

МНОГОСЕГМЕНТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

Д.К.Большаков, И.Н.Модин, К.Д.Ефремов

Введение

В настоящее время при изучении распределения удельного электрического сопротивления в верхней части геологической среды широко используются электрические зондирования на постоянном токе. За более чем столетнюю историю существования, методика выполнения единичного зондирования, основанная на геометрическом принципе увеличения глубинности, существенно не изменилась. Вместе с тем, большие изменения и значительные усовершенствования произошли в области аппаратных разработок, технологии измерений, обработке данных и их интерпретации. Основным практическим результатом развития этого направления электроразведки стала технология электротомографических измерений (метод электротомографии), объединяющая едиными требованиями получение полевых данных, их обработку и интерпретацию. Фактически, метод электротомографии сейчас является основным методом электроразведки постоянным током, применяемым как в нашей стране, так и за рубежом для решения самых разнообразных прикладных задач, требующих изучения распределения удельного электрического сопротивления в приповерхностной части среды со сложным геологическим строением.

Одной из особенностей электроразведочной аппаратуры (и всего метода в целом) является конечное количество электродов, одновременно используемых при измерениях. Встречаются практические ситуации, когда эта особенность становится ограничением, значимо влияющим на глубинность метода. В некоторых случаях указанная особенность, превращаясь в существенный недостаток, не позволяет со стандартным комплектом аппаратуры и оборудования выполнить все необходимые для решения практической задачи измерения. Для преодоления этого недостатка авторами настоящего сообщения предлагается использование многосегментной технологии, позволяющей проводить измерения на значительно большем количестве электродов, чем предусмотрено разработчиками стандартной двухсегментной многоэлектродной аппаратуры для метода электротомографии.

Преимущества многосегментной технологии

Основными ощутимыми преимуществами многосегментной технологии измерений являются:

- возможность действительного многократного увеличения глубинности при исследованиях геологических сред по двумерной методике;
- возможность изучения сред со сложным геологическим строением по трехмерной методике.

Практическая значимость указанных преимуществ многосегментной технологии заключается в расширении возможностей метода электротомографии, что позволяет расширить круг решаемых прикладных инженерно-геологических, гидрогеологических, технических задач. Результаты профильных исследований по многосегментной технологии не только сохраняют (присущую методу в целом) высокую детальность в приповерхностной части, но и обладают большей достоверностью в средней части получаемых геоэлектрических моделей, благодаря использованию программами инверсии дополнительных данных, недоступных при применении стандартной двухсегментной технологии измерений метода электротомографии. Реализация многосегментной технологии при площадных исследованиях позволяет выполнять действительно трехмерные измерения электрического поля и получать такие полевые данные, которые в мировой практике применения метода доступны лишь при использовании специальной аппаратуры, способной одновременно коммутировать значительно (в разы, десятки раз) большее количество электродов, чем стандартная аппаратура. Таким образом, многосегментная технология измерений, устраняя одно из существенных ограничений стандартной аппаратуры, позволяет использовать ее как аппаратуру более высокого класса, обладающую другими, соответствующими современным потребностям возможностями, которые не были предусмотрены разработчиками аппаратуры при проектировании.

Общий принцип многосегментных измерений

Объективная особенность стандартной аппаратуры метода электротомографии, связанная с возможностью коммутации конечного числа электродов, действительно является существенным

ограничением лишь в том случае, когда необходимо проведение измерений на значительно большем количестве электродов одновременно. Физически невозможно одновременно подключить к аппаратуре электродов больше, чем это предусмотрено разработчиками. Однако, если не стремиться сделать это за один раз, то невозможное становится возможным! Последовательное, посегментное подключение электродов к станции позволяет использовать при измерениях на одной расстановке в два, пять, десять раз большее количество электродов, чем обычно. Конечно, это требует большего времени на проведение измерений, написания нестандартных последовательностей коммутации электродов (протоколов измерений), изготовления специальных удлинителей, соединяющих со станцией удаленные электроды, но получаемые преимущества, по мнению авторов, вполне соизмеримы с затрачиваемыми усилиями. Для измерений вдоль профилей эти преимущества выражаются в увеличении глубинности исследований и повышении достоверности двумерных моделей. Для площадных измерений преимущество применения многосегментной технологии заключается в самой возможности получения действительно трехмерных данных для изучаемого объема геологической среды. Таким образом, основным общим принципом многосегментной технологии является последовательное попарное использование всех сегментов многосегментной расстановки для выполнения измерений стандартной двухсегментной аппаратурой метода электротомографии с количеством электродов многократно превышающим количество электродов на двухсегментной расстановке.

