

## РУБРИКА: ИНЖЕНЕРНАЯ И РУДНАЯ ГЕОФИЗИКА

### **Простые трехмерные системы наблюдения в методе электротомографии: математическое, физическое моделирование и полевой эксперимент**

Е.В. Балков (ИНГГ СО РАН), Карин Ю.Г. (ИНГГ СО РАН), Шапаренко И.О. (ИНГГ СО РАН),  
Мариненко А.В. (ИНГГ СО РАН)

#### *Аннотация*

В работе описано исследование трехмерных систем наблюдения в методе электротомографии. Исследуется роль межкабельных измерений дипольной установкой в расстановках из двух параллельных профилей, объединенных в одну систему. Численным и физическим моделированием, а также полевым экспериментом на натурной модели показано, что проведение межкабельных измерений и их включение в инверсию существенно улучшает качество получаемых моделей.

#### *Ключевые слова*

трехмерные системы наблюдения, электротомография, моделирование

### **Simple 3D observation systems in the electrical resistivity tomography method: mathematical, physical modeling and field experiment**

E.V. Balkov (IPGG SB RAS), Y.G. Karin (IPGG SB RAS), I.O. Shaparenko (IPGG SB RAS),  
A.V. Marinenko (IPGG SB RAS)

#### *Abstract*

The paper describes the study of three-dimensional observation systems in the method of electrical tomography. The role of intercable measurements by a dipole installation in arrangements of two parallel profiles combined into one system is investigated. Numerical and physical modeling, as well as a field experiment on a full-scale model, have shown that conducting intercable measurements and including them in the inversion significantly improves the quality of the resulting models.

#### *Key words*

3D observation systems, electrical resistivity tomography, modeling

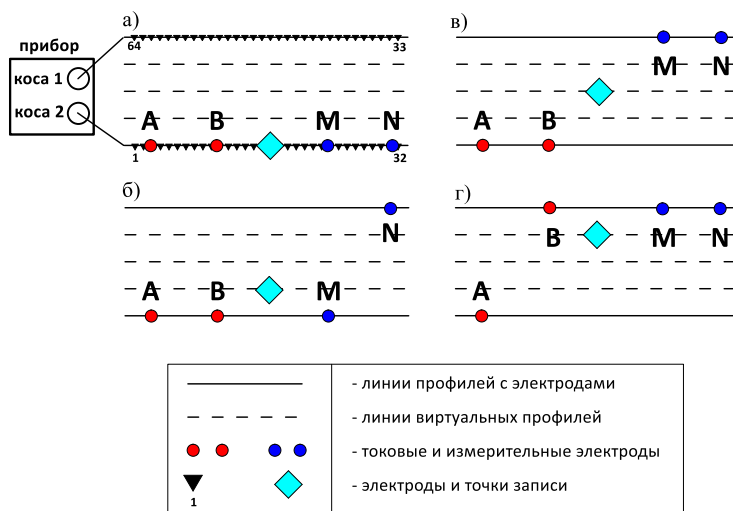
## Введение

Электротомография в настоящее время является одним из самых востребованных электроразведочных методов. Это обусловлено высоким уровнем развития соответствующего методического и аппаратного обеспечения. В наземных (поверхностных) работах широко применяются профильные, площадные исследования и трехмерная инверсия. Однако, даже при площадных исследованиях с высокой долей преобладают двухмерные измерения по сериям параллельных профилей. Это обусловлено, в первую очередь, экономическим фактором, но, во вторую очередь, фактором методическим. К настоящему моменту не удается найти достаточно представительных теоретических исследований, подкрепленных фактическим материалом заверенным прямыми методами, которые бы освещали практические преимущества и эффективные способы применения трехмерных систем наблюдения. Конечно, отдельные работы по этой тематике существуют. Среди них, например, публикации М.Н. Лок [1], Д.К. Большакова, И.Н. Модина и В.С. Степченкова [2, 3], Г.В. Гурина [4], П.А. Рязанцева [5]. Данная работа представляет собой попытку внести вклад в изученность обозначенного вопроса путем численного и физического моделирования, а также полевого эксперимента для моделей локального проводника и изолятора в однородном полупространстве, а также протяженной изолирующей полости соответственно.

