

Бобачев А.А.¹, Горбунов А.А.¹, Модин И.Н.¹, Шевнин В.А.²

1 - Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

2 - Институт нефти, Мексика

boba@geophys.geol.msu.ru

ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Введение

Электроразведка методом сопротивлений остается одним из основных методов при малоуглубинных геофизических исследованиях. Развитие этого метода привело к появлению новой методики, которая нацелена на изучение сложно построенных сред и которая позволяет проводить интерпретацию в рамках двумерных моделей. Хотя такая методика применяется уже более 10 лет [Griffiths and Barker, 1993; Бобачев и др., 1996], она до сих пор не получила общепринятого названия в отечественной литературе (*сплошные электрические зондирования, многоэлектродные зондирования, электротомография*). 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.

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 можно проводить в рамках двумерных и трехмерных моделей. Это принципиально расширяет круг решаемых электроразведкой задач, за счет исследования сред, значительно отличающихся от «классических» горизонтально-слоистых. Благодаря электротомографии и использованию алгоритмов подавления искажающего влияния верхней части разреза, можно повысить качество и одномерной интерпретации [Бобачев и др., 1995]

Отметим следующие методические особенности этой технологии, которые отличают ее от обычного метода ВЭЗ.

1. Линейный шаг по разносам, позволяющий многократно использовать одни и те же места заземлений питающих электродов для различных положений приемных линий.
2. Высокая плотность наблюдений, необходимая для двумерной интерпретации.
3. Небольшой, в сравнении с методом ВЭЗ, диапазон разносов, который определяется числом используемых в установке электродов и расстоянием между ними. Это, естественно, ограничивает и интервал изучаемых глубин.
4. Комбинирование различных электроразведочных установок, которое практически не встречается при работах методом ВЭЗ. Тем самым удается увеличить объем независимых измерений электрического поля, используя различные виды возбуждения и приема электрического поля, и компенсировать недостатки отдельных установок, существенно повышая надежность интерпретации. Например, совместное использование установок Шлюмберже и дипольной осевой заметно увеличивает разрешающую способность, особенно на малых разносах.

В области использования электротомографии применительно к трехмерным моделям геоэлектрического разреза ситуация пока более сложная. С одной стороны, существуют разработанные подходы к измерениям и программы интерпретации [Loke and Barker, 1996b], которые требуют довольно больших объемов измерений. С другой стороны, наш опыт показывает, что результаты двумерной инверсии пока получаются гораздо более реалистичными. В целом надо отметить, что существующая полевая аппаратура и программные средства пока недостаточно разработаны и не позволяют получить трехмерные геоэлектрические модели с детальностью и надежностью, которая требуется для дальнейшей геологической интерпретации.

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).

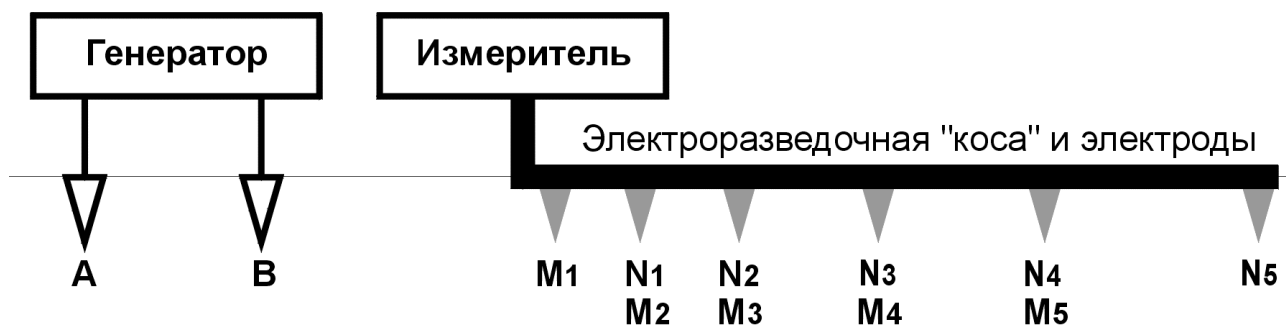


Рис. 1. Схема многоканальной аппаратуры.

