

На правах рукописи



ФАГЕ Алексей Николаевич

**ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ
ИНСТРУМЕНТАРИЙ ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАННЫХ
ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ
ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЛОЖНЫХ
ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Ельцов Игорь Николаевич,
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Глинский Борис Михайлович, доктор технических наук, профессор, ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, главный научный сотрудник (г. Новосибирск);

Бобров Никита Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», доцент кафедры геофизики (г. Санкт-Петербург).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск.

Защита состоится 15 июля 2021 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

просп. Акад. Коптюга, 3, г. Новосибирск, 630090;
факс (8-383) 330-28-07;
e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/commettee/fage2021>

Автореферат разослан 14 мая 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м.н., доцент
8(383)333-16-39



Н.Н. Неvedрова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена созданию высокопроизводительного инструментария для автоматизации численных расчётов данных электротомографии, работающего на графических процессорах, а также его практическому применению для моделирования сложных геологических объектов в Новосибирской и Кемеровской областях для поиска водоносных горизонтов и картирования угольных пластов, а также Республике Саха (Якутия) для исследования геокриологических объектов. В настоящее время основные имеющиеся программы численного моделирования электротомографии позволяют выполнять расчёты исключительно на центральных процессорах и, таким образом, не дают возможность использовать весь вычислительный потенциал современных рабочих станций и портативных компьютеров.

Актуальность работы обусловлена необходимостью оперативного выполнения численного трёхмерного моделирования электротомографии при проектировании полевого эксперимента и интерпретации данных, полученных в сложных геологических условиях. Трёхмерное моделирование в полевых условиях затруднено недоступностью традиционных высокопроизводительных вычислительных систем – зачастую его приходится выполнять на портативных компьютерах. В таких условиях использование одних лишь центральных процессоров при решении прямой задачи электротомографии не способно обеспечить требуемую производительность. Даже на самых современных устройствах расчёт задачи в трёхмерной постановке занимает недопустимо много времени. Таким образом, с учётом ограниченного полевого времени и высокой стоимости этого времени (в особенности при работе в труднодоступных районах), эффективное решение прямой задачи электротомографии с использованием наиболее производительных вычислительных устройств (графических ускорителей) является актуальной задачей представляет собой весьма актуальную исследовательскую задачу.

Поскольку метод электротомографии находит все более широкое применение и используется на очень сложных с точки зрения методики электроразведки объектах, предоставление пользователям инструментов, позволяющих за приемлемое время получить более качественную интерпретацию данных, – обоснованная и своевременная инициатива.

Для районов Западной Сибири актуальность применения метода электротомографии вытекает из особенностей геологического строения водоносных и угольных пластов, при разведке которых особенно

востребована высокая детализация разрезов и хорошая разрешающая способность. Электротомография зарекомендовала себя как надёжный инструмент при исследовании территорий со сложным геологическим строением, к которым относятся все восточные районы Новосибирской области, относящиеся к границе между Западно-Сибирской плитой и предгорьями Салаирского кряжа (Колывань-Томская складчатая зона, Салаир и Горловский прогиб) [Михайловский, Мартынов, 1979]. При решении задач гидрогеологии в этих районах электротомография помогает обнаруживать зоны не только конъюнктивных, но и дизъюнктивных тектонических нарушений и приуроченных к ним участков повышенной трещиноватости (обводнённости). При исследовании залежей каменного угля, разрабатываемых открытым способом, мобильность, высокая информативность и эксплуатационная гибкость электротомографии позволяют эффективно применять ее для разведки уже эксплуатируемых угольных месторождений неглубокого залегания, особенно в складчатых зонах, при множественных нарушениях нормального залегания в пластах и их невыдержанности по мощности.

Актуален этот метод для труднодоступных районов, например, для Крайнего Севера, поскольку даёт возможность изучать геологическое строение интересующих участков без использования тяжёлой техники. В частности, электротомография может быть полезна при оценке объёмов эманации парниковых газов из зон деградации многолетнемерзлых пород. При составлении глобальных климатических моделей и прогнозов на будущее климатологи обращают пристальное внимание на вечномёрзлые породы как аккумулятор гигантского количества органических соединений. Одними из наиболее интересных объектов при изучении источников парниковых газов, являются таликовые зоны в многолетнемерзлых породах, активно развивающиеся под термокарстовыми озёрами.

Принимая во внимание вышеупомянутые сильные стороны метода электротомографии, следует сказать о трудностях, связанных с его применением. Существует ряд проблем при интерпретации данных электротомографии, связанных как с особенностями электроразведки на постоянном токе, так и с традиционно используемым программным обеспечением. Основные программы для инверсии измерений методом электротомографии реализованы в двумерной постановке, таким образом при интерпретации не учитываются объекты, находящиеся на удалении от профиля исследования, но, тем не менее, влияющие на регистрируемые сигналы, что приводит к серьёзным ошибкам. Таким образом, для корректной интерпретации данных электротомографии, особенно при работе на объектах со сложной геологической обстановкой

(множественные тектонические нарушения), либо при изучении объектов, значения УЭС которых варьируются в широких пределах (высококонтрастные среды), особенно важно использование трёхмерного прямого численного моделирования.

