

DOI 10.34926/geo.2025.73.36.002

УДК 550.370; 550.379

## ВЫЯВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ПО ОЦЕНКАМ СХОДСТВА ДВУМЕРНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Д.К. Большаков, И.Н. Модин

Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. 119991, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1;  
e-mail: dkbolshakov@yandex.ru

**Аннотация.** Предложена и опробована методика электротомографии с приемными линиями постоянной длины. Результаты инверсии получены по нескольким совокупностям отдельных измерений встречными трехэлектродными установками. Двумерные геоэлектрические модели по экспериментальным данным представлены совместно с моделями по стандартной методике для двух участков опробования. Выводы качественного анализа моделей подтверждены результатами количественного анализа. Для количественного сравнения моделей авторами предложен параметр сходства двумерных геоэлектрических моделей. Результаты анализа статистических атрибутов параметра сходства использованы для выявления рациональной методики с количеством независимых измерений значительно меньшим, чем для стандартного варианта.

**Ключевые слова.** Электротомография, отдельные измерения, двумерные модели, параметр сходства, рациональная методика.

## IDENTIFICATION OF A RATIONAL ELECTROTOMOGRAPHY TECHNIQUE BASED ON ESTIMATES OF THE SIMILARITY OF TWO-DIMENSIONAL GEOELECTRIC MODELS

D.K. Bolshakov, I.N. Modin

Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University. 1, Leninskie Gory, Moscow, GSP-1, Russia, 119991;  
e-mail: dkbolshakov@yandex.ru

**Abstract.** A technique of electrotomography with receiving lines of constant length has been proposed and tested. The inversion results were obtained from several sets of separate measurements by counter three-electrode arrays. Two-dimensional geoelectric models based on experimental data are presented together with models according to the standard technique for two test sites. The conclusions of the qualitative analysis of the models are confirmed by the results of the quantitative analysis. For quantitative comparison of models, the authors proposed a similarity parameter for two-dimensional geoelectric models. The results of the analysis of statistical attributes of the similarity parameter were used to identify a rational technique with a significantly smaller number of independent measurements than for the standard version.

**Key words.** ERT, separate measurements, 2D models, similarity parameter, rational technique.

### Введение

Успешное применение электротомографии для изучения строения геологической среды связано как с типами установок зондирования, так и с особенностями методики измерений, которые обеспечивают равномерную плотность данных, требующуюся глубинность и необходимую разрешающую способность. Среди особенностей методики в публикациях отмечается зависимость проявления изменений свойств и геометрии геоэлектрического разреза от плотности данных (например, Xu & Noel, 1993; Wilkinson et al., 2012). Последовательности измерений, опубликованные в литературе, в большинстве своем предусматривают уменьшение плотности данных с увеличением глубины исследования (например, Dahlin & Bing, 2004; Martorana et al., 2009; Szalai et al., 2013; Loke et al., 2015). При сравнении результатов для разных установок авторы публикаций указывают на высокую глубинность трехэлектродной установки, которая сочетается с хорошей разрешающей способностью [Dahlin, Zhou, 2006; Martorana et al., 2016 и др.]. По нашему мнению, применение встречных трехэлектродных установок является предпочтительным при получении данных метода электротомографии. Последовательность измерений этими установками используется авторами с 2015 года как стандартная для двухсегментных изме-

рений и как основная для многосегментной методики (МСМ), предложенной для достижения максимально возможной глубинности исследований [Большаков и др., 2019] с разрежением данных на глубине за счет увеличения шага по пикетам и разносам. Фрагмент разреза точек записи (для установки Amn) этой стандартной последовательности измерений, реализованной в файле-протоколе T\_MCM\_mn1359dx, представлен в координатах «номер электрода – число шагов dx» (рис. 1а). Последовательное получение данных на встречных трехэлектродных (Т) установках происходит с использованием четырех измерительных линий с длинами, равными одному, трем, пяти и девяти расстояниям между электродами. Как правило, шаг между электродами (dx) равен 5 м, а длины приемных линий (mn) составляют 5, 15, 25 и 45 м, то есть 1dx, 3dx, 5dx и 9dx соответственно. Этот факт отражен в названии протокола символами mn1359dx, а точки записи указаны (рис. 1а) четырьмя разными цветами.

Практический опыт применения этой последовательности измерений показывает наличие в данных искажений от методических эффектов, связанных со сменой измерительных линий и изменением шага по разносам. Наложение этих искажений на эффекты от резких изменений свойств и геометрии исследуемой среды вызывает их усиление по амплитуде и увели-

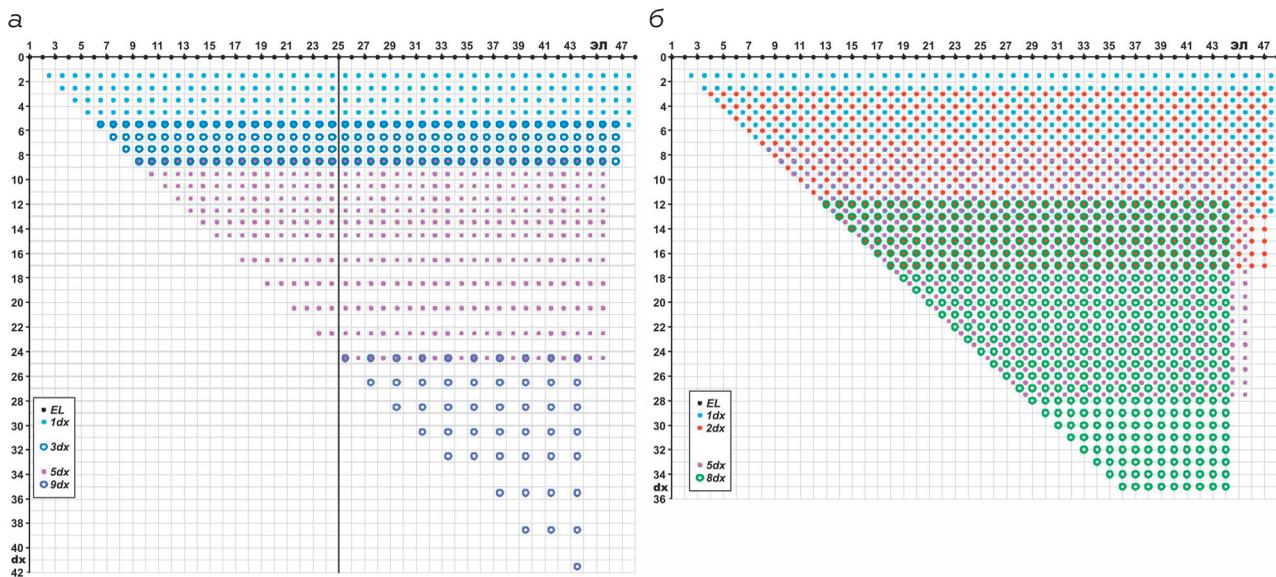


Рис. 1. Разрезы точек записи для стандартных (а) и отдельных (б) измерений

чение по площади. Дополнительно при измерениях в условиях интенсивных помех псевдоразрезы содержат весьма значительные по амплитуде искажения, вызванные суперпозицией всех перечисленных факторов. Очень часто редакция таких данных затруднена и требует предварительного анализа, оценки статистических характеристик измеренного поля всего объема данных, реализации эффективных процедур коррекции искаженных значений. Предлагаемая нами методика отдельных измерений позволяет исключить влияние указанных методических эффектов на полевые данные путем устранения вызывающих их причин.