## Используемая установка

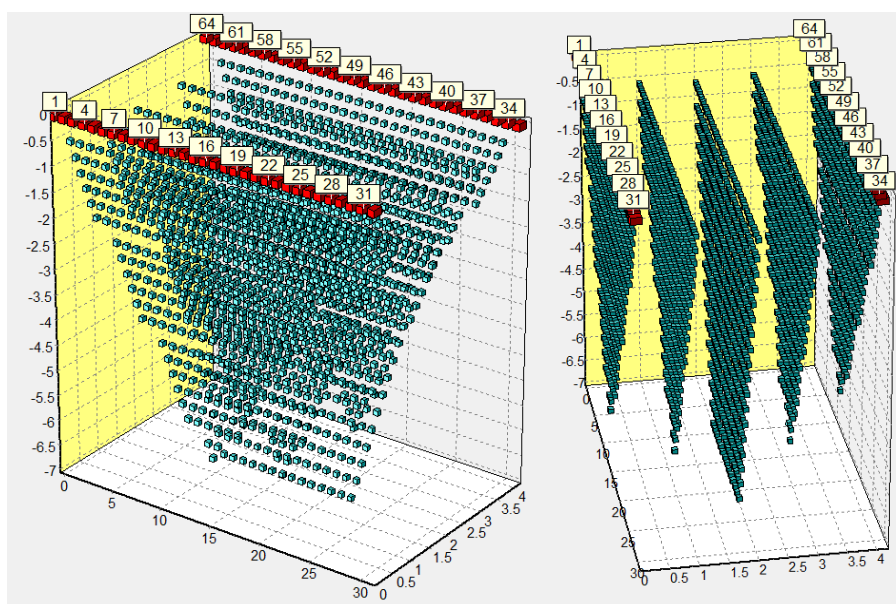
Если ограничить способы пространственной организации поверхностных систем наблюдения регулярной сетью электродов, подключаемых к электроразведочным косам с линейным шагом между электродами, то практически любые трехмерные системы наблюдения (протоколы) будут представлять собой комбинации двух простых систем. Это пара параллельных профилей, или же пара ортогональных профилей с произвольными (в рамках выбранной электроразведочной установки и других параметров протокола) комбинациями токовых и измерительных электродов. В настоящем исследовании рассматривается первый вариант.

Традиционно в электроразведочных методах вводится понятие точки записи, то есть точки местности, к которой относятся результаты измерений [6]. Это формальный подход, позволяющий вполне определенным образом выполнять графическое представление результатов измерений, анализировать их качество, проводить качественную и в дальнейшем количественную интерпретацию. Как отмечает И.Н. Модин [7], в методе электротомографии стирается грань между электропрофилированием и вертикальными электрическими зондированиями, а четкая привязка электродов и блоковая структура области в инверсии снимает вопрос о точке записи при количественной интерпретации. Однако, для формирования протоколов измерения и первичного анализа данных определение точки записи вполне обосновано. Рассмотрим это на примере двух параллельных кабелей, одновременно подключенных к электроразведочному прибору, позволяющему коммутировать произвольные комбинации четверок электродов (рис. 1, а). Горизонтальное положение точек записи здесь определяется как среднее положение между четырьмя используемыми электродами [1]. Поэтому, для четырех-электродной установки возможны пять положений записи в направлении оси ординат (вкост направлению профилей), четыре из которых показаны на рисунке 1. Таким образом, точки записи распределены в пространстве вдоль пяти профилей: двух крайних, расположенных по линиям электродов (кабелей), и трех межкабельных (виртуальных) (см. рис. 1, б-г).



**Рисунок 1.** Точки записи для различных положений токовых и измерительных электродов

По вертикали точку записи в электротомографии чаще всего относят к эффективной глубине [1,8]. На рисунке 2 показана пространственная визуализация протокола для раскладки двух параллельных кабелей по 32 электрода. В данном случае для простоты рассматриваются метровый шаг между электродами и расстояние 4 метра между профилями. Диаграмма протокола демонстрирует один из возможных наборов точек записи для дипольной установки. В соответствие с примером, приведенным на рисунке 1, точки записи в данном протоколе сосредоточены вдоль пяти линий: вдоль двух профилей, по которым разложены кабели, и трех виртуальных. В результате при расположении фактических профилей, имеющих шаг 1 м, на расстоянии 4 м, получается сеть наблюдений с плотным равномерным покрытием порядка 1 м на 1 м. При этом необходимо учитывать потерю минимальной глубины при формировании измерений в межкабельном пространстве, которая незначительна при малом расстоянии между кабелями, но повышается с его увеличением. Подобный протокол, состоящий из абсолютно такой же последовательности четверок электродов для каждого измерения, но в другом масштабе (шаг между электродами и расстояние между кабелями) использован в представленном далее математическом и физическом моделировании.

