

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Кафедра систем информатики

Мартьянов Андрей Сергеевич

Разработка программных средств анализа данных аппаратного комплекса
СКАЛА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

по направлению высшего профессионального образования

230100.68 ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

ФАКУЛЬТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Тема диссертации утверждена распоряжением по НГУ № 9 от «11» января 2012 г.

Тема диссертации скорректирована распоряжением по НГУ №___ от
«___» _____ 200__ г.

Руководители

Соболев А. Ю.
к.т.н, с.н.с. ИГФ СО РАН

Власов А.А.
б/с, м.н.с. ИНГТ СО РАН

Новосибирск, 2013г.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. Электротомография.....	5
1.1 Описание метода.....	5
1.2 Электроразведочная станция «СКАЛА-48».....	7
1.3 Проведение исследований	8
1.4 Программное обеспечение для моделирования и инверсии данных электротомографии	10
ГЛАВА 2. Анализ требований и проектирование	12
2.1 Постановка задачи	12
2.2 Архитектура системы	13
2.3 Модель данных.....	15
2.4 Моделирование	19
2.5 Данные электротомографического исследования	24
2.6 Предобработка данных измерений	26
2.7 Визуализация данных	27
ГЛАВА 3. Реализация и опытное применение.....	29
3.1 Функциональность программного средства ViewERT	29
3.2 Верификация результатов интерпретации данных метода сопротивлений при исследовании разломных структур на территории Горного Алтая	30
3.3 Верификация результатов интерпретации данных электротомографии при определении места залегания угольного пласта.....	32
Заключение.....	35
Литература.....	36

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкое развитие получил метод электротомографии, который активно применяется в различных областях человеческой деятельности, таких как экология, археология, гидрогеология, инженерно-геологические изыскания для строительства, городское коммунальное хозяйство и т.п. Метод позволяет детально изучить распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) на глубине до 100 метров. Зная распределения УЭС, можно решать широкий круг задач: от определения геологического строения верхних слоёв земли до поиска специализированных структур, например, места течи в земляной дамбе.

Обработку данных электротомографии можно разделить на несколько задач: предобработка, инверсия, включающая в себя моделирование, визуализация. Предобработка заключается в очистке данных от искажений, которые могут возникать в процессе измерений. Распределение УЭС в земной поверхности описывается геоэлектрической моделью, которая может быть задана разными способами (типами). Тип модели определяет набор параметров модели. В результате моделирования происходит расчёт данных электротомографии при известном распределении УЭС, определяющемся моделью. Процесс инверсии состоит в подборе значений параметров для заданного типа модели, при которых рассчитанные значения данных электротомографии наиболее точно совпадают с измеренными. Визуализация включает в себя построение визуальных представлений измеренных и смоделированных данных и самой модели.

На данный момент при обработке данных исследования для разных задач применяются разные программные средства. Такая передача данных между отдельными инструментами заметно тормозит получение результата и может стать причиной ошибок и потери данных, а также усложняет комплексный анализ. Целью работы является создание программного инструмента для упрощения труда интерпретатора и ускорения получения готового результата.

В результате анализа деятельности интерпретатора по обработке данных электротомографического исследования были сформулированы следующие функциональные требования к программе:

1. хранение всех данных исследования;
2. предобработка данных измерений;
3. предоставление пользователю выбора типа модели;
4. прямое моделирование в рамках трёхмерной модели;

5. инверсия данных всех профилей в рамках единой трёхмерной модели;
6. визуализация данных измерения.

Разрабатываемое программное средство должно стать удобным инструментом, позволяющим в короткие сроки получить результат в виде, пригодном для предоставления заказчику.

ГЛАВА 1. Электротомография

1.1 Описание метода

Метод электротомографии является развитием метода сопротивлений, предложенного Конрадом Шлюмберже в 1920г [1]. Для проведения измерения методом сопротивлений на поверхности земли размещаются и заземляются 4 электрода, которые в совокупности называются установкой: два питающих (обозначаются А и В) и два приёмных (обозначаются М и N). Основой метода сопротивлений является то, что разность потенциалов, наблюдаемая на поверхности земли (ΔU_{MN}) при пропускании электрического тока (I_{AB}) через заземленные питающие электроды (рис. 1), зависит от распределения удельного электрического сопротивления в некоторой области разреза вблизи установки. Интегральный характер наблюдаемого поля позволяет использовать метод сопротивлений в условиях, когда изучаемый разрез имеет сложное строение, что типично для городских и промышленных условий ([2]). По результатам выполненных измерений ΔU_{MN} при известном токе вычисляют кажущееся электрическое сопротивление (КС), обозначаемое ρ_k , и измеряемое в Ом·м: $\rho_k = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}}$, где, К – геометрический коэффициент, или геометрический фактор, который зависит от расстояний между электродами А, В, М и N.

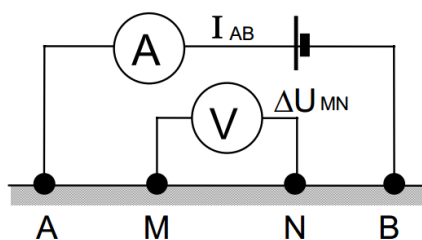


Рис. 1. Схема метода сопротивлений.

В зависимости от соотношения расстояний между электродами А, В, М и N выделяют разные типы установок. Стандартные установки, характерные для электротомографии, приведены на рис. 2. Измерения, проведённые с использованием разных установок, имеют различные показатели глубинности, уровня сигнала, разрешающей способности, чувствительности к вертикальным и горизонтальным границам. Свойства разных установок были хорошо исследованы [3]. Установка помимо типа также характеризуется разносом – расстоянием, равным половине расстояния между питающими электродами. Для реализации установок с электродами «на бесконечности»

используются выносные электроды, которые отнесены от места измерения на расстояние, в несколько раз превосходящие разнос установки.

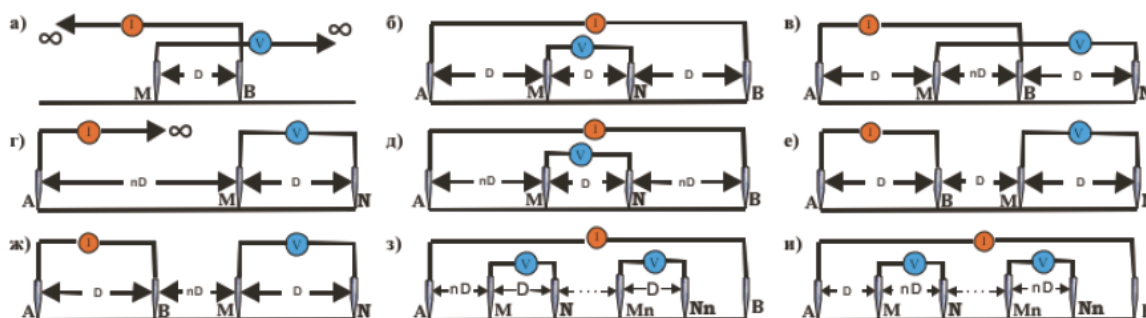


Рис. 2. Стандартные установки, применяемые в электротомографии.

(а) двухэлектродная, (б) Веннера α -типа, (в) Веннера β -типа, (г) трехэлектродная, (д) Шлюмберже, (е) Веннера β -типа, (ж) дипольная осевая, (з) градиентная, (и) градиентная срединная.

Изначально производительность электроразведочных работ определялась тем, что электроды приходилось переносить и заземлять вручную. С развитием метода сопротивлений появились многоэлектродные системы измерений, которые позволяли сначала расположить и заземлить набор электродов, а затем произвести измерения, поочерёдно используя комбинации из уже размещённых электродов (рис. 3). Для этого используется электроразведочная коса – многоканальный кабель, на котором через равные расстояния (обычно 5 метров) расположены места подключения электродов. Каждый канал такого кабеля подключается к своему электроду, таким образом, позволяя его использовать как в качестве питающего, так и в качестве приёмного. Коса подключается к коммутатору – устройству, осуществляющему переключение электродов. Коса, или несколько кос, растянутых вдоль одной прямой, составляют электроразведочный профиль. Такой подход позволил проводить электроразведку участка земной поверхности методом сопротивлений значительно быстрее.

Первые варианты многоэлектродных систем имели ручное переключение комбинаций электродов, затем появились системы с автоматическим переключением, что позволило проводить полностью автоматические измерения и контроль качества данных. Таким образом, в конце 20-го века электроразведка методом сопротивлений вышла на качественно новый уровень. Все это привело к появлению новой методики двумерной электроразведки, или электротомографии. В иностранной литературе чаще всего употребляются два термина – Resistivity Imaging и Electrical resistivity tomography.

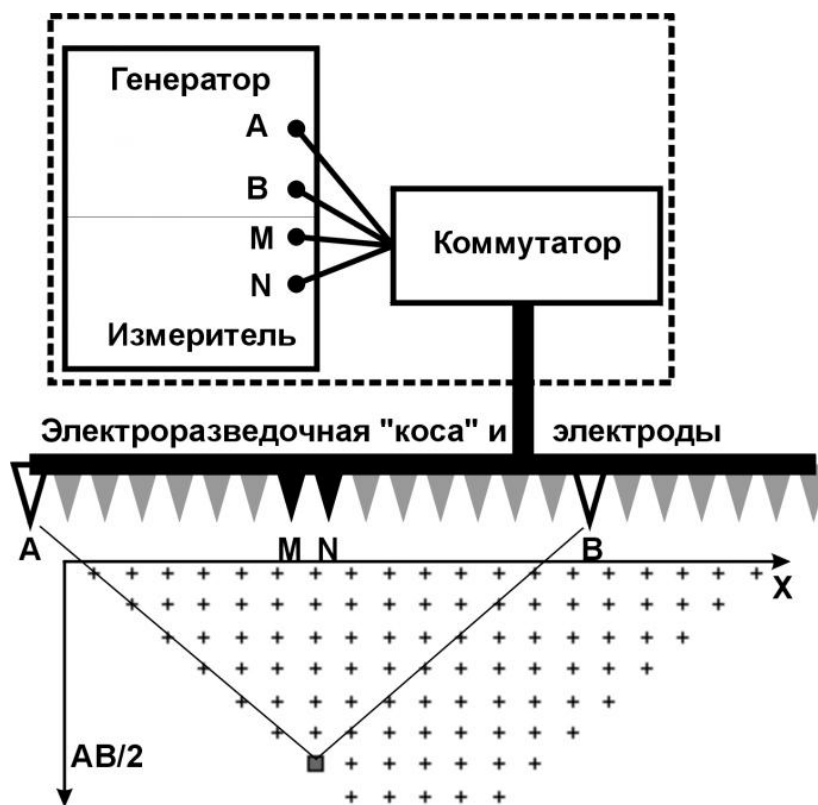


Рис. 3. Схема многоэлектродной системы измерений.