### Раздельные измерения с приемными линиями постоянной длины

Сокращение числа приемных линий, выбор разносов для их смены позволяют реализовать смещение методических эффектов с разносов, на которых проявляются особенности геологического строения, и исключить их взаимное наложение. Более того, использование нескольких последовательностей измерений (разных протоколов) дает возможность полностью устранить методические эффекты. Сколько нужно последовательностей? Какой длины и сколько приемных линий следует выбрать? Нами выбраны четыре приемные линии (mn) с длинами, равными одному (1dx), двум (2dx), пяти (5dx) и восьми (8dx) расстояниям между электродами (dx). В четырех файлах-протоколах (T\_mn1dx, T\_mn2dx, T\_mn5dx, T\_mn8dx) реализованы четыре (для каждой mn) последовательности измерений встречными трехэлектродными установками с разносами, возрастающими на величину шага между электродами, пока значение коэффициента установки не более 5000 м. Таким образом, для опробования выбран вариант методики раздельных измерений, в котором для приемной линии наименьшей длины (1dx) измерения выполнены встречными трехэлектродными установками на

12 разносах (от 1,5dx до 12,5dx) и их общее число на одной расстановке составляет 972 шт. Для аналогичных измерений с длиной приемной линии, равной двум расстояниям между электродами (2dx), действующих разносов 15 (от 3dx до 17dx), измерений 1110 шт. Аналогично для приемных линий с длинами 5dx и 8dx число разносов 21 (от 7,5dx до 27,5dx) и 24 (от 12dx до 35dx), а общее число измерений 1176 и 984 соответственно.

Вся совокупность данных раздельных измерений, содержащихся в четырех протоколах, составляет 4242 значения для одной расстановки 48 электродов. Разрезы точек записи для трехэлектродной установки Amn с четырьмя измерительными линиями постоянной длины представлены в координатах «номер электрода – число шагов dx» совместно (рис. 1б) из-за ограниченного объема публикации. Условные положения точек измерений обозначены на разрезе четырьмя разными цветами. Замена одного стандартного протокола многосегментной методики с четырьмя приемными линиями четырьмя указанными последовательностями измерений с приемными линиями постоянной длины приводит к увеличению числа измерений более чем в 2,5 раза. Действительно, при совместном представлении разрезов точек записи (рис. 1б) выявляются значительные (> 50%) перекрытия в 10 (для приемных линий 1dx и 2dx) и даже 16 разносов (5dx и 8dx). Для приемных линий с длинами 2dx и 8dx перекрытие протоколов < 50% (6 разносов), а для измерительных линий 1dx и 8dx минимальное (1 разнос). Также отметим, что для пар приемных линий 1dx – 2dx, 2dx – 5dx, 5dx – 8dx расстояние между зондированиями в два раза меньше (dx/2), чем расстояние между электродами, так как формально для приемных линий с длинами, кратными нечетному числу dx («нечетные», 1dx и 5dx), точки записи расположены между электродами, а для приемных линий с длинами, кратными четному числу dx («четные», 2dx и 8dx), – под электродами.

Фактически при замене одного стандартного протокола многосегментной методики с четырьмя «нечетными» приемными линиями четырьмя протоколами с «четными» и «нечетными» приемными линиями число зондирований удваивается. Данный факт имеет важное практическое значение, так как двойное сокращение расстояния между точками зондирования формально означает двойное увеличение разрешающей способности по горизонтали, что, очевидно, является значимым преимуществом методики, использующей измерительные линии четной и нечетной кратности шагу между электродами. Несмотря на то что указанные причины объясняют значительное (в 2,5 раза) увеличение данных при замене стандартного протокола, общий объем раздельных измерений воспринимается избыточным. Однако, при проведении исследований на промышленных территориях, в городах, где линейные размеры антропогенных неоднородностей очень часто значительно меньше размеров неоднородностей естественного, природного происхождения, эта кажущаяся избыточность данных делает методику универсальной, готовой к неожиданным, резким измерениям свойств и геометрии изучаемой геологической среды, является необходимым «запасом прочности» метода электротомографии. Использование такой универсальной методики со стандартным шагом между электродами 5 м делает этот «запас прочности» двойным (!), а получаемые данные действительно избыточными в тех случаях, когда метод применяется для изучения геологического строения территорий, свободных от хозяйственной деятельности, строительства и других антропогенных воздействий. Таким образом, основным преимуществом методики раздельных измерений является возможность значительного уменьшения влияния методических эффектов и исключения их наложения на эффекты, связанные с проявлениями особенностей строения изучаемой геологической среды, благодаря последовательному использованию разных протоколов для приемных линий постоянной длины. Вместе с тем методика раздельных измерений, как любой вариант методики электротомографии, при обязательном использовании приемных линий с длинами, кратными и четному, и нечетному числу шагов между электродами, позволяет, сохраняя глубинность исследований, получать полевые данные с плотностью

в два раза большей, чем при использовании измерительных линий одной кратности, например только «нечетных», как в стандартной последовательности T\_MCM\_mn1359dx [Большаков и др., 2019].

### Опробование методики раздельных измерений и полевые данные

Полевое опробование методики раздельных измерений с приемными линиями постоянной длины проводилось на двух участках: UGRA23 (профиль длиной 1075 м,  $dx = 5$  м, 9 сегментов, станция «Омега-48М-2», Калужская обл., сентябрь 2023 г.) и VLGR23 (профиль длиной 382 м,  $dx = 2$  м, 8 сегментов, станция «Омега-48М», Волгоградская обл., июль 2023 г.). Экспериментальные данные получены со встречными трехэлектродными установками по протоколу T\_MCM\_mn1359dx (рис. 1а) и по четырем протоколам: T\_mn1dx, T\_mn2dx, T\_mn5dx и T\_mn8dx (рис. 1б), описанным выше. Разрезы кажущего сопротивления для участка UGRA23, рассчитанные с использованием программы x2ipi (автор – А.А. Бобачев, <https://x2ipi.ru/>), по данным полной совокупности раздельных измерений T\_mn1258dx (22725 отсчетов, рис. 2б) и по данным протокола «T\_MCM\_mn1359dx» (8406 отсчетов, рис. 2а) представлены совместно. Псевдоразрезы для соответствующих встречных трехэлектродных установок (Amn –верху, mnB –внизу) в целом похожи, а наблюдаемые визуальные отличия объясняются наличием на разрезах для данных раздельных измерений (рис. 2б) случайных и регулярных шумов, связанных, по-видимому, с работой аппаратуры.