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.

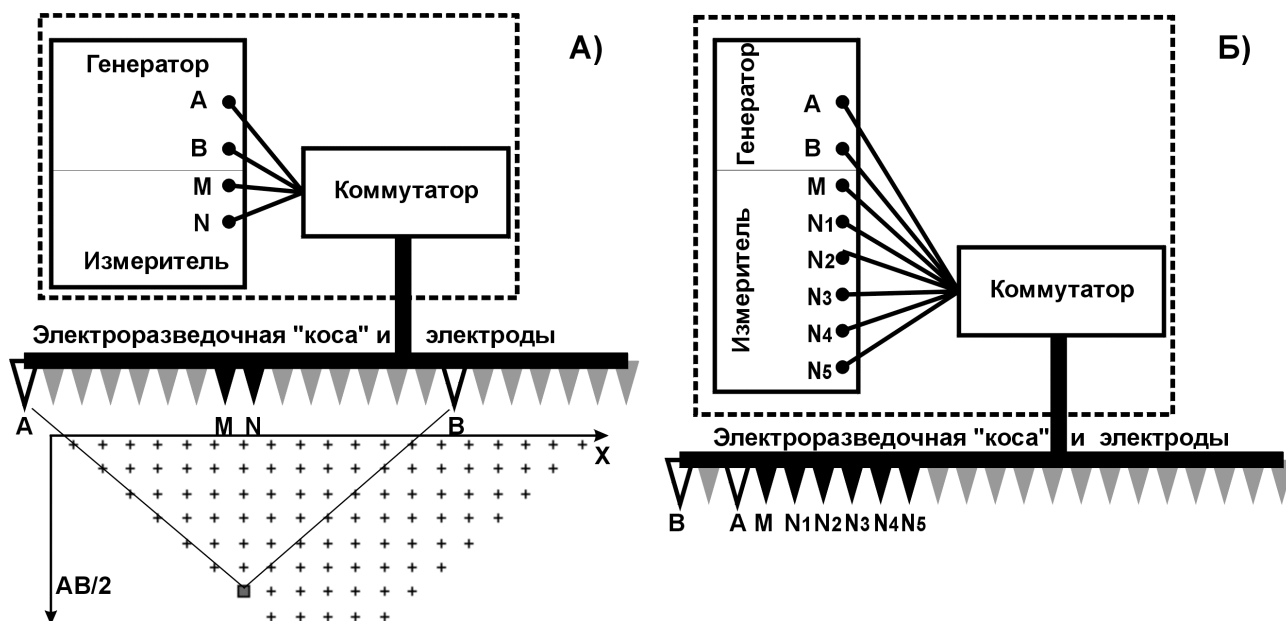


Рис. 2. А. Многоэлектродная аппаратура. Б. Многоканальная многоэлектродная аппаратура.

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

Хотя именно многоэлектродная аппаратура обеспечивает максимальную производительность при полевых работах методом электротомографии, она обладает рядом серьезных недостатков:

- высокая стоимость (25-75 тыс. долларов);
- большой вес электроразведочного комплекса порядка 100-200 кг, включающего измеритель, генератор, источник питания, комплект электродов (50-100 штук) и кос;
- трудности при работах с большими токами, необходимыми при глубинных исследованиях, особенно методом ВП;

- ограниченный диапазон разносов, который определяется числом электродов, поддерживаемых аппаратурой.

Поэтому часто работы методом электротомографии проводят с обычной одноканальной или многоканальной аппаратурой. При этом сетка разносов и шаг по профилю подбирается таким образом, чтобы выполнялось основное требование методики электротомографии – минимизация числа используемых положений электродов при увеличении плотности наблюдений. Определяющим параметром установки является минимальное расстояние между электродами (a), равное минимальной длине приемного диполя. Шаг по профилю выбирается кратным этому расстоянию, а значения разносов удовлетворяют условию - $AB = (2N+1)a$, где N любое целое число.

