

# ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНАЯ МЕТОДИКА А. И. БАДАНИНА ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

## ELECTRICAL EXPLORATION TECHNIQUE BY A. I. BADANIN FOR ENGINEERING AND GEOLOGICAL SURVEYS

К. В. Романевич, А. Д. Басов, К. А. Дорохин, О. В. Бойко, С. В. Андрианов, Е. В. Костромитина, ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург

K. V. Romanevich, A. D. Basov, K. A. Dorokhin, O. V. Boyko, S. V. Andrianov, E. V. Kostromitina, JSC «Scientific Research, Design and Survey Institute «Lenmetrogioprotrans», Saint Petersburg

В работе представлена методика альтернативной электротомографии, разработанная старшим научным сотрудником института А. И. Баданиным (1957–2019). Методика электрометрических наблюдений основана на выполнении профилирования с установкой градиента и перекрытием на разных участках в пределах обработки одного профиля. В результате по этим данным проводится двумерная интерпретация, аналогичная двумерной инверсии в стандартной электротомографии. Характерной чертой методики является отсутствие необходимости развертывания электроразведочных кос и подсоединения электродов к косе, а также необходимости перемещения многоэлектродной расстановки по профилю при работе на длинных профилях. Электроразведочная методика А. И. Баданина применяется при производстве геофизических (электротомографических) исследований для инженерных изысканий и геотехнического мониторинга транспортных тоннелей, а также может быть применена в ходе любых инженерно-геологических изысканий в качестве вспомогательного метода.

*The paper presents an alternative electrotomography technique developed by Alexander Badanin, a senior researcher at the Institute, died 2019. The technique of electrometric observations is based on profiling with the installation of a gradient and overlap in different areas within the development of one profile. As a result, a two-dimensional interpretation is carried out from these data, similar to two-dimensional inversion in electrotomography. A characteristic feature of the technique is the absence of the need to deploy electrotomography cable and connect electrodes to the cable line, as well as the need to move the multi-electrode array along the profile when working on long distances. Electroprospecting technique by Badanin A.I. is used in the geophysical (electro-tomographic) studies for engineering surveys and geotechnical monitoring of transport tunnels, and can also be used in the course of any engineering-geological surveys as an auxiliary method.*

Александр Иванович Баданин работал в научно-исследовательском отделе ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» с 2003 по 2019 г. в должности старшего научного сотрудника и основным направлением его деятельности являлась электроразведка. За это время им была разработана нестандартная методика электрометрических наблюдений, применявшаяся как при работах с дневной поверхностью, так и в подземных выработках. Особенностью этой методики является определенный порядок перемещения питающих и приемных заземлений вдоль профиля, позволяющий получать интегральный геоэлектрический разрез без использования кос и большого количества электродов. Такой порядок работы позволяет значительно сократить время полевых измерений и оперативно получать данные двумерной интерпретации для первоначальной оценки геотехнических условий и принятия решения о необходимости применения более де-

тальных методов геофизики и геотехники. В настоящее время методика А. И. Баданина в комплексе с другими методами инженерной геофизики применяется для инженерных изысканий и геотехнического мониторинга транспортных тоннелей и других подземных сооружений.

Александр Иванович получил квалификацию геофизика, сдав успешно выпускные экзамены и защитив диплом в 1982 г. на кафедре физики Земли Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени государственного университета имени А. А. Жданова (так назывался в те годы легендарный университет или коротко ЛГУ, а ныне известный как Санкт-Петербургский государственный университет).

### Методика электротомографических исследований

Методика электрометрических наблюдений, предложенная А. И. Баданиным, основа-

на на выполнении профилирования с установкой градиента и перекрытием на разных участках в пределах обработки одного профиля. В результате по этим данным проводится двумерная интерпретация, аналогичная двумерной инверсии в электротомографии. Характерной чертой методики является отсутствие необходимости развертывания электроразведочных кос и подсоединения многоэлектродной расстановки по профилю при работе на длинных профилях. Настоящая методика может быть отнесена к одному из вариантов т. н. альтернативной электротомографии, хотя и не описанной в [1].

### Порядок проведения работ

Полевые измерения производятся в несколько этапов.

