

**КОЛЕСНИКОВ В.П.**

Профессор кафедры геофизики, Пермский государственный  
национальный исследовательский университет, д.т.н.,  
г. Пермь, vp@uralgeopole.ru

**ЛАСКИНА Т.А.**

Аспирант, Пермский государственный национальный  
исследовательский университет, г. Пермь, ognewatania@yandex.ru

**АРТЕМЬЕВ Д.А.**

Ведущий инженер, ООО «НПО «Уралгеополе»»,  
г. Пермь, da@uralgeopole.ru

**KOLESNIKOV V.P.**

Professor of the Geophysics Department, Perm State National  
Research University, Doctor of technician sciences, Perm city,  
vp@uralgeopole.ru

**LASKINA T.A.**

Ph'D student, Perm State National Research University, Perm city,  
ognewatania@yandex.ru

**ARTEMEV D.A.**

Principal engineer, ООО "NPO" Uralgeopole", Perm city,  
da@uralgeopole.ru

# МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНВЕРСИОННОЙ УСТАНОВКИ

## MULTIELECTRODE ELECTRICAL SOUNDINGS WITH THE USAGE OF INVERSION ARRAY

**Ключевые слова:** многоэлектродные зондирования, электротомография, групповые зондирования, принцип взаимности, инверсионная установка.

**Key words:** multielectrode soundings, electrical tomography, group soundings, reciprocity principle, inversion array.

**Аннотация:** рассмотрены возможности использования принципа многоэлектродных измерений для развития технологии электрических зондирований на базе аппаратно-программного комплекса АМС-ЗОНД. Создание новой технологии направлено на повышение производительности полевых работ при исследовании разреза до глубин порядка двухсот и более метров с учетом специфики имеющихся интерпретационных средств. Разработана методика групповых зондирований, при этом в целях осуществления измерений с помощью многоканальной аппаратуры исследованы возможности применения инверсионной измерительной установки, основанной на использовании принципа взаимности. Для контроля и снижения возможного повышенного уровня электрических помех наблюдения осуществляются при заданном соотношении «шум/сигнал», контролируемом аппаратурой АМС-1. Выполненные экспериментальные работы по данной методике показали повышение производительности полевой съемки примерно в 4–5 раз по сравнению с традиционным методом ВЭЗ при удовлетворительной точности получаемых результатов измерений.

**Abstract:** the article deals with the possibilities of the multielectrode measurement principle usage for the development of the electrical sounding technology on the base of the AMS-ZOND hardware-software package. The main aim of new technology creation is the increasing of the field work efficiency for the geological section investigation in the depth interval approximately 200 meters, taking into account the specific peculiarities of the existent interpretation programs. The technique and technology of the group sounding method have been designed, also the possibilities of the applying of inversion array, based on the reciprocity principle, have been investigated with the purpose of the multichannel equipment usage. Measurements are conducted with the predetermined ratio "noise/signal", which is controlled by the AMS-1 equipment, for the decrease of the enhanced noise level effect. The results of the experimental work show the productivity increase up to 4-5 times in comparison with the traditional vertical electrical sounding method with the adequate accuracy of obtained measurement results.

## Введение

Метод электрического зондирования широко используется при решении многих геолого-разведочных, инженерно-геологических, экологических и других задач. Перспективным направлением его развития является разработка новых технологий, нацеленных на повышение оперативности и экономической эффективности ведения работ. Основное внимание при этом уделяется применению многоэлектродных установок с элементами электромографии [4, 10, 11 и др.], обеспечивающих возможность значительного ускорения процесса полевой съемки. Это ускорение процесса достигается в основном за счет использования системы равномерно расположенных (с постоянным арифметическим шагом) электродов, выполняющих в заданной последовательности функцию питающих и приемных электродов, обеспечивая единообразие выполнения зондирований для разных пикетов измерительной установки.

Под *многоэлектродной установкой* в дальнейшем будем понимать систему фиксированного расположения электродов, обеспечивающую возможность получения совокупности зондирований вдоль профиля либо в пределах определенной части площади.

Наряду с данной модификацией метода зондирования, в практике электроразведочных работ продолжает успешно применяться и традиционный метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), обладающий не-

сколько расширенными возможностями при выполнении исследований в сложных условиях (повышенная зарастованность, наличие леса, застройка территории, наличие мерзлых грунтов, асфальтовых покрытий и мн. др.), особенно при исследовании геоэлектрического разреза до сравнительно больших глубин (сотни метров).