Цель исследования – повышение качества, оперативности и достоверности интерпретации данных метода электротомографии при работе со сложно построенными геологическими разрезами за счёт использования графических процессоров при численном трёхмерном моделировании для решения задач гидрогеологии, поиска полезных ископаемых, а также исследования многолетнемерзлых пород.

Задачи исследования:

1. Адаптировать алгоритм расчета потенциала для точечного источника на графических ускорителях к решению трёхмерной прямой задачи электротомографии в полевых условиях с использованием дискретных видеокарт современных портативных компьютеров.
2. Применить разработанное ПО для моделирования данных электротомографии в сложных геолого-геофизических условиях (структурно неоднородные водоносные горизонты, тектонически нарушенные угольные пласты, объекты в многолетнемерзлых породах).

Фактический материал и методы исследования

Фактический материал собран лично автором за восемь лет полевых работ в Новосибирской и Кемеровской областях, а также Республике Саха (Якутия):

- 46 различных объектов, на которых были выполнены электроразведочные работы;
- более 35 000 метров электроразведочных профилей;
- более 400 000 точек измерений.

Основной метод исследования – электротомография и численное моделирование. Как правило, шаг электроразведочной линии (расстояние между точками заземления электроразведочной косы) составлял 5 и 10 м. Схемы исследования – установка Шлюмберже, установка диполь-диполь. Используемая аппаратура – современная сертифицированная автоматическая электроразведочная станция «Скала-48». Количество точек заземления - 48. Максимальная глубина исследования – 160 метров.

Программное обеспечение для обработки данных электротомографии, а также данных геопозиционирования и рельефа:

- SiberTools – предварительная обработка данных электротомографии, полученных в формате .d2d (собственный формат данных аппаратуры «Скала-48»);

- Res2DInv – программа двумерной инверсии данных метода электротомографии;
- Locus Maps Pro – мобильная ГИС для устройств на базе ОС Android, которая позволяет записывать данные местоположения, объединяя их в профили («трэки») с указанием значений высот в фиксируемых точках и возможностью экспорта этих профилей в формат .gpx;
- GPSTrackEditor – программа обработки данных геопривязки в формате .gpx;
- Origin Pro – программа обработки численных данных, в которой выполнялись операции интерполяции и сглаживания значений высот на электроразведочном профиле для получения картины рельефа;
- Golden Software Surfer – программа для двумерной и трёхмерной визуализации численных данных;
- QGIS– ГИС для работы с картографическими данными, результатами геофизической съемки и цифровыми моделями рельефа.

Проведение численных экспериментов для верификации геоэлектрических разрезов было выполнено для следующих объектов:

- водоносные горизонты в коренных породах (трещиноватые зоны, тектонические нарушения, зоны контакта разнотипных пород) и песках;
- угольные пласты сложного залегания (крутопадающие, плохо выдержанные, маломощные);
- многолетнемёрзлые грунты (высокольдистые отложения, ледовые жилы, таликовые зоны).

Защищаемые научные результаты

1. Для библиотеки численного моделирования, разработанной Сувориной И.В. на языке PGI CUDA Fortran, создан модуль (свидетельство о гос. рег. №2017660273), включающий генерацию сетки, задание конфигурации электроразведочной линии, задание геоэлектрической модели среды, полуавтоматический расчет множества моделей с варьируемыми геометрическими параметрами и значениями УЭС блоков среды, экспорт результатов расчетов, позволяющий её использовать для решения 3D задач электротомографии.
2. На территории Новосибирской области для 46 объектов методом электротомографии изучено строение водоносных горизонтов, определены пункты заложения водозаборных скважин с

дебитами до восьми раз превышающими средние показатели по району.

3. Применение разработанной программы в условиях высокоомного разреза при выполнении полевых работ на угольных месторождениях, разрабатываемых открытым способом, а также в зонах распространения многолетнемерзлых пород повысило эффективность и достоверность геофизического исследования за счёт:
 - а. оптимального проектирования полевого эксперимента;
 - б. предложенных приёмов проверки соответствия геоэлектрических моделей, полученных в результате инверсии полевых данных, априорной геологической информации;
 - в. выполненных оценок влияния трёхмерных неоднородностей на данные полевой геофизической съёмки и внесения соответствующей коррекции в схему интерпретации.

Научная новизна

1. Разработанное программное обеспечение предлагает оперативное решение трёхмерной прямой задачи электротомографии в полевых условиях на графических ускорителях обычного портативного компьютера.
2. Впервые проведены работы методом электротомографии, а также выполнен расчет сигналов в пространственно-неоднородных геоэлектрических моделях на участках в с. Новобибеево Болотнинского района Новосибирской области, два участка в строящихся коттеджных поселках в Новосибирском районе Новосибирской области, участок в с. Березовка Новосибирского района Новосибирской области, территория вблизи с. Лекарственное Тогучинского района Новосибирской области, а также площадка строящейся птицефабрики «Улыбино» (Искитимский район НСО) для поиска перспективных точек заложения водозаборных скважин; угольный разрез «Барзасский» в Кемеровской области; термокарстовое озеро на о. Джиелях-Арыта (Самойловский) и ледовый холм на о. Артамон-Арыта, дельта р. Лена, Булунский улус, р. Саха (Якутия).
3. Проведён расчёт и анализ результатов численных экспериментов для геоэлектрических моделей, имитирующих следующие ситуации – поиск локальных объектов, а также оценка глубинности метода с учётом параметров базовой

модели.

