

На правах рукописи

Ерохин Сергей Анатольевич

**Применение электротомографии при решении рудных,
инженерных и археологических задач**

25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Шевнин Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: Глазунов Владимир Васильевич
доктор технических наук, профессор.
Национальный минерально-сырьевой
университет «Горный»

Иванов Андрей Александрович
кандидат геолого-минералогических наук,
доцент. Московский государственный
геологоразведочный университет имени
Серго Орджоникидзе

Ведущая организация Прикладной и научно-исследовательский
институт по инженерным изысканиям в
строительстве (ПНИИИС)

Защита состоится 21 ноября 2012 г. в 14.30 на заседании диссертационного
совета Д 501.001.64 при Московском государственном университете имени
М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, ГЗ
МГУ, зона «А», геологический факультет, ауд. 308.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций
Фундаментальной библиотеки (Ломоносовский проспект, 27, сектор А, 8 этаж,
к. 812)

Автореферат разослан «19» октября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Никулин Борис Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы.

Геофизические методы исследования являются средством решения широкого спектра задач, имеющих важное значение для хозяйственной деятельности, научных исследований, безопасности. Необходимость повышения точности и достоверности их решения в рудной, инженерной и археологической геофизике требует создания универсальных геофизических технологий, отвечающих растущим требованиям времени.

В последние десятилетия в области поисков и разведки полезных ископаемых намечился переход к исследованию месторождений более сложного строения, с большими глубинами залегания рудных тел. Для их изучения необходимо создавать методы, способные повысить точность, детальность, производительность, разрешающую способность проводимых исследований.

Сходная ситуация характерна и для области инженерных изысканий. Рост объемов и сложности проводимого строительства и других видов инженерной деятельности требуют повышения информативности и надежности геофизических исследований.

Повышение информативности археогеофизических исследований, являющихся практически единственными средствами неразрушающего исследования памятников, позволит до минимума сократить объем раскопок. Это может привести к качественному прорыву в изучении крупных памятников, а также сыграть важную роль в сохранении археологических объектов для будущих поколений.

Одним из сравнительно новых геофизических методов, с помощью которого можно решать многие из поставленных задач, является электротомография. Как модификация метода сопротивлений на постоянном токе, электротомография унаследовала все принципиальные возможности метода сопротивлений, позволив, в то же время, существенно расширить области его применения. Благодаря этому в настоящее время электротомография становится одним из ведущих геофизических методов исследования верхней части геологического разреза при решении структурно-геологических задач в рудной, инженерной и археологической областях. Это требует более четкого понимания возможностей применения метода в каждом из данных направлений. Оно позволит правильно определять задачи, которые могут быть решены с помощью данного метода, ограничения метода, и оптимально использовать метод в комплексе геофизических исследований.

Для всех геофизических методов и методик важно иметь и использовать совместно программы решения прямых и обратных задач. Во многих практически используемых

программах решения обратных и прямых задач используются конечно-разностные методы, имеющие практические ограничения при расчете прямых задач при сложном рельефе. Поэтому было важно разработать программу двумерного моделирования с рельефом, что было сделано на основе алгоритма метода интегральных уравнений, широко применяемого в разработках кафедры геофизики МГУ.

Цель и задачи исследования.

Разработка и реализация алгоритма учета рельефа в методе интегральных уравнений, определение возможностей метода электротомографии при решении структурно-геологических задач в разных условиях.

Для решения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Создание прямой двумерной задачи метода сопротивлений с рельефом для оценки возможностей учета влияния рельефа при проведении двумерной автоматической инверсии.
2. Определение и развитие возможностей ЭТ при решении рудных и инженерных задач.
3. Разработка методики полного цикла измерений для ЭТ сопровождения археологических раскопок (включая петрофизические исследования образцов, профильную и площадную ЭТ съемку, использование априорной информации), оценка возможности данной методики.

Защищаемые положения.

1. Реализован алгоритм расчета электрического поля для двумерно-построенных сред с учетом рельефа методом интегральных уравнений
2. Исследована эффективность и развиты подходы к интерпретации электротомографии при решении рудных и инженерно-геологических задач.
3. Разработана методика полного цикла электротомографических измерений для решения археологических задач.

Научная новизна.

- Реализован алгоритм учета влияния рельефа при моделировании методом интегральных уравнений, оценена степень учета рельефа при автоматической инверсии в программе Res2DInv.
- Исследованы возможности электротомографии при изучении месторождений Карлинского типа, гидротермальных месторождений коры выветривания и медно-порфировых месторождений, а также вопросы комплексирования электротомографии с другими геофизическими методами для данных типов месторождений.
- Проанализированы возможности электротомографии при решении задач структурного картирования, исследования погребенных карстово-суффозионных воронок, установлена

возможность картирования и изучения древних полигональных структур в средней полосе России с помощью комплекса геофизических методов.

- Разработана и опробована методика «полного цикла» при проведении электротомографических исследований в археологии - от лабораторных анализов до полной заверки результатов, что позволило расширить представления о возможностях применения метода в археологии и дополнить работы предшественников в этом направлении.

Практическая значимость.

Полученные результаты позволили повысить эффективность применения электротомографии при решении геолого-структурных задач, расширить сферу применения метода и способствовали его более широкому внедрению в практику исследований для решения рудных, инженерных и археологических задач.

Фактический материал.

Диссертационная работа написана на основе результатов исследования большого количества разнообразных геологических объектов. К числу основных полевых материалов относятся исследования месторождения Депутатское, Карадагское рудное поле, Александровский геофизический полигон МГУ, ряд инженерных объектов в средней полосе России, проекты по поиску братских захоронений на Бородинском поле и результаты сопровождения археологических раскопок в с. Бородино, проводимых Можайской экспедицией ИА РАН.

Апробация работы.

Результаты исследований, а также основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях «Инженерная и рудная геофизика» (V 2009, Геленджик; VI 2010, Геленджик; VII 2011, Москва) и Near Surface Geoscience (2012, Париж), Петербургском геофизическом научно-практическом семинаре (2009, 2010, Санкт-Петербург), научно-практических конференциях молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве» (ПНИИС, 2009, 2010, Москва), международной научной конференции «Бородино в истории и культуре» (2009, Москва), Пятой общероссийской конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (2010, Москва), международной научно-практической конференции «Электромагнитные методы исследований-2010», научном семинаре «Археология Подмосковья» (2011, Москва), международном молодежном научном форуме Ломоносов-2011 (2011, Москва).

Публикации

Основные положения диссертации изложены в 28 работах, в том числе в 4 статьях и 25 тезисах докладов.

Структура и объем работы: диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 140 страниц текста, 61 рисунок. Список литературы составляет 177 наименований.

Благодарности

Автор благодарен и глубоко признателен доценту А.А. Бобачеву за помощь, поддержку, критику, плодотворные и интересные идеи.

Автор благодарен научному руководителю профессору В.А. Шевнину за конструктивную критику и очень большую помощь в процессе всей работы, и особенно на последних этапах ее написания.

Автор благодарен заведующему Лабораторией малоглубинной электроразведки профессору И.Н. Модину за поддержку, полезное общение и возможность заниматься очень интересными проектами как в рамках настоящей работы, так и в течение всего времени обучения в аспирантуре.