Такие работы нередко проводятся с использованием аппаратно-программного комплекса АМС-ЗОНД, включающего одноканальную измерительную аппаратуру АМС-1 [2] и систему программ ЗОНД [6]. Этот комплекс развивает возможности классического метода ВЭЗ.

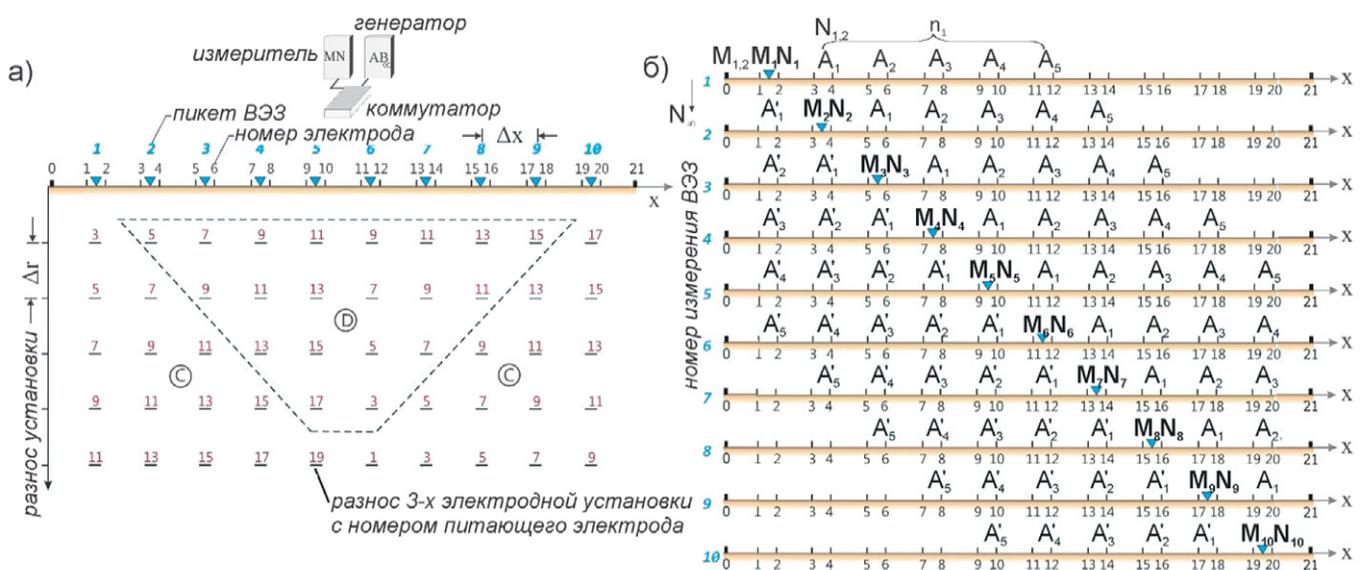
В настоящей статье рассмотрены возможности совершенствования технологии полевой съемки для комплекса АМС-ЗОНД на основе принципа многоэлектродных измерений. С этой целью исследованы два подхода — применение методики групповых зондирований; использование инверсионной установки.

Методика групповых зондирований (ГЗ) основана на использовании многоэлектродной установки в виде косы с системой парных электродов, расположенных с постоянным шагом вдоль профиля наблюдений, выполняющих в процессе зондирования последовательно функцию как приемных, так и питающих электродов (рис. 1). Она реализует возможность последовательного получения каждого в отдельности либо любой совокупно-

сти электрических зондирований из общего их набора, определяемого параметрами многоэлектродной измерительной установки.

Для получения информации об изучаемом разрезе до необходимой глубины, определяемой максимальным разносом установки, применяется методика измерений с использованием встречных установок. В соответствии с данной методикой при выполнении зондирований в пределах первой половины длины измерительной установки используется прямая трехэлектродная установка МNА, а после достижения последним питающим электродом А границы измерительной линии — обратная трехэлектродная установка А'МN при тех же ее параметрах, что и для МNА (рис. 1, б). При этом в определенной области (область D, рис. 1, а), ввиду использования прямой и встречной установок, получаются двойные измерения, суммарная величина значений разности потенциала которых соответствует результатам измерений с четырехэлектродной установкой А'МNА [5, 9 и др.].

