

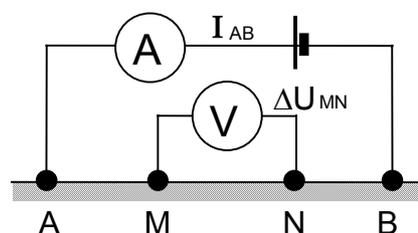
## ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ – ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

### Введение

Электроразведка методом сопротивлений остается одним из основных методов при малоглубинных геофизических исследованиях. Основной методикой являются **вертикальные электрические зондирования**, нацеленные на изучение горизонтально-слоистых разрезов. В настоящее время активно внедряется в практику методика **электротомографии**, которая позволяет исследовать сложную среду и проводить интерпретацию в рамках двумерных моделей. Такая методика применяется на Западе уже более 10 лет [Griffiths and Barker, 1993; Бобачев и др., 1996], но в России она до сих пор не получила широкого применения из-за практически полного отсутствия отечественной аппаратуры. В англоязычной литературе наиболее часто употребляется два термина: *Resistivity Imaging* и *Electrical Resistivity Tomography*. Термин **электротомография** вошел в «Свод Правил» Госстроя России [СП 11-105-97, 2004] и будет использоваться в нашей работе.

### Метод сопротивлений

Основой метода сопротивлений является то, что электрическое поле, наблюдаемое на поверхности земли ( $\Delta U_{MN}$ ) при пропускании электрического тока ( $I_{AB}$ ) через заземленные электроды (рис.0), зависит от распределения удельного электрического сопротивления в некоторой области разреза вблизи установки. Интегральный характер наблюдаемого поля, позволяет использовать метод сопротивлений в условиях, когда изучаемый разрез имеет сложное строение, типично для городских и промышленных условий. С другой стороны, эта устойчивость метода приводит к низкой разрешающей способности метода, в сравнении с сейсмическими методами или георадаром. Методика электротомографии благодаря использованию высокой плотности наблюдений, позволяет существенно повысить разрешение, особенно в горизонтальном направлении.



## **Электротомография**

Электротомография - это целый комплекс, включающий в себя как методику полевых наблюдений, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных. Ее особенностью является многократное использование в качестве питающих и измерительных одни и те же фиксированные на профиле наблюдений положения электродов. Это приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при существенном увеличении плотности измерений по сравнению с обычным методом вертикальных электрических зондирований. Такой подход позволяет с одной стороны, работать с современной высокопроизводительной аппаратурой, а с другой стороны, применять эффективные алгоритмы моделирования и инверсии. Интерпретацию данных электротомографии обычно проводят в рамках двумерных и трехмерных моделей. Это принципиально расширяет круг решаемых электроразведкой задач, за счет исследования сред, значительно отличающихся от «классических» горизонтально-слоистых.

Разрешающая способность (т.е. количество деталей геоэлектрического разреза, устойчиво проявляющихся в электрическом поле) и, соответственно, качество интерпретации данных электротомографии тесно связано с числом и плотностью измерений на одном профиле. Их число обычно достигает первых тысяч, поэтому вопрос о производительности полевых измерений имеет принципиальное значение и во многом определяет возможность практического использования этого метода. Для достижения максимальной эффективности при проведении полевых работ применяется специальная аппаратура с программируемой автоматической коммутацией электродов [Griffiths and Barker, 1993; Бобачев и др., 1996; Dahlin, 2001]. Далее для краткости мы будем использовать термин многоэлектродная аппаратура.

### **Многоэлектродная аппаратура**

Термин «многоэлектродная» часто путают с более привычным понятием «многоканальная», поэтому поясним эти термины.

*Многоканальная* аппаратура позволяет одновременно или последовательно измерять разность потенциалов на нескольких (8-24) приемных диполях, соединенных многожильным кабелем («косой»). Такой подход обычно используется при работах методом вызванной поляризации (ВП) и речных зондированиях (рис.1).