Переключение электродов производится таким образом, что расстояние между электродами, задействованными во время единичного измерения, подчиняется некоторой закономерности, определяющейся типом установки. В связи с различными свойствами установок зачастую на одной раскладке электроразведочных кос проводится серия измерений с различными типами установок. Таким образом, можно проводить комплексную интерпретацию, учитывая сильные и слабые стороны установок.

1.2 Электроразведочная станция «СКАЛА-48»

Среди ряда современных российских разработок, реализующих метод электротомографии, можно выделить аппаратуру «Скала-48». Аппаратура разработана в лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН и к настоящему моменту несколько комплектов «Скала-48» успешно применяются при решении различного рода научных и инженерных задач [4].

Аппаратура «Скала-48» (рис. 4) может работать в режимах электротомографии, вызванной поляризации, электропрофилирования и вертикального электрического зондирования. В аппаратуре реализован развитый пользовательский интерфейс, позволяющий полностью контролировать процесс работы. В рабочем состоянии на дисплее отображается соответствующая режиму таблица, по которой можно определять

расположение и геометрию текущей измерительной установки и просматривать результаты измерений. Прибор работает с установками Веннера (типов α , β , γ), Шлюмберже, дипольной (осевой и экваториальной), трёхэлектродной и двухэлектродной.



Рис. 4. Внешний вид аппаратуры «Скала-48».

1.3 Проведение исследований

Проведение исследования земной поверхности с помощью метода электротомографии можно разбить на несколько этапов:

- планирование;
- проведение измерений;
- обработка, или интерпретация, полученных данных;
- подготовка результатов для представления заказчику.

Планирование включает в себя выбор расположения профилей согласно задаче, поставленной заказчиком, а также с учётом заранее известной информации об исследуемой местности. При планировании раскладки профилей стоит учитывать объекты, которые могут помешать раскладке (овраги, оживлённые автомобильные дороги) или исказить измерения (остатки разрушенных построек: фундамент, трубопровод).

Полевые исследования представляют собой последовательные измерения по запланированным профилям. После раскладки каждого профиля производится тестирование аппаратуры, которое позволяет оценить качество заземления электродов. Затем производится серия измерений с использованием запланированных типов установок. Результаты измерений сохраняются в память электроразведочной станции. Эти данные считываются и переносятся на компьютер оператора для последующей обработки.

При интерпретации важны не только непосредственные измерения, но и информация о том, как в действительности были разложены профили. Зачастую фактическая раскладка не соответствует планируемой, что может быть обусловлено как недостатком априорной информации во время планирования, так и всевозможными форс-мажорными обстоятельствами. Также может быть интересен рельеф исследуемой местности. Удобным способом получения подобной информации является запись GPS-трека профилей.

Обработка полученных данных состоит из отбраковки измерений и проведении инверсии данных, или решения обратной задачи. Отбраковка измерений должна исключить искажённые данные измерений из решения обратной задачи. Причиной искажения может стать как человеческий фактор, например, плохо заземлённый работником электрод, так и независимые от бригады, проводящей исследование, причины антропогенного характера, к примеру, упоминавшиеся ранее остатки трубопровода. Для выявления искажений, вызванных причинами такого рода, очень важна работа с априорной информацией о местности.

Обратная задача состоит в подборе параметров некоторой выбранной модели земной поверхности, при которых отличия между смоделированными и измеренными данными были бы минимальны. Модель задаёт распределение УЭС в земле. Важной характеристикой модели является количество её параметров, т.к. от этого напрямую зависит сложность решения обратной задачи: чем больше параметров в модели, тем сложнее их подобрать. Также стоит отметить, что выбор параметризации модели зависит от задач исследований, т.е. от того, какую информацию необходимо извлечь в результате исследований, чтобы ответить на поставленный заказчиком вопрос. Однако случаются ситуации, при которых в рамках выбранной модели невозможно произвести инверсию с требуемой точностью. В таких случаях используют более сложные модели, позволяющие более детально описать распределение УЭС, прибегают к трёхмерной верификации.

Представление результата является, в некотором роде, самым важным этапом в исследовании: на его основании будет приниматься решение, которое скажется на всём проекте заказчика. Сложность данного этапа заключается в том, что часто заказчик не имеет знаний в области геофизики, поэтому результаты исследований следует преобразовать в наиболее доступный ему вид.

1.4 Программное обеспечение для моделирования и инверсии данных электротомографии

С началом использования электроразведочной аппаратуры, реализующей плотные томографические измерения, возникла необходимость в соответствующих программных системах для моделирования и инверсии данных электротомографии. В 1996 году были опубликованы работы [5, 6], в которых приводятся алгоритмы для практической 2D и 3D инверсии. Тогда же эти алгоритмы были реализованы в первых версиях программ Res2DInv, Res3DInv.

На текущий момент существует целый ряд подобных программных средств, наиболее распространённые приведены в таблице 1.

Название	Разработчик	Моделирование			Инверсия		
		1D	2D	3D	1D	2D	3D
Res2DInv	GEOTOMO SOFTWARE (Малайзия), www.geoelectrical.com					+	
Res3DInv							+
Res2DMod			+				
Res3DMod				+			
SensInv1D	Geotomographie GmbH (Германия), www.geotomographie.de				+		
SensInv2D						+	
SensInv3D							+
DC2DInvRes	Thomas Günther (Германия), www.resistivity.net					+	
DC3DInvRes							+
ZondIP1D	Александр Каминский (Россия), www.kaminae.narod.ru				+		
ZondRes2d						+	
ZondRes3d							+
Earth Imager 1D	Advanced Geophysics (США), www.agiusa.com	+			+		
Earth Imager 2D			+			+	
Earth Imager 3D				+			+
ERT Lab	MPT & GEOSudi Astier (Италия), www.ertlab.com						+
Emigma	PETROSEIKON Inc. (Канада), www.petroseikon.com			+	+		

Таблица 1. Программы для обработки данных электротомографии.

Стоит заметить, что ни одна из перечисленных программ не поддерживает работу с геопривязкой, т.е. не предоставляет возможности сохранять географическую информацию об измерениях. Таким образом, ответственность за сохранность полного набора данных о проведённом исследовании ложится на плечи пользователя. Также пользователю приходится вручную сопоставлять результаты инверсии или моделирования с географическими объектами.

Другой важной деталью является то, что зачастую результат визуализации данных, произведённой в программе инверсии или моделирования, не устраивает своим качеством интерпретатора. Наглядным примером этого факта является программа DC2dInvRes, где визуализация разреза строится на основании триангуляции двухмерной модели (рис. 5).

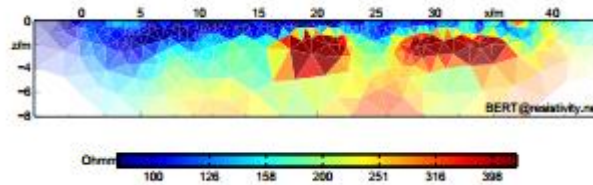


Рис. 5. Визуализация разреза программой DC2dInvRes.

Таким образом, одна из самых распространённых схем обработки данных выглядит следующим образом. Полученные данные с аппаратуры инвертируются с помощью программы RES2DINV [7], а результаты инверсии визуализируются с использованием специализированного программного обеспечения для построения карт, например Surfer [8].

ГЛАВА 2. Анализ требований и проектирование

2.1 Постановка задачи

В ходе интерпретации данных исследования методом электротомографии геофизику приходится работать с разнородными данными. При этом их обработка на разных этапах производится в соответствующих программных средствах: предобработка и инверсия – в специализированных программах, например Res2dInv; построение визуализации подобранных геофизических моделей – в программах-графопостроителях, например Surfer. При этом организация и хранение данных, в том числе промежуточных результатов, также является задачей интерпретатора, что усложняет его работу и может стать причиной ошибок по невнимательности.

Целью данной работы является разработка программного средства для ускорения и облегчения работы геофизика-интерпретатора по обработке данных электротомографии.

В ходе анализа деятельности интерпретатора по обработке данных электротомографических исследований были предложены пути для её оптимизации, описанные далее.

1. Организация хранения разнородных данных исследования. Это поможет избежать ошибок, вызванных человеческой невнимательностью, при обработке данных, а также облегчит помещение данных в архив организации. Структурирование данных исследования является немаловажной задачей, т.к. даже в ходе проведения данной работы возникала ситуация, когда часть данных о проведённых исследованиях либо была утеряна, либо было тяжело сопоставить непосредственные данные измерений и данные инверсий.
2. Автоматизация построения визуальных представлений данных исследования. С помощью этого исключается необходимость ручного переноса данных между программами инверсии и визуализации. Также сюда входит предоставление пользователю средств настройки визуализации данных одного профиля и возможности использования этих настроек для других профилей. В сумме это позволит увеличить удобство работы и сэкономить время пользователя.
3. Интерпретация данных всех профилей в рамках единой трёхмерной модели. Очень редко электротомографические исследования состоят из измерений лишь по одному профилю. С другой стороны, часто профили располагаются параллельно друг другу, что даёт хорошую возможность для трёхмерной интерпретации.

Изначальная обработка профилей в рамках единой модели позволяет сразу получать согласованный результат. Также применение трёхмерной модели даёт возможность для использования как трёхмерных алгоритмов моделирования, которые позволяют получать более точные результаты по сравнению с двухмерными, так и построения трёхмерной визуализации.

4. Выбор типа используемой для инверсии модели. Нередко цель исследования является куда более узкой, чем доскональное исследование земной поверхности, например, поиск глубины залегания фундамента. При решении таких задач можно использовать специализированные модели, которые имеют уменьшенное число параметров, что позволит проводить интерпретацию в рамках конкретной задачи гораздо быстрее. Таким образом, предоставив пользователю набор специализированных моделей для типовых задач, можно значительно ускорить обработку данных в большом числе случаев.

Ввиду выше сказанного, разрабатываемое программное средство должно предоставлять пользователю следующие функции:

1. хранение всех данных о проведённом исследовании в виде проектного файла;
2. предобработка данных электротомографических измерений;
3. предоставление пользователю выбора типа модели;
4. прямое моделирование в рамках трёхмерной модели;
5. визуализация данных измерения:
 - a. разрезы;
 - b. модель;
 - c. расположение профилей.

При разработке необходимо было учесть следующие нефункциональные требования. Программа может быть использована для оперативной обработки данных прямо на месте изысканий, следовательно, исполняться будет на портативном компьютере, поэтому необходимо максимально оптимизировать использование ресурсов компьютера, особенно оперативной памяти.

2.2 Архитектура системы

Исходя из поставленных задач, была разработана архитектура системы, которая приведена на рис. 6.