В итоге групповой съемки, при заданном числе разносов  $n_1$  и четном его значении регистрируется  $2n_1$  зондирование, при нечетном —  $2n_1 + 1$ . Значения разносов  $r$  зондирующей установки могут задаваться с их приращением  $\Delta r = \Delta x - MN/2$  либо  $\Delta r = \Delta x + MN/2$ . Максимальный разнос зондирующей установки, равный  $n_1 \cdot \Delta r$ , обеспечивает одинаковую эффективную глубину



Условные обозначения: М, N - приемные электроды; © - область 3-х электродной установки; А, В - питающие электроды; D - область 3-х и 4-х электродных установок

Рис. 1. Схема выполнения групповых электрических зондирований

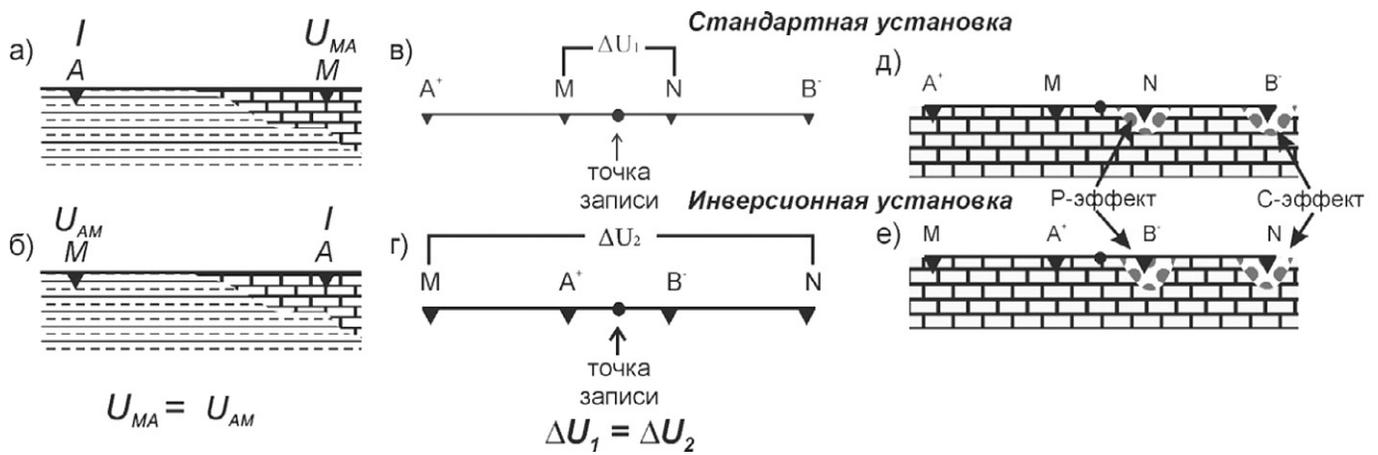


Рис. 2. Сопоставление применения стандартной и инверсионной установок

зондирования на всех пикетах исследуемого разреза.

В отличие от традиционной многоэлектродной установки, в данной модификации использована независимость размера приемной линии  $MN$  от расстояния между пикетами  $\Delta x$ , направленная на возможность варьирования, в определенной мере, шага

приращения разносов установки и информативности получаемых материалов. Последний фактор объясняется тем, что параметры  $\Delta x$  и размер  $MN$  несколько отличаются по информативности. Первый из них ( $\Delta x$ ) отражает детальность съемки, а второй ( $MN$ ) — степень интегральности и, соответственно, контрастности проявления

исследуемой части пород в наблюдаемом поле [5].

Выполнение съемки с использованием методики групповых зондирования позволяет в автоматическом режиме с помощью коммутатора получать произвольный набор кривых зондирования с визуальным либо численным их контролем. При необходимости воз-