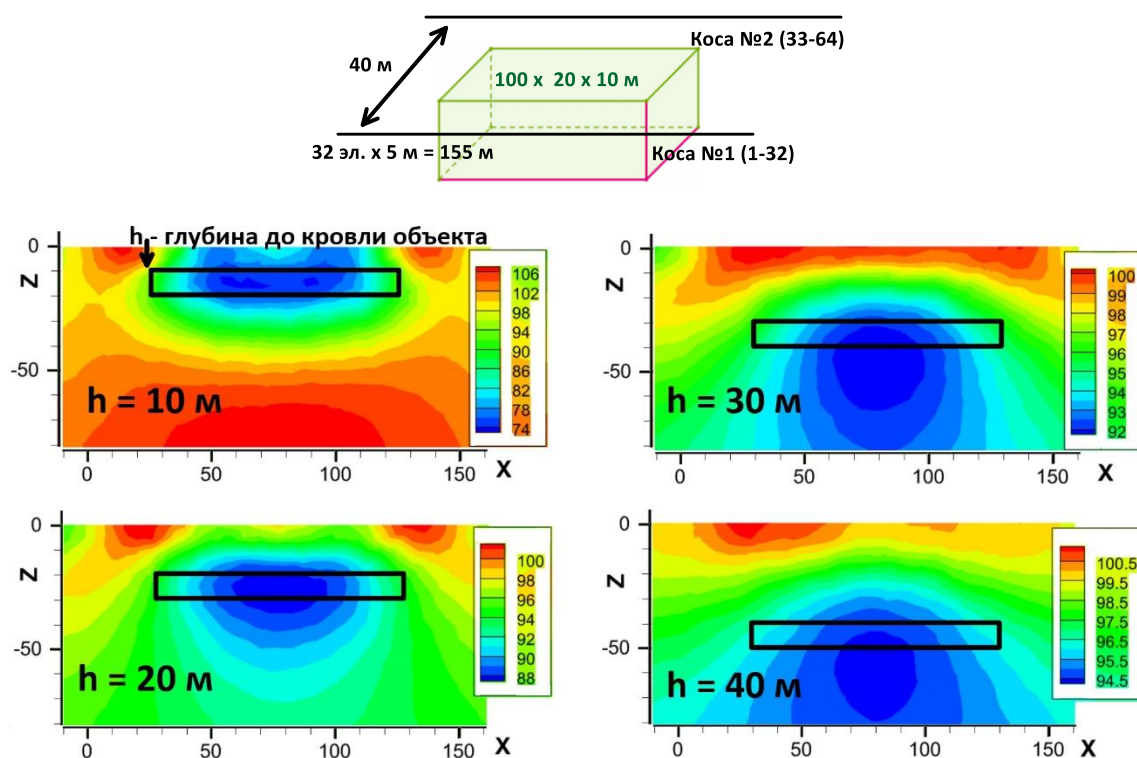


**Рисунок 2.** Раскладка двух параллельных профилей по 32 электрода, соединенных в одну систему наблюдения и диаграмма соответствующего протокола измерений для дипольной установки

### Математическое и физическое моделирование

С помощью программы DiInSo [9], которая позволяет решать прямую задачу для пользовательской системы наблюдения (например, описанного выше протокола), проведены серии расчетов и соответствующих инверсий модельных данных. Программа разработана в ИНГГ СО РАН, в ней используются метод конечных элементов на тетраэдральной сетке и минимизация методом Гаусса-Ньютона. На рисунке 3 приведен модельный пример для установки, подобной приведенной выше (рис.1), в увеличенном масштабе (шаг между электродами 5 м и расстояние между профилями 40 м). При этом используются диполи АВ и MN размером до 40 м с разносом до 120 метров между центрами, что соответствует значениям коэффициента установки, не превышающим 5000.