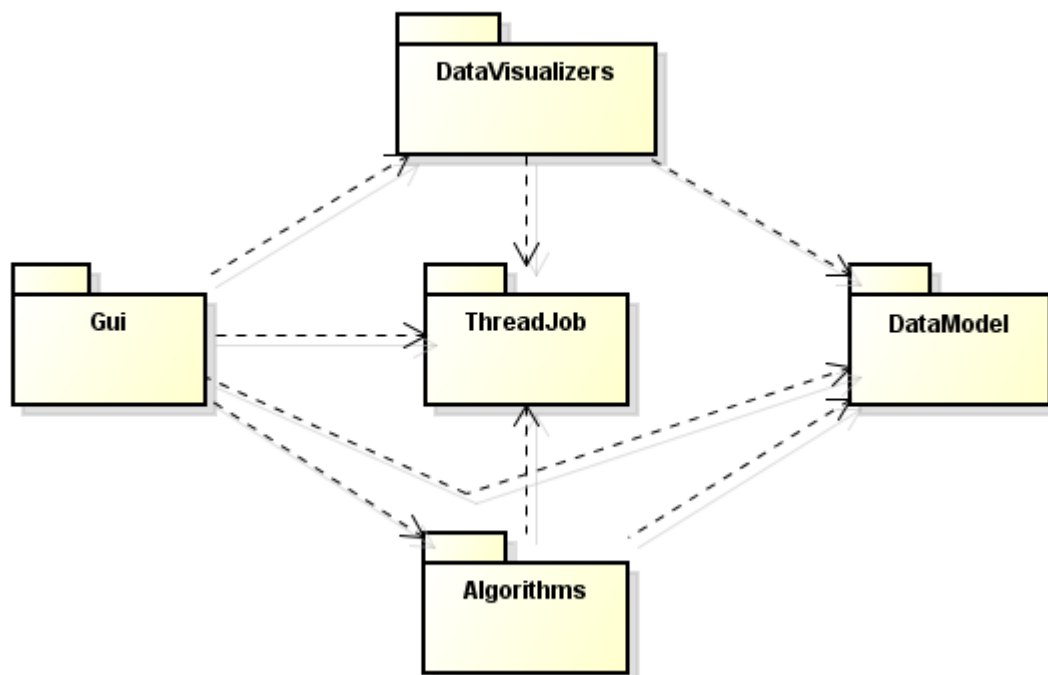


Рис. 6. Общая архитектура системы.

Программа состоит из шести крупных модулей. Модуль Gui содержит элементы пользовательского интерфейса и связывает между собой остальные модули. В модуль ThreadJob вынесена логика по управлению потоками программы: для эффективности и удобства пользования программой трудоёмкие операции, такие как построение трёхмерной визуализации или моделирование, выполняются в отдельных потоках. Специальные средства по визуализации данных размещены в модуле DataVisualizers. Модуль Algorithms реализует интеграцию расчётных алгоритмов. Модуль DataModel содержит внутренние представления обрабатываемых данных, а также средства для их импорта и экспорта.

Решения поставленных задач описаны в следующих главах:

- в разделе 2.3 «Модель данных» рассмотрена разработанная структура данных, которая обеспечивает поддержку моделей разных типов;
- в разделе 2.4 «Моделирование» рассмотрена реализация прямого моделирования;
- в разделе 2.5 «Данные электротомографического исследования» рассмотрена организация данных исследования в проект;

- в разделе 2.6 «Предобработка данных измерений» описан инструмент для предобработки данных электротомографии;
- в разделе 2.7 «Визуализация данных» описана реализация визуализации данных исследования.

2.3 Модель данных

Способ задания модели оказывает значительное влияние как на процессы моделирования и решения обратной задачи, так и на удобство пользования программой. С одной стороны, чем больше параметров в модели, тем более подробно можно описать среду и, соответственно, получить результаты моделирования более сходные с реальными данными. Однако большое количество параметров усложняет как ручное задание модели, так и процесс решения обратной задачи, который напрямую зависит от размерности пространства моделей.

Наиболее популярной является блочная модель среды (см. рис. 7). В блочной модели среда разбивается на прямоугольники (двухмерная модель) или параллелепипеды (трёхмерная модель), называемые блоками, каждый из которых имеет своё собственное удельное электрическое сопротивление. Значения сопротивлений блоков и являются параметрами блочной модели.

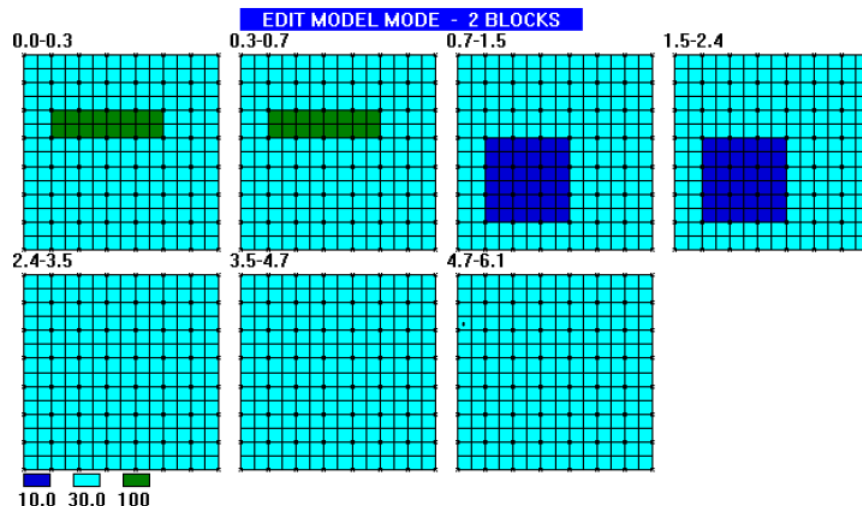


Рис. 7. Блочная геоэлектрическая модель среды. Представление модели в программе *Res3dMod*. Модель представлена в виде двумерных горизонтальных срезов, каждый из которых соответствует диапазону глубины.

Методы решения обратной задачи для электротомографии в рамках блочной модели хорошо изучены и разработан ряд хорошо зарекомендовавших себя методов [9].

Однако, у такого подхода есть и свои недостатки. Во-первых, существует ряд структур, например, наклонные границы, описание которых затруднено в рамках блочных

моделей. Во-вторых, зачастую решение обратной задачи упомянутыми ранее методами приводит к сглаживанию границ, что может затруднить интерпретацию данных исследования.

Избежать указанных проблем можно с помощью поддержки набора различных моделей, покрывающего основные случаи, и предоставления пользователю возможность выбора модели под конкретную задачу. Таким образом, достигается как сокращение параметров модели, так и сохранение чёткости границ за счёт использования соответствующих моделей.

Для примера, можно привести встречающуюся на практике задачу определения глубины залегания геологического фундамента. УЭС пород фундамента может в сотню раз превышать УЭС вышележащих пород. Поэтому, в данном случае можно обойтись либо обычной двуслойной моделью, либо двуслойной моделью с наклонной границей (см. рис. 8).

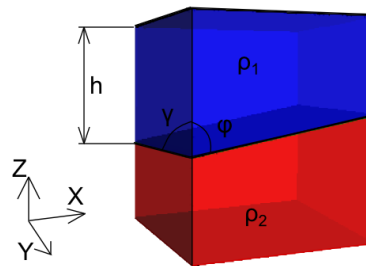


Рис. 8. Двуслойная модель среды с наклоном границы. ρ_1 – сопротивление верхнего слоя, ρ_2 – сопротивление нижнего слоя, h – глубина границы, φ, γ – углы наклона границы с осью Z в плоскостях XOZ и YOZ .

В данной работе предлагается реализовать систему, которая поддерживает различные модели среды и будет иметь хорошие возможности для расширения набора моделей. Такой подход требует как соответствующей архитектуры приложения, так и реализации алгоритма моделирования, не зависящего от способа задания модели.

Разработанный дизайн классов модели представлен на рис. 9.

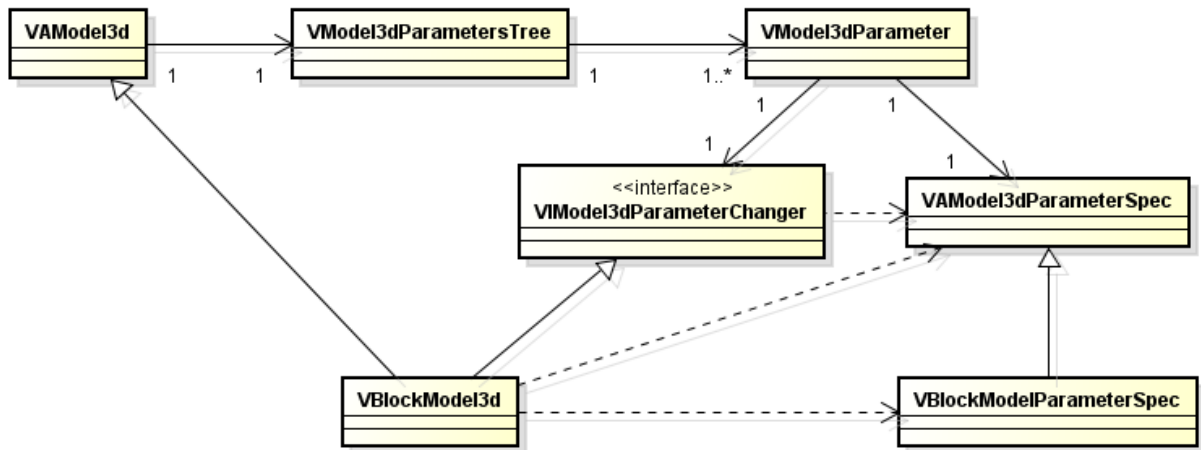


Рис. 9. Диаграмма взаимосвязей классов для представления модели среды.

Все реализации моделей наследуются от основного абстрактного класса VAModel3d, который предоставляет полный набор функций, необходимых для работы с моделью внутри программы. Класс VAModel3d содержит набор параметров модели в виде дерева (VModel3dParametersTree), что облегчает его представление пользователю. Параметр модели представляется классом VModel3dParameter, который содержит имя параметра, его описание, позволяет получить и изменить текущее его значение. Также класс VModel3dParameter имеет указатель на объект-наследник класса VAModel3dParameterSpec, который содержит специфичную информацию о параметре для конкретного типа модели. Изменение параметра происходит через вызов функции объекта, реализующего интерфейс VIModel3dParameterChanger, которой передаются новое значение параметра и советуемый объект VAModel3dParameterSpec. Таким образом, для добавления поддержки нового типа модели необходимо создать соответствующий ей класс-наследник VAModel3d, который также должен реализовывать интерфейс VIModel3dParameterChanger для своих параметров. Для примера на диаграмме приведены классы для реализации блочной модели VBlockModel3d и VBlockModelParameterSpec.