Личный вклад соискателя

Автором была выполнена модификация научно-исследовательской вычислительной библиотеки для её практического использования геофизиками интерпретаторами в составе созданного программного продукта. Модуль численного моделирования (автор И. В. Суродина), изначально написанный на языке PGI CUDA Fortran, работающий в составе кластера на базе ОС Linux. Он был скомпилирован в виде подключаемой библиотеки, дополненной функционалом генерации сетки, задания конфигурации электроразведочной линии, задания геоэлектрической модели среды, полуавтоматического расчета множества моделей с варьируемыми геометрическими параметрами и значениями УЭС блоков среды, экспорта результатов расчета в формат файла .dat для инверсии и визуализации. Это позволяет использовать ее для решения задачи электротомографии. Созданный соискателем программный продукт исполняется на любом графическом ускорителе NVIDIA в ОС Windows.

Весь объем фактического материала получен при непосредственном участии и/или под руководством автора работы.

Приведённые геоэлектрические разрезы построены лично автором диссертации. Кроме того, им разработана методика учёта рельефа дневной поверхности при помощи барометрического высотомера и датчика геопозиционирования, устанавливаемых в мобильных устройствах. Получаемый в результате применения данной методики профиль рельефа имеет более высокую (в 3-6 раз) точность воспроизведения высот по сравнению с аналогичным профилем, полученным при помощи одних лишь сигналов систем глобального позиционирования для этих устройств.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическую значимость представленной работы определяют:

1. выполненный анализ имеющихся алгоритмических и программных решений, предлагающих инструментарий трёхмерного численного моделирования данных электротомографии;
2. разработанный эффективный подход к организации параллельных высокопроизводительных вычислений непосредственно в полевых условиях. Кроме того, большое теоретическое значение имеет выполненное в работе обобщение и анализ особенностей работы метода электротомографии в высококонтрастных по УЭС объектах,

а также при оценке глубинности метода.

С практической точки зрения, одним из наиболее важных результатов является успешный опыт применения разработанных в диссертации средств при решении задач гидрогеологии. Рекомендованные по результатам проведенных работ перспективные точки для бурения водозаборных скважин позволили получить дебиты в два и более (до восьми раз) превышающие среднерайонные показатели. Эти результаты были отмечены благодарственными письмами администраций муниципалитетов, а также рекомендацией Технического совета при Администрации Новосибирской области (протокол Технического совета при Администрации Новосибирской области по теме «Обеспечение населения качественной питьевой водой с использованием передовых разработок ИНГГ СО РАН для поиска питьевой воды...» от 12.08.2016.).

Кроме того, практическая значимость работы определяется тем, что разработанный подход позволил существенно повысить оперативность проверки геоэлектрических моделей, получаемых в результате инверсии данных метода электротомографии, путём их расчёта на графических процессорах (GPU) портативных компьютеров. Таким образом появилась возможность выполнять проверку достоверности значений УЭС в трёхмерных геоэлектрических моделях среды, полученных в результате инверсии полевых данных. Особенно важно то, что эту проверку можно выполнять непосредственно в поле, без доступа к традиционным высокопроизводительным системам (кластерам, GRID и т.д.), что существенно экономит время проектирования полевого эксперимента в труднодоступных районах, например, на Крайнем Севере. Разработанное программное обеспечение позволило выполнить проверку полученных в результате инверсии геоэлектрических моделей сложных объектов в Новосибирской и Кемеровской областях, а также Республике Саха (Якутия).

Достоверность полученных результатов

Методика полевой геофизической съемки с использованием автоматизированных электроразведочных станций известна и хорошо задокументирована. Все полевые работы, в рамках диссертации выполнялись в строгом соответствии с методическими рекомендациями с использованием только сертифицированной и метрологически поверенной аппаратуры. Контроль качества данных выполнялся на двух этапах – непосредственно в момент съемки и во время предобработки данных (точки измерения неудовлетворительного качества в процедуру инверсии не включались). Достоверность полученных модельных результатов была подтверждена геологическими наблюдениями.

На всех приведённых в работе участках в Новосибирской области, где выполнялись исследования для решения задач гидрогеологии, были пробурены разведочно-эксплуатационные водозаборные скважины, геологические разрезы по которым с хорошей точностью подтвердили глубину залегания границ горных пород, ранее полученных автором по данным инверсии электротомографии и численного трёхмерного моделирования.

Положение угольных пластов подтвердили вскрышные работы на угольном разрезе «Барзасский».

Данные по геокриологическим образованиям в дельте р. Лена подтверждены экспертной оценкой специалистов по четвертичной геологии на основании сопоставительного анализа с хорошо изученными аналогичными объектами.