Автор благодарит за помощь в работе и энтузиазм в отношении проведенных исследований Г.М. Довыденко и А.Ю. Балашова. Также хотелось бы выразить благодарность за помощь в процессе работы, интересное общение и ценные замечания сотрудникам кафедры С.А. Акуленко, Д.К. Большакову, Л.А. Золотой, С.В. Ивановой, М.Н. Марченко, А.Ю. Паленову, А.Г. Яковлеву.

Особенно автор благодарит своих коллег – магистрантов и аспирантов, принимавших участие в проведении полевых работ, работе с материалами, и обсуждении их результатов: А.М. Павлову, Д.В. Макарова, Т.В. Ялова, А.И. Груздева, А.А. Пелевина, Д.Н. Уразаеву, Е.О. Рылову, А.С. Тамберга, М.А. Андреева, Д.А. Зайцева.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определены цели, сформулированы основные задачи исследований, отмечена практическая значимость и научная новизна работы.

Глава 1. Обзор состояния области исследования

Первая глава посвящена краткому обзору современного состояния электротомографической технологии и основных направлений ее применения.

Современная электротомография (ЭТ) представляет собой целый комплекс, включающий как методику полевых наблюдений, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных (*Бобачев и др., 2006, 2007*). Начало разработки большинства элементов комплекса относится к 1970 – 1980 гг. (*Little, Dines, 1978; Pelton, 1978*). За более

чем двадцатилетний период была разработана аппаратура для ЭТ, методика проведения полевых работ, а также алгоритмы обработки и инверсии полученных данных.

Чаще всего ЭТ исследования предполагают наличие большого числа наблюдений (в сравнении со стандартными методами ВЭЗ и ЭП) и проведение автоматической инверсии – трансформации, осуществляющей математический пересчет поля кажущегося сопротивления в истинное. Таким образом решение обратной задачи позволяет восстанавливать распределение удельного сопротивления под землей для, вообще говоря, любой двумерной модели среды.

В настоящее время разработаны несколько математических методов решения прямых задач в методе ЭТ (*Madden, 1971; Hohmann, 1975; Mufti, 1976; Xu et al., 1998*). На кафедре геофизики в МГУ активно для решения прямых задач на постоянном токе развивается метода интегральных уравнений (*Альпин, 1947*). К его достоинствам относится ясный физический смысл, а также удобство и точность при задании простых моделей. В практике ЭТ исследований наиболее часто используются сеточные методы моделирования (*Day, Morrison, 1979*), имеющие большие преимущества при решении обратной задачи, позволяя эффективно в автоматическом режиме искать гладкие решения и за счет этого в рамках гладких моделей описывать двумерное распределение сопротивления в реальных средах (*Loke, Barker, 1995*).

На таком алгоритме построены программы, используемые на практике для определения электрического сопротивления в разрезе при решении рудных, инженерных и археологических задач. Рудные объекты, представляющие интерес для разведки в настоящее время, являются объектами со сложной морфологией, их исследование с помощью одномерных методов может приводить к неправильным количественным, и даже качественным результатам. Переход к ЭТ при решении рудных задач позволяет не только работать в рамках более сложных моделей сред, но и несет преимущества при исследовании вызванной поляризации в сравнении с традиционными методами. (*Savin et al., 2003; Khaksar et al., 2007*). В целом, процесс внедрения ЭТ в производственную практику решения рудных задач является сравнительно новым направлением.

Более широко применяется ЭТ при решении различных инженерных задач: общего структурно-геологического картирования (*Soupios et al., 2007*), изучения оползневых процессов (*Jongmans, Garambois, 2007*), карстовых процессов (*Stepišnik, 2008*) и др.

Большой интерес представляет ЭТ при проведении археологических исследований в связи с высокой детальностью изучения верхней части разреза. Применение ЭТ в археологии является важным направлением археологической геофизики (*Модин, 2010*).

Глава 2. Расчет прямой двумерной задачи с рельефом методом интегральных уравнений для контроля результатов инверсии

Вторая глава посвящена разработке и реализации алгоритма расчета прямой двумерной задачи с рельефом методом интегральных уравнений (МИУ) и анализу учета влияния рельефа при проведении автоматической двумерной инверсии.

Наиболее часто используемые на практике (*Day, Morrison, 1979*) методы решения прямых задач ЭТ основаны на использовании сеточных методов. Они очень удобны для большого числа практических целей, но содержат несколько важных недостатков, связанных с невозможностью адекватного описания негладкой функции в дискретном пространстве. На практике это приводит к следующим ограничениям. 1. Невозможно задание кусочно-непрерывной границы, не повторяющей в той или иной степени линии сетки. 2. Проблема сингулярности (сложности при описании поля вблизи неоднородности), относящаяся как к

функции источника (*Lowry et al., 1989*), так и к неоднородностям рельефа (сложности при описании поля вблизи угловых точек рельефа: вблизи вершин вогнутых форм рельефа поле стремится к бесконечности, вблизи вершин выпуклых – к нулю). Этот эффект имеет наибольшее значение при наличии резких границ и острых углов в модели, даже незначительное их сглаживание существенно изменяет поле кажущегося сопротивления (рис. 2.1). Подобные резкие перегибы и углы между границами в реальных средах встречаются сравнительно редко, однако при проведении моделирования необходимо иметь инструмент для корректной работы с ними.

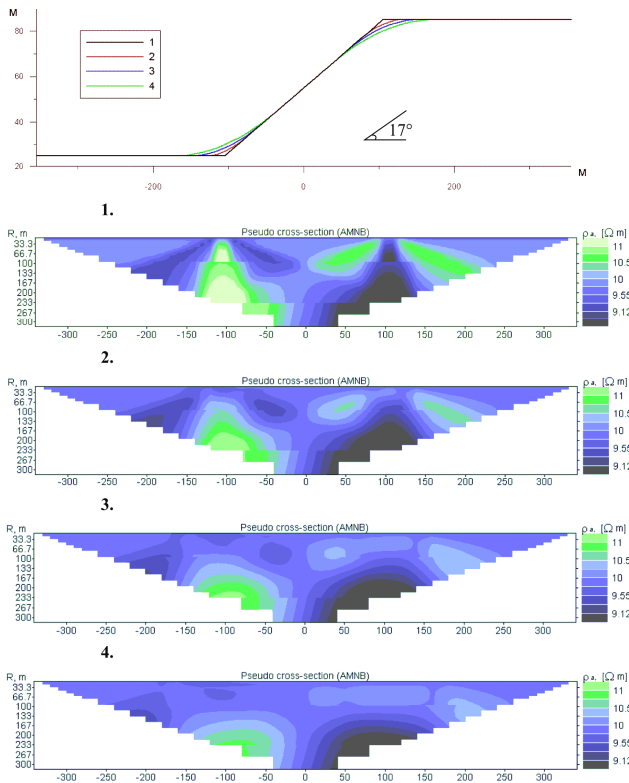


Рис.2.1. Кажущееся сопротивление для модели однородного полупространства с рельефом при разной гладкости рельефа

Кроме того, при проведении автоматической инверсии сеточными методами невозможно полностью учесть влияние рельефа, что важно осознавать при проведении интерпретации полевых данных. Это, опять же, требует инструмента для решения прямых задач, отличного от используемого при автоматической инверсии. В качестве альтернативного метода решения прямых задач нами был выбран метод интегральных

уравнений (МИУ), активно используемый на кафедре геофизики (*Электрическое зондирование...*, 1988, Бобачев, 2003).