Также модуль ModelData содержит классы для представления априорной информации, данных профилей и измерений, средства импорта и экспорта. Особое внимание было уделено способу задания типа установки. Диаграмма соответствующих классов представлена рис. 10.

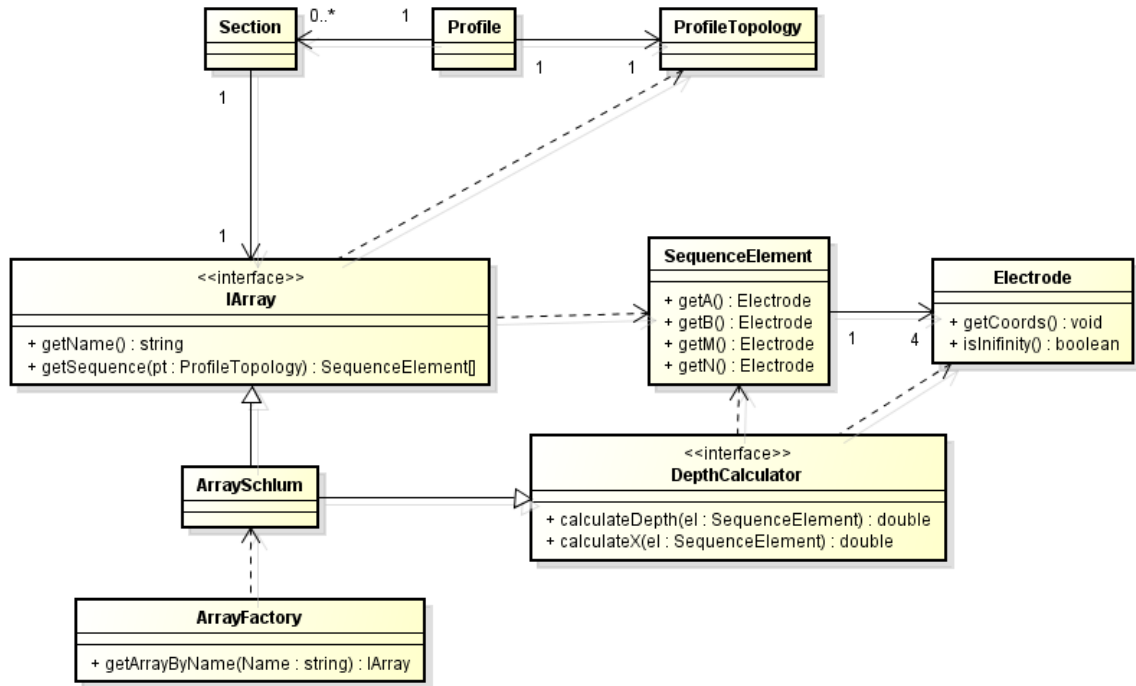


Рис. 10. Диаграмма взаимосвязей классов для представления модели среды.

Класс Profile содержит данные об электроразведочном профиле. Информация о расположении профиля и количестве электродов находятся в классе ProfileTopology. Данные измерений представляются классом Section, который имеет связь с объектом, реализующим интерфейс IArray, представляющим тип установки, с помощью которого данные были получены. IArray представляет функцию для генерации на основании ProfileTopology набора объектов SequenceElement, каждый из которых представляет одно измерение на четырёх конкретных электродах профиля. Таким образом, создаётся набор четвёрок электродов, согласно типу установки, с заданными координатами, на основании которых уже можно проводить моделирование. Точка земной поверхности, к которой относится кажущееся сопротивление, измеренное одной четвёркой электродов, зависит от типа установки. Поэтому каждая реализация IArray должна имплементировать интерфейс DepthCalculator, который предоставляет функции расчёта точки привязки кажущегося сопротивления на основании SequenceElement. Создание объекта типа установки по названию происходит с помощью класса-фабрики ArrayFactory.

Таким образом, модуль модели данных DataModel предоставляет всё необходимое для загрузки данных и моделирования.

2.4 Моделирование

Для моделирования электротомографии был применён трёхмерный алгоритм моделирования ВЭЗ, разработанный И. В. Суразиной [10]. Алгоритм долгое время применялся геофизиками-интерпретаторами в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН и хорошо себя зарекомендовал. Важной его чертой является то, что он позволяет использовать довольно сложные модели среды, в том числе, содержащие наклонные границы.

Исходная расчётная программа реализована на языке Fortran с использованием технологии MPI (Message Passing Interface) для расчёта на кластерах. Программа принимает на вход три файла: файл с параметрами установок, файл с параметрами модели среды, файл с параметрами расчётной сетки.

Параметры установок включают в себя координаты центра установок, расположение генераторных и приёмных электродов относительно центра установки в цилиндрических координатах. Расчётная сетка представляет собой трёхмерную сетку в цилиндрических координатах, и задаётся тремя наборами координат по каждой оси. Модель задаётся в виде разложения пространства на призмы с треугольным основанием с заданным удельным электрическим сопротивлением внутри, причём координаты задаются в декартовой системе.

При переводе координат из цилиндрической системы в декартову считается, что ось $Z_{ц}$ цилиндрической системы расположена в плоскости $X_{п}OY_{п}$, угол между осью $Z_{ц}$ и осью $X_{п}$ и начало координат цилиндрической системы задаются пользователем. Направление оси R совпадает с положительным направлением оси $Z_{п}$ декартовой системы. Угол отсчитывается в направлении поворота оси $Z_{п}$ декартовой системы в сторону оси $X_{п}$ по часовой стрелке (см. рис. 11).

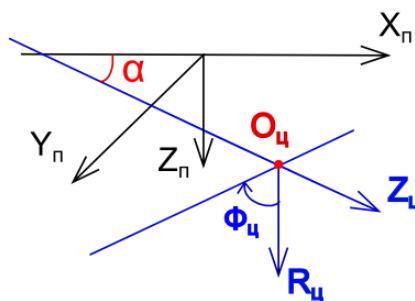


Рис. 11. Схема сопоставления прямоугольной системы координат модели и цилиндрической системы координат расчётной сетки. $X_{п}, Y_{п}, Z_{п}$ – оси прямоугольной системы координат. $Z_{ц}, R_{ц}, \Phi_{ц}$ – оси цилиндрической системы координат. $O_{ц}$ – координаты начало отсчёт цилиндрической системы и угол α задаются пользователем.

При моделировании происходит совмещение систем цилиндрических систем координат установки и расчётной. Затем на основании заданного расположения центра установки в декартовой системе координат модели происходит сопоставление удельного электрического сопротивления узлам расчётной сетки, что позволяет рассчитать коэффициента системы линейных алгебраических уравнений, построенной на основании уравнения Пуассона, для нахождения потенциала электрического поля, возбуждённого питающим электродом, в узлах сетки. Решив систему для каждого питающего электрода, можно получить суперпозицию полей в узлах, соответствующих приёмным электродам, что позволит рассчитать значение кажущегося сопротивления, полученное заданной установкой в заданной точке модели.

Схема работы алгоритма представлена на рис. 12.

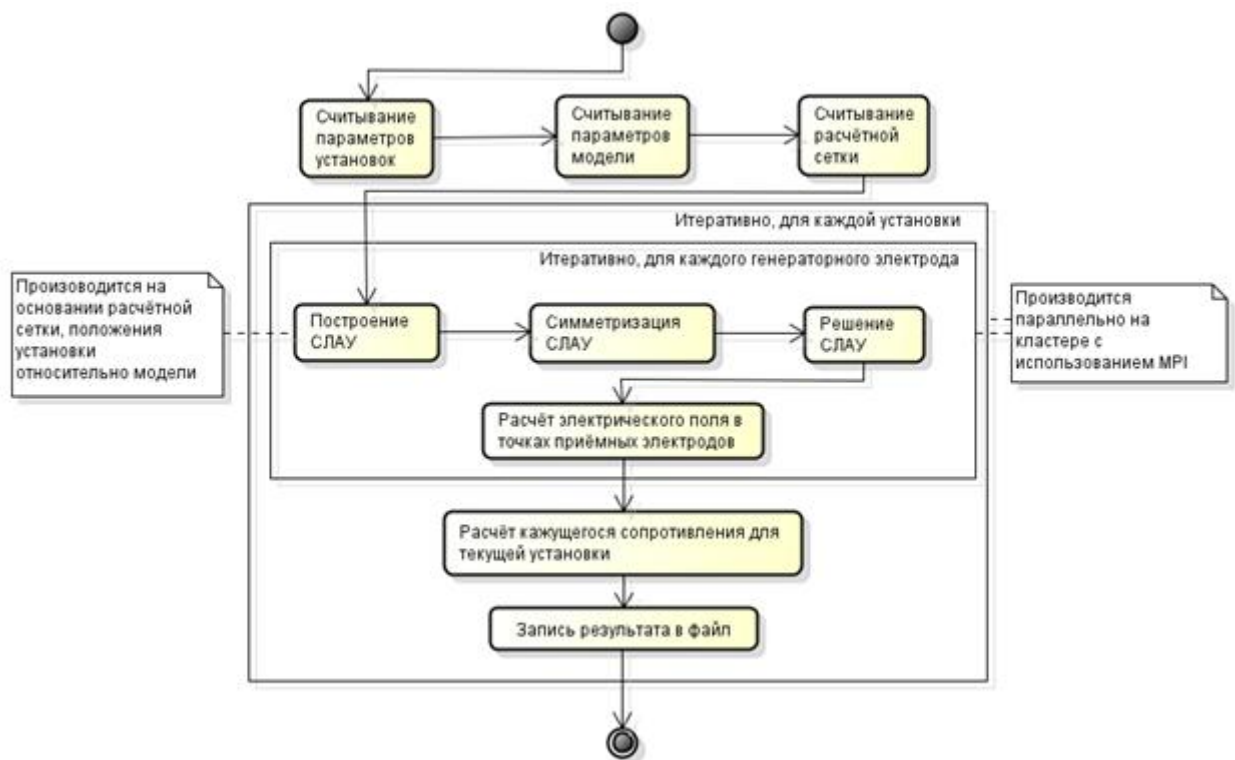


Рис. 12. Диаграмма исходной программы моделирования ВЭС.

Для интеграции алгоритма необходимо было решить следующие задачи:

1. автоматическая генерация расчётной сетки;
2. адаптация реализации алгоритма для запуска на персональных компьютерах.

От размеров и плотности расчётной сетки напрямую зависит как точность моделирования, так и время расчёта. Таким образом, основная задача автоматической генерации сетки сводится к построению минимальной по количеству узлов сети, обеспечивающей должную точность моделирования.

