

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА РАССТАНОВКАХ С БОЛЬШИМ КОЛИЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОДОВ

Большаков Д.К.¹, Модин И.Н.², Ефремов К.Д.³

Геологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, ООО «НПЦ Геоскан»,

¹ dkbolshakov@yandex.ru, ² imodin@yandex.ru, ³ ninsfer93@mail.ru.

Реферат

В практике применения электротомографии для решения инженерно-геологических задач все чаще встречаются ситуации, при которых выполнение измерений необходимо на расстановках с количеством электродов, превышающим максимальное, предусмотренное разработчиками аппаратуры. Использование дополнительного оборудования, специальных методических приемов позволяют преодолевать указанное ограничение. В сообщении представлены практические результаты опробования некоторых специально изготовленных дополнений к стандартному полевому комплекту оборудования для многоэлектродной электроразведочной аппаратуры. Применение дополнительного оборудования, специальной методики измерений и разработанной авторами технологии работ позволяют значительно расширить возможности серийно выпускаемой аппаратуры и воспользоваться этим при решении практических задач. Существенное увеличение глубинности исследований, за счет расширения возможностей аппаратуры, является одним из основных результатов для профильных электроразведочных установок. Использование расширенных возможностей аппаратуры для измерений с площадными установками позволяет получать действительно трехмерные электротомографические данные. Результаты измерений с профильными установками и их площадными аналогами на расстановках с большим количеством электродов продемонстрированы на практических примерах.

Ключевые слова: аппаратура; доп. оборудование; многоэлектродные измерения; электротомография.

RESULTS OF ELECTROTOMOGRAPHIC MEASUREMENTS ON ARRANGEMENTS WITH A LARGE NUMBER OF ELECTRODES

Bolshakov D. K.¹, Modin I. N.², Efremov K. D.³

Faculty of Geology Moscow State University, LLC «Geoscan»,

¹ dkbolshakov@yandex.ru, ² imodin@yandex.ru, ³ ninsfer93@mail.ru

Abstract

In the practice of using electrotomography to solve engineering, geotechnical and geological problems, there are increasingly situations in which measurements must be performed at positions with the number of electrodes exceeding the maximum provided by the developers of the equipment. The use of additional equipment, special methodological techniques allow you to overcome this limitation. The report presents the practical results of testing some specially made additions to the standard field set of equipment for multi-electrode electrical exploration equipment. The use of additional equipment, a special measurement technique and the technology developed by the authors allow us to significantly expand the capabilities of mass-produced equipment and take advantage of this in solving practical problems. A significant increase in the depth of research, due to the expansion of the capabilities of the equipment, is one of the main results for classical electrical exploration arrays. Using the advanced capabilities of the equipment for measurements with areal arrays allows you to obtain truly three-dimensional electrotomographic data. The results of measurements with classical profile arrays and their areal analogues on arrangements with a large number of electrodes are demonstrated by practical examples.

Key Words: additional equipment; ERI; multi-electrode measurements; optional equipment.

Введение

Необходимость использования большого количества электродов при выполнении электроразведочных работ методом электротомографии возникает из-за особенностей решаемых инженерно-геологических задач и очень часто продиктована потребностью в увеличении глубинности исследований. Эффективная глубина исследований связана с длиной расстановки электродов, зависящей от их количества и шага между ними. Некоторые производители аппаратуры предоставляют возможность расширения стандартного полевого комплекта путем изготовления специального (выпускаемого отдельно) оборудования, которое, дополняя основное, позволяет увеличить общее число электродов в расстановке одновременно доступных для коммутации и выполнения измерений. Возможность многократного увеличения коммутируемых станцией электродов позволяет производительно выполнять значительный объем измерений для площадных расстановок при получении трехмерных данных.