Идея этого метода заключается в представлении электрического поля, как суммы первичного поля (создается питающими электродами) и поля вторичных зарядов (возникают при протекании электрического тока в местах нарушения однородности среды):

$$E = E^0 + E^s, \quad (2.1)$$

где E^0 - вектор первичного электрического поля, E^s - вектор суммарного электрического поля вторичных зарядов.

В случае кусочно-постоянного распределения сопротивления вторичные заряды возникают только на границах неоднородностей. Рассмотрим описание вторичных зарядов на поверхности раздела между средами с удельными сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 . Поверхностную плотность вторичных зарядов Σ в некоторой точке m границы можно определить на основании разрыва нормальной компоненты электрического поля на поверхности заряженной плоскости (*Кауфман, 1997*):

$$\frac{\Sigma}{\epsilon_0} = E_n^2 - E_n^1, \quad (2.2)$$

где E_n^1 и E_n^2 - значение нормальной компоненты электрического поля на разных сторонах границы соответственно, а ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума. Нормаль направлена из первой среды во вторую.

На основании (2.2) и граничных условий для постоянного тока получим уравнение, которое связывает поверхностную плотность вторичных зарядов $\Sigma(m)$ в некоторой точке границы m с контрастом удельного сопротивления и электрическим полем в этой точке:

$$\frac{\Sigma(m)}{\epsilon_0} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} (E_n^2(m) + E_n^1(m)) = 2 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} E_n^{cp}(m), \quad (2.3)$$

где $E_n^{cp}(m)$ - среднее значение нормальной компоненты электрического поля в точке m , которое зависит как от первичного поля, так и от распределения вторичных зарядов, ρ_2 и ρ_1 - сопротивления сред.

Выберем окрестность точки m , достаточно малую, чтобы считать нормаль постоянной. Тогда нормальная компонента электрического поля от вторичных поверхностных зарядов в этой окрестности равна:

$$dE_n^m = \pm \frac{\Sigma(m)}{2 \epsilon_0}, \quad (2.4)$$

где знак зависит от того, на какой стороне поверхности исследуется поле.

Учитывая это, нормальную компоненту поля в точке m можно представить следующим образом:

$$E_n^1(m) = E_n^0 + E_n^{S-m} - \frac{\Sigma(m)}{2\epsilon_0}, \quad E_n^2(m) = E_n^0 + E_n^{S-m} + \frac{\Sigma(m)}{2\epsilon_0}, \quad (2.5)$$

где E_n^0 - нормальная компонента первичного электрического поля в точке m , E_n^{S-m} - нормальная компонента, вызванная всеми вторичными зарядами, кроме расположенных в окрестности точки m . Таким образом, мы можем выразить среднее значение электрического поля следующим образом:

$$E_n^{cp}(m) = E_n^0 + E_n^{S-m}. \quad (2.6)$$

На основании формулы (2.6), уравнение (2.3) можно записать в виде

$$\frac{\Sigma(m)}{\epsilon_0} = K E_n^{cp}(m) = K (E_n^0(m) + E_n^{S-m}(m)), \quad K = 2 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}, \quad (2.7)$$

где K - удвоенный коэффициент электрической эмиссии.

Поле вторичных зарядов в точке m определяется следующим интегралом:

$$\mathbf{E}_n^{S-m}(m) = - \int_{S-m} \frac{\Sigma(s)}{\epsilon_0} \frac{\partial G(s,m)}{\partial n} ds, \quad (2.8)$$

где $S-m$ - граница всех неоднородностей за исключением окрестностей точки m , а $G(s,m)$ - функция Грина для точек s и m :

$$G(s,m) = \frac{1}{4\pi L_{sm}}, \quad (2.9)$$

где L_{sm} - расстояние между точками s и m .

Расчет первичного поля осуществляется по формуле

$$U^0(m) = \frac{I}{\sigma_{cp}(a)} G(a,m), \quad (2.10)$$

где $\sigma_{cp}(a)$ - средняя удельная проводимость в окрестности точки a , которая равна:

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{4\pi} \sum_t^n \omega_t \sigma_t, \quad (2.11)$$

где n - число сред, с которыми соприкасается точка a , ω_t - телесный угол, под которым видна из a часть сферы малого радиуса с центром в точке a , вырезаемая границей среды с удельной электропроводностью σ_t (рис. 2.2).

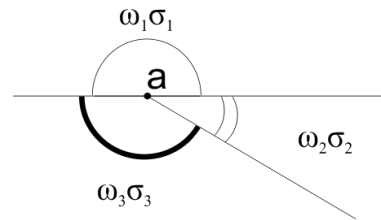


Рис.2.2. Секторальное распределение электропроводности. Горизонтальный рельеф, одна граница.

На основании (2.7) и (2.8) получаем интегральное уравнение Фредгольма II рода относительно $\Sigma(m)$ (Альпин, 1981):

$$\frac{\Sigma(m)}{\varepsilon_0} = K(m) \left(E_n^0(m) - \int_{s-m} \frac{\Sigma(s)}{\varepsilon_0} \frac{\partial G(s, m)}{\partial n} ds \right), \quad (2.11)$$

где $K(m)$ определяется по формуле (2.7) в зависимости от контраста сопротивлений на границе и выбранного направления нормали.

В работе (Бобачев, 2003) рельеф рассматривается как вторичная неоднородность по отношению к нормальному разрезу (модель, для которой существует эффективный алгоритм расчета функции Грина), в качестве которого используется однородное полупространство. Такой подход позволяет анализировать разрезы, содержащие только локальные неоднородности рельефа.

В предлагаемом в настоящей работе алгоритме производится расчет только аномального поля. Рельеф разбивается на ячейки, каждая из которых служит источником вторичных зарядов. При таком подходе поле в точке наблюдения представляют собой сумму первичного (рассчитывается на основании секторальной проводимости с учетом рельефа, рис. 2.3) и вторичного полей, в уравнение (2.8) для вторичного поля в качестве неоднородностей входят и ячейки рельефа. Такой алгоритм позволяет рассчитывать модели с произвольным рельефом местности (при углах склона, не превышающих вертикальный).

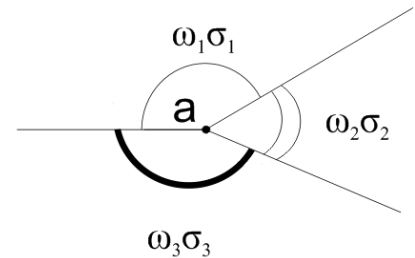


Рис.2.3. Секторальное распределение электропроводности при перегибе рельефа и границе в точке питающего электрода.

Добавление рельефа по описанной схеме приводит к существенной модификации метода интегральных уравнений по сравнению с вариантом, реализованным в программе моделирования IE2DP. Во-первых, не применяется метод отражений и, во-вторых, появляется возможность существенно изменить метод расчета при попадании питающего электрода в особые точки (углы рельефа, точки пересечения границ). Однако подобный вариант учета рельефа применим только для установок с линейным шагом между электродами (ЭТ наблюдения), так как число ячеек рельефа не бесконечно: при моделировании, например данных ВЭЗ, положение электродов на профиле может быть практически произвольным, что потребует наличия ячеек у каждого такого положения.

Описание разработанного алгоритма учета рельефа и решения прямой задачи в методе интегральных уравнений.