Необходимо отметить, что одним из рациональных способов перемещения расстановки при профильных измерениях с ограниченным количеством электродов является широко применяемый прием (Rosqvist et al., 2009; McCarthy, 2017) посегментного, последовательного размещения электроразведочной косы вдоль линии наблюдений («roll-along»). Этот прием используется и в практике площадных съемок (Dahlin and Bernstone, 1997; Dahlin et al., 2002). Многосегментная технология измерений вдоль профилей реализована и опробована для трехсегментных (Большаков и др., 2018) и четырехсегментных (Большаков и др., 2017; Модин и др., 2017) расстановок электродов с использованием этого приема. Возможность использования технологии «roll-along» предусмотрена и в предлагаемых авторами реализациях площадных расстановок (Большаков и др., 2019). Из-за ограниченного объема настоящего сообщения кратко рассмотрим основные особенности реализации многосегментного подхода, приведем примеры полевых данных и полученные по ним результаты в виде распределений удельного электрического сопротивления для профильных и площадных измерений.

Реализация многосегментной технологии измерений

На *Рисунке 1* (слева) схематично показана область исследования четырехэлектродной симметричной установки Шлюмберже при выполнении профильных измерений со стандартной двухсегментной расстановкой (перевернутый серый треугольник) в сравнении с областью исследований для

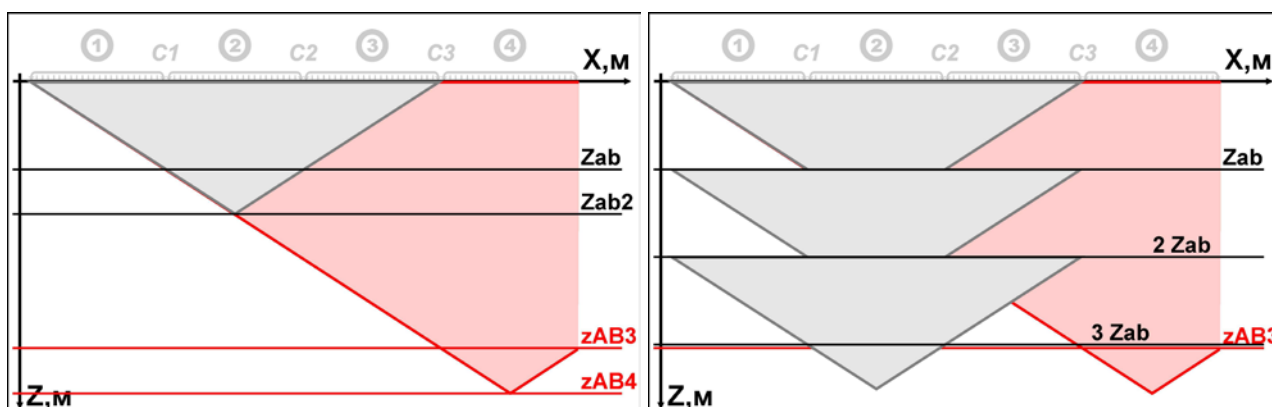


Рисунок 1. Сравнение области исследования для установки Шлюмберже на расстановках из двух (серый треугольник) и четырех (красный) сегментов (слева) и тройное увеличение глубины исследования (справа). (1 – 4 – номера сегментов, C1 – C3 – центры двухсегментных расстановок.)

четырёхсегментной расстановки (красный треугольник). Значения максимальной (z_{AB4}) и эффективной (z_{AB3}) глубин исследований для четырехсегментной расстановки значительно превышают аналогичные значения (Z_{ab2} и Z_{ab} , соответственно) для двухсегментной расстановки. Формальное сравнение значений эффективных глубин исследования дает трехкратное увеличение

глубинности при переходе от двухсегментной (Zab) к четырехсегментной (zAB3) расстановке, что схематично отображено на **Рисунке 1** (справа).