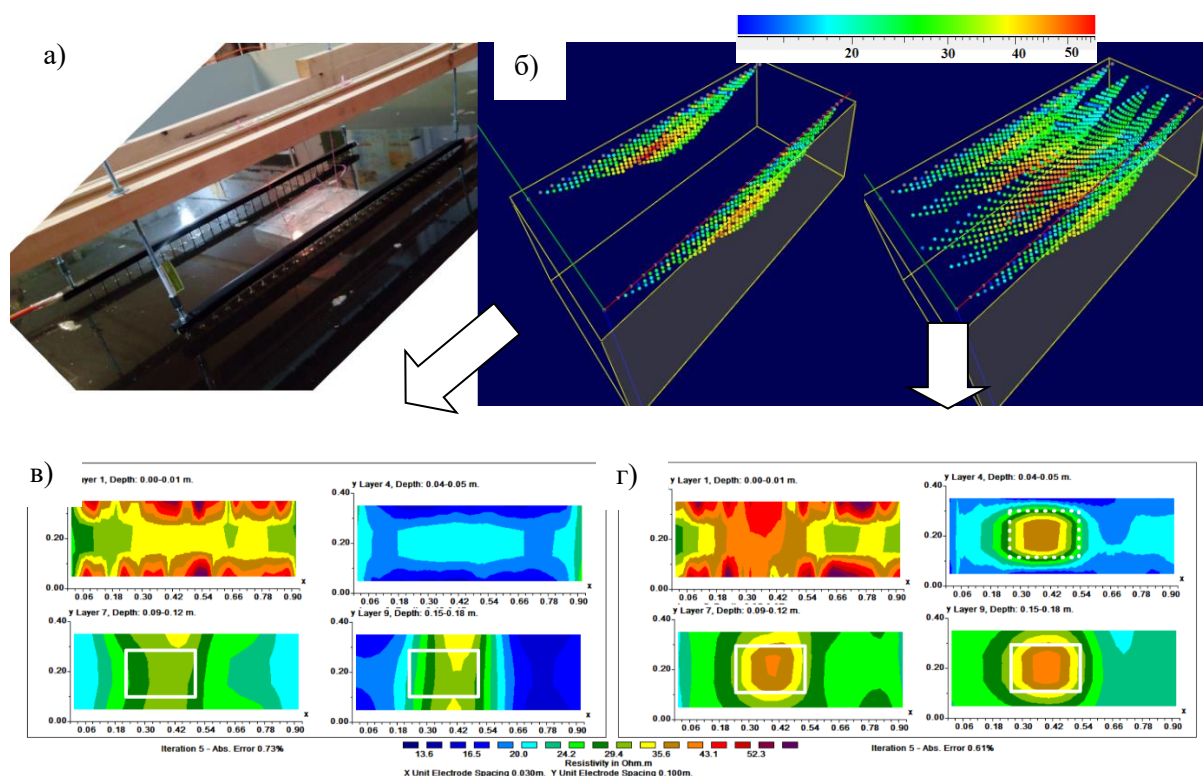
Здесь проводящий (10 Ом·м) относительно среды объект в виде прямоугольного параллелепипеда постепенно погружается в однородном полупространстве (100 Ом·м) от приповерхностного заглубления в 10 м до 100 м. На геоэлектрических разрезах, проходящих через центр аномального тела (см. рис. 3) и построенных в результате трехмерной инверсии, прослеживается динамика изменения образа объекта для четырех глубин (до 40 м). Так, только на минимальной глубине возможно говорить об оценке положения подошвы объекта, а кровля объекта здесь выходит на поверхность. Оценить же положение кровли возможно на глубинах 20 или 30 м. С глубины 40 м и далее затруднительно предположить корректную форму исходного тела. А с глубины 60 м объект не прослеживается.



**Рисунок 3.** Схема наблюдения (сверху) для модельного объекта – прямоугольного параллелепипеда, погруженного в однородное полупространство и результаты инверсии синтетических сигналов при погружении объекта на различную глубину (снизу)



Физическое моделирование проведено с использованием специального стенда, включающего набор из двух мини-кос (32 электрода, шаг 3 см) и бассейна 5х3х1 м, заполняемого водой (рис. 4, а). Косы располагались на расстоянии 40 см друг от друга, расстояние до бортов не менее 1 м и до дна 75 см. Здесь протокол отмасштабирован таким образом, что используются диполи АВ и MN размером до 40 см с разномом до 70 см между центрами, что соответствует значениям коэффициента установки, не превышающим 3000. В качестве объекта используется прямоугольный изолирующий объект размерами 30х20х10 см, расстояние от поверхности воды в бассейне до кровли объекта 6 см. В целом геометрия модели подобна рассмотренным ранее, но в уменьшенном масштабе. Проведены измерения с помощью описанного выше трехмерного протокола и проведена инверсия двух массивов данных – содержащий только те измерения, которые находились непосредственно под профилями (кабелями); и полный набор измерений, включающий также межкабельные (рис. 4 б). Здесь ставилась задача установить, существенно ли влияние межкабельных измерений на результат инверсии, ведь чувствительность такой системы наблюдения в межкабельном пространстве существенно снижается.