На всех изученных объектах продемонстрировано хорошее совпадение результатов интерпретации данных электротомографии и трёхмерного численного моделирования на основе разработанного в рамках выполнения диссертационной работы программного обеспечения.

Апробация результатов работы

Всего по теме диссертации опубликована 21 работа, из них 1 статья в журнале первого квартала (Q1), входящем в Web of Science и SCOPUS (Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2018), 3 статьи в рецензируемых научных журналах, определённых списком ВАК («Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири», «Деловой журнал Neftegaz.RU», «Горный информационно-аналитический бюллетень»), 1 работа в сборнике научных трудов, 15 – в материалах всероссийских и международных конференций, 1 работа – в сборнике публикуемых отчётов о результатах работ международной Российско-Германской экспедиции «Лена-дельта».

Результаты работы были представлены на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: международной конференции "Криосфера Земли: прошлое, настоящее и будущее " (4 - 8 июня, 2017 г., Пущино, Россия), международной научной конференции «ИНТЕРЭКСПО Гео-Сибирь» (Новосибирск, 2013, 2014, 2016, 2018), научно-практической конференции и выставки «Инженерная геофизика 2016» (г. Анапа, Россия, 25-29 апреля 2016 г.), международного геофизического научно-практического семинара (г. Санкт-Петербург, 18-19 марта 2015 г.), а также в публикуемых отчётах о результатах работ международной Российско-Германской экспедиции «Лена-дельта» - Berichte zur Polar- und Meeresforschung, Reports on polar and marine research. - Bremerhaven, 2017.

Кроме того, работа была представлена на семинарах в Московском

государственном университете имени М. В. Ломоносова, в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта (Центр геоэлектромагнитных исследований), а также в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» и Институте полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера в г. Потсдам, Германия.

Кроме того, был зарегистрирован объект интеллектуальной собственности – программа для ЭВМ «Модуль численного трёхмерного моделирования данных метода электротомографии на графических процессорах».

Работа выполнена в лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 100 источников. Полный объём диссертации 239 страниц, включая 141 рисунок и 15 таблиц.

Первая глава содержит обзор известных программных продуктов, предназначенных для трёхмерного численного моделирования электротомографии.

Вторая глава посвящена разработке и тестированию высокопроизводительной программы для автоматизации численных расчётов данных электротомографии, исполняемой на графических процессорах.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования данных электротомографии для проверки геоэлектрических моделей, полученных в результате инверсии полевого материала, собранного на объектах в Новосибирской и Кемеровской областях, а также Республике Саха (Якутия).

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, д.т.н., профессору Ельцову И. Н. за ценные советы и помощь в работе над диссертацией, а также неиссякаемую веру в способность автора дойти до конца этого долгого пути.

Автор искренне признателен академику РАН, д.т.н. М.И. Эпову за бесконечное внимание, неоценимую помощь, замечания и консультации, которые помогли правильно расставить акценты и структурировать работу.

Автор благодарит к. ф.-м.н. И.В. Суродину, а также к.т.н. А.А. Власова за помощь в работе с вычислительным модулем и рекомендации по улучшению текста диссертации.

Автор благодарит сотрудников Института к.г.-м.н. В.В. Оленченко, к.т.н. В.В. Потапова, к.т.н. Л.В. Цибизова, к.г.-м.н. А.М. Санчаа, В.И. Самойлову, за конструктивную критику и полезные советы, позволившие повысить качество работы.

Автор глубоко признателен экспертам: д.г.-м.н. Н.Н. Неведровой и профессору, д.г.-м.н. Н.О. Кожевникову за критический взгляд и искреннее желание помочь улучшить текст диссертации.

Автор выражает свою искреннюю признательность и благодарность учёным и специалистам: профессору, д.ф.-м.н. Э.Б. Файнбергу, д.ф.-м.н. В.В. Спичаку, к.ф.-м.н. И.М. Варенцову, профессору, д.т.н. И.Н. Модину, профессору, д.ф.-м.н. В.А. Шевнину, профессору, д.г.-м.н. К.В. Титову, профессору, д.г.-м.н. А.Л. Пискарёву, к. ф.-м.н. Н.С. Боброву, Prof. Dr. Guido Grosse, Dr. Anne Morgenstern, PD Dr. Julia Voike, Н.М. Ярковой за замечания по содержанию работы и полезные советы по улучшению материалов диссертации.

Кроме того, автор сердечно благодарит Е.И. Ивашину, В.В. Кремера, А.Н. Абалакова за помощь в продвижении технологии поиска подземных вод при помощи электротомографии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава 1. АНАЛИЗ ПРОГРАММ ПРЯМОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАННЫХ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

В главе 1 приведены сведения об особенностях работы трёх программ, позволяющих выполнить трёхмерное численное моделирование метода электротомографии (Res3DMod, ZondRes3D, ERT Lab) – оценено удобство работы, возможности программ, а также эффективность реализованных в них вычислительных процедур.