Измерения с приемными линиями постоянной длины выполнены по четырем разным протоколам, однако из-за ограничения объема публикации разрезы кажущегося сопротивления представлены для всей совокупности данных (рис. 2б). Такая форма визуализации, к сожалению, не только не передает преимуществ раздельного получения данных, а, напротив, создает «методический шум», который совместно с аппаратурными эффектами изрядно портит восприятие и общее впечатление от данных, почти втрое превышающих по числу отсчетов данные протокола T\_MCM\_mn1359dx (рис. 2а). Аналогичные данные получены для второго участка опробования VLGR23.

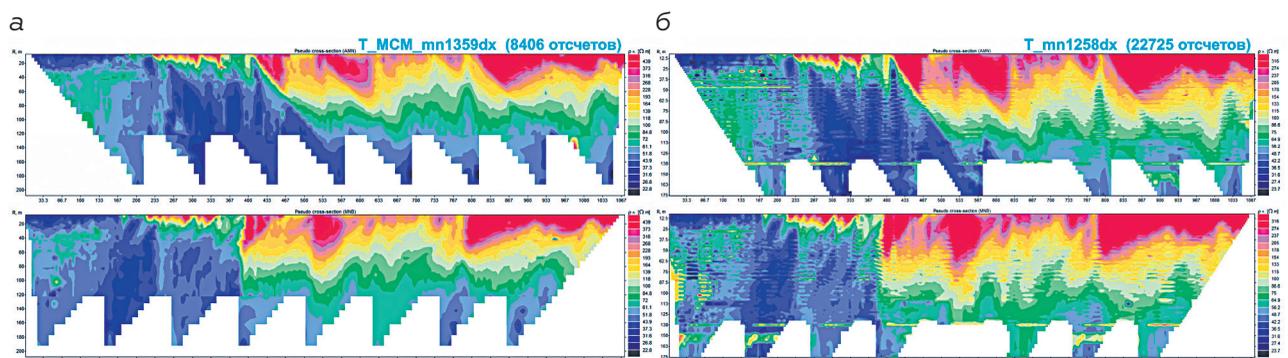


Рис. 2. Полевые данные стандартных (а) и раздельных (б) измерений

### Геометрия двумерной модели и результаты инверсии экспериментальных данных

Выбор для всех тестируемых данных единой геометрии двумерной модели перед началом проведения инверсии избавляет от последующих дополнительных пересчетов и значительно упрощает процедуру количественного сравнения результатов. Для каждого из участков опробования была выбрана одна общая единая модель с одинаковыми линейными размерами всех ячеек (уч. UGRA23 –  $2,5 \times 2$  м, уч. VLGR23 –  $1 \times 1$  м), общее число которых около 15 000. Двумерная инверсия выполнена в программе ZondRes2D (автор – А.Е. Каминский, www.zond-geo.com) для нескольких наборов данных (уч. UGRA23 – 12, уч. VLGR23 – 13) по методу наименьших квадратов с регуляризацией (алгоритм Marquardt). Для анализа выбраны модели после шестой итерации, у которых значения невязок изменяются от 2 до 8% (уч. UGRA23 – 5–8%, уч. VLGR23 – 2–6%). Четыре модели для участка UGRA23, представленные совместно (рис. 3), визуально похожи и отличаются лишь деталями.

Двумерная геоэлектрическая модель, рассчитанная программой 2D-инверсии по данным (8406 измерений) для стандартного протокола T\_MCM\_mn1359dx (рис. 3а), обладает наименьшей невязкой (5,12%) из всех полученных для участка UGRA моделей. Невязка для модели по данным (22 695 отсчетов) полной совокупности четырех раздельных измерений T\_mn1258dx (рис. 3б) составила

6,74%. Визуально незначительные различия в этих моделях отмечаются в средней и нижней частях и выражаются в несущественном занижении значений удельного электрического сопротивления (УЭС) для модели T\_mn1258dx (например, на ПК 350 – 375 в средней части и на ПК 800 – 825 в нижней части). Модель для совокупности данных (17 318 отсчетов) раздельных измерений T\_mn125dx с невязкой 7,22% (рис. 3в), как и следовало ожидать, имеет незначительные отличия от модели по полной совокупности T\_mn1258dx (рис. 3б) лишь в нижней части. Аналогично верхняя часть модели для совокупности данных (18 027 отсчетов) раздельных измерений T\_mn258dx с невязкой 6,57% (рис. 3г) визуально имеет более значимые различия с моделью для полной совокупности T\_mn1258dx (рис. 3б). Таким образом, результаты качественного визуального анализа четырех представленных на рис. 3 двумерных геоэлектрических моделей позволяют сделать предположение об эквивалентности этих моделей, несмотря на наличие некоторых, на наш взгляд несущественных, отличий. Необходимо отметить, что каждая из рассмотренных моделей по данным раздельных измерений (рис. 3б, 3в, 3г) получена для заведомо избыточного числа независимых измерений, которое многократно (в разы!) превышает число независимых измерений, использованных при расчете двумерной модели по данным стандартных измерений (рис. 3а). Аналогичные результаты получены для участка VLGR23.