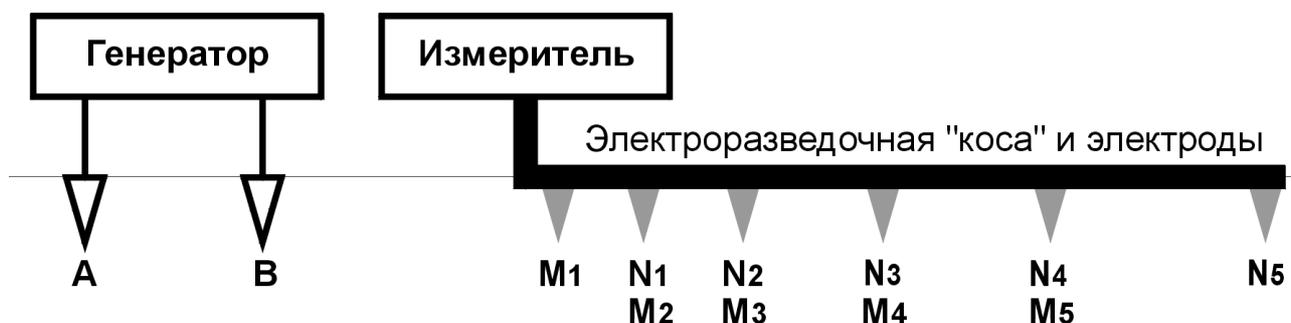


Рис. 1. Схема многоканальной аппаратуры.

В *многоэлектродной* аппаратуре тоже используется большой набор электродов (обычно от 48 до 96 штук), соединенных в виде электроразведочной косы. В отличие от многоканальных систем каждый электрод может использоваться не только как приемный, но и как питающий (рис. 2А). Таким образом, один раз установив и подключив электроды можно провести весь комплекс профильных измерений.

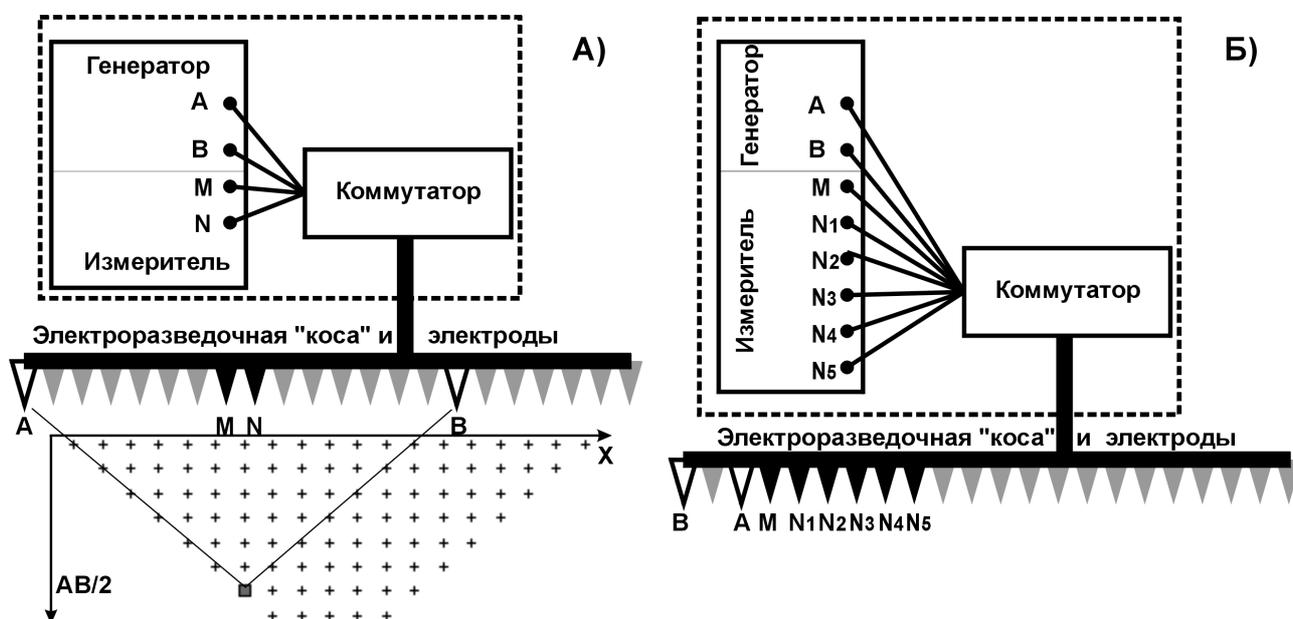


Рис. 2. А. Многоэлектродная аппаратура. Б. Многоканальная многоэлектродная аппаратура.