Считается, что электроды установки располагаются на оси Z . Для автоматической генерации были введены следующие параметры расчётной сетки (см. рис. 13): размер по оси Z , частота по оси Z , размер по оси R , частота по оси R , частота по оси Φ в области $[0, \frac{\pi}{2}] \cup [\frac{3\pi}{2}, 2\pi]$ (положительное полупространство декартовой системы координат: считается, что в отрицательном полупространстве модели располагается воздух, которому соответствует фиксированное значение очень большое значение сопротивления). Также было введены параметры, управляющие уплотнением сетки в области электродов по оси Z : диапазон вокруг точек электродов и количество дополнительных узлов, помещенных в него.

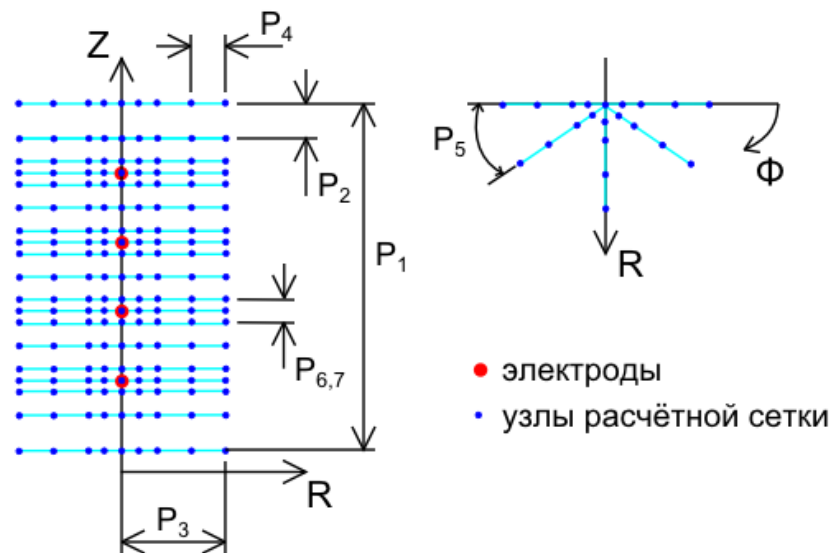


Рис. 13. Схема параметризации расчётной сетки. P_1 - размер по оси Z , P_2 - частота по оси Z , P_3 - размер по оси R , P_4 - частота по оси R , P_5 - частота по оси Φ , $P_{6,7}$ - параметры, отвечающие за уплотнение сетки возле электродов.

Была проведена серия расчётов с применением набора сеток, сгенерированных с разными параметрами. Моделирование проводилось для симметричной установки, с разносами 15 м, 30 м и 240 м, при этом использовались модели (см. рис. 14):

- двуслойная модель – сопротивление верхнего слоя равно 10 Ом·м, нижнего – 100 Ом·м. Глубина границы изменялась от 2 до 20 метров с шагом 2 метра.
- модель вертикального контакта – сопротивление левого слоя 10 Ом·м, правого слоя – 100 Ом·м. Угол изменялся от 45 до 90 градусов с шагом в 5 градусов.

Считается, что в горизонтальном направлении, перпендикулярном линии установки, УЭС не меняется.

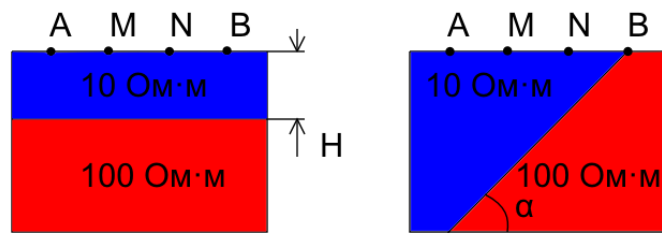


Рис. 14. Модели среды. Слева – двуслойная модель, H – глубина границы. Справа – модель вертикального контакта, α – угол наклона.

Смоделированные значения кажущегося сопротивления сравнивались со значениями, рассчитанными на эквивалентных моделях в программе Res2dMod. Считалось, что результаты моделирования на конкретной сетке приемлемы, если относительная разница не превышает 3%.

Эвристическим путём были установлены зависимости между параметрами установки и параметрами генерации сетки, обеспечивающие получение требуемой сети.

Размер по оси Z берётся в 3 раза больше разноса установки (должно выполняться условие $\frac{\rho l}{4\pi R} < 10^{-4}$, где R - размер по оси Z : для моделей с большим сопротивлением верхних слоёв этот параметр будет увеличен). Шаг по оси Z равен одной десятой разноса, но не меньше 5 метров. Размер по оси R равен разносу. Шаг по оси R равен 0,05, берётся логарифмическим по основанию 10. Шаг по оси Φ равен 0,04375 в радианах. Уплотнение в сетки вокруг электродов составляет 10 дополнительных узлов на область в радиусе двух метров от электродов.

Для интеграции алгоритма в разрабатываемое программное средство, расчётная программа была преобразована в динамически подключаемую библиотеку (dynamic-link library, DLL), предоставляющую интерфейс вызова функции моделирования. Входные данные передаются как аргументы вызова. Однако, претерпел изменение способ передачи модели: в функцию моделирования передаётся указатель на функцию, возвращающую значение УЭС по координатам точки модели. Тем самым реализация алгоритма моделирования становится независимой от способа задания модели внутри программы.

Перенос алгоритма на десктопы повлёк за собой отказ от использования технологии MPI в пользу OpenMP, при этом была изменена схема распараллеливания. В исходной программе расчёт электрических полей для каждого генераторного электрода производится параллельно, соответственно происходит синхронизация потоков при вычислении суперпозиции полей. При расчёте электротомографии разносы электродов, соответственно, и размеры расчётной сетки, значительно меньше, чем при типичных исследованиях методом ВЭЗ, поэтому моделирование одной установки происходит на

порядки быстрее. Таким образом, нет необходимости распараллеливать расчёты в рамках моделирования одной установки, что позволяет избавиться от синхронизации и обеспечить более высокую загрузку процессора.

Схема адаптированного алгоритма приведена на рисунке рис. 15.

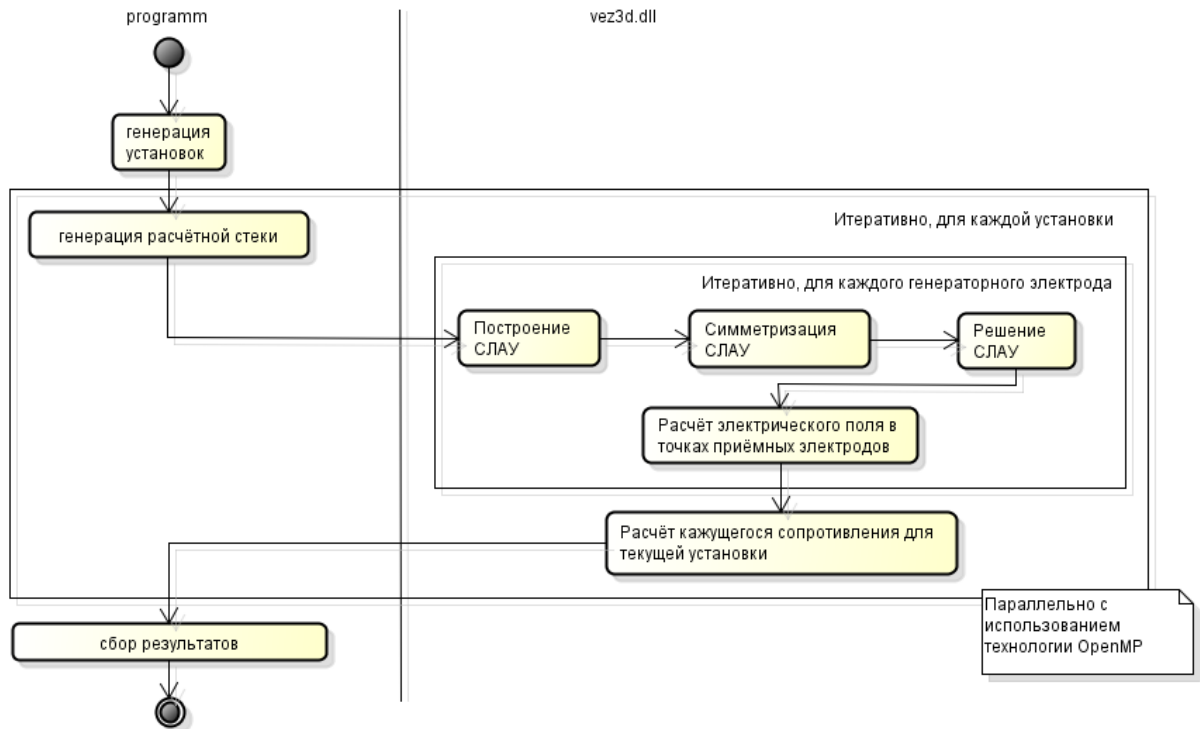


Рис. 15. Диаграмма алгоритма моделирования электротомографии.

Исходя из используемого типа установки и расположения профиля, генерируется набор установок. Моделирование сигнала каждой установки производится параллельно в отдельных потоках. Таким образом, достигается практически линейный рост скорости вычислений от количества задействованных вычислительных ядер. Данные замеров времени и использованной памяти приведены в таблица 2 и рис. 16.

Тип установки	Количество измерений	Время вычисления (использованная память)		
		Intel Core i5 460M, 2 потока	Intel Xeon E5630, 4 потока	Intel Xeon X5660, 12 потоков
Шлюмберже	345	1762 с (186 Мб)	1007 с (288 Мб)	421 с (896 Мб)
Веннера	528	2492 с (186 Мб)	1483 с (288 Мб)	622 с (896 Мб)

Таблица 2. Время моделирования

Приведённые данные показывают, что размеры требуемой для расчётов памяти позволяет выполнять моделирование на портативном компьютере.

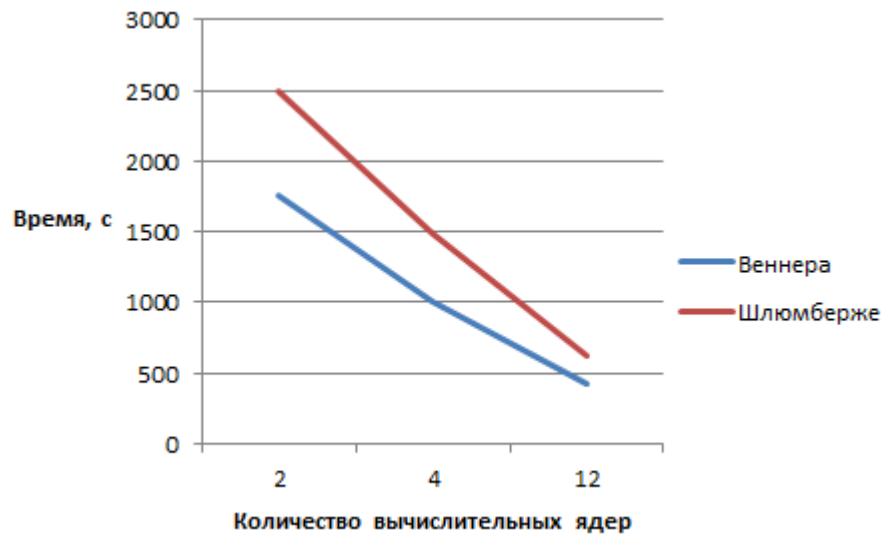


Рис. 16. Графики зависимости времени моделирования от количества используемых ядер.