По результатам проведённого обзора основных существующих программ для трёхмерного численного моделирования данных электротомографии можно сформулировать следующие выводы:

1. Программа Res3DMod, несмотря на свою бесплатность, малопригодна для реальной работы, поскольку неудобна в использовании и, фактически, не предназначена для моделирования одиночных электроразведочных линий. В этом смысле уровень её производительности не имеет значения, поскольку пользователь потратит многие десятки минут и даже часы задавая саму модель или внося изменения в существующие.
2. Программа ZondRes3D является отличным решением в смысле продуманности, функциональности и удобства использования

графического пользовательского интерфейса. При этом реализация вычислительных алгоритмов численного моделирования не позволяет эффективно решать прямую задачу на сетках большой размерности – программа требует слишком значительных объемов оперативной памяти для хранения небольших (по меркам трёхмерных вычислений) расчётных сеток. Кроме того, программа работает только в однопоточном режиме, что, очевидно, не лучшим образом сказывается на её общей производительности.

3. Программа ERTLab является прямой противоположностью программе ZondRes3D – хорошо оптимизированные вычислительные алгоритмы и неудобный графический пользовательский интерфейс. Таким образом пользователь всё равно тратит достаточно много времени на численное моделирование.

Окончательным итогом является то, что ни одна из рассмотренных программ не продемонстрировала достаточную эффективность в плане решения прямой задачи – либо в силу явных недочётов в реализации вычислительных алгоритмов (ZondRes3D), либо по причине неудобного графического пользовательского интерфейса и, хотя и хорошей, но всё же неоптимальной с точки зрения производительности (поскольку графический процессор всё равно превосходит центральный в таких задачах) реализации расчётов (ERTLab).

Таким образом можно сделать вывод как минимум об актуальности создания быстрого решателя прямой задачи электротомографии, способного в полной мере раскрыть мощь современных графических ускорителей.

Глава 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ «МОДУЛЬ ЧИСЛЕННОГО ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАННЫХ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ НА ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРАХ». ТЕСТИРОВАНИЕ

Глава посвящена описанию процесса разработки высокопроизводительной программы для автоматизации численных расчётов данных электротомографии, исполняемой на графических процессорах, проверке корректности ее работы, а также оценке производительности и моделированию, имитирующему следующие ситуации: поиск локальных объектов, оценка глубинности метода с учётом параметров базовой модели.

В первой части главы приводится описание основных особенностей

численного решателя, позволяющего производить расчёт прямой задачи электротомографии – моделировать распределение электрического потенциала точечного источника в сложно построенной среде. Дается формальное описание расчётной задачи, а также кратко описывается приём [Суродина И.В., 2015], позволяющий получить существенный прирост производительности при использовании графических процессоров (оригинальный подход к построению преобуславливающей матрицы на основе аппроксимации обратной матрицы). Кроме того, приводится описание основных функций программы – расчётной и функции-генератора сетки.

Во второй части главы анализируются результаты тестирования корректности созданного программного модуля. Приводятся результаты расчёта типичных моделей среды (однослойные, двухслойные, с вертикальными и наклонными границами).

Тестирование показало соответствие результатов расчета кажущихся значений УЭС и задаваемых моделей. Инверсия модельных данных восстанавливает изначально заданную модель геоэлектрической среды с хорошей точностью. Таким образом можно сделать вывод о том, что алгоритм расчета сигналов электротомографии на графических ускорителях дает ожидаемый результат. Что позволяет на качественном уровне судить о корректности его работы. Количественное сравнение с существующими решениями в полном объеме не производилось, поскольку данная задача сама по себе является нетривиальной [Жданов М.С., 1990] и заслуживает отдельной кандидатской диссертации для качественного освещения.

Третья часть главы посвящена сравнению производительности основных существующих программ и вновь созданного решения. Сравнение выполнялось с использованием как обычного полевого ноутбука, так и стационарной рабочей станции потребительского класса. Сравнительное тестирование производительности показало превосходство разработанной нами программы над конкурирующими решениями (ERT Lab и ZondRes3D): от 2 до более чем 200 раз (в зависимости от размеров вычислительной сетки). В ходе сравнительного тестирования был найден ещё один аргумент в пользу реализации решения прямой задачи на графическом ускорителе: рост производительности центральных процессоров в настоящее время невелик (от 5 до 7 % в год), в то время как производительность графических процессоров растёт очень высокими темпами – от 40 до 50 % в год. Таким образом создание решателей, исполняемых на графических процессорах – гарантия того, что их превосходство в производительности по состоянию на сегодняшний день, по сравнению с

решениями для центральных процессоров, в будущем будет только увеличиваться.

Глава 3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ ДАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Глава посвящена практическому применению разработанной программы при интерпретации данных электротомографии на объектах, расположенных в Новосибирской и Кемеровской областях, а также р. Саха (Якутия):

1. с. Новобибеево Болотнинского района Новосибирской области;
2. два участка в строящихся коттеджных поселках в Новосибирском районе Новосибирской области;
3. участок в с. Березовка Новосибирского района Новосибирской области;
4. территория вблизи с. Лекарственное Тогучинского района Новосибирской области;
5. площадка строящейся птицефабрики «Улыбино» в Искитимском районе Новосибирской области;
6. южный участок разреза «Барзасский» в Кемеровской области;
7. зона распространения многолетнемерзлых пород в дельте р. Лена, Булунский улус, р. Саха (Якутия).