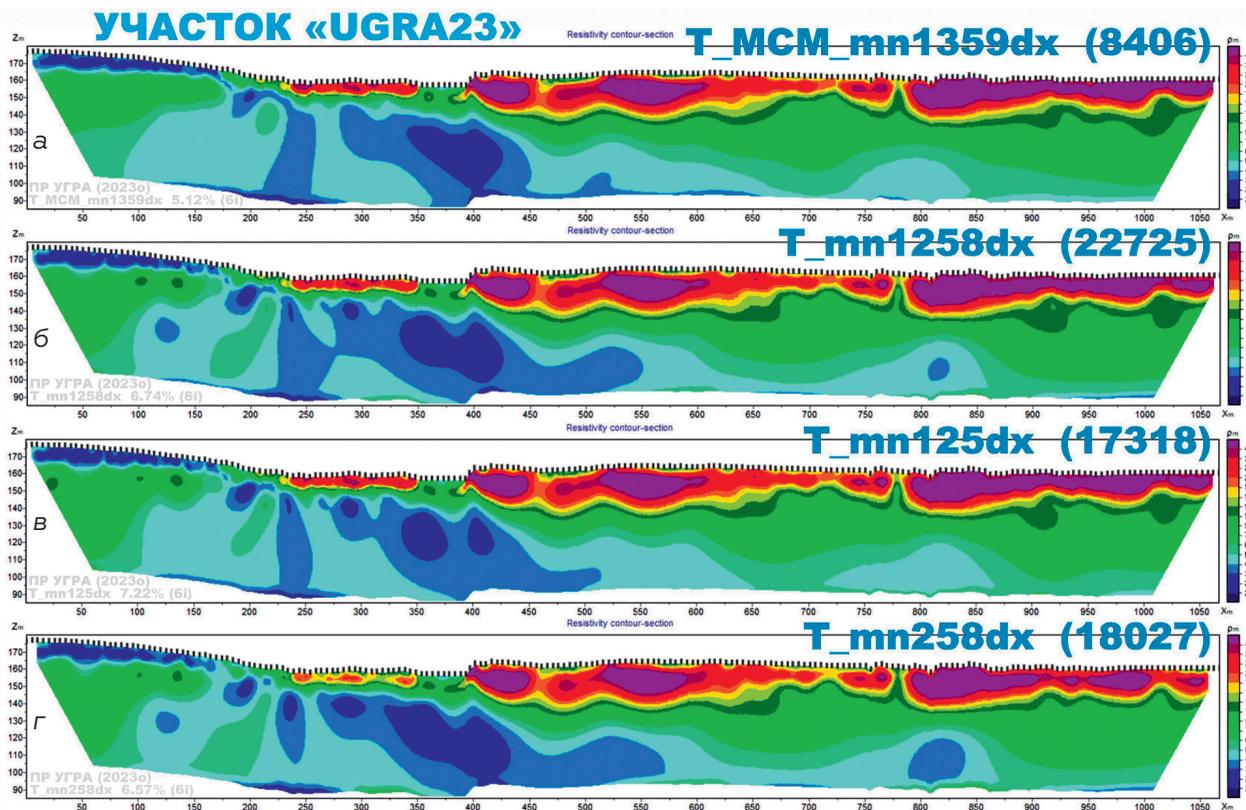


Рис. 3. Модели по данным стандартных (а) и раздельных (б, в, г) измерений

### Количественное сравнение моделей и качественный анализ параметра сходства

Для количественного сравнения полученных двумерных моделей выполнены расчеты величины Sim (Similarity, сходство), значение которой показывает на какую величину (Dн) в процентах (от сопротивления базовой модели) сопротивление в ячейке модели сравнения ( $\rho^{cp}$ ) меньше ( $Sim < 100\%$ ), больше ( $Sim > 100\%$ ) или совпадает ( $Sim = 100\%$ ) с сопротивлением в ячейке базовой модели ( $\rho^{баз}$ ).

$$Sim = 100\% + Dн \cdot 100\%,$$

$$\text{где } Dн = (\ln \rho^{cp} - \ln \rho^{баз}) / \ln \rho^{баз}.$$

В качестве базовой модели для каждого из участков опробования использована модель, рассчитанная по данным стандартной последовательности измерений T\_MCM\_mn1359dx. Предлагаемый параметр сходства демонстрирует именно сходство, степень близости сравниваемых значений УЭС в соответствующих ячейках моделей, в отличие от традиционно используемой среднеквадратической ошибки, направленной на демонстрацию различий. Действительно, на разрезе сходства (рис. 4) модели, рассчитанной по совокупности данных T\_mn1258dx (рис. 3б), с моделью по данным T\_MCM\_mn1359dx (рис. 3а) преобладают изолинии со значением 100%, так как основная часть удельных сопротивлений в соответствующих ячейках моделей совпадает на сто процентов, «стопроцентное попадание». Изолинии проведены с шагом 5% (от 75 до 125%), однако на всем разрезе сходства (рис. 4) выявляется около десятка областей, незначительных по площади и расположенных в основном в приповерхностной части начала профиля (ПК 0 – 250 м), для которых значения УЭС модели сравнения (T\_mn1258dx) отличаются от соответствующих значений базовой модели (T\_MCM\_mn1359dx) более чем на 5%. Эти области оконтурены изолиниями 95 и 105%, а значения УЭС модели сравнения в них меньше и больше значений сопротивлений базовой модели, соответственно. На разрезе сходства дополнительно использована градиентная цветовая заливка от значения 90% (интенсивный синий) до значения 110% (интенсивный красный) с переходом от синего цвета к красному на значении 100% (белый цвет). Этот прием наглядно подчеркивает отсутствие (на разрезе сходства) областей, отличающихся по значениям УЭС более чем на 10%, так как при визуальном анализе, кроме отсутствия изолиний со значениями 90 и 110%, также не выявляются области с интенсивной заливкой синим и красным цветом. Таким образом, качественный ана-

лиз разреза значений сходства приводит к выводу о совпадении этих двух моделей и предположению об их эквивалентности. Аналогичные результаты получены для участка VLGR23.

### Количественный анализ разрезов сходства

Значения параметра сходства получены для всех моделей двух участков опробования и использованы для нахождения количественных оценок медианного значения (med), стандартного отклонения (StDev) и плотности вероятности этого параметра. Результаты расчетов представлены в табличном (уч. UGRA23 – табл. 1а, уч. VLGR23 – табл. 1б) и графическом (уч. UGRA23 – рис. 5а, уч. VLGR23 – рис. 5б) виде. Названия моделей (name) указаны в строке 0 (столбцы N 1–14) и соответствуют названиям протоколов данных отдельных измерений. Оценки значений плотности вероятности сходства для основных квантилей (%), столбец 0) указаны для каждой модели (строки n 1–11) совместно с оценками стандартного отклонения (StDev, строка n 12), по которым отсортированы модели, и количеством измерений (NdU, строка n 13) в файлах данных. Для представленного на рис. 4 разреза сходства (модель T\_mn1258dx) количественные оценки указаны в столбце 3 табл. 1а. Медианное значение параметра сходства (строка 6) составило 99,98%, а значение стандартного отклонения (строка 12) – 2,42%. Следовательно, наблюдаемые на рис. 4 изолинии параметра сходства со значениями 95, 100 и 105% формально отстоят друг от друга менее чем на два значения стандартного отклонения ( $2,42 \times 2 = 4,84\%$ ), а изолинии, отстоящие от медианного значения на величину более четырех значений стандартного отклонения (90 и 110%), на разрезе отсутствуют. Таким образом, основная часть значений сходства (98% из 15 000) для модели T\_mn1258dx лежит в «окрестности» медианного значения (94,44–105,7%, рис. 5а, ось абсцисс) и лишь малая часть (2% от 15000) аномальных значений (около 300 шт.), связанных, по-видимому, с особенностями работы алгоритма инверсии, за ее пределами (рис. 5а, кривая 1258dx красного цвета).

Следовательно, этот результат количественного анализа значений сходства подтверждает вывод о близости двух рассмотренных моделей и предположение об их эквивалентности, полученные после качественного и количественного сравнения разрезов УЭС (рис. 3а и 3б) и повторно после качественного анализа разреза параметра сходства (рис. 4). Аналогичный результат получен и для участка VLGR23.