Таким образом, в практике применения метода электротомографии все чаще встречаются ситуации, при которых выполнение измерений необходимо на расстановках с количеством электродов, превышающим (весьма значительно, при площадных измерениях) максимально возможное, предусмотренное разработчиками аппаратуры. Использование дополнительного оборудования, специальных методических приемов позволяют преодолевать указанное ограничение. Настоящее сообщение посвящено некоторым способам расширения возможностей стандартной многоэлектродной аппаратуры для электротомографических измерений. Основу этих способов составляют последовательные измерения на большом количестве электродов, которое, благодаря применению специального дополнительного оборудования, превышает число электродов в стандартной расстановке. Практические результаты последовательных измерений на профильных и площадных расстановках с большим количеством электродов представлены для нескольких участков работ. Во всех случаях авторами использована электроразведочная станция «Омега-48» (ООО «Логис», Московская обл., г. Раменское, www.logsys.ru) со стандартным и дополнительным полевым оборудованием, способная одновременно автоматически коммутировать и использовать для измерений **48 электродов**. Расширенный комплект оборудования для профильных расстановок, использованный авторами, состоит из четырех стандартных (шаг 5 м, длина 115 м) сегментов косы (восьми для площадных расстановок), двух дополнительно изготовленных удлинителей длиной 130 м (ООО «ГЕОДЕВАЙС», Санкт-Петербург, www.geodevice.ru) и двух соединителей-переходников (ООО «НПЦ ГЕОСКАН», Москва, www.geoscan.su).

Профильные расстановки с количеством электродов превышающим 48

Показаны два способа организации и применения профильных расстановок с количеством электродов, превышающим стандартное, основанные на использовании различного дополнительного оборудования с целью увеличения глубинности исследований. Первый способ связан с проведением дополнительных измерений с шагом большим, чем при использовании стандартной расстановки. Способ основан на использовании стандартной расстановки и выносных электродов, соединенных со стандартной косой дополнительными проводами и коммутируемых автоматически с помощью серийной аппаратуры (расстановка «Паук»). Второй способ является суммой стандартной методики и дополнительных измерений на четырех стандартных сегментах косы [Модин и др., 2017] попарно соединяемых с аппаратурой при помощи специальных удлинителей электроразведочной косы (четырёхсегментная расстановка). Результаты применения расстановок «Паук» («Spider») и четырёхсегментной («4СМ») приведены для двух разных участков исследований – ПР «Плотина» и ПР «ДУБ», соответственно).

Профиль «Плотина» (расстановка «Паук», 58 электродов)

Измерения вдоль профиля по гребню каменно-набросной плотины (КНП) выполнялись с расстановкой из двух стандартных сегментов (шаг 5 м, длина 115 м) длиной 235 м.

Электротомографические измерения выполнены с шагом 10 м (стандартная расстановка электродов) и с шагом 50 м (расстановка «Паук»). Использовались встречные трехэлектродные установки. Электрод «бесконечность» был установлен в 2.5-3 км выше по течению реки. Фактическая схема взаимного расположения расстановок при измерениях с шагом 10 м (15 стандартных расстановок, «01» - «15») и измерениях с шагом 50 м (6 расстановок реализованные с использованием дополнительного оборудования, «03_SPIDER» - «13_SPIDER», выделены цветом) представлена на рис. 1.

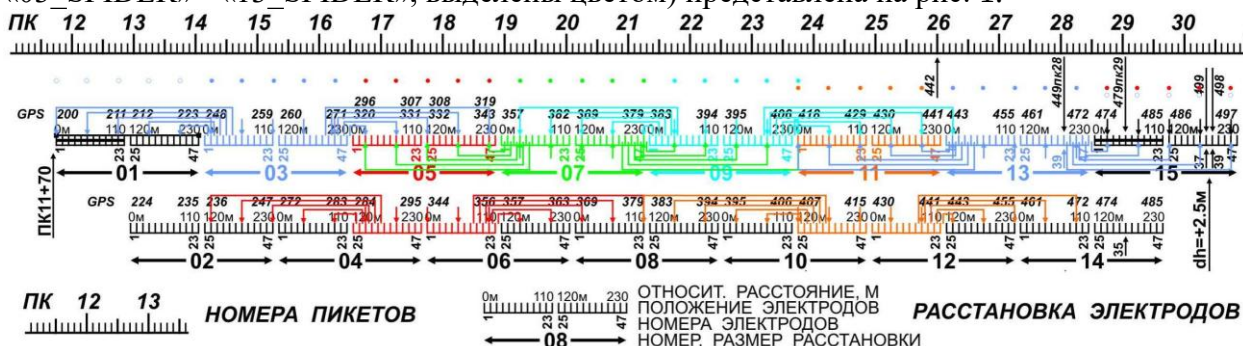


Рис. 1. Схема расположения расстановок («01»-«15», шаг 10 м, длина 230 м и «03_SPIDER»-«13_SPIDER», шаг 50 м, длина 700 м, выделены цветом) на гребне плотины (июль 2012).