Реализация алгоритма позволяет получить достаточно точные результаты моделирования моделях разной сложности, и провести таким образом верификацию трёхмерной модели. Однако быстроедействие алгоритма не позволяет реализовать решение обратной задачи за приемлемое время. Моделирование одного псевдореза занимает, в зависимости от типа установки, от 10 до 20 минут на 4х ядерном процессоре с частотой 2,5 GHz. Решение обратной задачи подразумевает многократное прямое моделирование, поэтому реализация инверсии с использованием данного алгоритма является нецелесообразной.

2.5 Данные электротомографического исследования

Далее в разделе описано, с какими данными приходится оперировать интерпретатору при обработке электротомографического исследования.

При планировании исследования используется карта исследуемой местности и априорная информация об объекте исследования. Априорная информация может быть довольно разнообразной и сильно зависит целей исследования. Например, при поиске места для бурения скважины на воду, можно учитывать уже пробуренные скважины, если таковые имеются: исследование строения земной поверхности возле эксплуатируемой скважины поможет определить водоносный слой. В этом случае важно сохранить расположение водяной скважины. Из-за неструктурированности априорной информации,

предлагается хранить её в виде текстовых комментариев, с возможной привязкой к координатам.

Обычно данные о расположении электроразведочных профилей представляют собой GPS координаты начала и конца профиля. Одним из способов сбора этой информации является запись GPS-трека вдоль разложенного профиля. Из полученного GPS-трека также можно извлечь информацию о рельефе, которая может быть использована при инверсии данных, полученных с данного профиля. Если на профиле производятся измерения с использованием установки с выносными электродами, то также добавляются координаты расположения выносных электродов.

Как упоминалось выше, на одной раскладке электроразведочного профиля может быть проведено несколько измерений с использованием разных или дублирующихся установок. Данные измерений выгружаются с аппаратуры в виде файлов. Все наиболее популярные электроразведочные станции поддерживают выгрузку данных в общем текстовом формате, подробное описание которого можно найти в [11].

Перед проведением инверсии данных измерений их необходимо подвергнуть предобработке. Более подробно предобработка данных будет рассмотрена далее.

Инверсия данных производится в рамках выбранной пользователем модели с заданными параметрами.

Учитывая вышесказанное, предлагается следующая схема заполнения данных в проект (рис. 17).

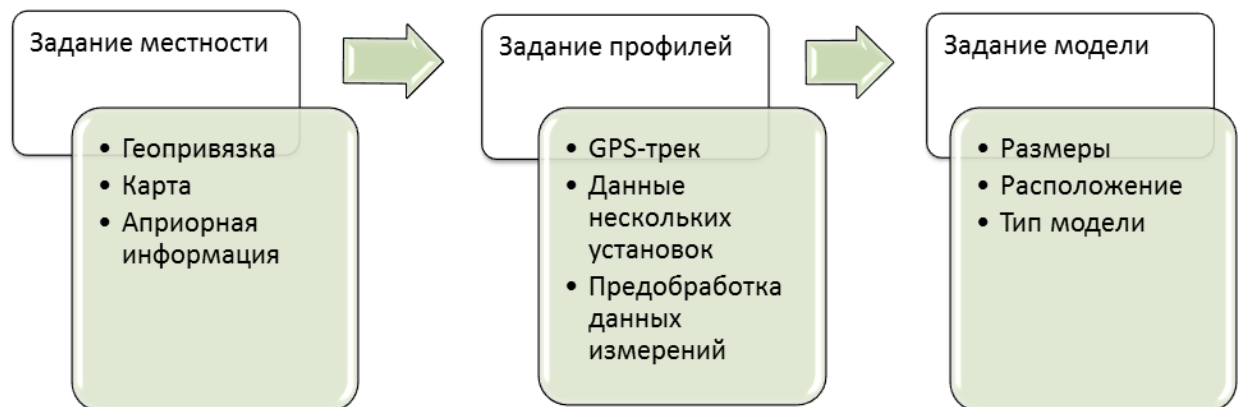


Рис. 17. Схема задания данных.

На первом этапе пользователь задаёт местность исследований. Ему необходимо указать глобальные (GPS) координаты точки отсчёта относительной системы координат. После этого координаты объектов можно задавать как в глобальных (GPS), так и в локальных координатах. Затем пользователь может загрузить карту местности в виде файла-изображения: левый нижний угол будет сопоставлен с началом относительной

системы координат. Также на этом этапе пользователь может задать априорную информацию с привязкой к координатам.

На втором этапе пользователь последовательно вводит данные профилей. Расположение и рельеф профиля могут быть как загружены из GPS-трека, так и заданы вручную. При необходимости также указывается расположение выносных электродов. После этого пользователь может приступить к загрузке данных измерений из файлов, полученных с аппаратуры. При этом задаются тип установки и используемые выносные электроды, проводится предобработка данных.

На третьем этапе происходит установка параметров модели: размеры, расположение и тип. При этом пользователю предлагается отталкиваться от расположения и размеров модели, выбранных автоматически. Автоматический выбор параметров основывается на уже заданном расположении профилей: выбирается минимальная по площади модель, вмещающая в себя все профили. Глубина модели рассчитывается исходя из глубины используемых установок. Тем не менее, пользователь может настроить значения параметров по своему усмотрению.

2.6 Предобработка данных измерений

Как уже упоминалось ранее, данные электротомографии представляют собой набор точек данных - измерений кажущихся сопротивлений, привязанных к координатам на двумерной плоскости. Причины ошибок в измерениях можно разделить на две категории: систематические и случайные. Систематические ошибки обусловлены огрехами в проведении исследования, которые не позволяют провести достоверного измерения сопротивления. Например, поломки в кабеле; плохое заземление электрода, что не позволяет обеспечить достаточной подачи тока; неподключенная к электроду клипса и т.п. Систематические ошибки довольно легко обнаружить: обычно они затрагивают небольшую часть из общего числа измерений, локализованы в одной части разреза, и выглядят как аномально большое сопротивление. Причиной случайных ошибок являются эффекты от теллурических токов, протекающих в земле; при этом измерения могут быть как завышенными, так и заниженными.

Перед началом инверсии необходимо исключить из обработки как можно больше ошибочных точек данных. Если искажения, вызванные случайными ошибками, тяжелы для определения, то систематические ошибки хорошо заметны.

Для проведения предобработки был реализован специальный элемент пользовательского интерфейса (виджет) (рис. 18).

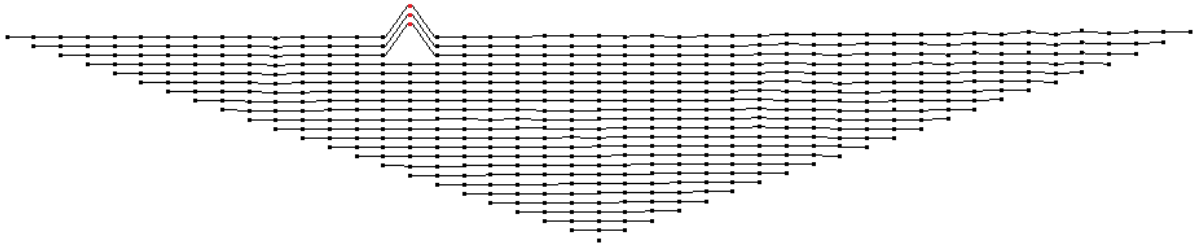


Рис. 18. Предобработка данных измерений.

Точки данных разделяются на уровни: уровень образуют точки, привязанные к одной глубине. Соседние по горизонтали точки одного уровня соединяются прямыми линиями и образуют линию уровня. Чем больше измеренное кажущееся сопротивление в этой точке, тем выше относительно своего уровня располагаются точки. В силу слоистого строения земной поверхности, обычно кажущееся сопротивление не меняется резко в горизонтальном направлении, из-за чего линии уровня получаются гладкими. При такой визуализации данных точки с аномально высоким кажущимся сопротивлением, что является признаком систематических ошибок в измерениях, сразу заметны (на рис. 18 выделены красным).

Виджет позволяет выделять точки и исключать их из обработки. Исключённые точки окрашиваются в красный цвет. Подобные средства есть и в других программах, например Res2dInv, однако при разработке виджета учитывался опыт работы с аналогами и добавлены недостающие функции, например, групповое выделение точек.

2.7 Визуализация данных

При обработке данных исследования интерпретатору могут быть полезны следующие виды визуального представления данных:

1. визуализация расположения профилей на карте местности;
2. визуализация данных измерений в виде псевдореззов;
3. визуализация модели в виде геоэлектрических разрезов по профилям;
4. трёхмерная визуализация модели.

Таким образом, можно выделить три типа визуализации данных:

1. визуализация расположения профилей;
2. двухмерная визуализация псевдо- и геоэлектрических разрезов;
3. трёхмерная визуализация.

Визуализация расположения профилей является довольно тривиальной задачей. На двумерной плоскости, исходя из введённых координат, изображаются профили в виде

отрезков. При этом в качестве подложки может быть использована загруженная пользователем карта местности. Также, если требуется, отмечаются точки привязки априорной информации.

Для двух- и трёхмерной визуализации используется свободная программная библиотека Visualization Toolkit (VTK) [12]. Построение изображения с помощью VTK реализуется в виде программного конвейера: исходные данные пропускаются через ряд фильтров, результат обработки одного фильтра является входом для следующего.

Исходными данными для построения двух- и трёхмерной визуализации как для псевдо-, так и для геоэлектрических разрезов, являются точки данных: значение сопротивления, привязанное к точке на двухмерной плоскости (трехмерного пространства). Средствами VTK путём интерполяции значений между точками происходит построение скалярной функции. С помощью построения изолиний (изоповерхностей) происходит выделение связных областей пространства, значения функции в которых находятся в заданных пределах, которые потом заполняются соответствующим цветом. Соответствие диапазонов значений и цветов задаются шкалой. Шкала может быть выбрана автоматически, на основании заданного числа диапазонов и интервала значений функции, или жёстко задана пользователем.

ГЛАВА 3. Реализация и опытное применение

3.1 Функциональность программного средства ViewERT

Согласно разработанной архитектуре было создано программное средство ViewERT. ViewERT реализует следующие функции:

- загрузка данных:
 - задание профилей:
 - задание расположения;
 - ручное задание рельефа;
 - загрузка данных измерений;
 - предобработка данных измерений;
- моделирование
 - выбор модели:
 - блочная модель;
 - модель, задающаяся с помощью призм;
 - модель вертикального контакта;
 - слоистая модель;
 - моделирование данных установок:
 - Веннера;
 - Шлюмберже;
- визуализация:
 - визуализация псевдо- и геoeлектрических разрезов;
 - визуализация модели.