Использование одних и тех же электродов в качестве приемных и питающих может приводить к ошибкам измерений, связанных с поляризацией электрода при пропускании тока. После выключения тока поляризация постепенно уменьшается. Если во время разрядки проводить измерения с использованием такого электрода, можно получить искаженный сигнал [Dahlin, 2000]. Наиболее существенны такие ошибки для работ методом ВП. Чтобы повысить качество съемки, нужно оптимизировать порядок измерений.

При работах на длинных профилях после проведения измерений с одной расстановкой электродов физически перемещается только часть электродов (технология "roll-along"). В связи с этим для существенного сокращения времени измерений применяют системы, состоящие из нескольких независимых кос.

Стремление повысить производительность многоэлектродной аппаратуры привело к появлению *многоканальных многоэлектродных станций* (Syscal-Pro, Iris Instruments; SAS4000, ABEM). Такие комплексы позволяют одновременно получать значения разности потенциалов на нескольких приемных диполях (рис. 1Б). Число таких каналов невелико: от 4 до 10 штук, но такой подход дает принципиальную возможность увеличить скорость полевых наблюдений в число раз, соответствующее числу каналов. Кроме того, быстрые измерения открывают новые возможности для использования электроразведки при мониторинге различных геологических и технических процессов.

В таблице 1 приведены примерные производственные характеристики полевых работ с многоэлектродной аппаратурой при нормальных условиях заземления и типичном числе электродов в современной аппаратуре.

**Таблица 1. Примерные производственные характеристики полевых работ методом электротомографии с многоэлектродной аппаратурой.**

Число электродов	Расстояние между электродами, м	Длина профиля, м	Интервал разносов (AB/2), м	Примерное время развертывания установки	Число измерений	Время измерений методом сопротивлений	
						Одно-канальная станция	10-канальная станция
48	4	188	6 - 94	40 мин	300 – 1000	30 минут – 1.5 часа	6 – 20 минут
	10	470	15 - 235				
96	4	380	6 - 190	1.5 часа	1000 - 3000	1.5 – 4.5 часа	20 минут – 1 час
	10	950	15 - 475				

## Электротомография с одноканальной аппаратурой

Очевидно, что именно многоэлектродная аппаратура обеспечивает максимальную производительность при полевых работах методом электротомографии. Но, в тоже время, сегодня она практически не используется в практике отечественной инженерной геофизики. С одной стороны это связано с высокой стоимостью аппаратуры (40-100 тыс. долларов), с другой стороны пока довольно мало успешных примеров применения, из-за отсутствия аппаратуры. Чтобы разорвать этот замкнутый круг, нужно проводить работы со стандартной одноканальной электроразведочной аппаратурой. Методика такого подхода дана в статье *Бобачев и др., 2006*. Но этот подход имеет очень низкую производительность. Поэтому был разработан коммутатор «СОМх64», позволяющий добиться высокой производительности и при использовании одноканальной аппаратуры.

Идея этого подхода в том, что коммутируются только приемные электроды, соединенные косой (рис. 3). Питающий электрод переносится вручную. Это позволило создать простой и дешевый прибор (5 тыс. долларов, включая косы и электроды). Для

эффективного использования коммутатора нужно использовать установки с неподвижными питающими электродами: трех электродная установка Шлюмберже или дипольная осевая.