При измерениях с шагом 10 м длина приемной линии для всех разносов была постоянной и составляла 10 м. Измерения выполнены на 22 разносах (АО от 15 до 225 м, шаг 10 м). Значение максимального разноса (225 м) и эффективная глубина исследований ограничены длиной используемой расстановки (235 м).

Основные особенности измерений — использование только нечетных контактов стандартных сегментов расстановки и изготовленных особым способом свинцовых электродов, заранее установленных вдоль профиля по специальной технологии с шагом 10 м. Благодаря этим особенностям, при выполнении измерений время на устройство заземлений электродов в песчано-щебенистом грунте было сокращено.

Таким образом, для 15 стандартных расстановок электродов («01» – «15») выполнены измерения со встречными трехэлектродными установками с шагом по пикетам и по разносам 10 м при постоянной длине измерительной линии 10 м. Шаг смещения расстановки по профилю – 120 м (перекрытие расстановок – 50%). Общая длина профиля – 1910 м. Разрезы кажущегося сопротивления представлены на Рис. 2 (слева).

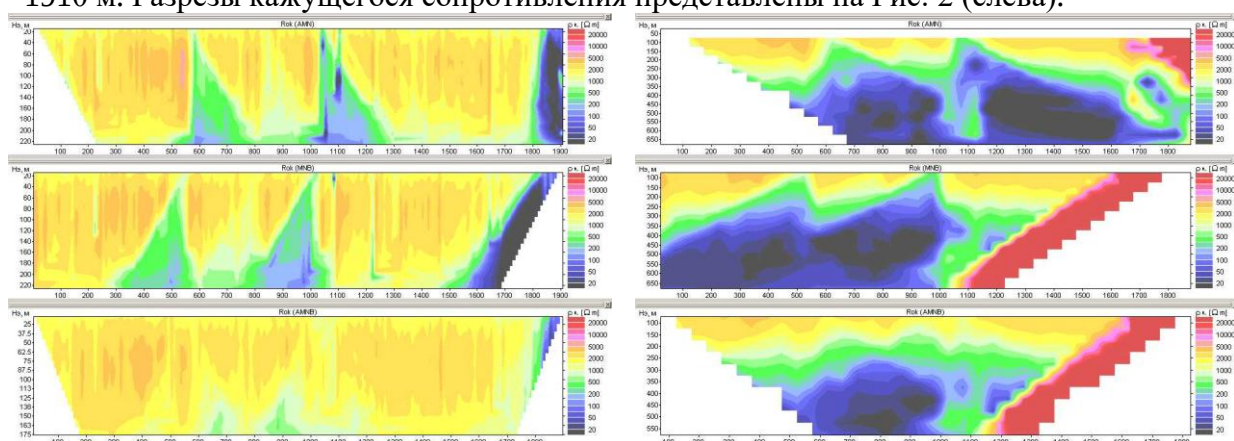


Рис. 2. Разрезы кажущегося сопротивления (KHP, июль 2012) для установок Amn (верхний), mnV (средний), AmnV (нижний) на расстановках из двух сегментов («01»-«15», шаг 10 м, длина 230 м, слева) и с доп. оборудованием («03_SPIDER»-«15_SPIDER», шаг 50 м, длина 700 м, справа).

Основной целью измерений было получение данных подтверждающих однородное строение тела плотины, отсутствие как мест подозрительных на протечки, так и самих протечек. В центральной части полученных разрезов кажущегося сопротивления (Рис. 2,

слева) проявилось влияние вертикальных смотровых колодцев, пронзающих все тело плотины и находящихся на разных расстояниях от профиля наблюдений. В правой части разрезов ярко проявилось влияние бетонной подготовки, являющейся фундаментом плотины.