1. Разбиение неоднородностей. Нами используется алгоритм И.Н. Модина (*Электрическое зондирование...*, 1988). Полученное с его помощью разбиение трансформируется с измерением геометрических параметров ячеек, к разбиению добавляются ячейки рельефа. Количество ячеек рельефа определяется требуемой точностью. Согласно полученным оценкам, шаг разбиения, в два раза превышающий шаг между электродами, является достаточным.

2. Расчет первичного поля на основе секторальной проводимости, расчет интенсивности вторичных зарядов (2.8, рис. 2.4).

3. Расчет пространственных частот на основе геометрии модели и наблюдений.

4. Для каждой частоты формирование матрицы взаимных влияний и дискретного аналога интегрального уравнения (2.11). На основании решения этого уравнения

определение спектрального потенциала в точке наблюдения.

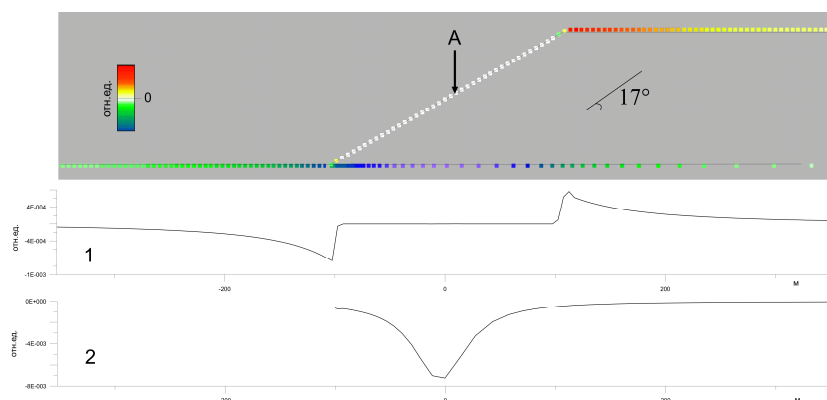


Рис. 2.4. Интенсивность вторичных источников в модели с рельефом и одной границей для положения А питающего электрода. 1 – график интенсивности для ячеек рельефа, 2 – для ячеек горизонтальной границы. ρ верхнего слоя 50 Ом·м, нижнего – 10 Ом·м.

5. Восстановление потенциала в действительной области, расчет поля и кажущегося сопротивления.

Оценка правильности работы алгоритма проводилась для простых

моделей с помощью сравнения с результатами моделирования в программе ZondRes2D.

Для оценки учета влияния рельефа на результаты инверсии в программе Res2DInv для нескольких моделей были произведены расчет прямой задачи в разработанной программе и инверсия полученных данных с помощью программы Res2DInv (рис. 2.5). На основании модельных данных можно говорить о том, что при проведении автоматической двумерной инверсии поля от рассматриваемых моделей наблюдается недостаточный учет влияния рельефа местности. Это выражается в изменении падения градиентных зон, соответствующих границам, на геоэлектрических разрезах, а также к возникновению артефактов в нижнем слое. Данные особенности работы алгоритма инверсии необходимо учитывать при проведении интерпретации геоэлектрических разрезов по данным ЭТ.

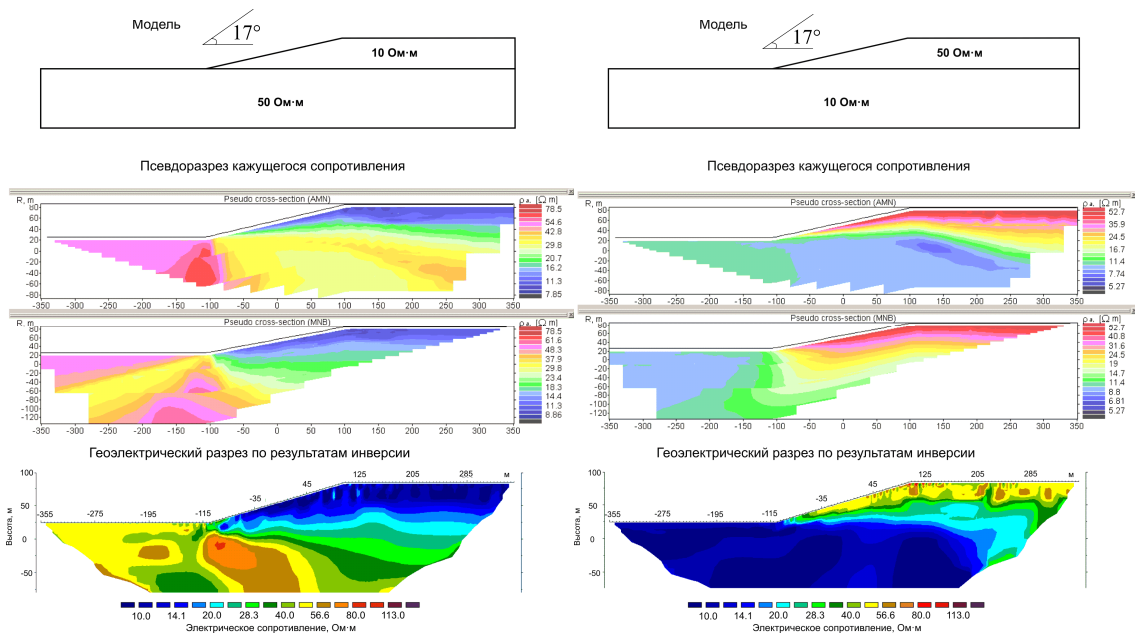


Рис.2.5. Результаты моделирования с помощью МИУ и инверсия модельных данных в Res2DInv.

Такие ситуации типичны для средней полосы России, где ледниковые отложения образуют положительные формы рельефа. Например, на рис. 2.6 субгоризонтальное положение подошвы флювиогляциальных отложений по геозлектрическому разрезу (слой высокого сопротивления, ограничен снизу красной линией), скорее всего, соответствует действительности. В то же время кажущееся понижение подошвы моренных отложений (слоя низкого сопротивления) может являться артефактом инверсии. Поэтому при проведении интерпретации эту границу целесообразнее проводить субгоризонтально, пересекая изолинии сопротивления.

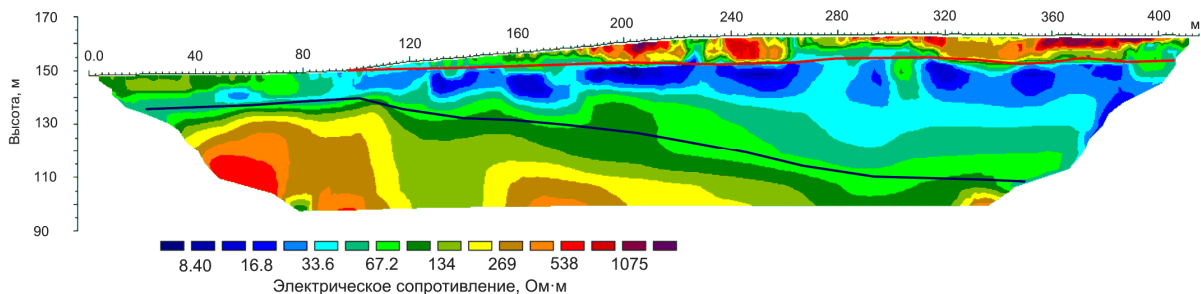


Рис.2.6. Геозлектрический разрез, полученный по результатам автоматической инверсии полевых данных по одному из профилей электротомографии на Александровском полигоне.