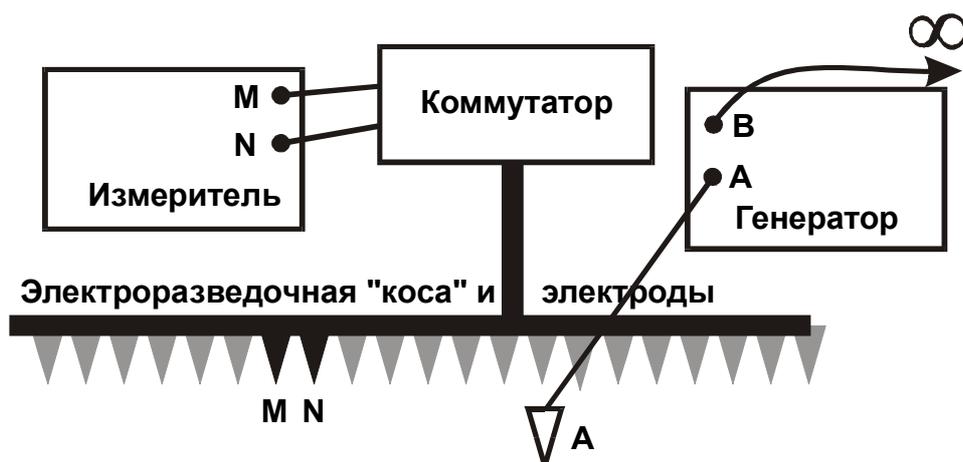


Рис. 3. Установка для электротомографии на базе одноканальной установки.

Коммутатор «СОМх64» обеспечивает измерения с 64-канальными косами. При расстоянии между электродами 3 метра это позволяет использовать сетку разносов от 4.5 метров до 120 метров. Глубина исследования достигает 50 метров. Рекомендуется использовать шаг по профилю 6 метров, хотя возможен шаг и 3 метра, чтобы получить достаточную производительность полевых работ. При этом число измерений на одном профиле длиной 200 метров от 500 до 1000 и зависит от интервала разносов.

Возможности измерителя тоже влияют на производительность труда. К сожалению, разработчики современной аппаратуры (особенно цифровой) уделяют мало внимания повышению скорости измерений, предпочитая повышать точность измерений. Однако, при 1000 измерениях в день увеличение времени каждого всего на 3 секунд приводит к дополнительному часу работы в поле.

Практическое использование предложенной схемы показало высокую эффективность измерителя «МЭРИ-24» и генератора «АСТРА» (ООО «Северо-Запад», г. Москва). Полностью цифровая обработка сигнала позволила добиться времени измерения менее 5 секунд, включая получение фазовых характеристик сигнала для определения поляризуемости горных пород.

## Применение электротомографии

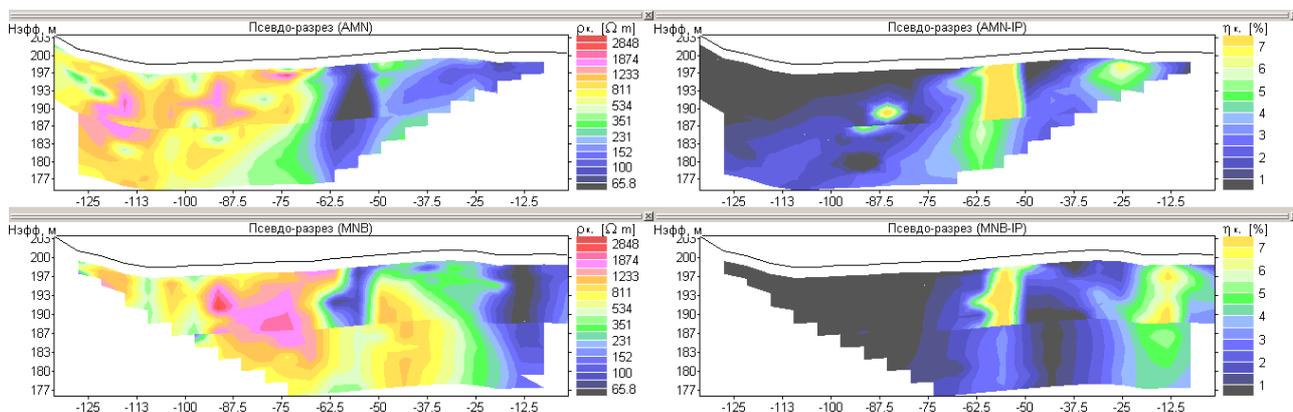
В нашей стране использование электротомографии рекомендовано Госстроем России (СП 11-105-97). Применение двумерной электроразведки целесообразно при всех детальномасштабных (масштаб 1:2000 и крупнее) геофизических исследованиях – при инженерно-геологических и гидрогеологических изысканиях, изучении геологического 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.

Для изучения геоэлектрических разрезов, значительно отличающихся от горизонтально-слоистых, применение электротомографии является необходимым условием для надежной интерпретации. Такое сложное строение обычно характерно для рудных зон и зон тектонических нарушений, оползней, насыпных и искусственных грунтов в зонах городской застройки, многолетнемерзлых пород, при крутом падении слоев и при наличии карста.