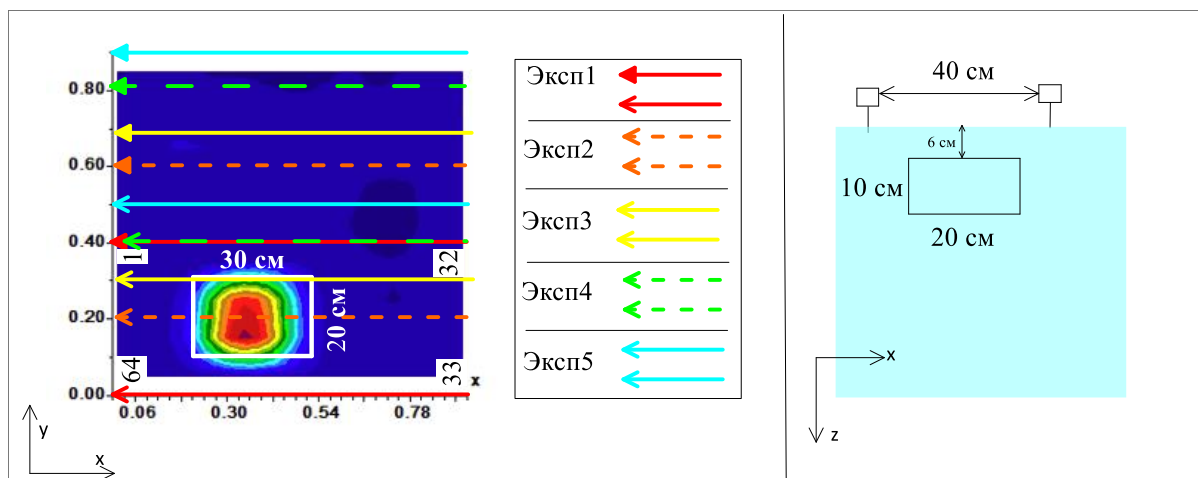


**Рисунок 4.** Измерительная система и физическая модель изолирующего объекта в бассейне с водой (а); две схемы наблюдения: содержащие межкабельные измерения и нет (б); соответствующие результаты инверсии (в) и (г)

Результаты инверсии в программе Res3DInv приведены в виде набора горизонтальных срезов (рис. 4, в-г). Здесь и далее использована гладкая инверсия, единичная плотность сетки и количество блоков равно сумме физических и виртуальных профилей, в данном случае – пять. Если не использовать трехмерную систему наблюдения (рис. 3, в), то есть не включать в массив данных для инверсии межкабельные измерения, то никакой корректной информации о положении и форме объекта получить невозможно. Лишь, за счет бокового влияния проявляется небольшая протяженная неоднородность. При использовании межкабельных измерений (рис. 4 г) горизонтальное положение объекта отлично восстанавливается.

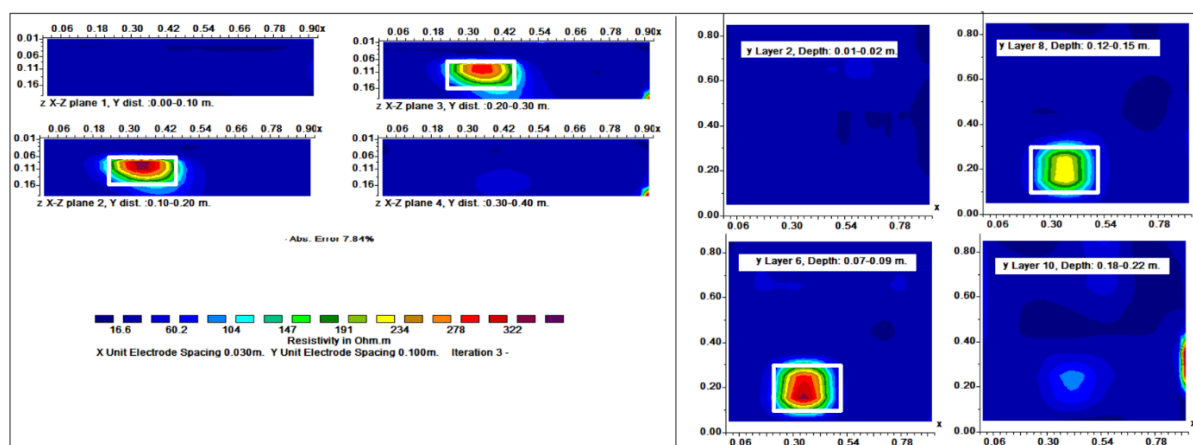
На этой же физмодели проведен дальнейший эксперимент: фиксированная система наблюдения перемещалась над объектом. Всего выполнено четыре смещения, то есть полный набор данных

состоял из пяти пар профилей (рис. 5). После чего полный набор данных, включая все межкабельные измерения, подавался в программу Res3DInv для инверсии.