1. Определяется необходимый разнос приемных электродов MN (1–5 м), выполняется подключение контактов MN к переносному

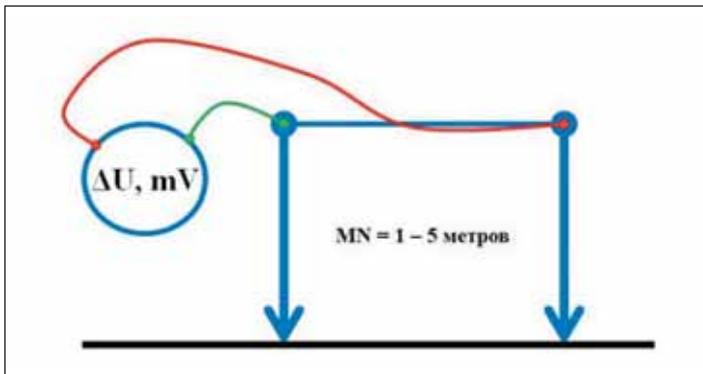
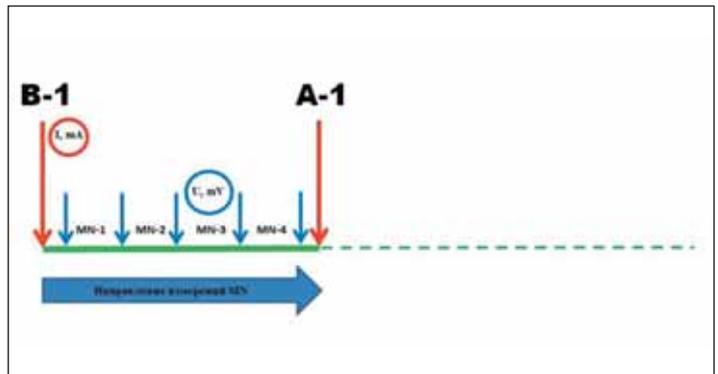
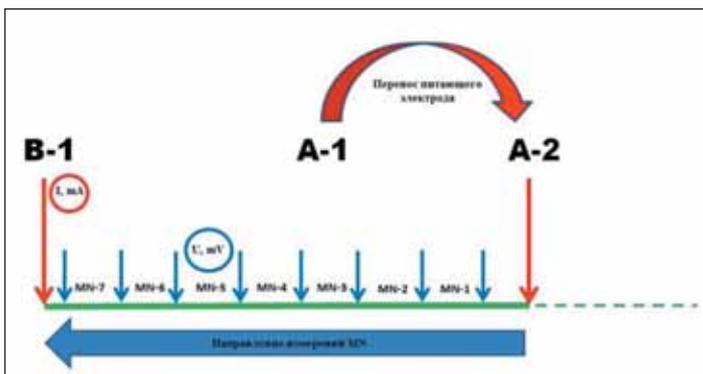
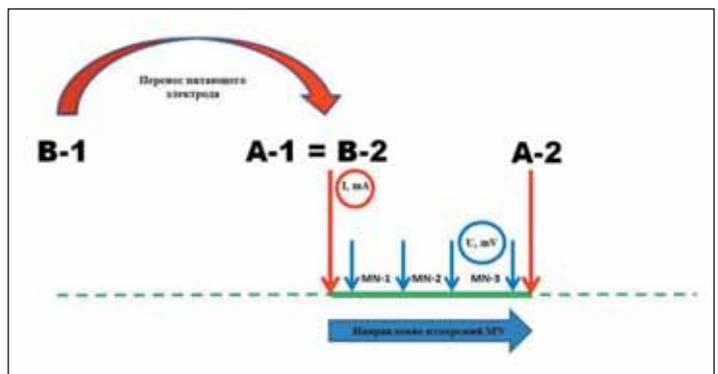
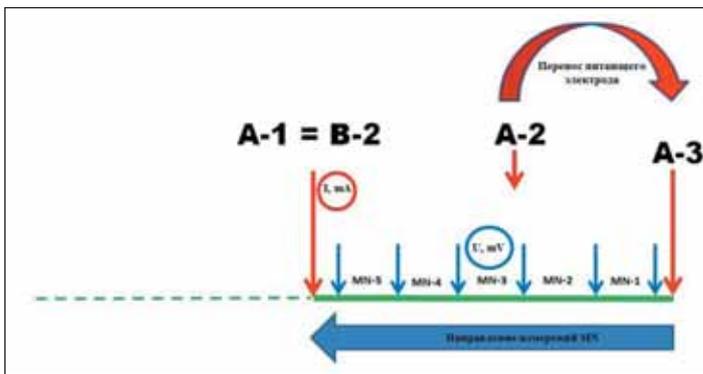
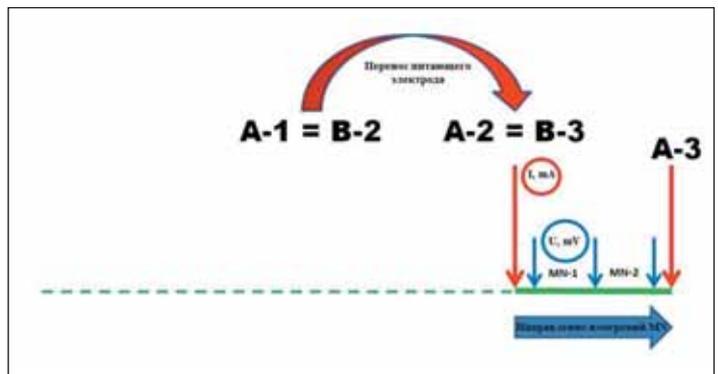