При измерениях с шагом 50 м длина приемной линии для всех разносов была постоянной и составляла 50 м. Измерения выполнены на 13 разносах (АО от 75 до 675 м, шаг 50 м). Значение максимального разноса (675 м) существенно превышает значение максимального разноса (225 м) при измерениях с шагом 10 м и означает значительное увеличение эффективной глубины исследований. Основная особенность расстановки «Паук» – использование для подключения к аппаратуре всех ее 15 электродов двух стандартных сегментов, используемых для измерений с шагом 10 м. Длина расстановки составляла 700 м, что в три раза больше длины стандартной расстановки. Фактически, в качестве пяти центральных электродов каждой расстановки «Паук» использовались пять электродов в пределах стандартной расстановки, отстоящие друг от друга на 50 м и подсоединенные к соответствующим нечетным контактам косы. Для подключения еще 10 электродов, расположенных за пределами стандартной расстановки, использовались четные контакты косы (по пять крайних с каждой стороны, рис. 1), размещенной вдоль профиля (для измерений с шагом 10 м) и десять соединительных линий (длина от 70 до 300 м), дополнительно изготовленных из полевого провода марки «ГСП-0.5».

Таким образом, для 6 расстановок электродов с дополнительным оборудованием («03_SPIDER» - «13_SPIDER») выполнены измерения со встречными трехэлектродными установками с шагом по пикетам и разносам 50 м при постоянной длине измерительной линии 50 м. Шаг смещения расстановки по профилю – 250 м (перекрытие расстановок – около 65%). Общая длина профиля – $(250+250+250+200+250+700=)$ 1900 м. Разрезы кажущегося сопротивления представлены на Рис. 2 (справа).

Основной целью выполненных измерений было получение данных уверенно демонстрирующих, что разрезы кажущегося сопротивления для стандартной расстановки позволяют охарактеризовать состояние тела плотины по всей ее высоте до бетонной подготовки. В центральной части разрезов кажущегося сопротивления, полученных для расстановки «Паук» (Рис. 2, справа), также как и для стандартной расстановки, проявилось влияние вертикальных смотровых колодцев. Полученные результаты измерений (Рис. 2) показывают, что для выявления изменений сопротивлений, связанных с возможными протечками в теле плотины, удовлетворительно подходят разрезы для стандартной расстановки электродов.

При реализации расстановки «Паук» за пределами стандартной расстановки располагалось 10 электродов. Следовательно, общее количество электродов длинной расстановки, организованной с использованием стандартных сегментов и дополнительного оборудования, формально равно 58 (48 электродов стандартной расстановки и еще 10 за ее пределами) и превышает количество электродов одновременно подключаемых и коммутируемых использованной станцией «Омега-48».

Профиль «ДУБ», (четырёхсегментная расстановка «4СМ», 96 электродов)

Измерения вдоль профиля «ДУБ» выполнялись с расстановкой из четырех стандартных сегментов (шаг 5 м, длина 115 м) длиной 475 м с использованием расширенного комплекта оборудования для профильных расстановок (см. Введение). Общая длина профиля около 800 м (семь сегментов). В центральной части (с ПК 380 по ПК 440) профиль пересекает русло реки (ширина около 70 м, глубина менее 3.5 м). Использовались встречные трехэлектродные установки. Электрод «бесконечность» был установлен в 2 км выше по течению реки. Основная цель исследований – построение геоэлектрической модели долины реки с присущей методу электротомографии детальностью и максимально возможной глубиной.

Разрезы кажущегося сопротивления по результатам измерений с четырехсегментной («4СМ») расстановкой вдоль профиля «ДУБ» представлены на рис.4 (справа) совместно с аналогичными разрезами для стандартной двухсегментной («2СМ») расстановки (рис.4, слева). Детальность результатов 4СМ расстановки не уступает детальности 2СМ [Модин и др., 2017], а эффективная глубина исследований заметно больше (см. рис. 4).