Также обращают на себя внимание субвертикальные артефакты в нижнем проводящем слое, аналогичные наблюдаемым на рис 2.5.

Таким образом, разработан и программно реализован алгоритм расчета электрического поля для двумерно-построенных сред с учетом рельефа местности методом интегральных уравнений. Произведен расчет прямых задач для ряда простых моделей с

рельефом, позволивший проводить оценку учета влияние рельефа по профилю наблюдений на результаты автоматической инверсии данных электротомографии.

Произведена оценка учета влияние рельефа в программе инверсии Res2Dinv для ряда моделей с рельефом.

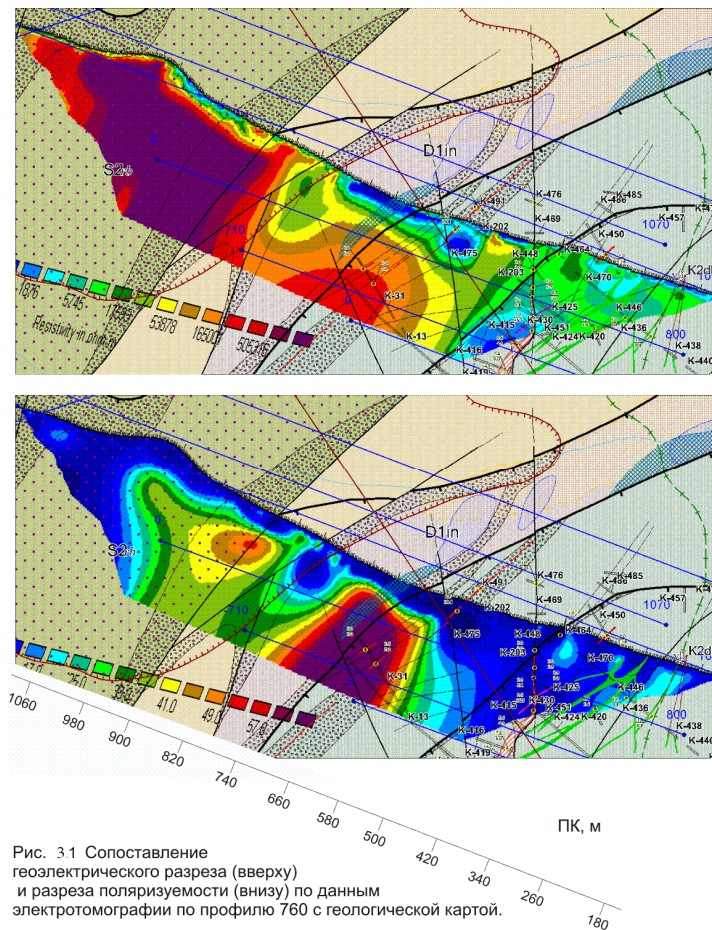
Глава 3. Применение электротомографии при решении рудных задач

Глава 3 посвящена применению ЭТ при решении рудных задач на примере исследований Калычанской площади в Северной Якутии и Карадагского рудного узла в Азербайджане.

Калычанская рудная зона находится в пределах Черско-Полоусненской складчатой системы и представляет собой сложно построенное гетерогенное складчато–глыбовое сооружение. В его строении участвуют разнообразные вещественно–структурные комплексы, сформированные в различных геодинамических обстановках. Наиболее широко представлены карбонатные, карбонатно–терригенные и терригенно–карбонатные комплексы континентального палеозойского шельфа. Локализовано оруденение в минерализованных зонах дробления, относящихся к золото–сурьмяно–ртутной формации, размещение которых контролируется сбросами и разрывными нарушениями, опережающими надвижки. В

большинстве случаев зоны дробления приурочены к крутопадающим зонам межслоевых срывов. Часть минерализованных зон, по отношению к вмещающим породам, связана с секущими разрывными нарушениями.

Столь сложное геологическое строение требует применения ЭТ как метода позволяющего работать по крайней мере с двумерными моделями среды. Для определение эффективности применения ЭТ при исследовании рудных объектов такого типа было проведено сопоставление геоэлектрических разрезов по результатам исследования и априорной



геологической информации (рис. 3.1).

Проведенное сопоставление показывает, что все границы и зоны, выделяемые при геологической съемке, отражаются в геоэлектрическом разрезе. На основании электротомографических геоэлектрических разрезов возможно определение строения структур в разрезе, что относится также и к сложно построенным, двумерным структурам.

На основании интерпретации данных электротомографии при использовании априорной информации можно давать количественные оценки углов падения структур, нижних границ выделяемых зон. Значительным ограничением метода при решении рудных задач является падение разрешающей способности с глубиной. Это говорит о необходимости проведения моделирования при планировании полевых исследований, а также о значительном понижении точности интерпретации нижних горизонтов геоэлектрического разреза.

При измерении процессов вызванной поляризации при использовании электротомографии появляется возможность сопоставления выделенным структурам геоэлектрического разреза значений поляризуемости. Это позволяет проводить интерпретацию в терминах распространения электропроводящих минералов, что часто является основной целью при решении рудных задач. В то же время интерпретация полученных разрезов поляризуемости является очень сложной задачей при отсутствии лабораторных измерений керна или данных каротажа. В частности, в ходе проведенных исследований в некоторых зонах амплитуды аномалий интегральной поляризуемости рудной

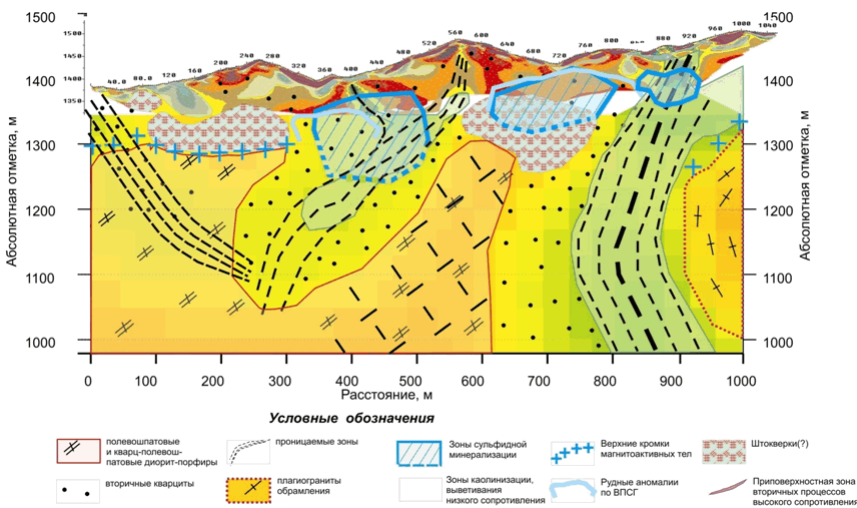


Рис. 3.2. Комплексный геоэлектрический разрез с результатами качественной геолого-геофизической интерпретации по профилю 2.

и нерудной природы оказались сопоставимы, что исключает возможности их разделения без дополнительной геологической информации или применения технологии спектральной вызванной поляризации. Также необходимо отметить более низкую

разрешающую способность метода при изучении поляризуемости и более значительное падение разрешающей способности с глубиной, чем при изучении сопротивления.