Рис. 1. Разнос приемных электродов MN для проведения измерений

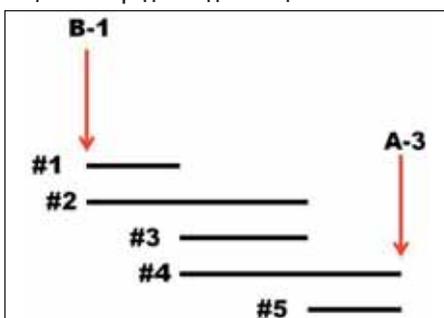
Рис. 2. Измерения  $\Delta U$  на участке профиля от В-1 до А-1Рис. 3. Перенос питающего электрода с позиции А-1 на позицию А-2, измерения  $\Delta U$  на участке профиля от А-2 до В-1Рис. 4. Перенос питающего электрода с позиции В-1 на позицию В-2 (место А-1), измерения  $\Delta U$  на участке профиля от В-2 до А-2Рис. 5. Перенос питающего электрода с позиции А-2 на позицию А-3, измерения  $\Delta U$  на участке профиля от А-3 до В-2Рис. 6. Перенос питающего электрода с позиции В-2 на позицию В-3 (место А-2), измерения  $\Delta U$  на участке профиля от В-3 до А-3

измерителю (рис. 1). Работа с разномом MN подразумевает двумя операторами, один из которых перемещается с измерителем.

2. Производится установка параметров измерителя (выбирается рабочая частота).

3. Производится заземление двух питающих электродов: А-1 и В-1. Для забивки электродов

Рис. 7. Пять участков профиля от позиции питающего электрода В-1 до позиции А-3



применяют молоток или кувалду. Один из питающих электродов находится в пункте стояния генератора, другой – относится на необходимое расстояние при помощи катушки (в зависимости от общей глубины исследований, первый разнос может достигать 100–500 м и более). Профиль располагается вдоль прямой линии, допускаются плавные повороты профиля. Координаты положения питающих электродов определяются с помощью GPS.

4. Производится установка параметров генератора (задается рабочая частота и амплитуда тока в питающей линии). Оптимальные параметры определяются опытными работами.

5. Производятся измерения  $\Delta U$  разномом MN вдоль участка профиля от электрода В-1 до электрода А-1 (рис. 2). После отработки участка профиля питающая линия отключается.

6. Производится перенос питающего электрода дальше по профилю с позиции А-1 на позицию А-2, после чего производится измерения  $\Delta U$  разномом MN вдоль участка профиля от электрода А-2 до электрода В-1 (рис. 3). После отработки участка профиля питающая линия отключается.

7. Производится перенос питающего электрода с позиции В-1 на позицию В-2 (место А-1), после чего производится измерения  $\Delta U$  разномом MN вдоль участка профиля от электрода В-2 до электрода А-2 (рис. 4). После отработки участка профиля питающая линия отключается.

8. Производится перенос питающего электрода дальше по профилю с позиции А-2 на позицию А-3, после чего производится измерения  $\Delta U$  разномом MN вдоль участка профиля от электрода А-3 до электрода В-2 (рис. 5). После отработки участка профиля питающая линия отключается.

9. Производится перенос питающего электрода с позиции В-2 на позицию В-3, после чего производятся измерения  $\Delta U$  разном MN вдоль участка профиля от электрода В-3 до электрода А-3 (рис. 6).