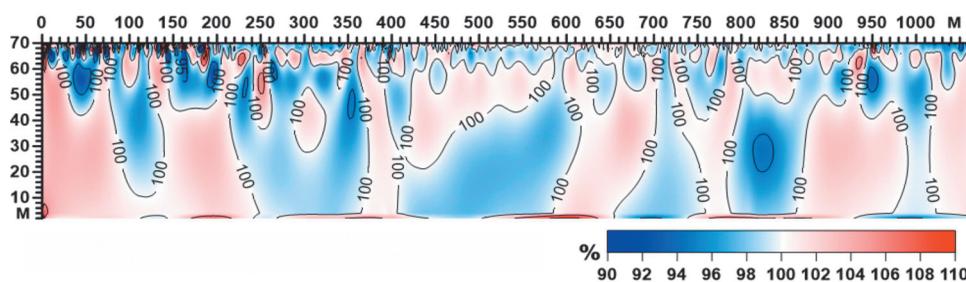


Рис. 4. Разрез сходства модели T\_1258dx и модели T\_1359dx для участка UGRA23

Таблица 1  
Оценка сходимости моделей для участков UGRA23 (а) и VLGR23 (б)

а

n \ N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>0</b>	% \ name	<b>2&amp;8*dx</b>	<b>125dx</b>	<b>1258dx</b>	<b>28dx</b>	<b>258dx</b>	<b>12dx</b>	<b>2&amp;8dx</b>	<b>2&amp;8AO1</b>	<b>2&amp;8*AO1</b>	<b>1dx</b>	<b>2dx</b>	<b>5dx</b>	<b>8dx</b>
1	0 (min)	29.12	53.28	4.29	8.19	13.23	79.14	2.39	34.84	74.50	76.90	73.40	62.18	0.00
2	1	93.57	94.33	94.44	89.69	88.75	93.39	87.71	86.43	91.24	92.09	89.96	75.94	70.21
3	5	97.82	96.79	96.29	94.64	93.71	96.08	94.48	95.06	96.81	95.15	93.51	87.30	81.19
4	10	98.60	97.59	97.25	96.29	95.65	97.17	96.26	96.51	97.94	96.55	94.97	89.71	86.62
5	25	<b>99.27</b>	<b>98.85</b>	<b>98.52</b>	<b>98.04</b>	<b>97.59</b>	<b>98.91</b>	<b>98.04</b>	<b>98.17</b>	<b>98.97</b>	<b>98.44</b>	<b>97.72</b>	<b>93.94</b>	<b>92.49</b>
6	50 (med)	<b>100.00</b>	<b>100.07</b>	<b>99.98</b>	<b>99.63</b>	<b>99.50</b>	<b>100.39</b>	<b>99.47</b>	<b>99.87</b>	<b>100.31</b>	<b>100.45</b>	<b>100.37</b>	<b>97.27</b>	<b>97.26</b>
7	75	<b>100.77</b>	<b>101.28</b>	<b>101.26</b>	<b>100.91</b>	<b>101.01</b>	<b>102.24</b>	<b>101.05</b>	<b>101.64</b>	<b>101.79</b>	<b>102.61</b>	<b>102.73</b>	<b>102.04</b>	<b>101.46</b>
8	90	101.74	102.72	102.50	102.24	102.98	104.23	102.90	103.14	103.25	105.20	105.04	105.76	105.06
9	95	102.59	104.11	103.31	103.13	103.94	105.20	104.00	104.17	104.25	106.78	106.75	108.89	107.46
10	99	106.09	106.82	105.69	107.10	108.00	116.13	108.42	109.45	108.37	115.18	120.30	114.42	115.73
11	100 (max)	129.33	120.81	119.40	132.95	131.72	132.14	151.70	177.91	425.87	262.93	136.31	145.38	140.48
<b>12</b>	<b>StDev</b>	<b>2.20</b>	<b>2.36</b>	<b>2.42</b>	<b>3.06</b>	<b>3.48</b>	<b>3.66</b>	<b>3.69</b>	<b>3.81</b>	<b>4.01</b>	<b>4.18</b>	<b>4.85</b>	<b>7.09</b>	<b>8.29</b>
<b>13</b>	<b>NdU</b>	<b>4626</b>	<b>17318</b>	<b>22725</b>	<b>10994</b>	<b>18027</b>	<b>10285</b>	<b>4626</b>	<b>2474</b>	<b>2474</b>	<b>4698</b>	<b>5587</b>	<b>7033</b>	<b>5407</b>

б

n \ N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<b>0</b>	% \ name	<b>T2&amp;8*</b>	<b>T2&amp;8*AO1</b>	<b>T_125</b>	<b>T_1258</b>	<b>T_12</b>	<b>T_2</b>	<b>T_28</b>	<b>T_2&amp;8</b>	<b>T_258</b>	<b>T2&amp;8AO1</b>	<b>T_1</b>	<b>T_5</b>	<b>T_58</b>	<b>T_8</b>
1	0 (min)	80.68	70.94	72.23	71.74	71.77	58.09	55.90	49.44	54.81	41.90	67.48	32.51	28.82	31.25
2	1	92.47	91.74	88.32	88.50	86.14	76.39	75.79	73.24	74.74	73.86	76.41	64.43	64.44	65.38
3	5	97.88	96.40	91.60	91.57	89.59	89.93	91.19	91.01	90.96	90.92	86.43	85.21	84.71	84.25
4	10	98.44	97.18	94.21	93.96	92.82	92.34	93.42	93.54	93.45	93.09	88.08	91.80	92.33	90.65
5	25	<b>99.22</b>	<b>98.06</b>	<b>98.15</b>	<b>98.18</b>	<b>95.46</b>	<b>96.21</b>	<b>97.97</b>	<b>98.06</b>	<b>97.90</b>	<b>97.40</b>	<b>90.96</b>	<b>98.21</b>	<b>98.19</b>	<b>95.92</b>
6	50 (med)	<b>99.73</b>	<b>98.95</b>	<b>100.08</b>	<b>100.52</b>	<b>97.90</b>	<b>98.64</b>	<b>100.74</b>	<b>100.30</b>	<b>101.07</b>	<b>99.54</b>	<b>94.64</b>	<b>100.37</b>	<b>100.73</b>	<b>99.68</b>
7	75	<b>100.17</b>	<b>99.78</b>	<b>100.96</b>	<b>101.74</b>	<b>99.93</b>	<b>100.93</b>	<b>101.87</b>	<b>101.47</b>	<b>102.48</b>	<b>100.67</b>	<b>99.41</b>	<b>101.65</b>	<b>102.79</b>	<b>101.99</b>
8	90	101.22	102.24	102.61	103.05	102.50	102.84	103.84	103.56	104.24	103.27	104.66	104.09	105.19	105.66
9	95	102.48	104.33	103.61	104.45	103.97	104.29	105.66	105.00	106.37	104.88	107.44	107.85	107.82	112.44
10	99	105.26	110.50	108.74	107.83	108.26	112.46	113.11	113.31	113.18	117.37	114.54	117.75	117.99	138.02
11	100 (max)	140.58	166.39	144.19	148.95	136.38	165.79	173.02	186.91	177.68	200.91	142.84	264.51	274.27	303.73
<b>12</b>	<b>StDev</b>	<b>1.94</b>	<b>3.07</b>	<b>3.74</b>	<b>4.02</b>	<b>4.24</b>	<b>5.62</b>	<b>5.76</b>	<b>6.04</b>	<b>6.05</b>	<b>6.25</b>	<b>7.03</b>	<b>8.92</b>	<b>9.18</b>	<b>11.38</b>
<b>13</b>	<b>NdU</b>	<b>4565</b>	<b>2265</b>	<b>15274</b>	<b>21086</b>	<b>8921</b>	<b>4895</b>	<b>10707</b>	<b>4565</b>	<b>17060</b>	<b>2265</b>	<b>4026</b>	<b>6353</b>	<b>12165</b>	<b>5812</b>