Сопоставление геоэлектрических разрезов и разрезов с результатами других методов показывают, что большими практическими возможностями обладает электротомография при проведении комплексных исследований, в частности, при комплексировании с профилированием в варианте срединного градиента (ВП-СГ). Применение данного комплекса позволяет существенно повысить производительность и результативность исследований, в случае, если на основании ВП-СГ проводится выделение перспективных зон в плане, а на основании данных томографии – привязка соответствующих аномалий по глубине и изучение выделенных зон в разрезе.

В отношении возможностей межметодного комплексирования ЭТ с другими методами при решении рудных задач показателен пример Карадагского рудного поля, где при изучении медно-порфирового оруденения удалось построить единую качественную модель по нескольким методам исследования, включающим магниторазведку, ВП-СГ, ЭТ и АМТЗ. В этом случае по АМТЗ определяется глубинное строение разреза, а по ЭТ – строение верхних 100-150 метров.

Глава 4. Применение электротомографии при решении инженерных задач

Глава 4 посвящена применению ЭТ при решении инженерных задач на примере задач общего картирования и выделения структурных зон, исследования карстоопасных территорий и исследования «слабых» аномалий геологического строения на примере реликтовых криогенных полигональных структур.

Одной из важнейших задач, стоящих перед геофизическими методами исследования, является задача изучения геологического строения территории. В рамках настоящих исследований для оценки практических возможностей и эффективности применения метода

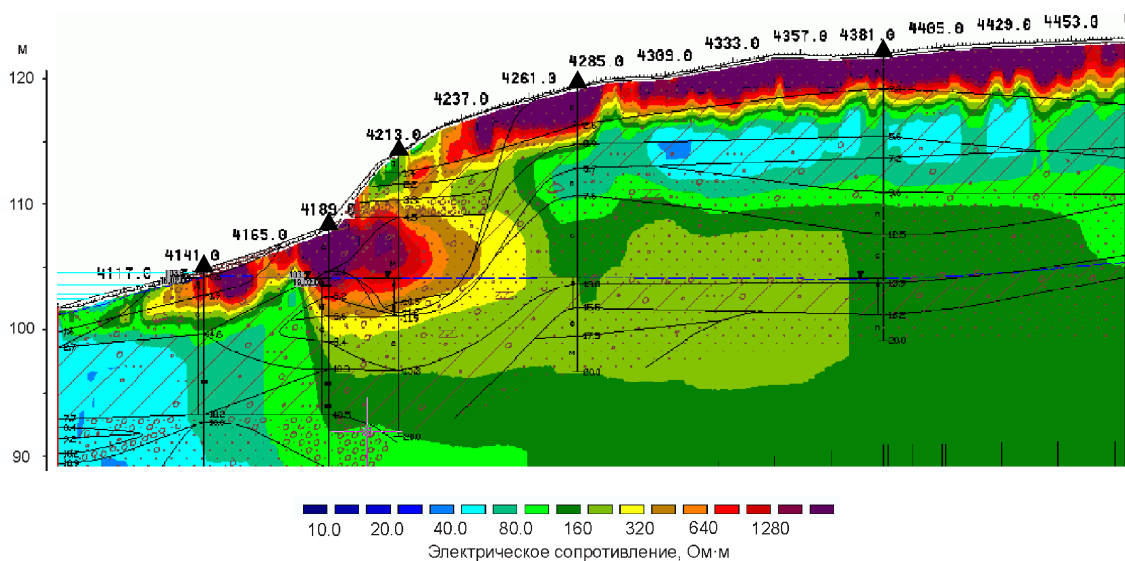


Рис. 4.1 Сравнение результатов бурения и геоэлектрического разреза. Берег р. Волга.

ЭТ было проведено моделирование и сопоставление с имеющейся геологической информацией результатов ЭТ-исследований десятков инженерных объектов.

К одним из наиболее интересных примеров применения электротомографии в рамках настоящих исследований относятся результаты электротомографических исследований на

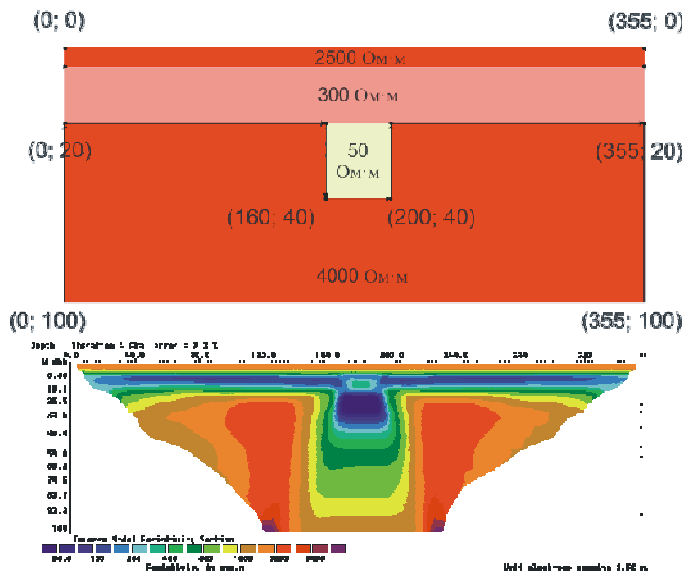


Рис. 4.2. Модель карстово-суффозионной воронки и результат решения обратной задачи для этой модели.

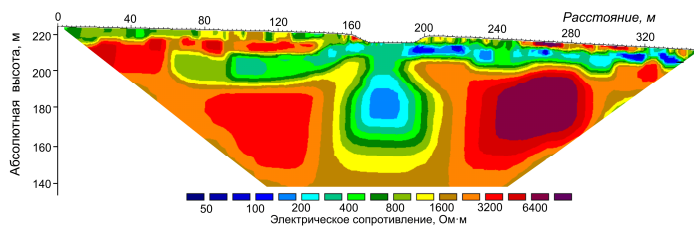


Рис. 4.3. Геоэлектрический разрез по профилю над карстово-суффозионной воронкой.

действия принципа эквивалентности для метода постоянного тока, что оказывается верным не только для одномерных, но и для двумерно построенных сред. Последнее существенно расширяет область применения электротомографии по сравнению с традиционными модификациями метода сопротивлений. Плавный рельеф реальных сред и отсутствие очень больших углов наклона (как на рис. 4.1) обеспечивает корректный учет влияния рельефа при проведении автоматической двумерной инверсии данных ЭТ.

Во многих случаях детальность геоэлектрических разрезов, полученных по данным электротомографии, соответствует детальности инженерно-геологического бурения. Несоответствие встречается сравнительно редко и связано с падением разрешающей способности метода с глубиной.

В настоящее время ЭТ относится к основным методам, применяемым при исследовании карстовых процессов (*Wightman, Zisman, 2008*). В литературе накоплен

Александровском геофизическом полигоне кафедры, а также в рамках проектов по изучению переходов трасс трубопроводов через равнинные реки. Как в примере, представленном на рис. 4.1, здесь часто наблюдается сочетание высокого контраста сопротивлений между суглинистыми и песчанистыми отложениями, двумерное строение песчаных тел и существенный рельеф на профиле наблюдений. Сопоставление

геоэлектрических разрезов по результатам ЭТ и данных бурения показывает, что наблюдается высокая степень соответствия геоэлектрических разрезов и результатов бурения в рамках

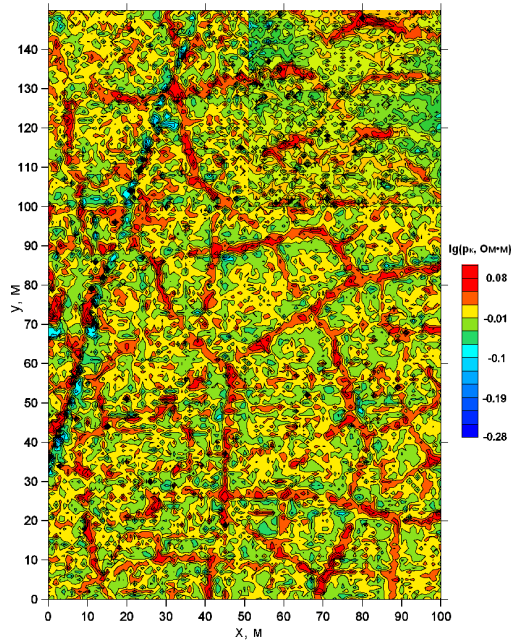


Рис. 4.3. Карта инвариантов кажущегося сопротивления по результатам СГ после снятия регионального фона. Участок «Раевского-3», Бородинское поле.