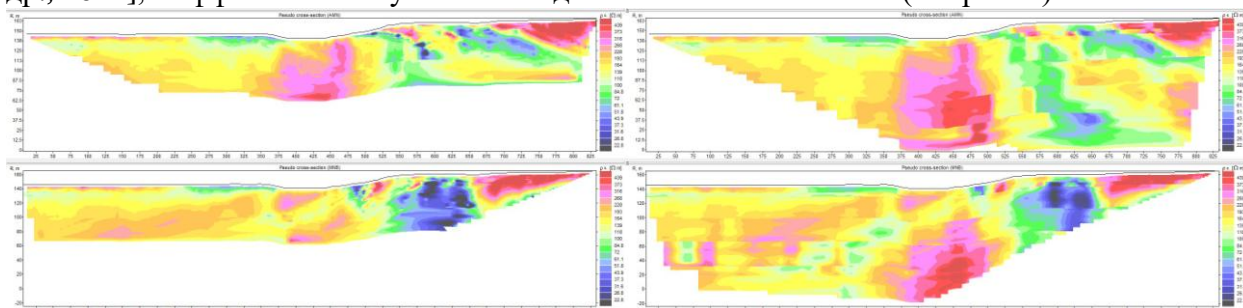


Рис. 4. Разрезы кажущегося сопротивления (ПР «ДУБ», июнь 2018) для установок Амн (сверху) и mnB (снизу) на расстановках из двух (слева) и четырех (справа) сегментов.

Разрезы удельного электрического сопротивления по результатам инверсии данных (с рис. 4) по программе «Res2Dinv» (www.geotomosoft.com) представлены совместно (рис. 5) для стандартных 2СМ расстановок (верхний) и для 4СМ расстановок (нижний).

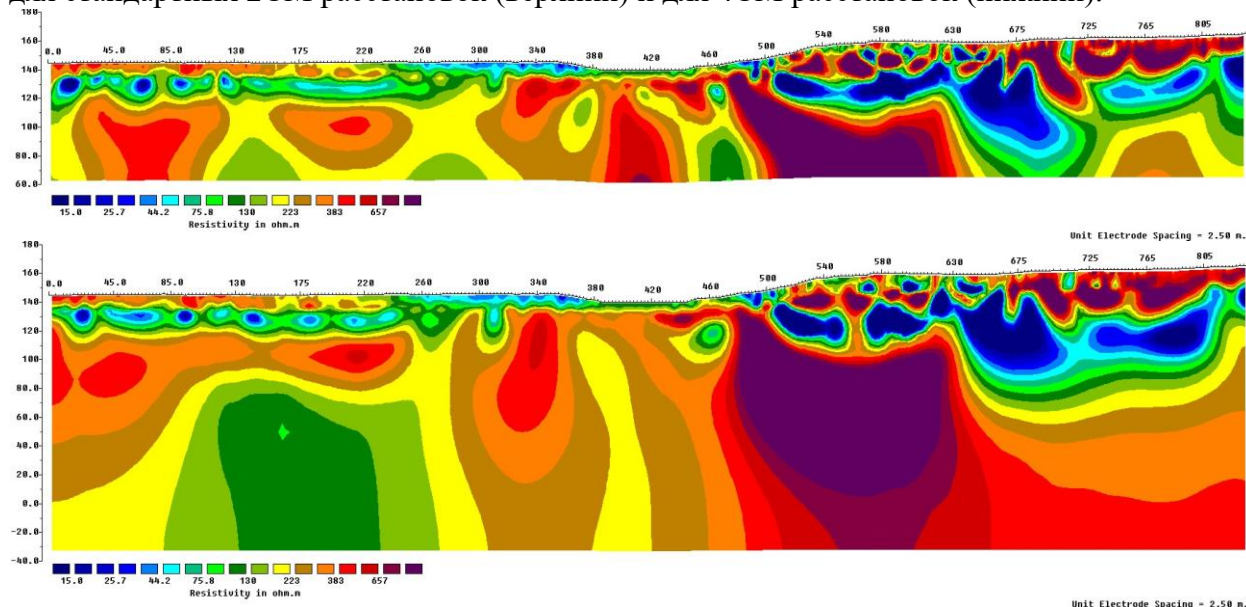


Рис. 5. Разрезы удельного сопротивления (ПР «ДУБ», июнь 2018) для стандартных (2СМ) расстановок (верхний) и для расстановок с дополнительным (4СМ) оборудованием (нижний).