## Практический пример

Рассмотрим практический пример использования электротомографии. Исследования выполнены в карьере «Марганцевый», Кемеровская область для уточнения положения продуктивных жил.



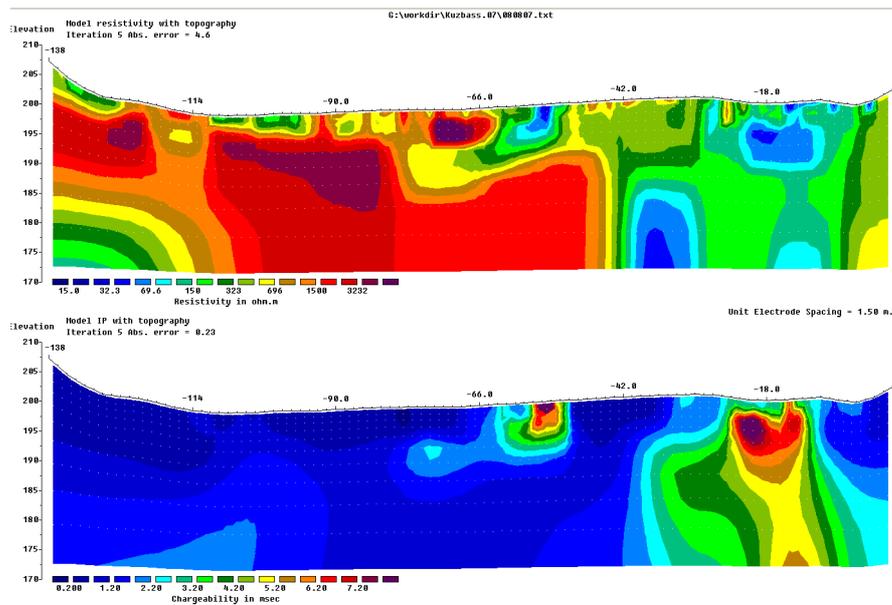
**Рис. 4.** Псевдо-разрезы кажущегося сопротивления и поляризуемости для прямой и встречной установок.

Полевые данные представлены в виде псевдо-разрезов кажущегося сопротивления, которые построены с учетом рельефа (рис.4). Эффективная глубина рассчитана по следующей формуле [Edwards, 1977]:

$$H_{\text{eff}} = \frac{AO}{2.63}.$$

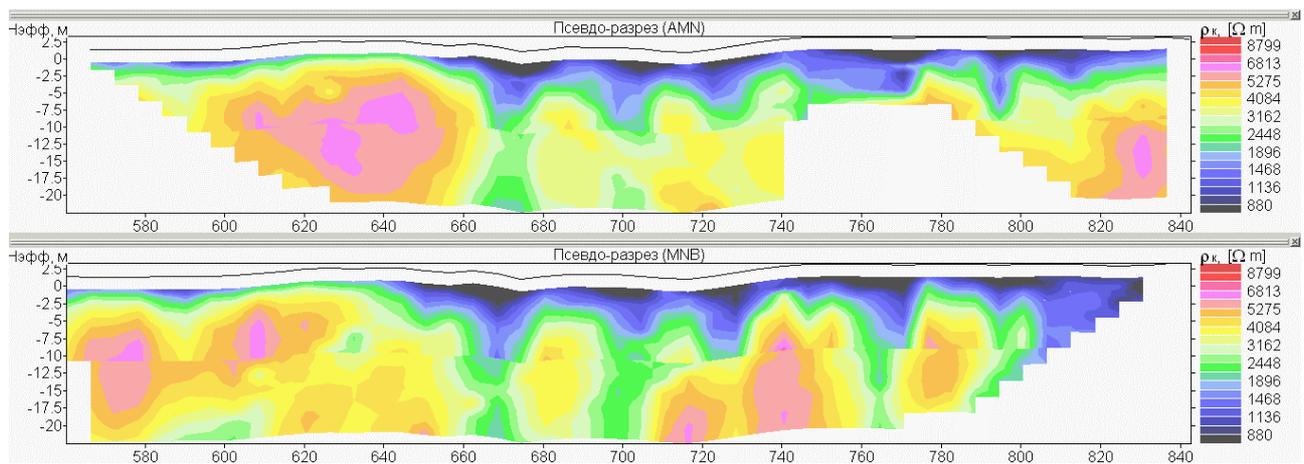
Большая разница в кажущемся сопротивлении для прямой и встречной установками указывает на то, что изучаемый разрез существенно отличается от одномерного.