Таким образом, отрабатывается пять участков профиля от позиции питающего электрода В-1 до позиции А-3 (рис. 7). В дальнейшем профиль может быть продолжен дальше в таком же порядке.

Высотн-плановая привязка профиля необходима для правильной обработки интерпретации данных. Обычно ее выполняют параллельно с процессом измерений. Для этого положение каждого электрода отмечается и сохраняется в приемнике GPS. Также проводится дополнительное определение рельефа профиля по глазомерной или инструментальной съемке.

### Обработка полученных данных

Обработка и быстрая 2-D инверсия для данной методики выполняется с использованием метода наименьших квадратов стандартными программами инверсии [2]. Двумерная 2-D модель, используемая программой инверсии, состоит из ряда прямоугольных блоков, расположение блоков слабо связано с распределением точек на псевдоразрезе. Распределение и размер блоков автоматически генерируется программой, так что число блоков обычно не превышает числа точек измерения.

Расположение блоков, используемых в модели вместе с точками записи на псевдоразрезе при работе с косой, показано на рис. 8 (верхняя схема), там же (нижняя схема) показано расположение блоков с точками записи на псевдоразрезе при работе по приводимой методике.

Таким образом, можно видеть, что распределение точек записи на псевдоразрезе при работе по приводимой методике гораздо более редкое, что однако позволяет давать грубую оценку распределения сопротивлений горных пород в массиве. Кроме того, такая грубая оценка может быть получена для значительно больших профилей за то же время работы, чем при работе с косой.

Как показывает практика, реальная геологическая среда часто оказывается неоднородной как по горизонтали, так и по вертикали, особенно если речь идет о горных районах, где чаще всего проектируются тоннельные переходы. В таких условиях общая задача электроразведки (электротомографии) сводится к интерполяции между скважинами, и поиску ответа на вопрос: «Как геологическое строение массива меняется между парой скважин?». Эта задача-минимум для электротомографических исследований решается различными специалистами по-разному в зависимости от имеющейся в наличии аппаратуры и опыта. Наш опыт проведения электроразведочных работ показывает, что приведенная здесь методика позволяет значительно повысить производительность работ, не требует применения многоканаль-