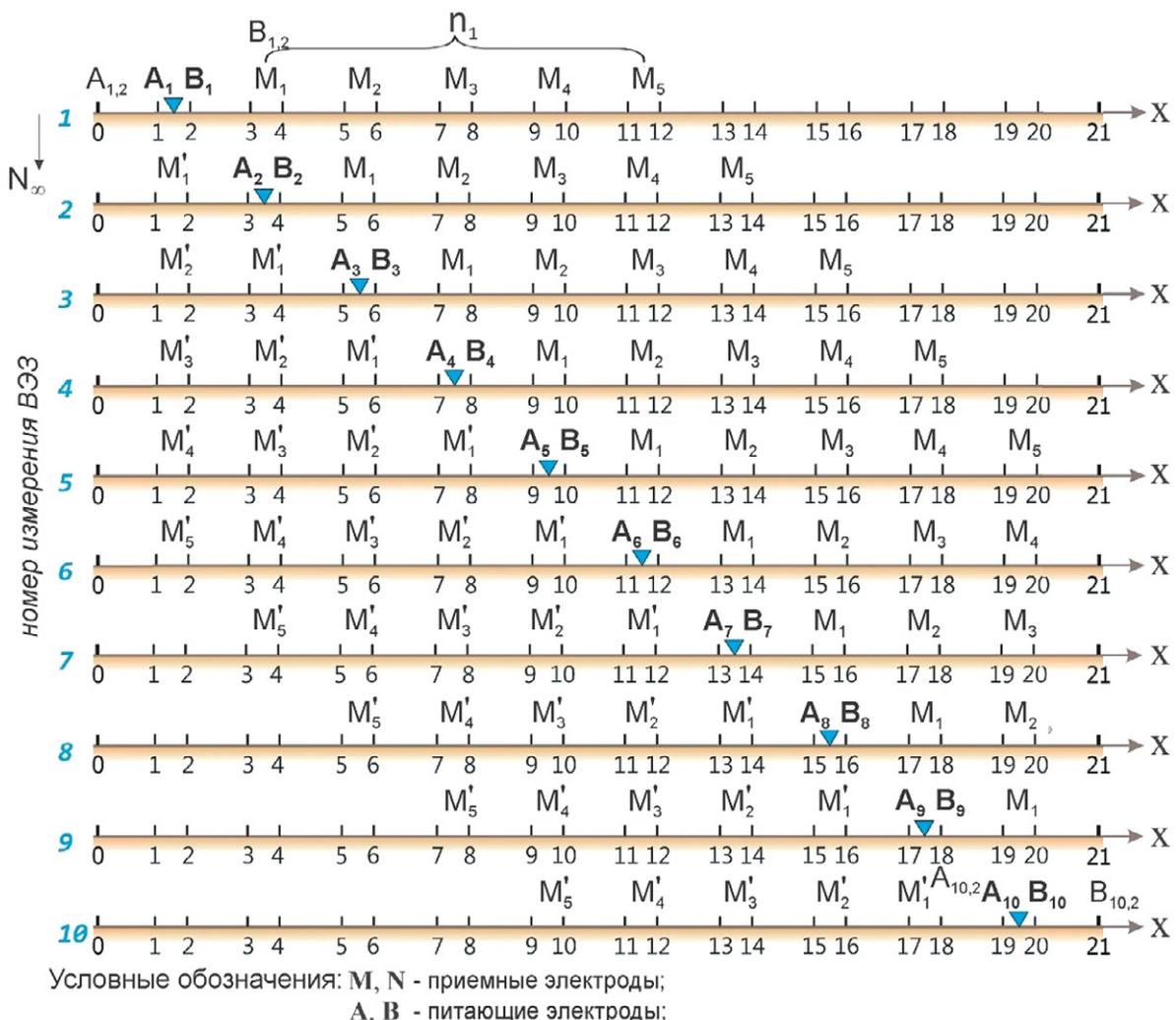


Рис. 3. Схема выполнения групповых электрических зондирований инверсионной установкой

можны повторные замеры на любом пикете из всей совокупности.

В рамках работ, направленных на дальнейшее развитие метода групповых зондирований, исследовано применение инверсионной установки в целях возможного использования многоканальной аппаратуры, обеспечивающей одновременную регистрацию сигналов для всех разносов кривой зондирования, ускоряя этим процесс полевых измерений.

Суть инверсионной установки заключается в видоизменении функционального назначения электродов на основе использования известного принципа взаимности [7]. Согласно принципу взаимности источник, помещенный в точку  $A$ , вызывает в точке  $M$  такое же значение потенциала электрического поля  $U_{MA}$ , как и значение потенциала  $U_{AM}$  в точке  $A$ , образуемого при помещении источника в точку  $M$  независимо от характера пространственного изменения физических свойств среды (рис. 2, а, б). То есть при взаимной замене питающего и приемного электродов выполняется соотношение:

$$U_{MA} = U_{AM} \quad (1)$$

При выполнении измерений с традиционной установкой (рис. 2, в) измеряемое значение разности потенциалов между точками  $M$  и  $N$  определяется по формуле:

$$\Delta U_1 = U_M - U_N = (U_{MA} - U_{MB}) - (U_{NA} - U_{NB}). \quad (2)$$

При этом точка записи соответствует положению приемных электродов  $MN$  [5].