большой опыт изучения карстоопасных территорий. В рамках настоящей работы нами этот опыт был расширен за счет изучения возможностей ЭТ при исследовании карстово-суффозионных воронок. С помощью моделирования (рис. 4.2) и по результатам полевых исследований (рис. 4.3) показано, что подобные объекты имеют характерное проявление в геоэлектрическом разрезе, что позволяет уверенно обнаруживать их при проведении практических исследований и определять их основные параметры.

Высокая разрешающая способность при исследовании верхней части геологического разреза позволяет использовать ЭТ при изучении «слабых», малоамплитудных аномалий геологического строения. К таким аномалиям относятся криогенные полигональные структуры, возникающие результате морозобойного растрескивания при многократном сезонном промерзании и оттаивании. В рамках настоящей работы была впервые установлена возможность изучения реликтовых криогенных полигональных структур (периода четвертичных оледенений) в средней полосе России с помощью методов постоянного тока рис. 4.4).

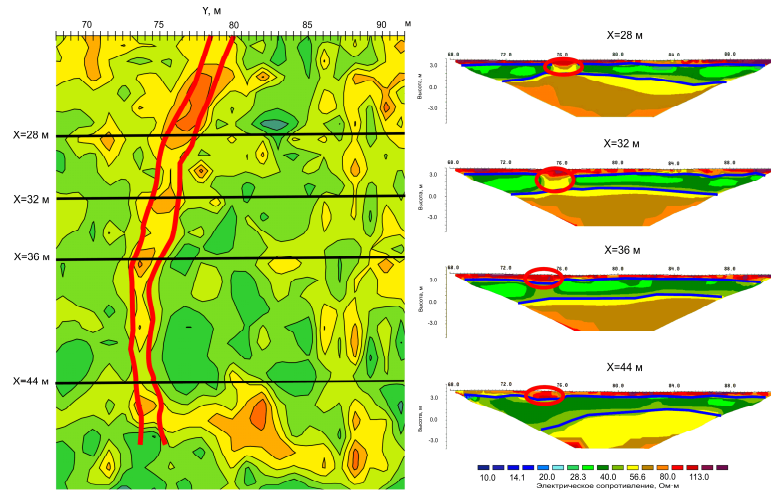


Рис. 4.5. Карта кажущегося сопротивления СГ и геоэлектрические разрезы по данным электротомографии на участке «Братская могила -1».

В средней полосе единственным методом изучения данных образований являлась аэрофотосъемка. Однако из-за залесенности и влияния распашки, аэрофотосъемка имеет ограниченное применения для изучения реликтовых криогенных структур. Поэтому возможность их картирования с помощью геофизических методов является своеобразным прорывом в этой области. При решении данной задачи ЭТ в рамках комплекса геофизических методов выступает в качестве эффективного средства изучения строения

палеомерзлотных структур в разрезе (рис. 4.5), позволяя определять глубину и ширину трещин. Эта информация, в свою очередь, может быть важна при проведении палеогеографических реконструкций.

Глава 5. Применение электротомографии при решении археологических задач

Глава 5 посвящена разработке и опробованию методики «полного цикла» ЭТ

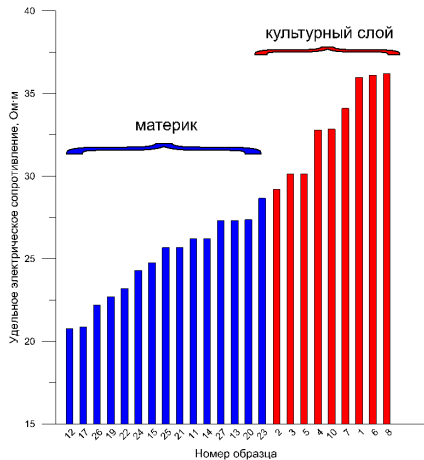


Рис. 5.1. Результаты лабораторных исследований образцов грунта, взятых из материка и культурного слоя.

исследований для решения археологических задач. Необходимость в данной методике определяется потребностями в увеличении качества и достоверности интерпретации разрезов ЭТ, а также необходимостью понимания эффективности данного метода при практических археологических исследованиях. Методика включает в себя производство лабораторных петрофизических измерений образцов, взятых из шурфа или раскопа на исследуемой территории, построение петрофизической модели по результатам этих измерений, проведение профильных и площадных (по системе параллельных профилей) исследований, интерпретация полученных данных на основании созданной петрофизической модели.

Данная методика опробовалась при археологических раскопках Можайской экспедиции ИА РАН в с. Бородино. Для оценки ее эффективности результаты интерпретации сравнивались с результатами раскопок.

Лабораторные измерения удельного электрического сопротивления для 28 образцов из разных участков раскопа “Пожарный” были проведены по методике, изложенной в работе

[Shevnin et al., 2007] с помощью стандартной электроразведочной аппаратуры – МЭРИ, Астры и Syscal Pro. Были проведены измерения сопротивления образцов грунта, взятых из разных горизонтов культурного слоя и материка. При этом все образцы были взяты из

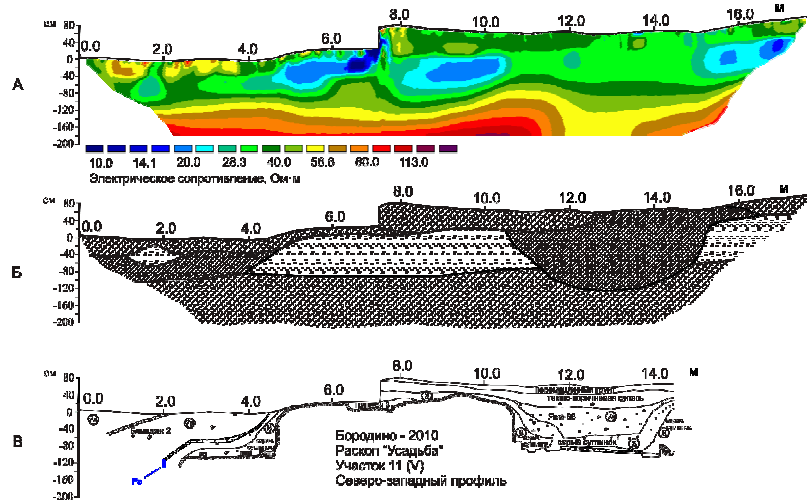
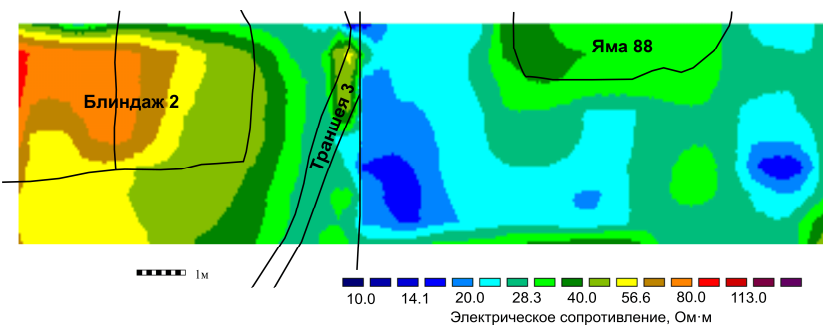


Рис. 5.2. Результаты исследований по северо-западному профилю раскопа “Усадьба 11”. А - геозлектрический разрез по методу электротомографии, Б - результат интерпретации, нарисованный геофизиками, В - разрез по результатам раскопок.

