

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи



Сивенкова Анастасия Павловна

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ТРЕХМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ЗОНДИРОВАНИЙ**

1.2.2 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор Персова М.Г.

Новосибирск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1 Математические модели и алгоритмы для решения прямых и обратных задач электроразведки и магниторазведки	21
1.1 Алгоритмы построения оптимизированных неконформных конечноэлементных сеток, обеспечивающие совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов	21
1.2 Математические модели для расчета электромагнитных полей с контролируемым источником	47
1.2.1 Гальванический источник.....	47
1.2.2 Индукционный источник.....	53
1.3 Математические модели для расчета магнитных полей	56
1.4 Математические модели для решения обратных задач.....	57
1.5 Верификация процедуры мультифизической инверсии	62
Выводы по главе 1	67
Глава 2 Метод совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок в ситуациях, когда целевые заглубленные объекты находятся под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями	69
2.1 Верификация решения обратной задачи магниторазведки и анализ эквивалентности	69
2.2 Алгоритм совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок в ситуациях, когда целевые заглубленные объекты находятся под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями.....	75
2.3 Обоснование работоспособности алгоритма на синтетических данных.....	76

2.4 Обоснование работоспособности алгоритма на практических данных	79
Выводы по главе 2	96
Глава 3 Методы проверки эквивалентности трехмерных геоэлектрических моделей, построенные на основе процедур конечноэлементного 3D-моделирования и геометрических 3D-инверсий.....	97
3.1 Анализ эквивалентности 3D-модели, полученной в результате 3D-инверсии данных аэроэлектроразведки.....	98
3.2 Обоснование новой высокоразрешающей технологии «Звезда» для морских электроразведочных работ.....	105
3.2.1 Сравнение разрешающей способности технологии «Звезда» с разрешающей способностью технологий ГЭД-ГЭЛ и ВЭД-ВЭЛ.....	107
3.2.2 Анализ точности картирования границ целевых объектов и анализ эквивалентности	115
3.2.3 Возможности технологии «Звезда» для решения задач мониторинга	120
Выводы по главе 3	123
Глава 4 Программный комплекс для проектирования электромагнитных зондирований, разработки и обоснования новых технологий и совместной обработки данных электромагнитной и магнитной съемки	125
4.1 Интерфейсная часть	125
4.1.1 Принципы задания мультифизических данных и параметров	126
4.1.2 Задание системы наблюдений.....	129
4.1.3 Весовые функции	131
4.1.4 Группирование.....	131
4.1.5 Функции для работы с данными	132
4.1.6 Проведение локальных инверсий магниторазведки	133
4.1.7 Определение параметров конечноэлементной сетки	134

4.1.8 Визуализация результатов моделирования электромагнитных и магнитных полей и инверсии в виде графиков	135
4.2 Вычислительная часть.....	135
4.3 Пример использования программного комплекса для проектирования электроразведочных работ.....	140
Выводы по главе 4	145
Заключение	146
Список литературы	149
Приложение А – Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ	169
Приложение Б – Акты внедрения научных результатов диссертационной работы.....	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Технологии электромагнитных (ЭМ) зондирований Земли используются при решении широкого спектра геологических и инженерных задач. К ним относятся поиск и разведка месторождений углеводородов [55,56,66,118,119,120], поиск месторождений твердых полезных ископаемых [34,54,60,61,62,72,73,81], решение гидрогеологических задач [25,27,115] и т.д. Вместе с тем актуально дальнейшее повышение их разрешающей способности в части повышения глубинности исследований, детализации формы локальных поисковых объектов и их классификации особенно в сложных геологических средах (когда целевые объекты перекрыты неоднородными слоями вмещающей среды), а также дальнейшее расширение класса решаемых задач, например, мониторинга водонефтяного контакта при разработке нефтегазовых месторождений.

Повышение разрешающей способности ЭМ технологий, с одной стороны, может быть достигнуто путем достижения более высоких технических характеристик и разработки новых конфигураций приемно-генераторных установок, направленных на получение существенно больших абсолютных и относительных сигналов от поисковых объектов, а с другой – путем использования более точных методов обработки данных, которые основаны на численном 3D-моделировании и 3D-инверсиях ЭМ данных с привлечением данных других геофизических методов, а также на анализе эквивалентности, устанавливающем пределы неопределенности физических свойств и границ выявленных потенциально целевых геологических тел (структур). При этом эффективность разработки новых конфигураций приемно-генераторных установок во многом зависит от степени использования методов 3D-моделирования и 3D-инверсий ЭМ данных и их возможностей.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется необходимостью разработки новых методов проектирования работ и обработки данных ЭМ зондирований Земли, позволяющих повысить разрешающую

способность соответствующих технологий и надежность геофизического прогноза, особенно, в сложных, существенно неоднородных геологических средах.