Основной проблемой при работах с обычной аппаратурой является низкая производительность труда. Для этого приходится разрезать шаг по профилю и сетку разносов, теряя детальность результатов, особенно на малых глубинах. Опыт показывает, что в зависимости от решаемых задач, имеющегося времени шаг между зондированиями может достигать пяти расстояний между электродами.

В качестве примера рассмотрим полевые работы с диапазоном разносов АВ от 3 до 250 м. При работах с многоэлектродной аппаратурой потребуется одновременно использовать не менее 126 электродов с шагом 2 метра. При этом только в одной точке профиля длиной 250 м будет достигнута максимальная глубинность. При использовании одноканальной аппаратуры для такого диапазона разносов допускается работать с 10 метровым шагом по профилю. В таблице 2 показан пример сетки разносов, соответствующей технологии электротомографии.

Таблица 2. Пример сетки разносов для работ методом электротомографии при расстоянии между электродами 2 м.

MN	2	2	2	2	2	2	2	2	14
AB/2	3	4	5	7	9	11	15	19	19
MN	14	14	14	14	14	14	14	14	
AB/2	25	35	45	55	65	85	105	125	

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 400 измерениях в день увеличение времени каждого всего на 9 секунд приводит к дополнительному часу работы в поле.

При глубинных работах методом электротомографии с использованием больших токов приходится ограничивать число линий АВ, так как трудно обеспечивать необходимое хорошее заземление питающих электродов. В этом случае можно рекомендовать

использовать несимметричные установки с достаточно большой длиной линии АВ и расположением приемных диполей как внутри, так и снаружи АВ (рис. 3). В этом случае на малых разносах у нас будет трехэлектродная установка, а на больших либо Шлюмберже, либо дипольная осевая. При работах по такой методике наблюдений 5-7 перекрывающихся линий АВ могут обеспечить получение объема данных достаточного для двумерной интерпретации.

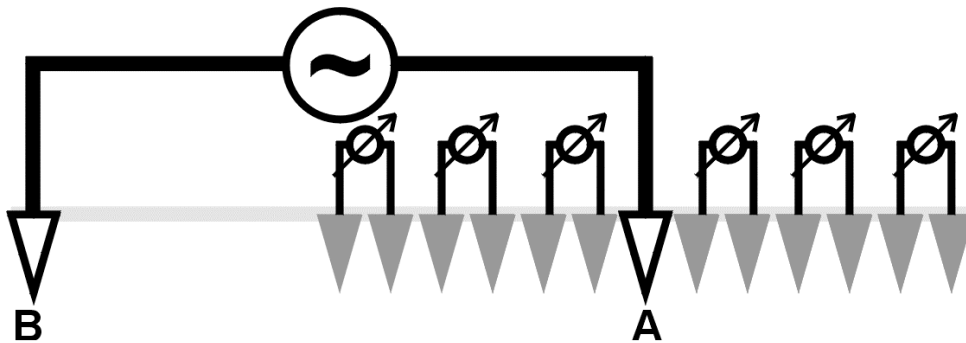


Рис. 3. Пример несимметричной четырехэлектродной установки.

Программное обеспечение для электротомографии

Для работ методом электротомографии используются следующий комплекс программ.