**Рисунок 5.** Схема наблюдения физмоделирования со сдвигающейся над объектом измерительной установкой в горизонтальной (слева) и вертикальной развертке (справа)

В результате инверсии более полного массива данных удастся корректно восстановить вертикальное и горизонтальное положение, а также замкнутую форму объекта (рис. 6).

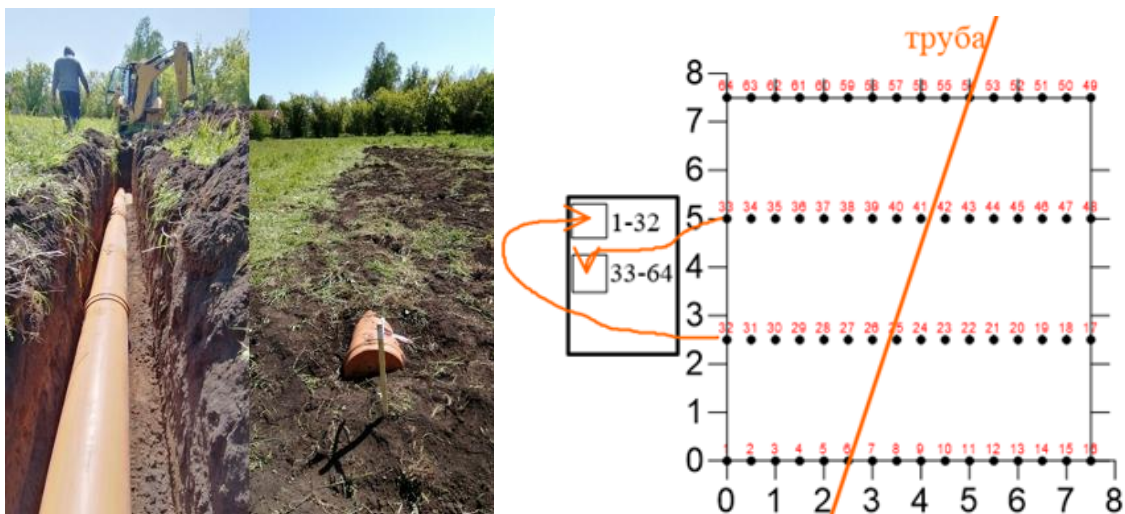


**Рисунок 6.** Результаты трехмерной инверсии, корректно восстанавливающей положение и примерные размеры модельного объекта в вертикальных (слева) и горизонтальных срезах (справа)

## Полевые наблюдения

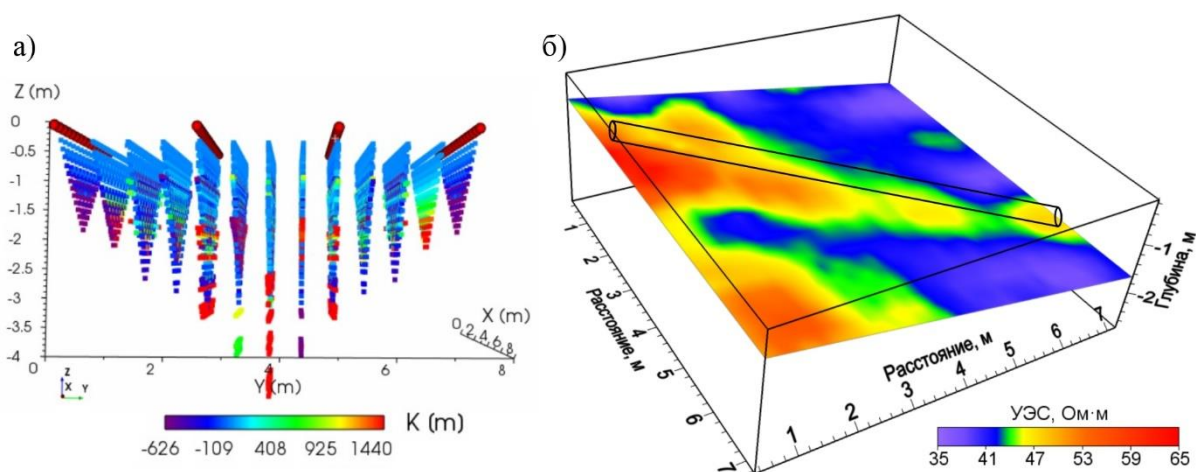
На территории электрометрического полигона ИНГГ СО РАН организована натурная модель протяженной изолирующей полости, плавно погружающейся от поверхности до глубины 2 м, которая имитируется полый заглушенной на концах пластиковой трубой длиной 18 м и диаметром 0.3 м. Над трубой были проведены измерения системой наблюдения, построенной по описанному ранее принципу, но с разбивкой системы из 64 электродов на 4 параллельных профиля (рис. 7). Детально исследована площадка 7.5 x 7.5 м, содержащая сегмент трубы с глубиной от 0.5 до 1.5 м. Протокол создан в программе ERTLab Studio и состоял из полного