Для площадных электротомографических измерений характерны следующие особенности: большое число электродов на расстановке; поляризация среды и выполнение измерений в нескольких направлениях; значительные объемы измерений. Указанные особенности учтены авторами при разработке полевой методики площадных многосегментных измерений. Для обеспечения технологичности многосегментной системы трехмерных наблюдений выполнено ее согласование с размещением электродов на площади по равномерной сети, используемой аппаратурой и оборудованием. Авторами предусмотрена возможность перемещения расстановки в разных направлениях по большой площади для выполнения непрерывных измерений с перекрытиями. Для площадных измерений методом электротомографии предлагается расстановка из восьми сегментов (Большаков и др., 2019) с их расположением, показанным на **Рисунке 2**.

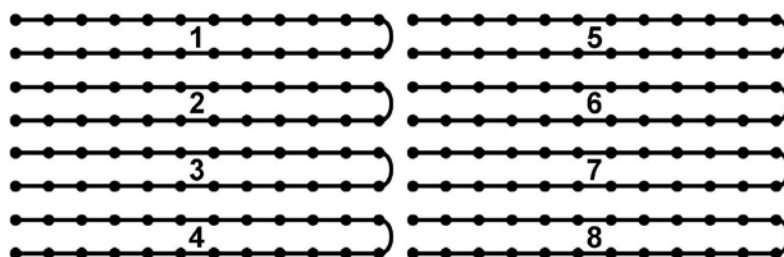


Рисунок 2. Схема расположения сегментов электроразведочной косы (черные линии) для выполнения измерений на восьмисегментной расстановке 192 электродов (черные кружки), расположенных в узлах равномерной сети. (1 - 8 – номера сегментов.)

Применение этой расстановки обеспечивает измерение компонент поля не менее чем в двух (ортогональных) направлениях, единообразие размещения сегментов на площади, непрерывность сети наблюдений, смещение расстановки (**Рисунок 3**) вдоль любого из основных направлений сети.

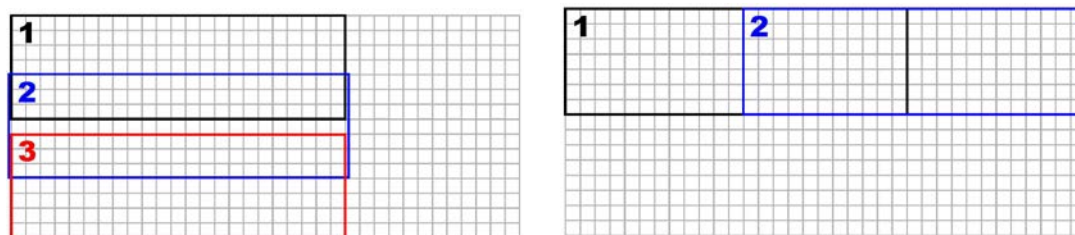


Рисунок 3. Схемы смещения (с перекрытием) восьмисегментной расстановки электродов вдоль короткой (слева) и длинной (справа) сторон площади исследований (Электроды в узлах равномерной сети – серые линии; 1-3 - номера положений расстановки).

Таким образом, использование восьмисегментной расстановки и возможность ее перемещения со значительным перекрытием позволяет получать непрерывные трехмерные данные всех категорий (Loke, 2018) на больших площадях.

Примеры полевых данных, полученных на многосегментных расстановках

Представляемые полевые данные получены авторами летом 2018 года с использованием электроразведочной станции «Омега-48» (ООО «Логис», Московская обл., г. Раменское, www.logsys.ru) в районе Звенигородской биологической станции имени С.Н. Складовского биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (пос. Луцино, Моск. обл.). При измерениях использовался расширенный комплект оборудования из восьми стандартных сегментов электроразведочной косы и дополнительно изготовленных двух удлинителей (длина 130 м, ООО «ГЕОДЕВАЙС», Санкт-Петербург, www.geodevice.ru) и двух переходников (ООО «НПЦ ГЕОСКАН», Москва, www.geoscan.ru). Методика и технология электротомографических измерений направлены на получение данных, пригодных для применения программ инверсии (Loke and Barker, 1996) и построения распределений удельного электрического сопротивления по глубине вдоль профиля или в объеме. Предложенные авторами многосегментные расстановки позволяют получать именно такие данные с основными электроразведочными установками профильных наблюдений и их площадными аналогами (Loke, 2018).