Разработка велась на языке C++ с использованием фреймворка Qt 4.7 [13]. Решение об использовании Qt было принято на следующих основаниях. Во-первых, Qt является многофункциональной кроссплатформенной библиотекой, предоставляющей средства как для создания пользовательского интерфейса, так и для поддержки многопоточности. Также Qt позволяет внести программу элементы событийно-ориентированного программирования, используя механизм сигналов-слотов. Во-вторых, VTK предоставляет специальные средства для интеграции в Qt-приложения.

Вид главного окна программы представлен на рис. 19 и рис. 20.

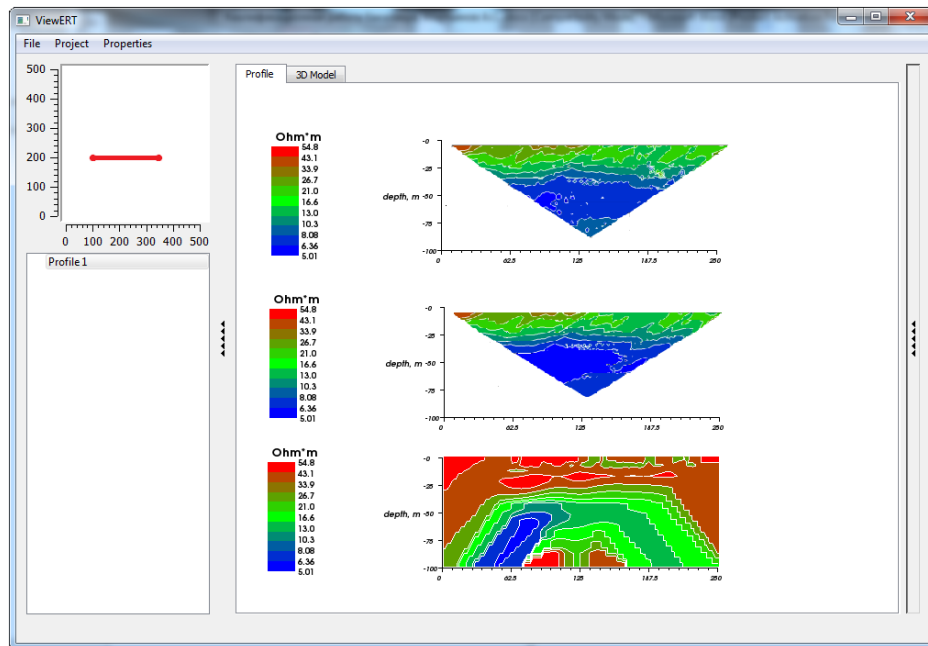


Рис. 19. Главное окно программы, вкладка отображения профилей.

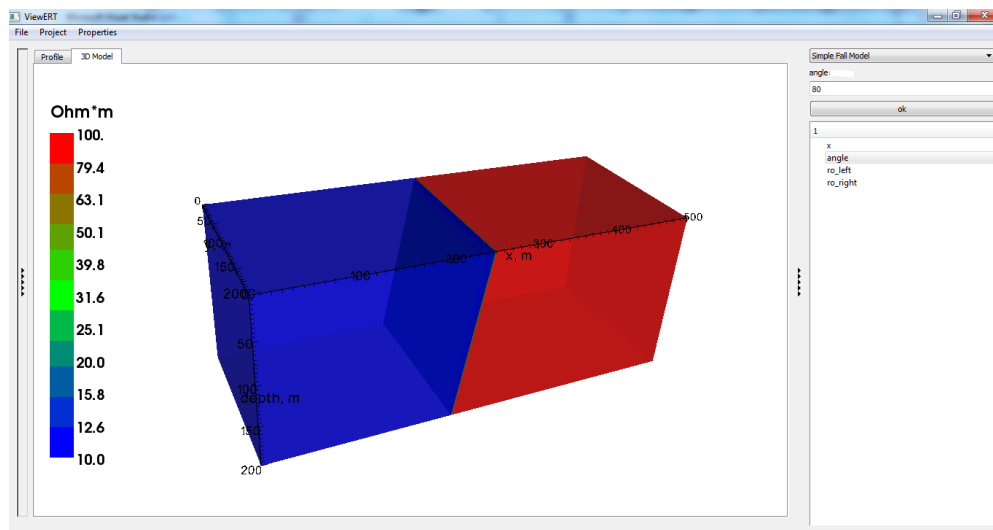


Рис. 20. Главное окно программы, вкладка отображения модели.

3.2 Верификация результатов интерпретации данных метода сопротивлений при исследовании разломных структур на территории Горного Алтая

Одним из применений метода ВЭЗ является исследование разломных структур земной поверхности. В ходе подобного исследования на основании полевых данных производится построение трёхмерной геоэлектрической модели. Первоначальная трёхмерная модель строится исходя из одномерных. Затем производится итеративное её уточнение, пока результаты трёхмерного моделирования не будут повторять полевые данные с допустимой погрешностью. Одномерная модель представляет собой описание распределения УЭС от глубины в одной точке земной поверхности. Одномерные модели

получаются в результате 1D-инверсии данных ВЭЗ, полученных в результате серии измерений с увеличивающимся разномом установки, при сохранении расположения её центра. Затем набор одномерных моделей преобразуют в трёхмерную модель, интерполируя функцию распределения УЭС между точками (пикетами) одномерных моделей.

С использованием ViewERT была проведена верификация трёхмерной геоэлектрической модели, построенной в ходе исследования территории Горного Алтая (рис. 21). Модель была построена на основании одномерных инверсий полевых данных, проведённых в программе IPI2Win [14].

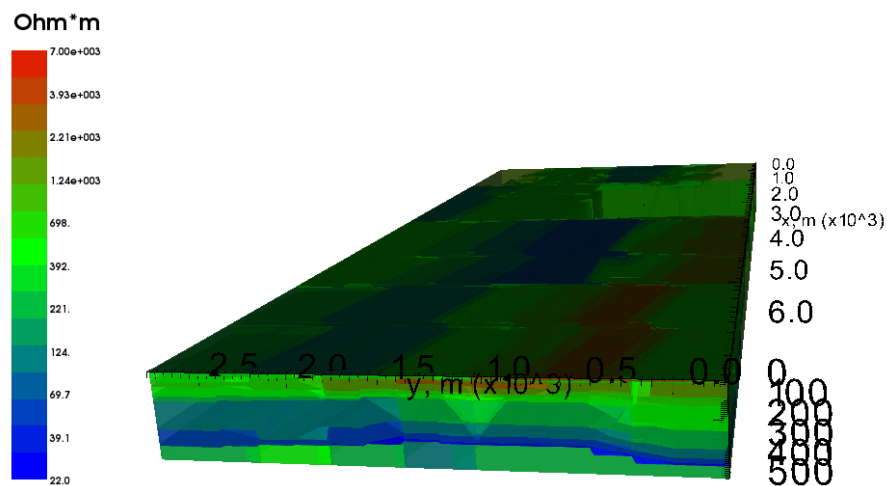


Рис. 21. Трёхмерная модель.

Верификация проводилась путём сравнения смоделированных значений кажущегося сопротивления с измеренными. Результаты для одного из пикетов приведены на рис. 22 и рис. 23.

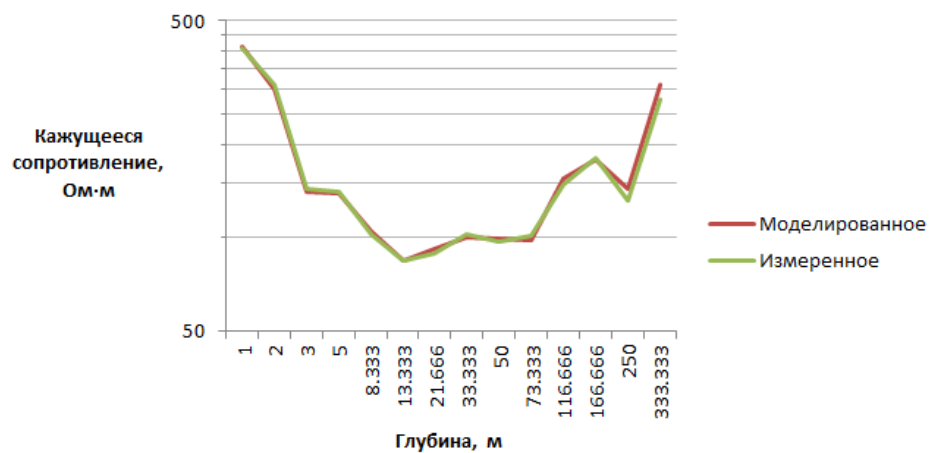


Рис. 22. Сравнение измеренных и смоделированных значений кажущихся сопротивлений.

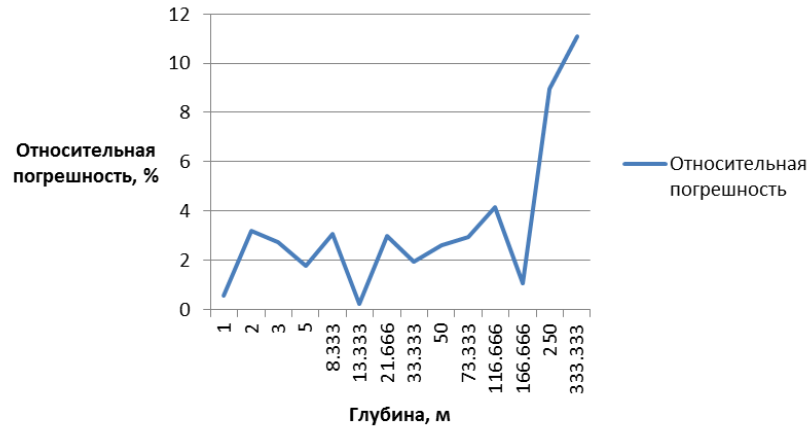


Рис. 23. Относительная ошибка смоделированных значений кажущихся сопротивлений.

Как видно по графикам, модель обеспечивает хорошее совпадение с экспериментальными данными. Однако для больших разносов относительная разница между наблюдаемыми и смоделированными данными возрастает. Это можно объяснить тем, что сказывается влияние «соседних» одномерных моделей, и итоговая трёхмерная модель нуждается в незначительной корректировке.