Основными особенностями (преимуществами) результатов для 4СМ расстановки (рис. 5) являются: оценка значений удельного сопротивления до эффективных глубин значительно превышающих глубины для 2СМ расстановки (около 80 м); высокая детальность в приповерхностной части (аналогично 2СМ); уточненные свойства и геометрия модели на максимальных для 2СМ расстановки глубинах (для 4СМ – средняя часть разреза, 30-40 м).

При реализации измерений на 4СМ расстановке использовано четыре стандартных сегмента и дополнительное оборудование, позволяющее последовательно (парами сегментов) подключать к станции «Омега-48» для коммутации и выполнения измерений 96 электродов. Формально, количество электродов в использованной 4СМ расстановке превышает количество электродов одновременно подключаемых и коммутируемых использованной станцией в два раза.

Выводы по результатам измерений на профильных расстановках

Использование дополнительного оборудования в сочетании со стандартным, позволяет применять серийную аппаратуру метода электротомографии для измерений на расстановках с количеством электродов, превышающим максимальное возможное, определенное разработчиками. Представленные авторами методические и технические приемы совместного применения стандартного и дополнительного оборудования существенно расширяют возможности серийно выпускаемой аппаратуры и метода электротомографии в целом. Результаты измерений серийной аппаратурой с дополнительным оборудованием на профильных расстановках с большим количеством электродов обладают значимыми преимуществами по сравнению с результатами измерений со стандартными профильными расстановками.

Площадные расстановки с количеством электродов превышающим 48

Представлены результаты электротомографических измерений для двух площадных расстановок электродов [Большаков и др., 2019], с количеством, значительно превышающим стандартное число электродов одновременно подключаемых к станции для коммутации и измерений. Обе расстановки позволяют получать действительно трехмерные данные [Loke, 2018, p.139]. Первый способ измерений на площадной четырехсегментной расстановке («S4CM», 96 электродов) не требует применения дополнительного оборудования. Второй способ измерений основан на последовательном подключении с помощью двух удлинителей всех пар сегментов площадной восьмисегментной расстановки («S8CM», 192 электрода) к серийной аппаратуре. Результаты применения расстановок S4CM и S8CM приведены для двух разных участков «МГУ» (2011) и «Колодцы» (2018), соответственно.

Участок «МГУ» (площадная расстановка «S4CM», 4 сегмента, 96 электродов)

Измерения на участке «МГУ» выполнялись с расстановкой из четырех площадных сегментов по равномерной сети (шаг 5 м). Использовались дипольные установки [Большаков и др., 2019]. Основная цель опытно-методических работ – опробование площадной методики измерений и получение объемного распределения кажущегося сопротивления для площадной четырехсегментной расстановки («S4CM», 96 электродов) со стандартным оборудованием и серийной аппаратурой. Расположение площадных сегментов косы вокруг станции «Омега-48» (рис. 6, слева) позволило выполнить измерения без привлечения дополнительного оборудования с последовательным подключением всех пар сегментов к аппаратуре. Объемное распределение проекций точек записи под расстановкой представлено на рис. 6 (справа).

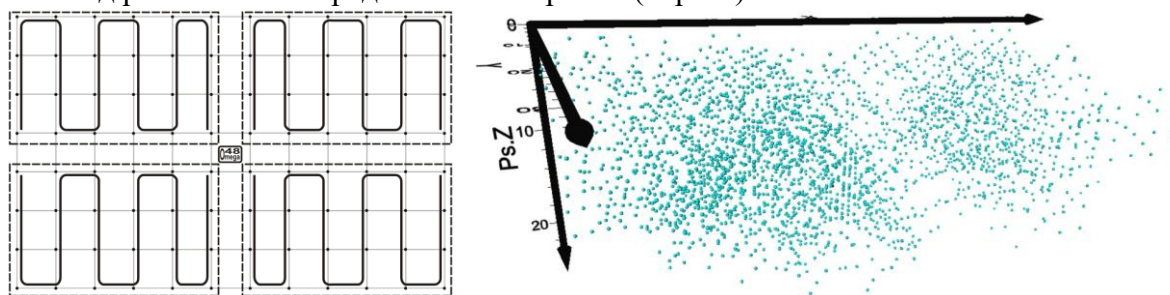


Рис. 6. Расположение четырех сегментов косы (слева, черные линии) вокруг станции и распределение проекций точек записи (справа) для площадной расстановки (май 2011).