1. Подготовка протоколов с описанием методики измерений. Обычно такие программы входят в комплект поставки многоэлектродной аппаратуры. Часто эти программы не обладают достаточной гибкостью, поэтому мы совместно с ними используем программу «x2ipi» (МГУ).
2. Программы визуализации, предварительной обработки полевых данных и подавления эффектов приповерхностных неоднородностей [Бобачев и др. 1995; Ritz et al., 1999]. На этом этапе также используются программы, поставляемые с аппаратурой и разработки Московского университета: “MEDIAN”, “MPC”, “x2ipi”.
3. Программы автоматической двумерной инверсии, прежде всего в рамках “гладких” моделей [Loke and Barker, 1996a]. Использование моделей с плавным изменением удельного сопротивления является стандартным способом регуляризации алгоритмов инверсии и позволяет во многих случаях оперативно, без учета априорной информации и даже при минимальной квалификации пользователя получать удовлетворительную интерпретацию данных электротомографии. Такой подход за последние 10 лет получил на западе повсеместное распространение. Наиболее распространенной программой инверсии является программа “Res2dInv” (Geotomo, Малайзия). Отметим также российскую разработку – “ZondRes2D” (СПбГУ, Санкт-Петербург).

4. Очевидно, что полностью автоматическая инверсия не всегда удовлетворяет квалифицированного интерпретатора. Поэтому на базе результатов автоматической инверсии рекомендуется проводить подбор в рамках одномерных и двумерных моделей с использованием программ двумерного моделирования: “Res2dMod” (Geotomo, Малайзия), “ie2dp” (МГУ). Такой подбор позволяет наиболее полно учесть априорные данные.

В традиционном методе ВЭЗ работают с кривыми кажущегося сопротивления, которые удобно представлять в виде псевдо-разреза кажущегося сопротивлений. Как уже говорилось выше, в электротомографии часто используют измерения в различными типами установок. Кажущееся сопротивление будет функцией, зависящей не от разноса и пикета, а от положения всех четырех рабочих электродов. Соответственно, все программное обеспечение для электротомографии должно уметь работать с такими типами данных. Например, стандартная процедура устранения «ворот» и потеря информации о длине MN недопустима при двумерной интерпретации.

Практическое применение электротомографии

В нашей стране использование электротомографии рекомендовано Госстроем России (СП 11-105-97). Применение двумерной электроразведки целесообразно при всех детальными (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 на месте древнего городища дьяковского времени (I - IV в.в. н.э.), расположенного на окраине с. Знаменское Одинцовского района Московской области. Городище расположено на высоком правом берегу р.Москвы, на высоте относительно уреза воды около 20 м. Оно имеет диаметр около 50 м, хорошо выраженные два рва и один вал

между ними высотой около 1 м. Общий перепад высот в пределах исследуемой площадки памятника составляет около 2 м. При этом наклон рельефа в районе вала достигает 40 градусов, а его внутренний и внешний склоны расположены под заметным углом друг к другу. Перед тотальными раскопками городища были выполнены опережающие комплексные геофизические работы, цель которых имела чисто методический характер и состояла в получении полной характеристики археологического объекта в том числе и в физических полях. В частности, по системе радиальных профилей, начинающихся в центре площадки и заканчивающихся на напольной стороне, была выполнена электротомография. Профиль длиной 45 м был отработан с помощью двух трехэлектродных установок Шлюмберже AMN и MNB. Максимальный разнос составлял 10 м. Минимальный разнос АО был 0.75 м. Использовалась только одна линия MN длиной 0.5 м. Шаг по профилю наблюдений составил 1 м. Сетка разносов АО и ОВ была следующая: 0.75, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10 м. Глубина исследования при этом составила около 4 м.