3.3 Верификация результатов интерпретации данных электротомографии при определении места залегания угольного пласта

Метод электротомографии на постоянном токе получает всё большее распространение при поиске и разведке полезных ископаемых на небольших (до 100 м) глубинах, в том числе и для разведки угольных месторождений, перспективных для добычи открытым способом. Особенно хорошо метод показывает себя на участках, где угольные пласты и вмещающая их порода соседствуют с водоносными горизонтами, как правило, низкоомными, что позволяет получать контрастные геоэлектрические разрезы [15].

В ходе исследования необходимо определить место залегания угольного пласта. Для этих целей особенно наглядным является построение именно трёхмерной модели, которая позволяет, во-первых, проследить направление простираения угольного пласта, а во-вторых, верифицировать модель с помощью трёхмерного моделирования. Геологическое строение территории месторождения может быть довольно сложным, что может сказаться на точности двумерной интерпретации.

С помощью ViewERT была проведена верификация трёхмерной модели, построенной на основании данных электротомографического исследования в целях

разведки угольных слоёв (см. рис. 24). Трёхмерная модель была построена на основании инверсии 4 сонаправленных профилей, расположенных в 20-30 метрах друг от друга. Инверсия производилась с помощью программы Res2dInv. На визуализации трёхмерной модели хорошо различимы водоносный горизонт и вмещающие угольный пласт породы.

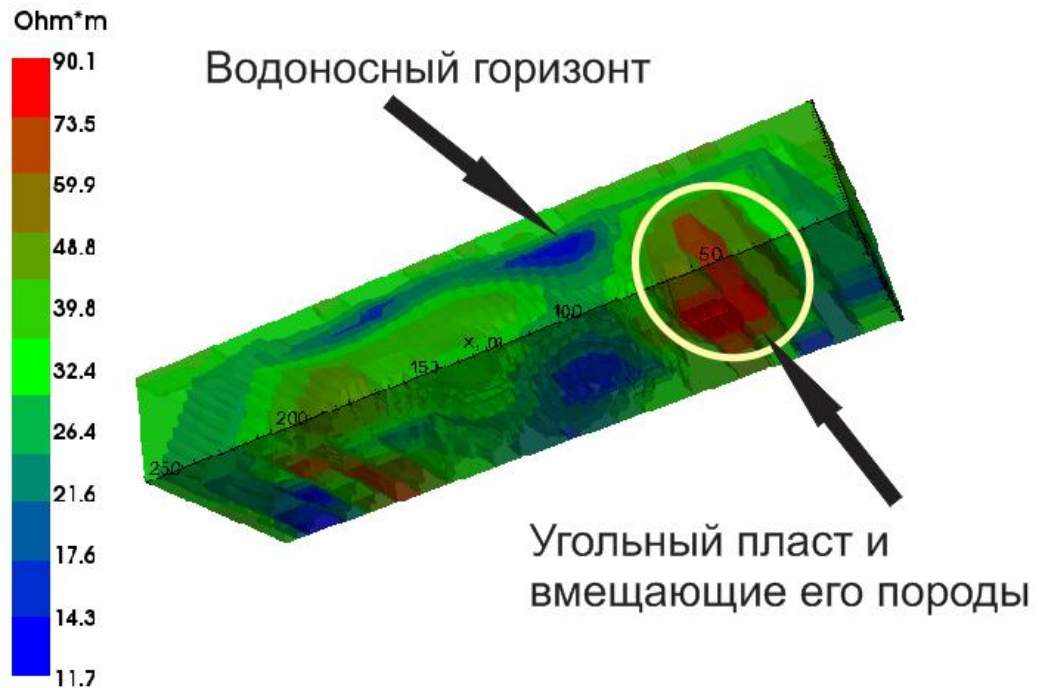


Рис. 24. Трёхмерная модель.

Измерения были выполнены с использованием установки Шлюмберже. Результаты моделирования показали хорошее совпадение с наблюдаемыми. Среднеквадратичное отклонение составляет для всех профилей составляет менее 3%. Пример для одного из профилей приведён на рис. 25, распределение ошибки моделирования - на рис. 26.

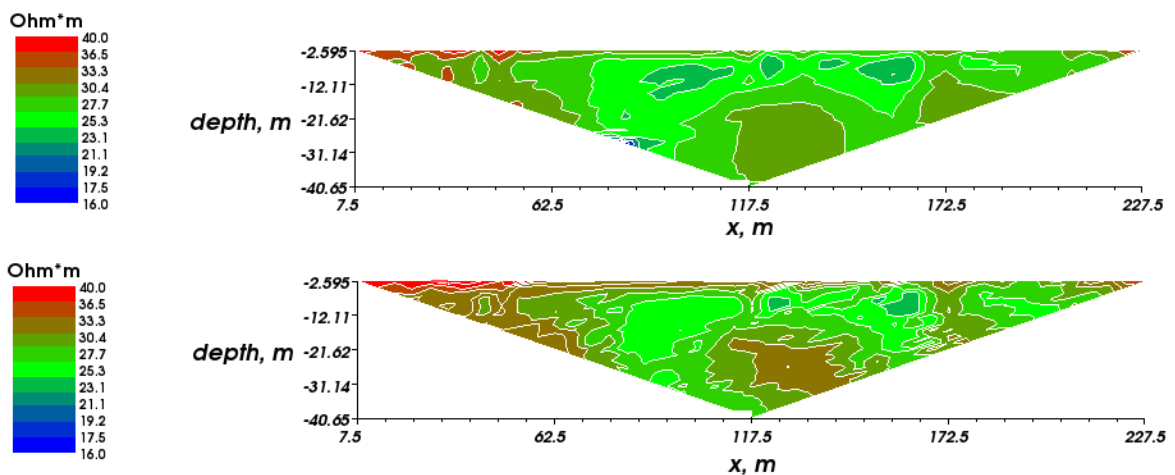


Рис. 25. Наблюдаемый (верхний) и смоделированный (нижний) псевдоразрезы по одному из профилей исследования. Среднеквадратичное отклонение составляет 2,01%.

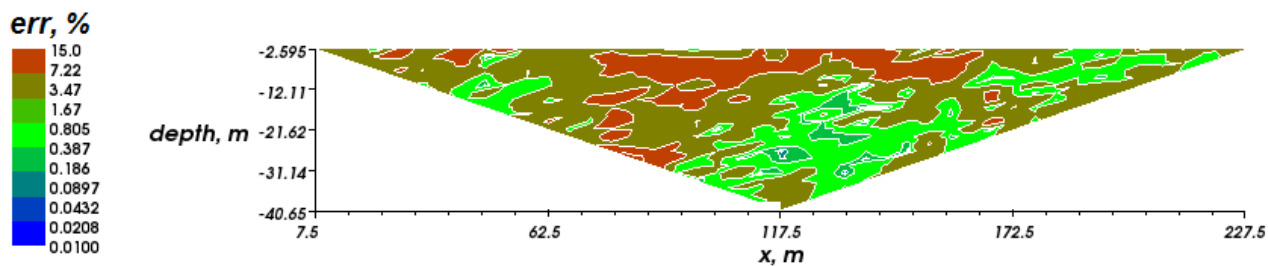


Рис. 26. Распределение относительной ошибки моделирования.

На основании результатов моделирования можно утверждать, что полученная трёхмерная модель довольно точно описывает исследуемую территорию. Достигнуть такого результата позволило отсутствие резких изменений в геологической структуре в направлении, перпендикулярном профилям. Расстояния между параллельными профилями оказалось достаточным для построения достоверной трёхмерной модели.

Заключение

В рамках представленной работы создано программное средство для обработки данных электротомографического исследования. В процессе работы автором были решены следующие задачи:

- проведено изучение технологии проведения электротомографии;
- сформулированы требования к программному средству;
- на основе алгоритма моделирования ВЭЗ реализован алгоритм моделирования электротомографии;
- разработаны архитектура и дизайн классов программного средства;
- создана первая версия программного средства.

На момент написания реализованы следующие функции средства:

- импорта данных;
- предобработки данных;
- выбора геоэлектрической модели;
- прямого моделирования на основании модели;
- визуализации данных и результатов моделирования.

Созданный программный инструмент был успешно применён для верификации трёхмерных геоэлектрических моделей, полученных в процессе реальных исследований.

Перспективами проекта являются дальнейшее наполнение набора доступных моделей, интеграция более быстрого алгоритма моделирования [16], что позволит реализовать решение обратной задачи.

Основные положения и промежуточные результаты работы были представлены на научном конгрессе "Интерэкспо Гео-Сибирь-2013" [17].

Литература

1. Schlumberger C. Etude sur la Prospection Electrique du Sous-sol // Gaultier-Villars et Cie., Paris, 1920, 94 p.
2. Бобачев А. А. Электротомография - высокоразрешающая электроразведка на постоянном токе. / Яковлев А. Г., Яковлев Д.В. // "Инженерная геология", сентябрь 2007, 31-35
3. Dahlin, T. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. / Zhou B.. // Geophysical Prospecting. – 2004 - 52(3) - p.379-398
4. Манштейн Ю. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения [Электронный ресурс] / Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., Белобородов В. А. – Режим доступа: <http://www.nemfis.ru/etom.pdf>
5. Loke M.H. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method / Barker R.D // Geophysical Prospecting. – 1996 - №44 (1) - p. 131–152.
6. Loke M.H. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques / Barker R.D // Geophysical Prospecting. – 1996. - №44(3) - p. 499–524.
7. Geotomo Software [Electronic resource] – Англ. – Режим доступа: <http://www.geotomosoft.com/>
8. Surfer 11 [Electronic resource] – Англ. – Режим доступа: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer>
9. Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys // 2009, 144 p.
10. Неведрова, Н.Н. Трехмерное моделирование сложных геоэлектрических структур / Н.Н.Неведрова, И.В, Суродина, А.М. Санчаа // Геофизика. - 2007. - №1. - с.36-41.
11. Loke M.H. Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method // 2011, 162 p.
12. VTK – The Visualization Toolkit [Electronic resource] – Англ. – Режим доступа: <http://www.vtk.org/>
13. Qt [Electronic resource] – Англ. – Режим доступа: <http://qt.digia.com/>

14. IPI2WIN - программа для одномерной интерпретации ВЭЗ и ВЭЗ-ВП [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.geotech.ru/faq/ipi2win/>
15. Фаге А.Н. Применение электротомографии для разведки угольных пластов и контролируемых их водоносных горизонтов / Ельцов И.Н., Яркова Н.М. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр., 15-26 апреля 2013г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск : СГГА, 2013, - с.52-57.
16. Эпов М.И. Математическое моделирование одного класса прямых и обратных задач / Эпов М.И., Шурина Э.П., Ковбасов К.В. // Материалы международной конференции «Обратные и некорректные задачи математической физики», посвящённой 75-летию академика М.М. Лаврентьева. – Новосибирск: 2007.
17. Мартьянов А.С. Программный инструментальный анализа данных электротомографии. / Власов А. А. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр., 15-26 апреля 2013г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск : СГГА, 2013, - с.151-155.