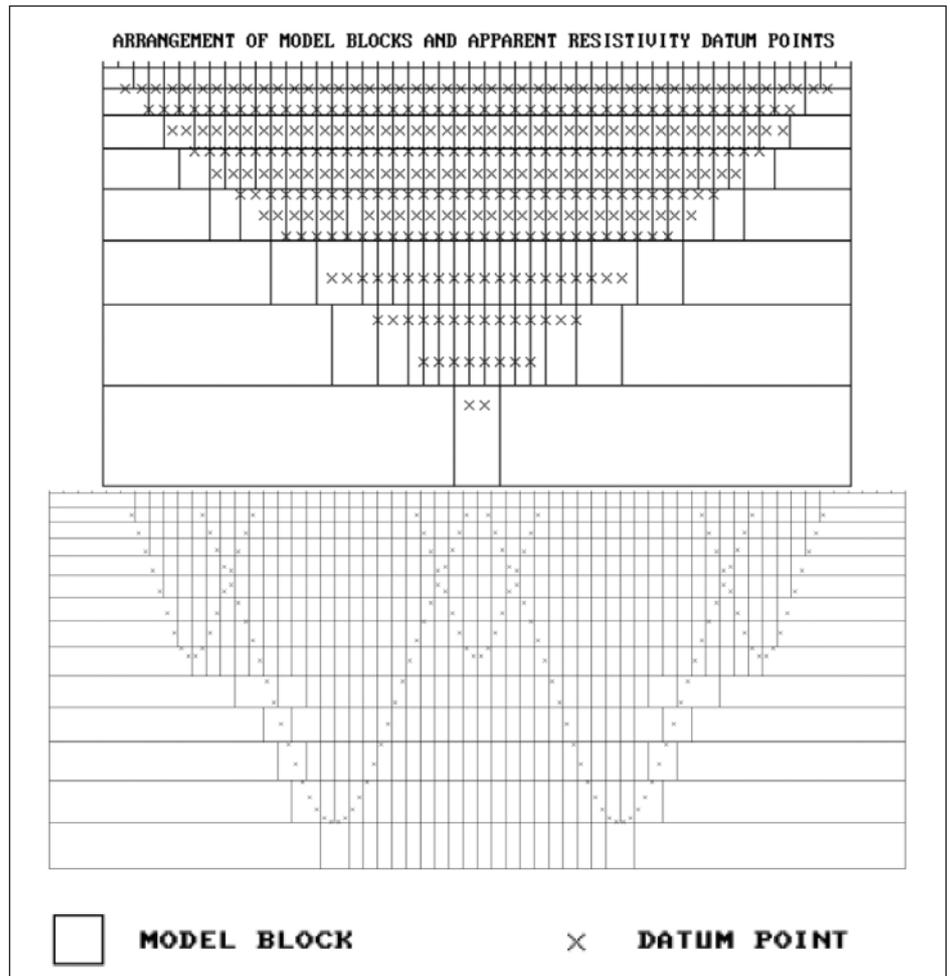


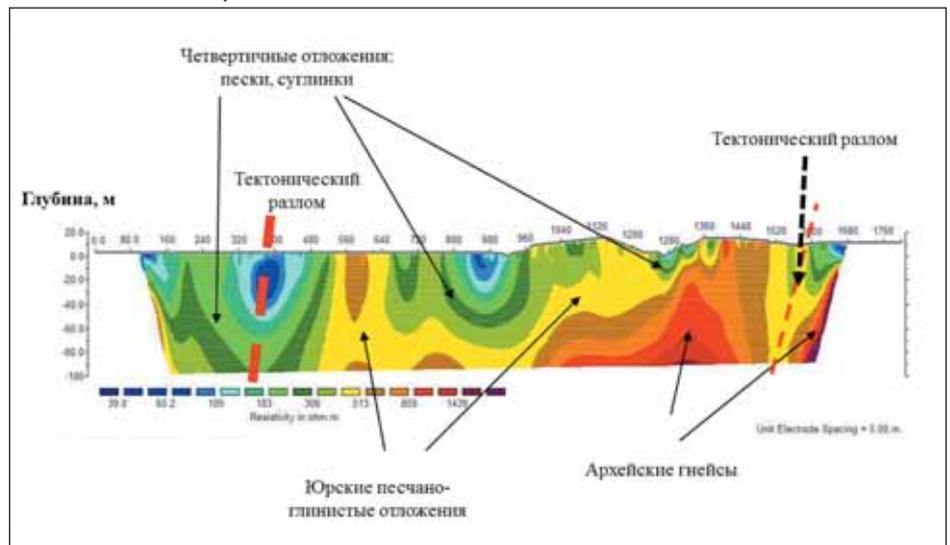
Рис. 8. Расположение блоков, используемых в модели вместе с точками записи на псевдоразрезе при работе с косой (вверху) и при работе по приводимой методике (внизу)

ных кос и позволяет обрабатывать длинные профили за сравнительно малые отрезки времени, хотя и с потерей части информации. Однако получаемых оперативно результатов достаточно для принятия решения о применении более детальных методов геофизики и/или геотехники включая бурение.

Методика А. И. Баданина является экспресс-методом при обработке длинных про-

филей. В ходе исследований могут быть локализованы аномальные интервалы, в пределах которых уже будут выполнены детальные работы. Это особенно актуально при изысканиях (а также мониторинге) при строительстве и реконструкции крупных линейных сооружений, таких как транспортные тоннели, так как покрытие детальными геофизическими работами всей протяжен-

Рис. 9. Результат двумерной интерпретации электроразведочных данных, полученных по рассматриваемой методике измерений с обозначением основных геологических и тектонических особенностей