набора измерений, включая межкабельные (рис. 8, а). Значения коэффициента установки здесь по модулю не превышали 1500.



**Рисунок 7.** Фотографии натурной модели погружающейся от поверхности до 2 м пластиковой трубы, имитирующей протяженную изолирующую полость (слева). Схема наблюдения, состоящей из 64 электродов, расставленных вдоль четырех параллельных профилей по 16 штук в каждом (справа)

В результате трехмерной инверсии в Res3DInv такого трехмерного набора данных достаточно точно восстанавливается постепенно углубляющаяся изолирующая область, положение которой соответствует известному положению трубы (рис. 8, б). При этом поскольку невозможно разделить вклады в аномальный сигнал, вносимые непосредственно трубой и траншеей, то нельзя исключить некоторое влияние траншеи на результат инверсии. Проведенные тесты по инверсии массива данных, из которого были исключены межкабельные измерения, показали худшие результаты.



**Рисунок 8.** Диаграмма протокола, отображающая положения точек записи для 4 основных и 9 межкабельных линий измерений, а также значения коэффициента установки  $K$  (а). Наклонный срез по оси трубы, отражающий аномалию УЭС по результатам трехмерной инверсии (б)

## Выводы

Практическое проведение трехмерных измерений в общем случае весьма затратно из-за дороговизны многоканальной аппаратуры, поэтому должно быть обосновано. В результате проведенных исследований, включающих математическое и физическое моделирование, а также полевой эксперимент, установлена целесообразность и преимущество использования трехмерных систем наблюдения, включающих межкабельные измерения. Принципиально такие системы наблюдения могут повышать разрешающую способность без добавления новых кабелей и электродов, позволять исследовать участки с ограниченным доступом на их территорию. Вместе с этим очевидно, что проведен лишь начальный этап исследований, которые следует продолжать в направлении выявления конкретных практических преимуществ трехмерных систем наблюдения для различного рода геоэлектрических моделей вмещающих сред и искомых объектов, разных установок, и в конечном счете создания методических основ их эффективного применения.

## Благодарности

Исследования выполнены в рамках проекта НИР FWZZ-2022-0025. Полевые работы выполнены при технической поддержке ООО «КБ Электрометрии». Авторы выражают благодарность геофизику ООО «КБ Электрометрии» Попову И.А. за активное участие в сборе полевого материала.

## Библиография

1. Loke, M.H. Lecture notes on 2D & 3D electrical imaging surveys / M.H. Loke // <https://www.geotomosoft.com/downloads.php> - 2025.
2. Большаков, Д. К. Использование многосегментной технологии электротомографии при опробовании площадных методик получения трехмерных данных / Д. К. Большаков, К. Д. Ефремов, И. Н. Модин // Геофизика. – 2022. – № 6. – С. 97-107. – DOI 10.34926/geo.2022.42.74.013. – EDN UXVBPF.
3. Степченков, В. С. Сравнение результатов трехмерной инверсии двумерных и трехмерных данных / В. С. Степченков, Д. К. Большаков, И. Н. Модин // Инженерная и рудная геофизика 2024. Инженерная и рудная геология 2024 : Материалы 20-й научно-практической конференции и выставки, Казань, 13–16 мая 2024 года. – Москва: ООО «Геомодель Развитие», 2024. – С. 380-384. – EDN ANYUGE. DiInSo: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. RU2021662035. Датарегистрации:21.07.2021.
4. Гурин, Г. В. Глубинная электротомография с 2D, 2.5D и 3D системами наблюдения в сложнопостроенных геоэлектрических разрезах (по данным математического моделирования) / Г. В. Гурин, И. А. Пантеев, П. В. Ткачук // Инженерная и рудная геофизика 2024. Инженерная и рудная геология 2024 : Материалы 20-й научно-практической конференции и выставки, Казань, 13–16 мая 2024 года. – Москва: ООО «Геомодель Развитие», 2024. – С. 319-323. – EDN NTJAVZ.
5. Рязанцев, П. А. 3D электротомография для изучения трещиноватости массива горных пород / П. А. Рязанцев, С. В. Бурдюх // Инженерная и рудная геофизика 2024. Инженерная и рудная геология 2024 : Материалы 20-й научно-практической конференции и выставки, Казань, 13–16 мая 2024 года. – Москва: ООО «Геомодель Развитие», 2024. – С. 177-182. – EDN MZSIFM.
6. Электроразведка: Справочник геофизика. В двух книгах / Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. Книга первая. – М.: Недра, 1989. – 438 с.