Результаты измерений в виде объемного распределения значений кажущегося сопротивления для площадной расстановки S4CM представлены на рис. 7.

Таким образом, результаты измерений на площадной четырехсегментной расстановке из 96 электродов демонстрируют возможность получения данных содержащих значимую трехмерную информацию [Loke, 2018, p.139] с серийной 48-электродной аппаратурой, без использования дополнительного оборудования. Общее количество электродов в предложенной и опробованной расстановке превышает в два раза количество электродов

одновременно подключаемых и коммутируемых станций «Омега-48», использованной авторами для измерений на этой расстановке.

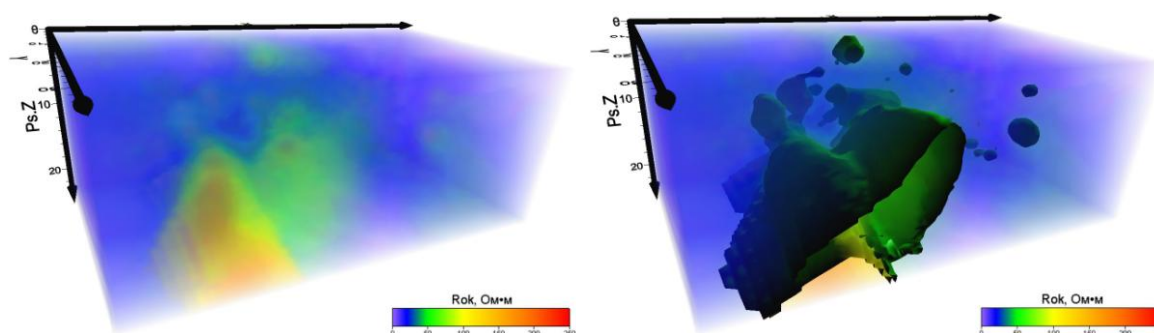


Рис. 7. Объемное распределение значений кажущегося сопротивления (май 2011) для площадной четырехсегментной расстановки (слева) с изолиниями 50 и 100 Ом·м (справа).

Участок «Колодцы» (площадная расстановка «S8CM», 8 сегментов, 192 электрода)

Измерения на участке «Колодцы» выполнялись с расстановкой из восьми площадных сегментов («S8CM», 192 электрода) по равномерной сети (шаг 0.5 м). Использовались трехэлектродные установки [Большаков и др., 2019]. Основная цель опытно-методических работ – опробование площадной методики измерений серийной аппаратурой со стандартным и дополнительным оборудованием для получения трехмерных данных [Loke, 2018, p.139].

Расположение площадных сегментов показано (рис. 8, слева) совместно с объемным расположением проекций точек записи (рис. 8, справа) для восьмисегментной расстановки.

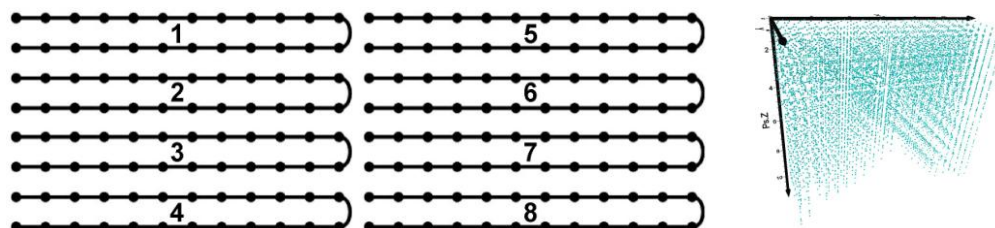


Рис. 8. Расположение восьми сегментов косы (слева, черные линии) и объемное распределение проекций точек записи (справа) для площадной расстановки (июнь 2018).