Распределение кажущегося сопротивления для комбинированной трехэлектродной установки (**Рисунок 4**), получено на четырехсегментной расстановке из 96 электродов (шаг 5 м, длина 475 м), перемещаемой вдоль профиля длиной 835 м на четверть (один сегмент) ее длины. Общее количество четырехсегментных расстановок на профиле из семи сегментов – 4. Основная цель исследований –

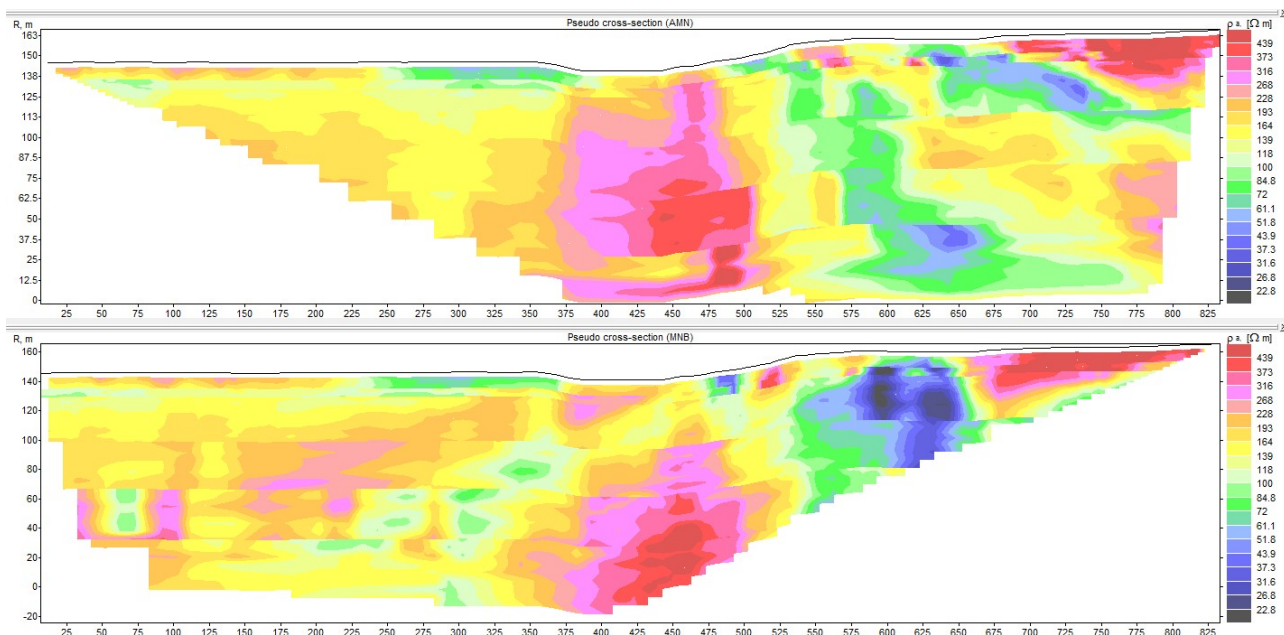


Рисунок 4. Разрезы кажущегося сопротивления для прямой (вверху) и встречной (внизу) трехэлектродных установок (расстановка из четырех сегментов, участок «ПР ДУБ2018»).

построение геоэлектрической модели современной долины Москвы-реки с присущей методу электротомографии детальностью и максимально возможной глубинностью. Профиль пройден с северо-запада (первый сегмент, левый берег) на юго-восток (седьмой сегмент, правый берег). Ширина реки в месте перехода (четвертый сегмент) около 70 м (ПК 380 – 440), глубина – менее 3.5 м.

Схема расположения в пространстве проекций точек записи, для которых выполнены измерения с трехэлектродной установкой на одной площадной (11.5 x 3.5 м) восьмисегментной расстановке из 192 электродов (шаг равномерной сети 0.5 м) и объемное распределение кажущегося сопротивления представлены на (**Рисунке 5**).