7. Модин, И.Н. Электроразведка в технической и археологической геофизике / И.Н. Модин // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 2010. – 49 с.
8. Edwards, L.S. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization / L.S. Edwards // Geophysics. – 42. – P. 1020-1036.
9. Мариненко А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ DiInSo / А.В. Мариненко // Св-во о регистр. прогр. № 2021662035; RU; № 2021661164, заявл. 13.07.2021, опубл. 21.07.2021.

## References

1. Loke, M.H. Lecture notes on 2D & 3D electrical imaging surveys / M.H. Loke // <https://www.geotomosoft.com/downloads.php> - 2025.
2. Bol'shakov, D. K. Ispol'zovanie mnogosegmentnoj texnologii e'lektrotomografii pri oprobovanii ploskhnadny'x metodik polucheniya trexmerny'x danny'x / D. K. Bol'shakov, K. D. Efremov, I. N. Modin // Geofizika. – 2022. – № 6. – S. 97-107. – DOI 10.34926/geo.2022.42.74.013. – EDN UXVBPF.
3. Stepchenkov, V. S. Sravnenie rezul'tatov trexmernoj inversii dvumerny'x i trexmerny'x danny'x / V. S. Stepchenkov, D. K. Bol'shakov, I. N. Modin // Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2024. Inzhenernaya i rudnaya geologiya 2024 : Materialy` 20-j nauchno-prakticheskoy konferencii i vy`stavki, Kazan`, 13–16 maya 2024 goda. – Moskva: ООО «Geomodel` Razvitie», 2024. – S. 380-384. – EDN ANYUGE. DiInSo: Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy` dlya E`VM. RU2021662035. Dataregistracii:21.07.2021.
4. Gurin, G. V. Glubinnaya e'lektrotomografiya s 2D, 2.5D i 3D sistemami nablyudeniya v slozhnopostroenny'x geoe'lektricheskix razrezax (po danny'm matematicheskogo modelirovaniya) / G. V. Gurin, I. A. Panteev, P. V. Tkachuk // Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2024. Inzhenernaya i rudnaya geologiya 2024 : Materialy` 20-j nauchno-prakticheskoy konferencii i vy`stavki, Kazan`, 13–16 maya 2024 goda. – Moskva: ООО «Geomodel` Razvitie», 2024. – S. 319-323. – EDN NTJAVZ.
5. Ryazancev, P. A. 3D e'lektrotomografiya dlya izucheniya treshhinovatosti massiva gorny'x porod / P. A. Ryazancev, S. V. Burdyux // Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2024. Inzhenernaya i rudnaya geologiya 2024 : Materialy` 20-j nauchno-prakticheskoy konferencii i vy`stavki, Kazan`, 13–16 maya 2024 goda. – Moskva: ООО «Geomodel` Razvitie», 2024. – S. 177-182. – EDN MZSIFM.
6. E'lektrozvedka: Spravochnik geofizika. V dvux knigax / Pod red. V.K. Xmelevskogo i V.M. Bondarenko. Kniga pervaya. – M.: Nedra, 1989. – 438 s.
7. Modin, I.N. E'lektrozvedka v texnicheskoj i arxeologicheskoy geofizike / I.N. Modin // Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora texnicheskix nauk. – Moskva, 2010. – 49 s.
8. Edwards, L.S. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization / L.S. Edwards // Geophysics. – 42. – P. 1020-1036.
9. Marinenko A.V. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy` dlya E`VM DiInSo / A.V. Marinenko // Sv-vo o registr. progr. № 2021662035; RU; № 2021661164, zavavl. 13.07.2021, opubl. 21.07.2021.