Результат автоматической двумерной инверсии показан на рис. 5. На нем выделяется две зоны повышенной проводимости и поляризуемости, но разной вертикальной мощности..

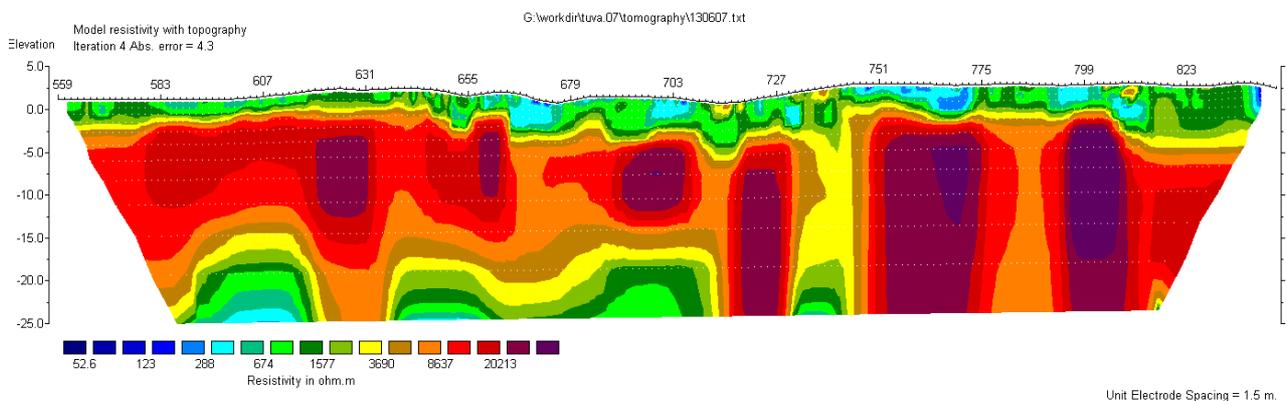


**Рис. 5. Результаты инверсии данных электрической томографии на карьере «Марганцевый».**

Другой полевой пример это изучение строения острова на озере Тере-Холь (Республика Тыва).



**Рис. 6. Псевдо-разрезы кажущегося сопротивления для прямой и встречной установок.**



**Рис. 7. Псевдо-разрезы кажущегося сопротивления для прямой и встречной установок.**

## Заключение

Для изучения двумерных разрезов разработана и активно применяется методика электротомографии (табл. 3). Эта технология значительно расширяет область применения метода сопротивлений и вызванной поляризации, повышает точность, разрешающую способность и геологическую эффективность метода сопротивлений, позволяя проводить надежную интерпретацию для сложно построенных сред. Такое качество интерпретации во многих случаях недостижимо при использовании методов ВЭЗ и ВЭЗ-ВП.

**Таблица 3. Сравнение «классического» метода ВЭЗ и электротомографии**

<b>методика</b>	<b>Метод ВЭЗ</b>	<b>Электротомография</b>
<b>аппаратура</b>	одноканальная	обычно многоэлектродная
<b>шаг по разносам</b>	логарифмический	линейный
<b>шаг по профилю</b>	сравним с максимальным разносом	сравним с минимальным разносом
<b>диапазон разносов</b>	широкий (2 - 3 декады)	ограниченный (1 – 1.5 декады)
<b>электроразведочная установка</b>	Шлюмберже или дипольная	стандартные, произвольные или комбинирование установок
<b>число измерений на одном профиле</b>	десятки и первые сотни	сотни и первые тысячи
<b>интерпретация</b>	одномерная	1D-2D (3D)

## 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.
- Griffiths, D.H., Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *J. Appl. Geophysics* 29, 211–226.
- Edwards, L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Loke, M.H. and Barker, R.D.. 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting* 44, 499– 523.
- 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
- 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.*
- 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, 14-17.

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