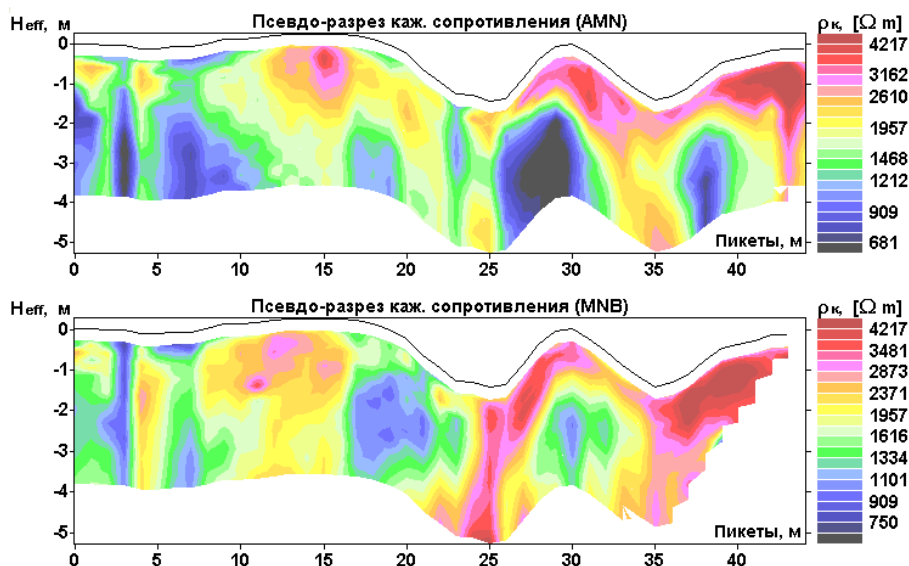


Рис. 4. Псевдо-разрезы кажущегося сопротивления.

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 яркая аномалия, указывающая на наличие внутреннего вала, сложенного песками и расположенного на 13 пикете (повышение рельефа дневной поверхности). Внутренний вал

хорошо совпадает по форме со вторым валом, который явно выражен в рельефе, и отличается от него несколько большей шириной (около 10 м). Вероятно, более поздние обитатели городища частично его разрушили, расширяя жилую часть. Кроме этого, в конце профиля структура геоэлектрического разреза указывает на наличие третьего, внешнего вала, ось которого расположена в районе 42 пикета.

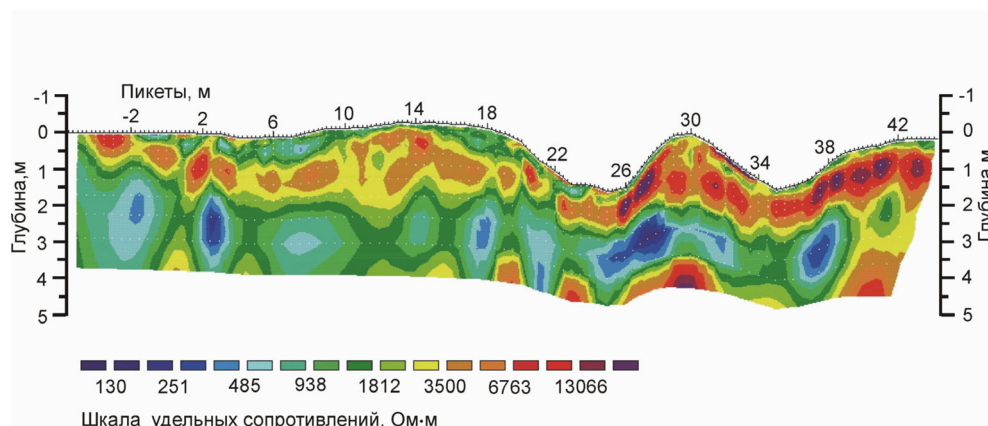


Рис. 5. Результаты электрической томографии на участке «Знаменское городище».

Подстилающими породами, на котором расположен культурный слой городища являются суглинки (примерная глубина кровли 1.5 м). По результатам двумерной инверсии видно, что рвы были вкопаны в суглинки по крайней мере на 70-80 см. В более позднее время они были занесены песчаным материалом в результате обрушения валов. Особенно хорошо видны заглобления в районе 25 и 35 пикетов. С учетом этого можно сделать вывод, что высота вала относительно днища рва первоначально достигала 3 м.

Последующие раскопки, выполненные археологами на городище два месяца спустя, полностью подтвердили результаты геофизической интерпретации.

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

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

В настоящее время актуальной задачей является внедрение этой методики 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.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Б.С. Светову за полезные дискуссии при подготовке этой статьи.

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