Для участков в Новосибирской области было показано, что выполненные комплексные работы, состоящие из электротомографии и последующего численного моделирования, позволили с высокой точностью определить их геологическое строение и принять правильное решение относительно точек бурения водозаборных скважин (пример для птицефабрики «Улыбино» приведен на Рисунке 1). Скважины в среднем показали дебит в 2 раза выше среднерайонного значения. Для отдельных объектов дебит превысил средние значения в восемь раз (с. Новобибеево). Таким образом сочетание электротомографии и численного моделирования имело большое практическое значение – для полноценного обеспечения населения муниципальных образований, коттеджных поселков и сельскохозяйственных предприятий водой требовалось меньше скважин (в основном, хватало одной). В условиях сложностей с финансированием программ по бурению водозаборных скважин, а также сложным гидрогеологическим устройством восточных

районов, такой результат является крайне важным с социальной и экономической точек зрения.

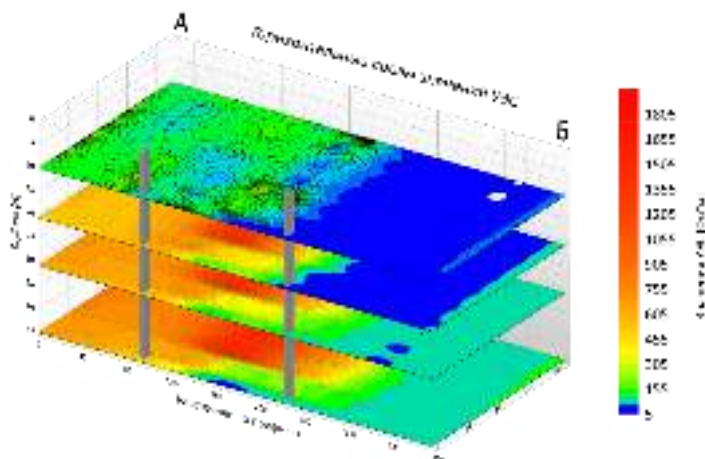


Рисунок 1 – Горизонтальные срезы значений УЭС по данным трёхмерной инверсии в программе Res3DInv с вынесенными точками бурения водозаборных скважин (серые параллелепипеды), места для которых были определены по результатам трёхмерного численного моделирования.

Для разреза «Барзасский» показано, что электроразведочные работы позволили определить зоны тектонических нарушений, а также предварительно оценить глубину залегания угольного пласта (Рисунок 2).

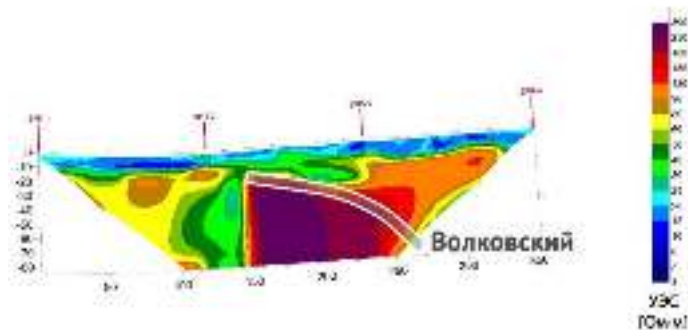


Рисунок 2 – Геоэлектрический разрез, полученный по данным

электротомографии на участке разреза «Барзасский». Белый контур – предполагаемое расположение угольного пласта по результатам исследования.

Вскрытие участка в 2013 г. подтвердило основные выводы, сделанные по результатам геофизических работ (Рисунок 3).

Работы показали высокую информативность метода электротомографии при изучении угольных пластов, залегающих под четвертичными отложениями и не контактирующими с коренными породами. Интерпретация полевых данных позволяет не только определить наличие/отсутствие угольных пластов, но также оценить их угол падения. При использовании трехмерного численного моделирования в сочетании с данными лабораторных исследований образцов породы также удастся восстановить угольных мощности пластов. Электротомография в целом показала высокую информативность при решении задачи доразведки угольного месторождения неглубокого залегания, что подтверждается данными вскрытия. Наибольшую трудность при интерпретации представляют геоэлектрические разрезы, в которых искомые объекты (угольные пласты) соседствуют с близкими по электрическим свойствам породами. Для решения этой проблемы предложен оперативный инструментарий – программа численного трехмерного моделирования на графическом процессоре, позволяющая верифицировать геоэлектрические разрезы в каждом конкретном случае и сделать оценки чувствительности и разрешающей способности.