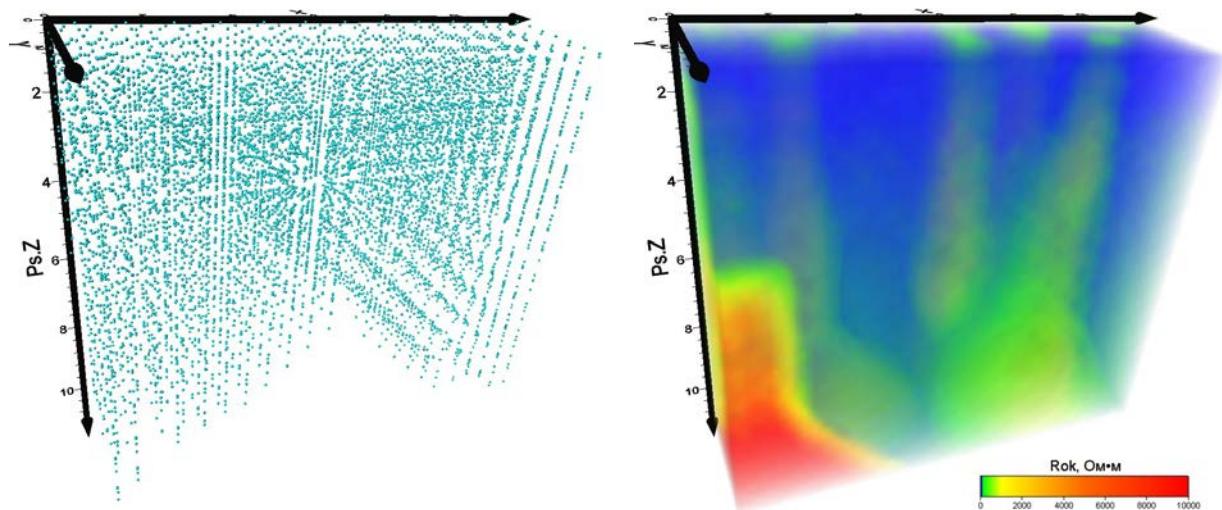


Рисунок 5. Схема объемного расположения проекций точек записи (слева) в пространстве под восьмисегментной расстановкой и распределение значений кажущегося сопротивления (справа).

Основная цель исследований – получение трехмерных данных для построения по результатам трехмерной инверсии объемного распределения удельного электрического сопротивления, отражающего наличие трех вертикальных колодцев. Одной из особенностей площадных данных является использование в качестве питающих лишь четверти из всех установленных электродов. Для каждого положения питающего электрода на всех диполях минимальной длины (0.5 м) выполнены

измерения разности потенциалов в двух перпендикулярных направлениях (вдоль линий сети). Таким образом, полученные трехмерные данные относятся к третьей категории (Loke, 2018, p.139). Общей особенностью распределений кажущегося сопротивления (**Рисунок 4** и **Рисунок 5**), является то, что получены они с расстановками (линейной и площадной), для которых количество электродов многократно (в 2 и 4 раза, соответственно) превышает количество электродов одновременно коммутируемых применявшейся станцией. Таким образом, для двух приведенных полевых примеров решена основная задача – успешное практическое полевое опробование технологии доступных (последовательных двухсегментных) измерений на 48 электродах с попарным использованием всех сегментов расстановки. Основным результатом опробования являются представленные полевые данные аналогичные недоступным в настоящий момент для авторов одновременным измерениям на 96 и 192 электродах, размещенных по профилю и площади, соответственно.

Результаты инверсии данных, полученных по многосегментной технологии

Результаты двумерной инверсии профильных данных (**Рисунок 4**) получены по программе «Res2DInv» (www.geotomosoft.com) и представлены на **Рисунке 6** в виде распределения удельного электрического сопротивления вдоль профиля измерений. Основной особенностью представленных результатов является оценка значений удельного сопротивления до эффективных глубин около 80 м (Абс. отм. 60), при высокой детальности в приповерхностной части профиля (до 20-25 м). Эти результаты хорошо согласуются с общими представлениями о геологическом строении участка исследований и результатами 2017 года, вдоль аналогичного профиля в 600 м ниже по течению реки (Большаков Д.К. и др., 2018). Таким образом, предварительные результаты, полученные методом электротомографии с четырехсегментной расстановкой не противоречат имеющейся информации и могут использоваться для построения геолого-геофизического разреза.