По результатам измерений на площадной расстановке S8CM построено объемное распределение значений кажущегося сопротивления (рис. 9, слева) с пространственным положением изолиний 40, 120 и 1000 Ом·м (рис. 9, справа).

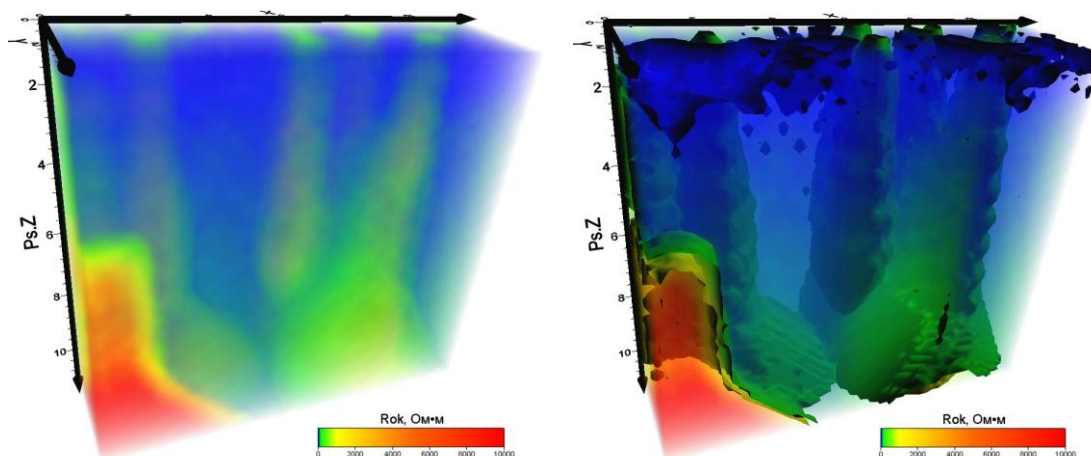


Рис. 9. Объемное распределение значений кажущегося сопротивления (июнь 2018) для восьмисегментной расстановки (слева) с изолиниями 40, 120 и 1000 Ом·м (справа).

Результаты детальных работ на площадной восьмисегментной расстановке показали возможность получения действительно трехмерных данных [Loke, 2018, p.139] с серийной аппаратурой и комплектом стандартного и дополнительного оборудования. Продемонстрированные удовлетворительные результаты площадных измерений получены для расстановки с большим количеством электродов (192 шт.), которое многократно (в четыре раза) превышает максимальное число электродов (48) одновременно коммутируемых применявшейся электроразведочной станцией «Омега-48».

Выводы по результатам измерений на площадных расстановках

Выполнение измерений на площадных расстановках большого количества электродов с современной серийной многоэлектродной аппаратурой метода электротомографии позволяет получать данные содержащие трехмерную информацию без использования дополнительного оборудования. Применение дополнительного полевого оборудования позволяет многократно увеличить количество электродов на площадной расстановке и проводить трехмерные электротомографические измерения без смены аппаратуры.

Выводы

Приведены примеры получения удовлетворительных результатов на профильных и площадных расстановках с количеством электродов превышающим (в некоторых случаях весьма значительно) максимальное число электродов, предусмотренное разработчиками использованной при измерениях аппаратуры. Авторами показано, что реальные возможности серийной многоэлектродной аппаратуры для метода электротомографии могут быть существенно расширены при использовании даже незначительных дополнений к стандартному полемому оборудованию. Важными практическими результатами расширения возможностей аппаратуры являются: значительное увеличение глубинности исследований при профильных измерениях и принципиальная возможность получения трехмерных данных на большом количестве электродов установленных на площади.

Таким образом, применение дополнительного оборудования, специальной методики измерений, разработанной и опробованной авторами технологии работ позволяют значительно расширить возможности серийно выпускаемой аппаратуры и использовать эти возможности при решении практических задач.

Литература

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.)

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. (Е07, 10 стр.)

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