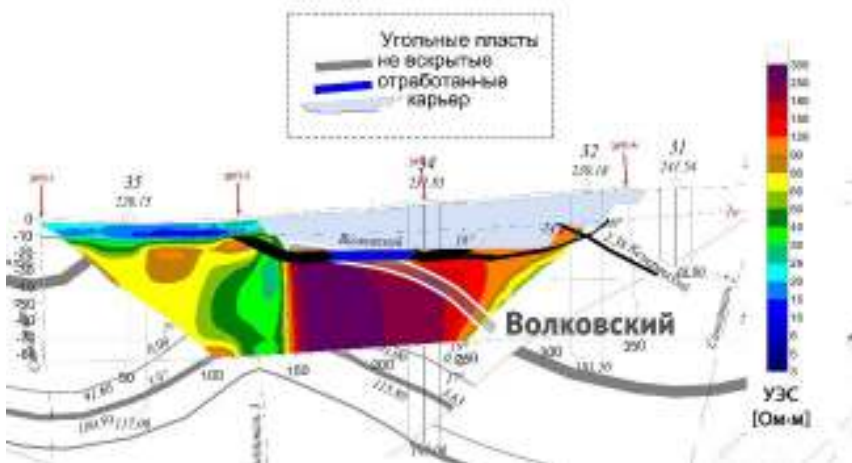


Рисунок 3 – Геоэлектрический разрез, полученный по данным электротомографии на участке разреза «Барзасский», наложенный на

фактические данные по результатам вскрышных работ. Черным цветом показаны угольные пласты, находящиеся непосредственно в зоне исследования. Синим цветом – вскрытые и отработанные угольные пласты.

Верификация полученных геоэлектрических разрезов даже на объектах, характеризующихся значительными тектоническими нарушениями, а также обилием хорошо проводящих водоносных горизонтов, обеспечивает результативность метода электротомографии при картировании угольных пластов и расширяет круг решаемых задач.

Для объектов в дельте р. Лена было показано, что трёхмерное численное моделирование данных метода электротомографии чрезвычайно важно для верификации получаемых в результате инверсии моделей среды. Полевой электроразведочный материал, собранный в Арктической зоне характеризуется высокими электрическим сопротивлением и чрезвычайно большими контрастами УЭС, особенно при наличии высокоминерализованных вод. Моделирование показало, что таликовая зона оказывает существенное влияние на результаты измерений (относительная разница между значениями УЭС в аномальной зоне в интервале 90-140 м по профилю составляет не менее 75%). Однако, идентификация таликовой зоны и, тем более, определение ее параметров, лишь по результатам геофизических измерений методом электротомографии требует наличия обширных статистических данных по объектам исследования, а также базы рассчитанных моделей среды. В данном примере показано, что ответ на вопрос о наличии/отсутствии талика можно дать при сравнительном анализе данных натурного и численного эксперимента. Поскольку разработан высокопроизводительный инструментальный трёхмерного моделирования на GPU полевого ноутбука, задача может быть оперативно решена непосредственно в полевых условиях.

В целом практический опыт показал, что численное трёхмерное моделирование, как дополнение к методу электротомографии является исключительно полезным, а в некоторых случаях – просто незаменимым инструментом при интерпретации полевых данных. Поскольку в сложных геологических условиях (высококонтрастные среды, пространственные аномалии) данные электротомографии, особенно при использовании двумерной инверсии, могут производить некорректные с точки зрения геологической действительности геоэлектрические модели среды. В этом смысле численное моделирование способно сузить область эквивалентности и лучше понять природу аномальных зон, наблюдаемых на геоэлектрических разрезах, как это было показано на примере с угольными пластами и ледовым холмом. Кроме того, численное

моделирование способно правильно выбрать параметры полевого эксперимента на этапе подготовки работ – пример с карстовыми зонами. А также принять более взвешенное решение при проведении ответственных производственных работ таких как поиск водоносных горизонтов и определение оптимальных мест для бурения водозаборных скважин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная программа расчёта удельного электрического сопротивления в трёхмерных моделях сред на графических процессорах имеет существенное преимущество в сравнении с имеющимися аналогами – чрезвычайно высокую производительность: ускорение по сравнению с традиционными алгоритмами, исполняемыми на центральных процессорах, достигает десятков раз. Получены следующие результаты:

1. Создан модуль расчёта удельного электрического сопротивления для решения прямой задачи электротомографии в трёхмерных моделях сред на графических процессорах потребительского класса (в т.ч. дискретных видеокартах ноутбуков) в операционных системах семейства Microsoft Windows (версии 7 и выше).
2. По результатам численных экспериментов при тестировании программы определены пределы применимости двумерного моделирования для электротомографии, а также выполнена оценка глубинности исследования для отдельных случаев, а полученный модельный результат впоследствии подтверждён полевым экспериментом.
3. Выполнена проверка результатов инверсии полевых данных для ряда объектов Новосибирской и Кемеровской областей, а также для Республики Саха (Якутия):
 - а. В Новосибирской области при решении задач гидрогеологии выполнено полевое исследование (в некоторых случаях с привлечением численного трехмерного моделирования) для объектов в с. Новобибеево Болотнинского района, двух участков в строящихся коттеджных поселках в Новосибирском районе, участка в с. Березовка Новосибирского района, а также площадки строящейся птицефабрики «Улыбино» в Искитимском районе. Полученные геоэлектрические модели хорошо подтверждаются бурением, дебиты водозаборных скважин превосходят среднерайонные

показатели до восьми раз.