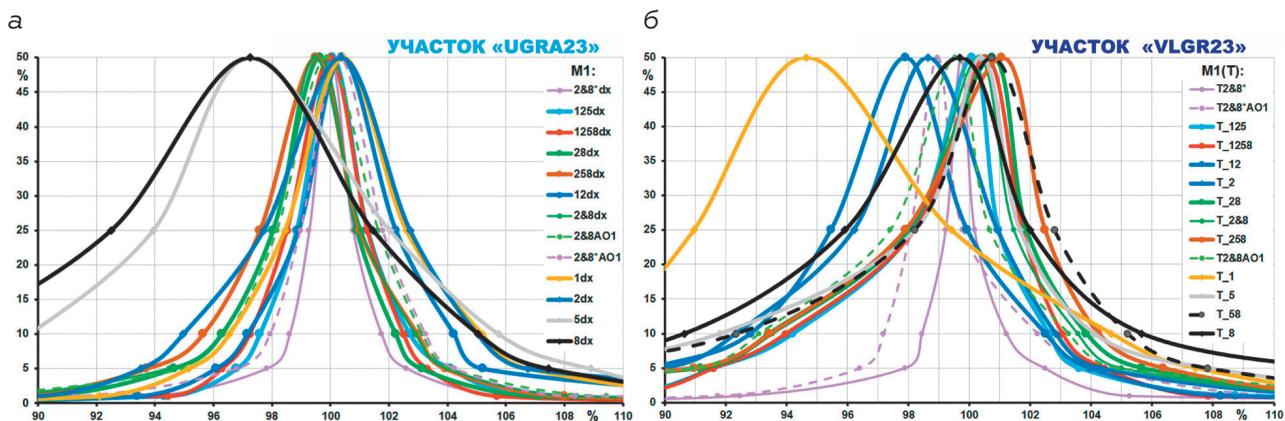


Рис. 5. Оценки плотности распределения сходимости для UGRA23 (а) и VLGR23 (б)

**Избыточность данных отдельных измерений и рациональная методика**

Количественные оценки параметра сходимости (табл. 1), выполненные для каждого из участков, их графическое представление (рис. 5) указывают на возможность обобщения полученного при анализе модели T\_mn1258dx (уч. UGRA23) результата на большинство других моделей. Действительно, несмотря на изменение медианных значений сходимости, значений стандартного отклонения, лишь для некоторых моделей (T\_5dx, T\_8dx уч. UGRA23 и T\_1dx уч. VLGR23) эти изменения существенны. Для участка VLGR23 значения стандартного отклонения и разброс оценок

медиан сходимости несколько больше, чем для участка UGRA23, однако, на наш взгляд, этот факт не является препятствием для сделанного обобщения. Таким образом, близость полученных геоэлектрических моделей указывает на близость полевых методик, по которым были получены данные, использованные для расчета этих моделей с помощью программы двумерной инверсии. Следовательно, любой вариант методики отдельных измерений, обеспечивающий совокупность данных, соответствующую одной из полученных эквивалентных моделей, можно рассматривать в качестве рационального. Как же сделать выбор? Основным, главным критерием рациональности методики для

этих двух уже обработанных участков, по нашему мнению, является минимальное число измерений. Однако объемы совокупностей данных отдельных измерений с тремя ( $T_{125dx}$ ,  $T_{258dx}$ ) и четырьмя ( $T_{1258dx}$ ) приемными линиями для обоих участков (табл. 1, строка п 13) значительно превосходят (в разы!) объем данных стандартной методики ( $T_{MCM\_mn1359dx}$ , 8406 отсчетов для уч. UGRA23 и 7611 отсчетов для уч. VLGR23).

Совокупность данных отдельных измерений с двумя приемными линиями  $T_{28dx}$  также содержит больше измерений (10 994 отсчетов для уч. UGRA23 и 10 707 отсчетов для уч. VLGR23), чем данные стандартной методики, но превышение не столь значительное. Более того, эта совокупность после равномерного прореживания данных вдоль профиля содержит в два раза меньше измерений ( $T_{2\&8dx}$ ), а повторное равномерное прореживание уменьшает общее число отсчетов еще в два раза ( $T_{2\&8AO1}$ ). На рис. 6 для одной расстановки совместно представлены разрезы точек записей установки  $A_{mn}$  этих двух совокупностей прореженных данных, а сами полевые данные для них взяты из совокупности  $T_{28dx}$  (рис. 6, кружки бледных красного и зеленого цветов). Необходимо отме-

тить, что для получения полевых данных совокупности  $T_{2\&8AO1}$  (рис. 6, кружки синего цвета) достаточно только нечетных электродов (удвоенное расстояние между электродами), в отличие от данных для совокупности  $T_{2\&8dx}$  (рис. 6, кружки синего и красного цветов).

**Геоэлектрические модели для прореженных данных и разрезы сходства**

Подготовленные с использованием совокупности  $T_{mn28dx}$  прореженные данные из-за ограничения объема публикации, к сожалению, не представлены. Геоэлектрические модели, полученные по данным совокупностей  $T_{mn2\&8dx}$  (рис. 7в, 7ж) и  $T_{mn2\&8AO1}$  (рис. 7г, 7з), представлены совместно с геоэлектрическими моделями полной совокупности отдельных измерений  $T_{mn1258dx}$  (рис. 7а, 7д) и совокупности  $T_{mn28dx}$  (рис. 7б, 7е) для двух участков опробования с указанием (в скобках рядом с именем модели) объема измерений.

