater studies // The Leading Edge, 17, 1998, N10, p. 1454–1458.

**Candansayar M.E.** Two-dimensional individual and joint inversion of three- and four-electrode array dc resistivity data // J. Geophys., 2008, N05, p. 290–300.

**Candansayar M.E., Basokur A.T.** Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: application to an archaeological survey // Geophysical Prospecting, 2001, N49, p. 40–58.

**Dahlin T., Zhou B.** A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with Ten Electrode Arrays // Geophysical Prospecting, 2004, N52, p. 379–398.

**Dahlin T.** 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications // First Break, 1996, vol. 14, N07, p. 275–283.

**Dahlin T.** The development of electrical imaging techniques // Computers and Geosciences, 2001, N27(9), p. 1019–1029.

**Dahlin T.** The development of a cable system for vertical electrical sounding and a comparison of the Schlumberger and Offset Wenner methods. // Licentiate Thesis LUTVDG/(TVTG-1005)/1-77, Lund University, 1989, 77 p.

**Dahlin T.** On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications // Doctoral Thesis, ISRN LUTVDG/TVDG–1007–SE, ISBN 91-628-1032-4, Lund University, 1993, 187 p.

**Dahlin T, Bjelm L., Svensson C.** Use of electrical imaging in site investigations for a railway tunnel through the Hallandsås Horst, Sweden, Quarterly // Journal of Engineering Geology, 1999, N32(2), p. 163–173.

**Dahlin T., Leroux V., Nissen, J.** Measuring techniques in induced polarization imaging // Journal of Applied Geophysics, 2002, N50(3), p. 279–298.

**Edwards L.S.** A modified pseudosection for resistivity and induced polarization // Geophysics, 1977, N42, p. 1020–1036.

**Griffiths D.H., Turnbull J., Olayinka A.I.** Two dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array // First Break, 1990, N8(4), p. 121–129.

**Loke M.H.** Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys // 2009, 144 p.

**Loke M.H., Barker R.D.** Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting, 1996, N44 (1), p. 131–152.

**Loke M.H., Barker R.D.** Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques // Geophysical Prospecting, 1996, N44(3), p. 499–524.

**Overmeeren R.A., van Ritsema I.L.** Continuous vertical electrical sounding // First Break, 1988, N6(10), p. 313–324.

**Pellerin L.** Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations // Surveys in Geophysics, 2002, N23, p. 101–132.

**Szalai S., Szarka L.** On the classification of surface geoelectric arrays // Geophysical Prospecting, 2008, N56, p. 159–175.

**Schlumberger C.** Etude sur la Prospection Electrique du Sous-sol // Gaultier-Villars et Cie., Paris, 1920, 94 p.