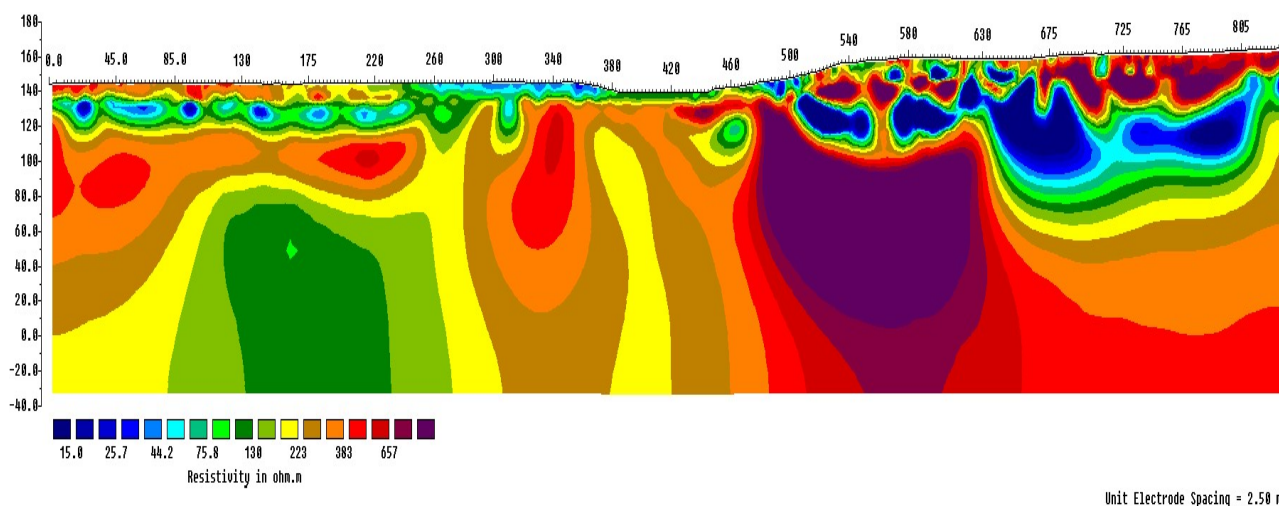


Рисунок 6. Распределение значений удельного электрического сопротивления по результатам двумерной инверсии профильных данных (программа «Res2DInv», www.geotomosoft.com).

Результаты трехмерной инверсии площадных данных (**Рисунок 5**) получены по программе «ZondRes3D» (www.zond-geo.com) и представлены на **Рисунке 7** в виде распределения удельного электрического сопротивления в объеме. Основной особенностью представленного пространственного распределения сопротивлений является уверенное выявление во вмещающей среде со средним сопротивлением около 150 Ом.м нескольких областей высокого удельного сопротивления (более 1800 Ом.м). Эффективные глубины нижних кромок трех высокоомных областей не превышают трех-четырех метров, что согласуется с информацией о глубине расположенных на участке исследований трех колодцев (около 3-3.5 м). По-видимому, изометричная форма выявленных высокоомных областей связана с особенностями алгоритма трехмерной инверсии направленного в большей степени на выявление тел такой геометрии. Следовательно, полученные предварительные результаты могут быть использованы для построения трехмерной модели исследованного объема геологической среды. Таким образом, детальные опытно-методические работы на площади с применением многосегментной технологии (восьмисегментная расстановка, 192 электрода) показали возможность получения удовлетворительных результатов трехмерных измерений со стандартным оборудованием и двумя дополнительными удлинителями для подключения серийной 48-электродной аппаратуры.

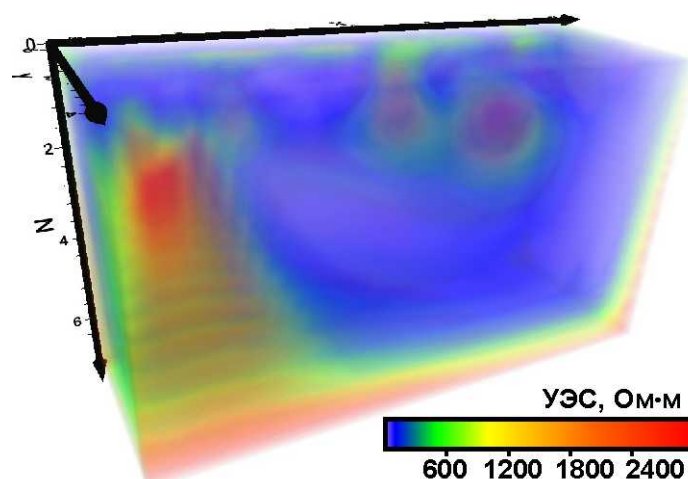


Рисунок 7. Объемное распределение значений удельного электрического сопротивления по результатам трехмерной инверсии трехмерных данных («ZondRes3D», www.zond-geo.com).