Используя принцип взаимности (1), соотношение (2) можно переписать в виде:

$$\Delta U_2 = U_M - U_N = (U_{AM} - U_{BM}) - (U_{AN} - U_{BN}). \quad (3)$$

Полученное соотношение (3) соответствует измерительной установке, приведенной на рис. 2, г.

Сопоставление выражений (2) и (3) показывает, что принцип взаимности (1) обеспечивает выполнение соотношения  $\Delta U_1 = \Delta U_2$ , то есть вместо измерительной установки (рис. 2, в) можно использовать ее инверсионный аналог (рис. 2, з).

Из вышесказанного можно сделать два важных вывода. Во-первых, ввиду полной тождественности традицион-

ной и инверсионной установок, сохраняется и положение точки записи, которая в случае инверсионной установки (рис. 2, з, е) должна соответствовать положению спаренных питающих электродов  $AB$ . Во-вторых, ввиду независимости выполнения принципа взаимности от строения и физического состояния геологической среды, проявление неоднородности, расположенной в точке записи, должно быть идентичным при измерениях с обычной и инверсионной установками. В частности, проявление Р-эффекта, который обычно связывается с наличием локальной неоднородности вблизи приемной линии  $MN$  (рис. 2, д) [5, 8], в случае инверсионной установки отождествляется с положением этой неоднородности вблизи питающей линии  $AB$  (рис. 2, е). То есть природа Р-эффекта связана не с функциональным назначением электрода (приемный/питающий), а с соотношением расстояния между спаренными электродами и их расположением относительно локальной неоднородности. Аналогичный вывод может быть получен и для известного С-эффекта [5, 8], отображающего наличие неоднородности вблизи отдельного питающего электрода.

Следует отметить, что принцип взаимности почти не используется в прак-

тике ведения электроразведочных работ, ввиду возможной повышенной зашумленности внешнего электрического поля [3]. Тем не менее имеются примеры его применения, показывающие существенное упрощение процессов измерения, в частности, при проведении непрерывных акваториальных наблюдений [1].

В данном случае выполненный анализ привел к созданию новой модификации групповых зондирований, основанной на использовании инверсионной установки (ГИЗ). В отличие от ГЗ в этом случае ток подается на спаренные электроды косы  $AB$ , а регистрация разности потенциалов производится между электродами  $M_i$  измерительной косы и электродом  $N_{\infty}$  (рис. 3), обеспечивая возможность применения многоканальной аппаратуры.

В целях оценки технологичности и информативности практического применения ГИЗ были проведены экспериментальные наблюдения на одном из опытных участков по трем профилям с шагом между пикетами 20 м при длине многоэлектродной установки 620 м с получением 20 зондирований для разносов, меняющихся в интервале от 25 до 305 м. Величина приемной линии  $MN$  при разносах установки до 100 м составляла 10 м, а при последующем ее увеличении — 50 м.