Аналогично уже представленным выше результатам качественное визуальное сходство геоэлектрических моделей прореженных данных ( $T_{mn2\&8dx}$  и  $T_{mn2\&8AO1}$ ) с моделью по совокупности  $T_{mn28dx}$  продемонстрировано разрезами сходства (рис. 8а, б – уч. UGRA23, рис. 8в, г – уч. VLGR23), а также количественными оценками плотности распределения и статистических атрибутов параметра сходства, представленными в табличном (табл. 1а, столбцы 1 и 9 – уч. UGRA23, табл. 1б, столбцы 1 и 2 – уч. VLGR23) и графическом (рис. 5а – уч. UGRA23, рис. 5б – уч. VLGR23, кривые фиолетового цвета) виде. Факт использования в качестве базовой при расчетах сходства, модели по совокупности  $T_{mn28dx}$  отмечен в тексте названия рис. 8, отражен в таблицах и на графиках добавлением в имена моделей сравнения символа \*. Полученные результаты качественного визуального сравнения моделей по прореженным данным, незначительные (менее 2%) смещения медианных значений сходства и удовлетворительные оценки стандартного отклонения сходства (до 5%) указывают на эквивалентность моделей, на их близость к мо-

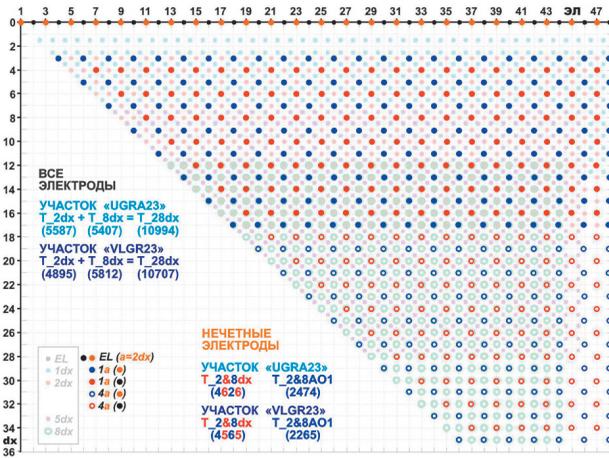


Рис. 6. Разрез точек записи для прореженных отдельных измерений

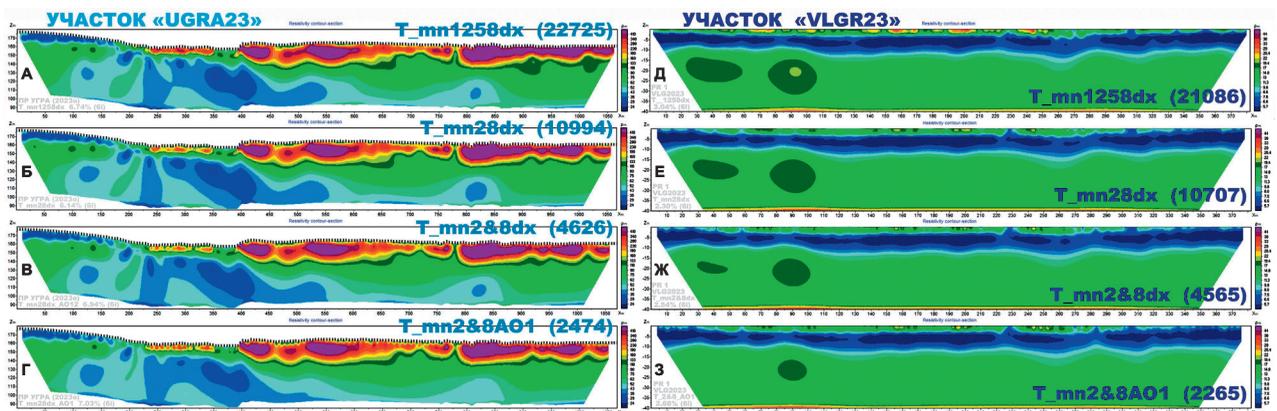


Рис. 7. Геоэлектрические модели по результатам инверсии полной совокупности (а, д) и комбинаций непрореженных (б, е), прореженных по пикетам (в, ж) и по разносам (г, з) данных отдельных измерений для участков UGRA23 (а–г) и VLGR23 (д–з)

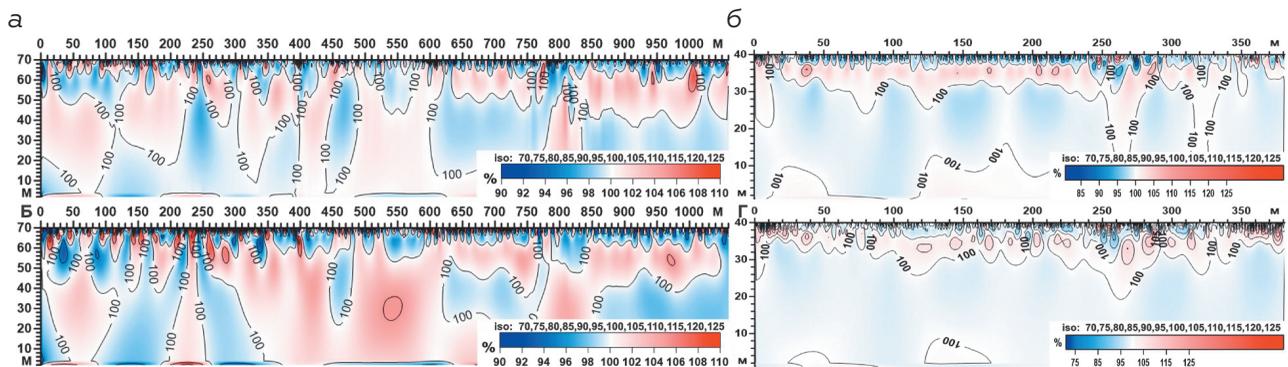


Рис. 8. Разрезы сходства моделей  $T_{mn2\&8dx}$  (а, в) и  $T_{mn2\&8AO1}$  (б, г) с моделью  $T_{mn28dx}$  для участков UGRA23 (а, б) и VLGR23 (в, г)

дели по совокупности данных  $T_{mn28dx}$ , которая, как было показано выше, эквивалентна и модели по полной совокупности данных отдельных измерений  $T_{mn1258dx}$  с максимальным числом отсчетов, и модели по данным минимального объема измерений  $T_{MCM\_mn1359dx}$ .