Выводы

Предложенные авторами многосегментные расстановки позволяют получать пригодные для инверсии данные с основными электроразведочными установками профильных наблюдений и их площадными аналогами (Loke, 2018). В обоих представленных практических примерах измерения стандартная 48-электродная станция использовалась как многоэлектродная система с доступом к значительно большему числу электродов, чем предусмотрено разработчиками аппаратуры.

Предложенная авторами многосегментная организация расстановок большого количества электродов дает возможность реализации технологии последовательных измерений между всеми парами сегментов многосегментной расстановки совместно с возможностью ее перемещения. Реализация этих возможностей при профильных измерениях позволяет повысить глубинность исследований и достоверность получаемых двумерных моделей.

Многосегментный подход к выполнению площадных электротомографических измерений позволяет получать действительно трехмерные и непрерывные данные с классическими и новыми установками на площадях значительно превышающих площадь одной расстановки. Применение предложенного авторами многосегментного подхода к выполнению двумерных и трехмерных измерений методом электротомографии с использованием дополнительного оборудования (пара удлинителей) значительно расширяет возможности существующей доступной аппаратуры для профильных измерений с ограниченным количеством электродов. Таким образом, несмотря на то, что переход от двумерных профильных измерений методом электротомографии к трехмерным площадным наблюдениям требует существенного увеличения количества полевого оборудования, значительных временных затрат для выполнения работ, осуществление такого перехода возможно и без привлечения специальной дорогостоящей электроразведочной аппаратуры.

Литература

1. Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д. [2017] Использование выносных линий для увеличения глубины исследования при проведении электротомографии. Инженерные изыскания. М.: ООО «Геомаркетинг», №1, 2017, с.46-53 (8 стр.).
2. Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д., Топилина Т.В. [2018] Трехсегментная методика электротомографии и результаты исследований долины Москвы-реки в районе Звенигородской биостанции МГУ (п. Луцино, Московская обл.). Тезисы докладов, на конференции «Инженерная геофизика – 2018», г. Алма-ата, Казахстан, 23-27 апреля 2018. (10 стр.)
3. Большаков Д.К., Ефремов К.Д., Модин И.Н. [2019] Трехмерные измерения стандартной аппаратурой метода электротомографии на многосегментных площадных расстановках электродов. Тезисы докладов, на конференции «Инженерная геофизика – 2019», г. Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2019. (10 стр.)
4. Модин И.Н., Большаков Д.К., Ефремов К.Д. [2017] Развитие технологии электротомографии с использованием многосегментных измерений. Тезисы докладов, на конференции «Инженерная геофизика – 2017», г. Кисловодск, Россия, 24-28 апреля 2017. (E07, 10 стр.)

5. Dahlin, T. and Bernstone, C., [1997] A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays, Procs. SAGEEP'97 (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems), Reno, Nevada, March 23-26 1997, vol 2, 927-935.
6. Dahlin, T., Bernstone, C., Loke M. H., [2002] A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. *Geophysics*, 67, no. 6 (november-december 2002), 1692–1700.
7. Loke M. H. and Barker R. D., [1996] Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion, *Geophysical Prospecting*, 44 pp. 499-523.
8. Loke M. H., [2018] Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. (Copyright 1996-2018) Part 8, pp. 127-178. Web: www.geotomosoft.com
9. McCarthy Building Companies, Inc. [2017] 3D Resistivity Imaging/New Parking Garage Structure (Locating Drainage Rates In Soils) Web: www.agiusa.com.
10. Rosqvist, R., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Månsson, C-H. and Lindsjö, M., [2009] Detektering av gas i deponier med resistivitet (in Swedish), Rapport SGC 208-1102-7371, ISRN SGC-R-208-SE, Svenskt Gastekniskt Center, Malmö, 66p.