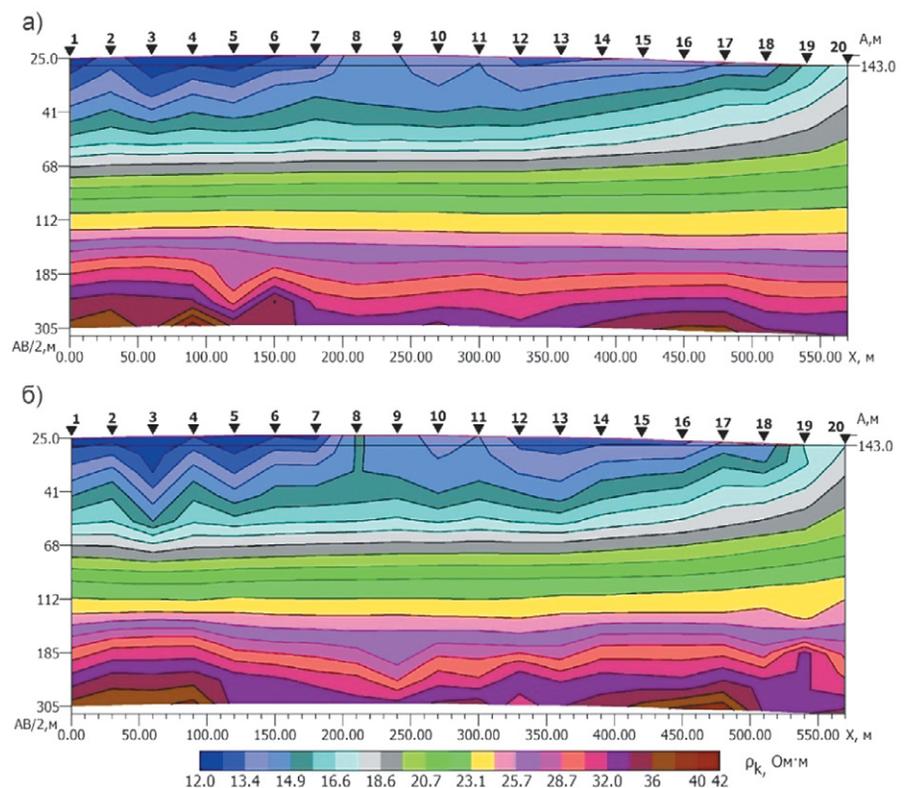


Рис. 4. Разрезы кажущегося сопротивления, полученные методом групповых зондирований с использованием традиционной (а) и инверсионной (б) установок

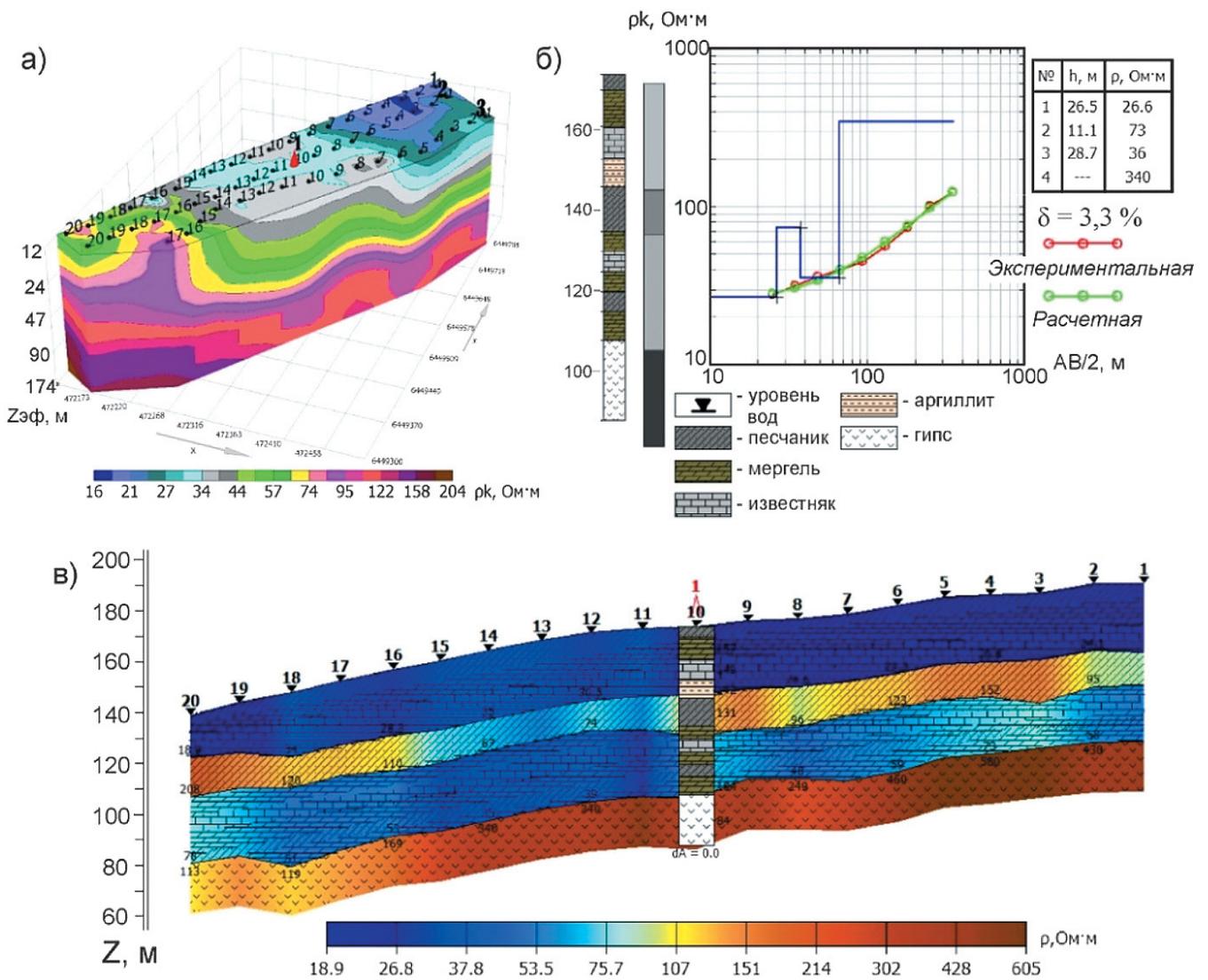


Рис. 5. Результаты интерпретации: а) поле значений кажущегося сопротивления; б) результаты интерпретации параметрического зондирования; в) геоэлектрический разрез по профилю 2