- b. В Кемеровской области численным моделированием и экспериментальными данными обосновано строение верхней части четвертичной толщи и выклинивающихся угольных пластов на угольном разрезе «Барзасский». Модель подтверждена вскрышными работами.
- c. В Республике Саха (Якутия) при помощи численного моделирования выявлена природа зон аномально низких значений УЭС в геоэлектрических разрезах, пересекающих термокарстовые озёра. Кроме того, выполнена проверка данных, полученных в ходе исследования малого ледового холма (булгунняха).

Дальнейшие исследования по теме диссертации необходимо сосредоточить на совершенствовании методики поиска подземных вод в Новосибирской области при активном использовании численного моделирования для проверки полевых данных. Особенно это актуально для западных районов области, где разрезы характеризуются высокой минерализацией поровых вод и, как следствие низкими значениями УЭС, что представляет трудность для работы метода. При этом потребность в новых скважинах в западных районах крайне высока, т.к. существующий скважинный фонд ежегодно уменьшается в связи с устареванием, а финансирование на строительство новых глубоководных скважин не выделяется.

Кроме того, следует обратить внимание на модификацию программного инструментария с тем, чтобы использовать открытые стандарты и инструментарий для написания высокопроизводительных решений под графические процессоры. К таким инструментам относится стандарт OpenCL и построенный на его основе современный набор библиотек Vulcan. Это позволит использовать в качестве вычислительных устройств не только видеокарты компании Nvidia, но также конкурирующие решения AMD.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК:

1. Фаге А.Н. Доразведка неглубоких угольных месторождений с использованием метода электротомографии и трехмерного численного моделирования / А.Н. Фаге, Н.М. Яркова, И.Н. Ельцов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2017. – №. 1 (29). – с. 111-123. Фаге А.Н., Фадеев Д.И., Ельцов И.Н. Мониторинг процесса деградации многолетнемерзлых пород в зоне влияния теплового потока дизель-генератора НИС о.Самойловский при

помощи малоглубинной электроразведки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. №2. С. 357-368.

2. Ельцов И.Н. Электротомография в Российской Арктике по данным полевых исследований и трехмерного численного моделирования / И.Н. Ельцов, В.В. Оленченко, А.Н. Фаге // Деловой журнал Neftegaz.RU. - 2017. - № 2. - с. 54-64.
3. Angelopoulos M. Heat and Salt Flow in Subsea Permafrost Modeled with CryoGRID2 / M. Angelopoulos, S. Westermann, P. Overduin, A. Faguet, V. Olenchenko, G. Grosse, M. Grigoriev // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. - 2019. - Т. 124. - № 4. - с. 920-937.
4. Фаге А.Н. Электромагнитный мониторинг техногенной деградации многолетнемерзлых пород на территории полярной станции "НИС о. Самойловский" / А.Н. Фаге, Д.И. Фадеев, И.Н. Ельцов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2017. - № 2. - с. 357-368.

Другие важные публикации:

5. Fague A.N. Electrical resistivity tomography in Polar Regions, field data and high performance GPU-based 3D numerical modeling / A.N. Fague, D.I. Fadeev, I.N. Yeltsov, V.A. Kashirtsev, D.E. Ayunov, L.V. Tsibizov // XI. International Conference on Permafrost. Exploring Permafrost in a Future Earth (Potsdam, Germany, 20-24 June 2016): Book of Abstracts. - Potsdam: Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, 2016. - с. 943-943.
6. Faguet A. Electrical resistivity tomography and 3D numerical modeling for aquifer mapping in Novosibirsk region / A. Faguet, A. Sanchaa // Information technologies in solving modern problems of geology and geophysics: VII International Scientific Conference of young scientists and students (Baku, Azerbaijan, October 15-18, 2018): Book of Abstracts. - Baku, 2018. - с. 81-82.
7. Фаге А.Н. Изучение таликовых зон под термокарстовыми озерами при помощи метода электротомографии (по полевым измерениям и трехмерному численному моделированию) / А.Н. Фаге, И.В. Суродина, И.Н. Ельцов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология" (г. Новосибирск, 18-22 апреля 2016 г.): Сборник материалов в 4 т. - Новосибирск: СГУГиТ, 2016. - Т. 2. - с. 253-258.
8. Фаге А.Н. Применение электротомографии для поисков водоносных горизонтов в геологических условиях Новосибирской области / А.Н. Фаге, А.М. Санчаа, О.В. Шемелина // Геодинамика. Геомеханика и геофизика: Материалы девятнадцатой Всероссийской конференции (стационар "Денисова пещера", Россия, Алтайский край,

- п. Солонешное, 22-28 июля 2019 г.). - Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2019. - с. 206-207.
9. Фаге А.Н. Результаты геолого-геофизического исследования площадки строящейся птицефабрики для определения точки заложения водозаборной скважины (Искитимский район Новосибирской области) / А.Н. Фаге, А.М. Санчаа, О.В. Шемелина // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVI международной научной конференции (г. Новосибирск, 20-24 апреля 2020 г.), 2020. – с. 650-656.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 05.03.2021

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 1,0. Тираж 100. Зак. № 195

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3