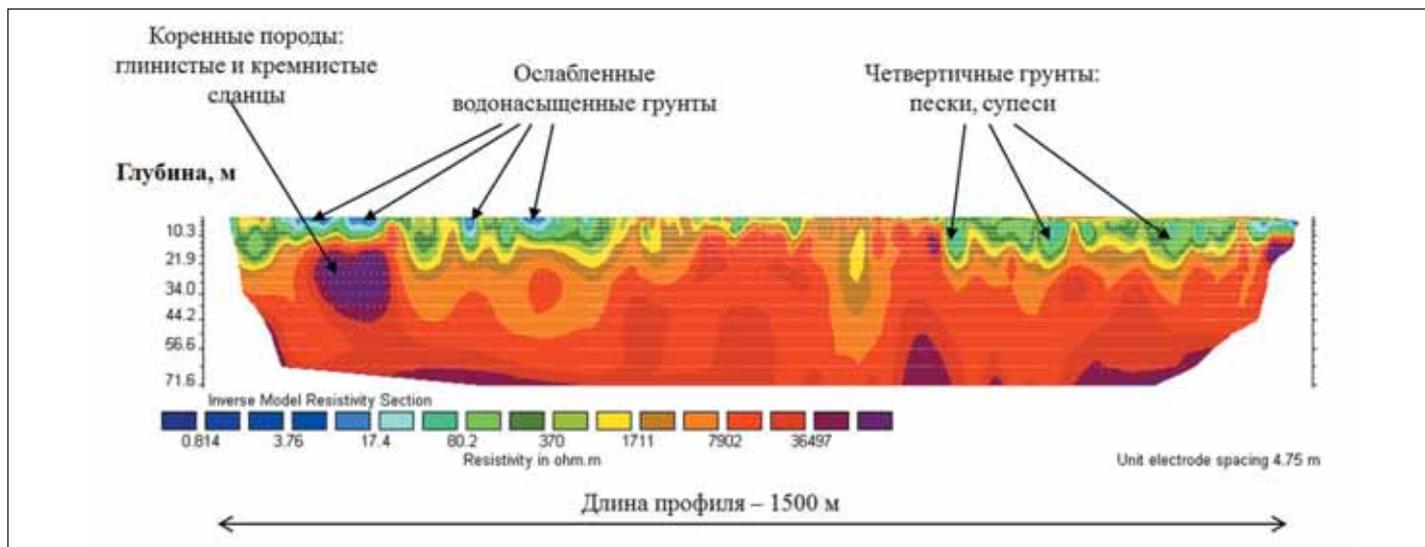


Рис. 10. Результат двумерной интерпретации электроразведочных данных, полученных по рассматриваемой методике измерений с обозначением основных геологических особенностей



Рис. 11. Рабочие моменты при проведении полевых работ под руководством Александра Ивановича Баданина

ности тоннелей, как правило, экономически нецелесообразно.

Работы по такой методике выполняются в ходе изыскательских работ и мониторинга в рамках научно-исследовательских работ отдела НИО ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» наряду с традиционными методиками, как на дневной поверхности, так и в различных горных выработках. В том числе для решения геотехнических задач при строительстве и мониторинге подземных сооружений Московского и Петербургского метрополитенов, изысканий под транспортные тоннели в Краснодарском крае, на БАМе и Транссибе и др.

На рис. 9 показан глубинный результат двумерной интерпретации электроразве-

дочных данных, полученных по рассматриваемой методике измерений с обозначением основных геологических и тектонических особенностей. Электроразведочный профиль проходил по лесному массиву в тайге с целью изучения разломных структур в коренных породах.

На рис. 10 приведен результат двумерной интерпретации электроразведочных данных, полученных по рассматриваемой методике измерений с обозначением основных геологических особенностей.

Электроразведочный профиль был заложен внутри подводного тоннеля. В ходе работ были исследованы ослабленные водонасыщенные грунты в заобделочном про-

странстве. Это демонстрирует возможности методики А. И. Баданина при производстве работ из протяженных подземных сооружений для оценки геотехнических условий за тоннельной обделкой.

### Выводы

Электротометрические исследования по методике А. И. Баданина являются упрощенным вариантом метода электротомографии (альтернативной электротомографии) и отличаются мобильностью и меньшими трудозатратами при полевых работах. Явным преимуществом приводимой экспресс-методики по сравнению со стандартными методиками (с применением многоканальных кос) являются большие разности, позволяющие хотя и грубо, однако интегрально и оперативно оценивать распределение электросопротивления в разрезе на больших дистанциях и глубинах, в том числе и выполняя работы внутри протяженных подземных сооружений.

### Ключевые слова

Геофизика, электротомография, электрическое сопротивление, геология, инженерные изыскания, мониторинг, транспортные тоннели.

*Geophysics, electrotomography, electrical resistance, geology, engineering surveys, monitoring, transport tunnels.*

### Список литературы

1. Бобачев А.А., Бальшаков Д.К., Модин И.Н., Шевнин В.А. [2013] *Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей*. Т. II. Малоглубинная электроразведка. Москва: МГУ. – 123 с.
2. Loke, M. H. and Barker, R.D. 1996. *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting*, 44, 131–152.

### Для связи с авторами

Романевич Кирилл Викторович  
romanevichkirill@gmail.com