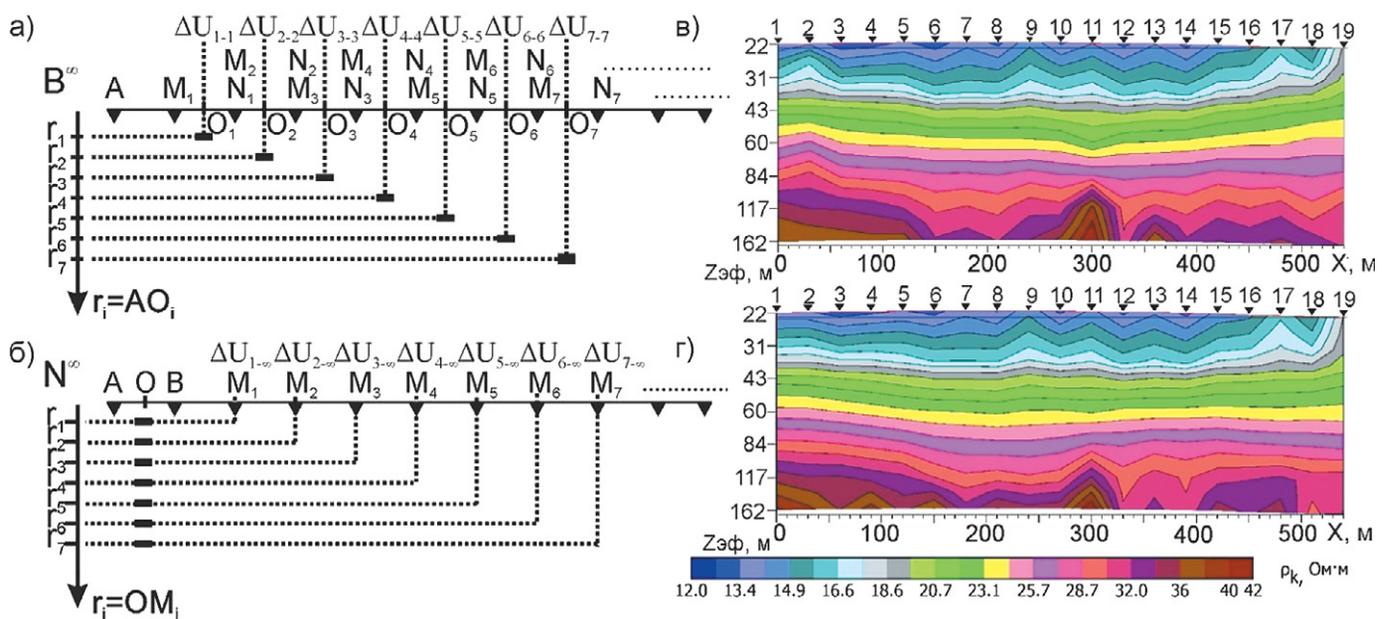


Рис. 6. Схема измерений методом СЭЗ традиционной (а) и инверсионной (б) установками и полученные в результате полевой съемки разрезы кажущегося сопротивления с помощью традиционной (в) и инверсионной (г) установок

Измерения проводились с помощью одноканальной аппаратуры АМС-1, обеспечивающей возможность контроля и получения измерений с заданной величиной соотношения «шум/сигнал», оценка которой осуществляется с использованием процедуры спектрального анализа наблюдаемого поля.

Экспериментальные работы проводились в пригородной зоне г. Перми при умеренной зашумленности электрического поля. Величина генерируемого тока составляла 100 мА (максимальное значение для аппаратуры АМС-1). Автоматическое переключение каналов осуществлялось с помощью коммутатора COMDD-48. Предельный уровень соотношения «шум/сигнал» задавался равным 2%.