одного раскопа (раскоп Пожарный) размерами 14×5м, то есть характеризуют степень изменчивости параметров в очень ограниченной по геологическим меркам площади.

Результатом измерений явилась петрофизическая модель, основными элементами которой являются объекты исследования первого порядка – культурный слой и материк (рис. 5.3). Установлено, что сопротивление пород культурного слоя достоверно и существенно



отличается от сопротивления пород материка. В частности, средние значения составляют, соответственно, 32 и 25 Ом·м (отличие в 1.3 раза).

Рис. 5.3. Результаты площадных электротомографических измерений на участке “Усадьба 11”. Сопоставление распределения сопротивления на глубине 80-100 см от поверхности и плана-схемы части раскопа.

Полученные результаты были

использованы при интерпретации ЭТ исследований на соседнем участке. После проведения исследований участок был раскопан, полученные результаты представлены на рис. 5.2.

Результаты раскопок подтвердили правильность проведенной интерпретации. Выделенные нами основные границы соответствуют границе культурный слой – материк. Ошибка определения глубины положения границ оказывается в пределах 20 см.

Исследования по системе параллельных профилей позволили проследить в плане структуры, выделенные на северо-западном профиле. С помощью полученных карт изолиний удельного сопротивления удалось локализовать в плане основные объекты (рис. 5.3). Траншея 3 пересекает уступ в рельефе, что, скорее всего, повлияло на возможность ее обнаружения.

Также предложенный подход позволяет выделять локальные аномалии сопротивления, представляющие локальные археологические объекты (рис. 5.4).

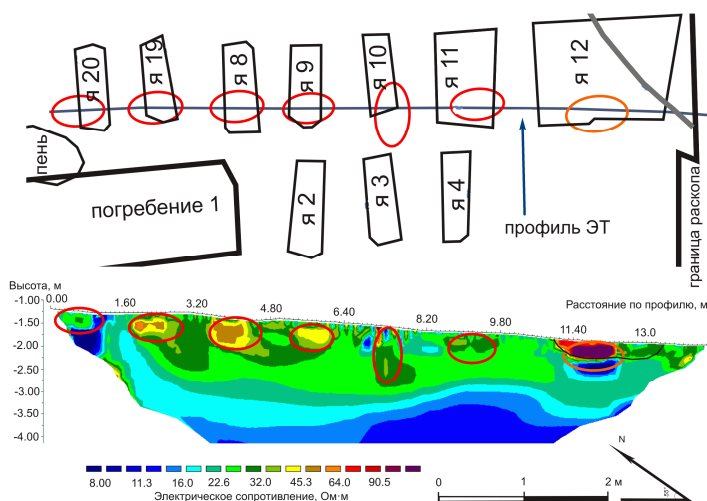


Рис. 5.4. Раскоп «Почтовый» – положение одиночных могил в плане по результатам раскопок и в геоэлектрическом разрезе (обозначены красным).

исследований полного цикла говорят об эффективности предложенного подхода. Его применение в ряде случаев может позволить сократить объем раскопок без существенного уменьшения количества информации.

Заключение

Основные результаты работы можно свести к следующему:

1. Реализован алгоритм расчета электрического поля для двумерно-построенных сред с учетом рельефа методом интегральных уравнений. Создан инструмент для контроля результатов автоматической двумерной инверсии. При этом особенно важно, что этот инструмент имеет физическую основу, отличную от сеточных методов. Оценена степень учета влияния рельефа на результаты инверсии для ряда простых моделей, что позволит повысить качество интерпретации полевых данных в сходных условиях.

2. На материале электротомографических исследований большого количества рудных и инженерных объектов рассмотрены и проанализированы возможности метода при решении соответствующих задач. Выявлены особенности интерпретации геоэлектрических в разных геологических ситуациях, что позволило повысить качество интерпретации данных и, как следствие, достоверность применения метода.

3. Разработана методика полного цикла электротомографических измерений для решения археологических задач. Методика включает в себя проведение лабораторных исследований образцов и интерпретацию полевых профильных и площадных электротомографических данных на основе результатов петрофизических исследований. Данная методика в ряде случаев может позволить существенно сократить объем раскопок без потери информации.

Результаты работы развивают аппарат методов моделирования на постоянном токе, и могут повысить эффективность электротомографических исследований при решении рудных, инженерных и археологических задач.

Публикации по теме диссертации

Статьи в реферируемых журналах:

1. Бобачев А.А., Ерохин С.А. Практика применения электротомографии на малоглубинных акваториях// Инженерные изыскания, №11, 2011.
2. Ерохин С.А., Модин И.Н., Новиков В.П., Павлова А.М. Возможности электрической томографии при изучении карстово-суффозионных воронок // Инженерные изыскания №11, 2011.
3. Ерохин С.А., Модин И.Н., Паленов А.Ю., Шевнин В.А. Картирование реликтовых криогенных полигональных структур с помощью геофизических методов //Инженерные изыскания №11, 2011.

Статьи в других изданиях и тезисы конференций:

1. Бобачев А.А., Ерохин С.А. Результаты многолетнего применения электротомографии на Александровском геофизическом полигоне в Калужской обл. Приборы и системы разведочной геофизики, №01(31)/2010.
2. Бобачев А.А., Ерохин С.А. Опыт применения электротомографии на Александровском геофизическом полигоне в Калужской области. Тезисы докладов 5-ой международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика - 2009», Геленджик, 26-30 апреля 2009.
3. Ерохин С.А., Бобачев А.А. Исследование перспективного золоторудного участка в северной Якутии с помощью электротомографии// Тезисы докладов 5-ой международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика - 2009», Геленджик, 26-30 апреля 2009.
4. Бобачев А.А., Ерохин С.А., Шевнин В.А. 2D моделирование и инверсия электротомографии для обучения и изучения. Тезисы докладов 6-ой международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика - 2010», Геленджик, 26-30 апреля 2010 г.
5. Modin I.N., Erokhin S.A., Pavlova A.M, Kats M.Y. Geophysical Investigations of Early Middle-ages Turkic Fortresses // Near Surface Geoscience 2012 – 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Paris, France, 3-5 September 2012.
6. Shevnin V.A., Erokhin S.A., Pavlova A.M. Anisotropy of Hydraulic Conductivity Investigations with Azimuthal Self Potential Measurements// Near Surface Geoscience 2012 – 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Paris, France, 3-5 September 2012.