**Выводы**

На каждом из двух участков опробования наиболее предпочтительным является вариант методики с удвоенным (!) расстоянием между электродами, для которого совокупность данных ( $T_{mn2\&8AO1}$ ) содержит значительно (в три раза!) меньше независимых измерений (2474 – уч. UGRA23, 2265 – уч. VLGR23), чем совокупность данных ( $T_{MCM\_mn1359dx}$ ) стандартных измерений (8406 – уч. UGRA23, 7611 – уч. VLGR23). Необходимо отметить, что этот, наиболее предпочтительный вариант методики для участка UGRA23 (около 250 отсчетов на 100 м, при  $dx = 10$  м) весьма близок по плотности равномерных независимых измерений к хорошо забытой и почти полностью ушедшей в историю методике сплошных электрических зондирований (СЭЗ,  $dx = 10$  м), активно применявшейся при решении задач инженерно-геологической направленности 20–25 лет назад, до появления возможности измерений многоэлектродной многоканальной аппаратурой, являющейся необходимой, неотъемлемой частью эффективного использования технологии электротомографии.

Выявленные с помощью прореживания данных отдельных измерений по двум участкам опробования варианты методик электротомографии, дающие совокупности данных  $T_{mn2\&8dx}$  и  $T_{mn2\&8AO1}$  с числом измерений меньшим, чем совокупность данных стандартных измерений, являются рациональными,

обоснованными. При дальнейшем изучении опробованных участков целесообразно применение именно этих или близких к ним методик, позволяющих получать данные метода электротомографии, аналогичные (по объему и равномерности) данным указанных совокупностей.

**Заключение**

Представленные для двух участков результаты полевого опробования отдельных измерений методом электротомографии продемонстрировали высокую избыточную плотность первичных данных и широкие возможности их комбинирования. Результаты двумерной инверсии нескольких совокупностей данных, созданных из наборов экспериментальных измерений встречными трехэлектродными установками с четырьмя приемными линиями постоянной длины, проанализированы совместно с результатами для данных стандартной методики электротомографии. Выводы по результатам качественного анализа двумерных геоэлектрических моделей для двух участков опробования подтверждены результатами количественного анализа. Количественное сравнение моделей проведено с использованием параметра сходства, предложенного авторами, оценками его плотности вероятности и статистических атрибутов. Результаты статистического анализа значений параметра сходства моделей использованы для выявления рационального и обоснованного варианта методики электротомографии. Выявленный рациональный вариант методики содержит значительно меньше независимых измерений по сравнению со стандартным вариантом.

Положительная рецензия 09.01.2025

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д. Многоsegmentная технология измерений методом электротомографии // Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения – 2019», секция «Геология». Москва, МГУ, Россия, 15–25 апреля 2019 года (16.04.19, <https://conf.msu.ru/rus/event/5604/>, 7 с.).

2. Dahlin T., Zhou B. Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *NearSurface Geophysics* 4 (2), 2006, 113–123. <http://dx.doi.org/10.3997/1873-0604.2005037>.  
 3. Dahlin T., Bing Z. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 2004, 52 (5), 379–398. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x>.  
 4. Loke M.H., Wilkinson P.B., Chambers J.E., Uhlemann S.S., Sorensen J.P.R. Optimized arrays for 2-D resistivity survey lines with

a large number of electrodes. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 112(1), 136–146. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2014.11.011.

5. Martorana R., Capizzi P., D'Alessandro A., Luzio D. Comparison of different sets of array configurations for multichannel 2D ERT acquisition. *Journal of Applied Geophysics* (2016). DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.12.012.

6. Martorana R., Fiandaca G., Casas Ponsati, A., Cosentino, P.L. Comparative tests on different multi-electrode arrays using models in near-surface geophysics. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2009, 6 (1), 1–20. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/001>.

7. Szalai S., Koppan A., Szokoli K., Szarka L. Goelectric imaging properties of traditional arrays and of the optimized Stummer configuration. *Near Surface Geophysics*, 2013, 11 (1), 51–62. <http://dx.doi.org/10.3997/1873-0604.2012058>.

8. Wilkinson P.B., Loke M.H., Meldrum P.I., Chambers J.E., Kuras, O., Gunn D.A., Ogilvy R.D. [2012] Practical aspects of applied optimized survey design for electrical resistivity tomography. *Geophysical Journal International*, 2012, 189 (1), 428–440. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05372.x>.

9. Xu B., Noel M. On the completeness of data sets with multi-electrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, 1993, 41 (6), 791–801. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2478.1993.tb00885.x>.

## REFERENCES

1. Bolshakov DK, Modin IN, Efremov KD. Multisegment technology of measurements by electrotomography. Abstracts of the Scientific Conference “Lomonosov Readings – 2019”, section “Geology”, Moscow, Moscow State University, Russia, April 15–25, 2019 (16.04.19, <https://conf.msu.ru/rus/event/5604/>, 7 p.) (in Russian).

2. Dahlin T, Zhou B. Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *NearSurface. Geophysics*. 2006; 4 (2):113–123. <http://dx.doi.org/10.3997/1873-0604.2005037>.

3. Dahlin T, Bing Z. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays. *Geophysical Prospecting*. 2004; 52 (5): 379–398. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x>.

4. Loke MH, Wilkinson PB, Chambers JE, Uhlemann SS, Sorensen JPR. Optimized arrays for 2-D resistivity survey lines with a large number of electrodes. *Journal of Applied Geophysics*. 2015; 112 (1): 136–146. DOI:10.1016/j.jappgeo.2014.11.011.

5. Martorana R, Capizzi P, D'Alessandro A, Luzio D. Comparison of different sets of array configurations for multichannel 2D ERT acquisition. *Journal of Applied Geophysics*. 2016. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.12.012.

6. Martorana R, Fiandaca G, Casas Ponsati A, Cosentino PL. Comparative tests on different multi-electrode arrays using models in near-surface geophysics. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2009; 6 (1): 1–20. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/001>.

7. Szalai S, Koppan A, Szokoli K, Szarka L. Goelectric imaging properties of traditional arrays and of the optimized Stummer configuration. *Near Surface Geophysics*. 2013; 11 (1): 51–62. <http://dx.doi.org/10.3997/1873-0604.2012058>.

8. Wilkinson PB, Loke MH, Meldrum PI, Chambers JE, Kuras O, Gunn DA, Ogilvy RD. Practical aspects of applied optimized survey design for electrical resistivity tomography. *Geophysical Journal International*. 2012; 189 (1): 428–440. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05372.x>.

9. Xu B, Noel M. On the completeness of data sets with multi-electrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*. 1993; 41 (6): 791–801. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2478.1993.tb00885.x>.

## ОБ АВТОРАХ



**БОЛЬШАКОВ**  
Дмитрий Константинович

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В 1993 г. окончил геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности «геолог-геофизик». Область научных интересов:

малоглубинная геофизика, разработка и совершенствование технологий электроразведки. Соавтор более 50 научных публикаций, в том числе 6 учебных пособий.



**МОДИН**  
Игорь Николаевич

Доктор технических наук, профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В 1976 г. окончил геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности «геолог-геофизик». Область научных интересов:

малоглубинная геофизика, анализ комплексных геофизических данных, разработка новых технологий и методов электроразведки. Автор и соавтор более 300 научных публикаций, в том числе более 23 монографий и учебников для вузов.