При выполнении измерений было отмечено увеличение времени регистрации сигнала относительно обычной установки, что свидетельствует о несколько повышенном уровне помех. Величина времени регистрации одного измерения при заданном ограничении соотношения «шум/сигнал» составляла примерно 5–7 с при малых разностях, увеличиваясь до 15–20 с на максимальном разnose.

Общее время съемки несколько увеличилось, но незначительно. Выполнение 20 зондирований по одному профилю при максимальном разnose 305 м и использовании одноканальной аппаратуры АМС-1 с переключением каналов с помощью коммутатора потребовало 1,5 часа, включая установку оборудования и проведение измере-

ний. В то время как съемка методом ВЭЗ при таком же числе зондирований и соразмерных параметрах установки, согласно опыту наших работ, занимает около 8 часов. То есть в целом процесс съемки ускорился примерно в 4–5 раз.

Сравнительный анализ измерений, выполненных по методикам ГЗ и ГИЗ, показал наглядную схожесть результатов наблюдений (рис. 4).

Полученные результаты полевой съемки обеспечили возможность проведения оперативной их интерпретации с помощью системы ЗОНД с получением необходимой информации об исследуемой геологической среде (рис. 5).

Выявленные особенности инверсионной установки показали возможность ее использования и в других многоэлектродных методиках зондирования. К примеру, сравнительная оценка результатов съемок методом сплошных электрических зондирований (СЭЗ) [4] с использованием стандартной и инверсионной установок (рис. 6) показала, что применение инверсионной установки также приводит к возможности пошагового (визуального либо численного) контроля графиков зондирования с использованием известных критериев, отражающих характер и физически возможные пределы их изменений [5, 8, 9 и др.]. Кроме этого, при необходимости возможно сравнительно простое использование иных программных средств, в частности системы ЗОНД.

## Заключение

Разработана методика и технология проведения многоэлектродных электрических зондирований в модификации групповых зондирований инверсионной установкой. Показан ряд ее положительных особенностей, направленных на повышение производительности работ с учетом снижения влияния на результаты измерений повышенной зашумленности внешнего электрического поля. Предложенная методика обеспечивает возможность выполнения произвольной совокупности кривых зондирования из общего их набора, определяемого параметрами многоэлектродной измерительной установки.

Выполненные экспериментальные работы по методике ГИЗ с использованием аппаратурно-программного комплекса АМС-ЗОНД и коммутатора COMDD-48 показали повышение производительности выполнения полевой съемки примерно в 4–5 раз по сравнению с традиционным методом ВЭЗ при удовлетворительной точности результатов наблюдений и их сопоставимости с результатами съемки методом сплошных зондирований.

Разработанная методика может быть использована при изучении массива горных пород, залегающих в интервале глубин от земной поверхности до первых сотен метров, осуществление зондирования геологической среды в условиях ограниченного пространства (шахтные работы), проведения оперативных высокоточных мониторинговых наблюдений физического состояния контролируемой толщи пород. 📍

## Список литературы

1. Андреев М.А., Модин И.Н. Метод непрерывных электрических зондирований на акваториях // Инженерная и рудная геофизика. Геленджик, 2009.
2. Аппаратурно-программный комплекс для геоэлектроразведки АМС-1: пат. 97542 Рос. Федерация: МПК7: G01V3/02 / авторы и патентообладатели Алатов С.А., Батяев И.М., Зеленин В.П., Карпов С.Б., Колесников В.П., Мельников А.К., Татаркин А.В.; 10.09.2010.
3. Атаев Д.И., Болотников В.А. Практические схемы высокочастотного звуковоспроизведения. М.: Радио и связь, 1986. 136 с.
4. Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Урусова А.В., Шевнин В.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред // Физика Земли. 1995. № 12. С. 79–90.
5. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. М: Научный мир, 2007. 248 с.
6. Программа обработки и интерпретации результатов вертикального электрического зондирования ЗОНД: свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004611865 Рос. Федерация / авторы Колесников В.П., Кутин В.А., Мокронос С.В., правообладатель Колесников В.П.; 11.01.2005.
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.
8. Электроразведка методом сопротивлений: учебное пособие / В.К. Хмелевской, В.А. Шевнин. М.: Изд-во МГУ, 1994. 160 с.
9. Электроразведка: Справочник геофизика: в 2 кн. / под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. М.: Недра, 1989 438 с.
10. Dahlin T., Zhou B. Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging // Near Surface Geophysics. 2006. P. 113–123.
11. Loke M.N., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion // Geophysical Prospecting. 1996. № 44. P. 499–523.