Степень разработанности.

О необходимости перехода от массового использования 1D-инверсий к трехмерной обработке ЭМ данных пишут многие авторы [23,43,117]. В качестве обоснования приводится множество примеров неадекватных результатов 1D-инверсий как на синтетических данных [9,23,43], так и на реальных данных, полученных на месторождениях с известной по результатам бурения геолого-геофизической моделью [23,117]. В этих работах показано, что применение 1D-инверсий искажает глубину и форму локальных объектов даже в средах, достаточно близких к горизонтально-слоистым. В неоднородных же средах применение 1D-инверсий довольно часто приводит к появлению ложных объектов и/или пропускам реальных.

Подходы к 3D-инверсии ЭМ данных можно разделить на два класса. Более традиционным является подход, основанный на так называемой voxel-инверсии [51,70,85,111,130,131]. В этом подходе объем исследуемой среды разбивается на достаточно мелкие ячейки, внутри которых ищется электропроводность. Другим подходом являются геометрические инверсии (называемые в зарубежной литературе также «parametric» или «model based») [13,26,71,75,94,95,107], основанные на использовании комбинации физических и геометрических параметров при описании геоэлектрической модели. Так, в этом подходе геоэлектрическая модель представляется в виде относительно крупных 3D-неоднородностей, для которых ищутся как значения электропроводности внутри них, так и координаты их границ. За счет этого использование геометрических инверсий позволяет существенно сократить количество искомых параметров и снизить область эквивалентности. Преимущества геометрических инверсий перед традиционными voxel-инверсиями на примере решения задач морской электроразведки и аэроэлектроразведки представлены, например, в работах [75,95].

Геометрические инверсии, в свою очередь, также можно разделить на два класса. В работах [13,75] представлен подход, в котором 3D-объекты учитываются «наложением» на конечноэлементную сетку с использованием осреднения электропроводности на пограничных элементах. Недостатком такого подхода является то, что в этом случае расчет производной по параметру, соответствующему границе, может давать существенную ошибку при использовании не слишком мелких ячеек, и поэтому для его реализации требуются достаточно подробные конечноэлементные сетки. В реальных же ситуациях, когда среда содержит много 3D-неоднородностей, этот подход требует очень подробных конечноэлементных сеток и, соответственно, больших вычислительных затрат, даже несмотря на то, что в этом случае производные по параметру могут вычисляться аналитически [11].

В подходе, представленном в работах [94,95,107], 3D-неоднородности «согласуются» с конечноэлементной сеткой так, что их границы совпадают с сеточными поверхностями, а расчет производных по геометрическим параметрам выполняется численно путем решения соответствующей начально-краевой задачи в области с 3D-объектом, который образован перемещаемой границей в исходном состоянии и после ее перемещения, определяемого приращением соответствующего параметра. Такой численный расчет обеспечивает высокую точность соответствующей производной даже на достаточно грубых конечноэлементных сетках [94,95,107].

Отметим, что даже для физических параметров аналитический расчет производных далеко не всегда позволяет сократить вычислительные затраты по сравнению с численным. Он эффективен лишь в случаях, когда затраты на факторизацию матриц систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), получаемых при использовании сеточных методов для решения прямых задач, существенно превышают остальные затраты, а это не всегда так. Например, для задач аэроэлектроразведки с большим количеством положений источника поля использование неконформных оптимизированных сеток, а также методов группирования с применением прямых решателей [93] приводит к тому, что

вычислительные затраты на факторизацию матрицы СЛАУ не превышают 25% [98] и аналитический способ расчета производных при решении обратных задач практически не дает преимуществ. Аналогичная ситуация характерна и для технологий морской электроразведки с буксируемым источником. С другой стороны, например, в задачах наземной электроразведки, аэро наземной электроразведки с использованием беспилотных летальных аппаратов (БПЛА) для буксирования приемника [57,58,88], а также морских технологий, реализуемых в старт-стопном режиме [6,55,56], с небольшим количеством положений источника, но требующих использования сеток с достаточно большим количеством узлов, применение схем с аналитическим вычислением производных по параметрам обратной задачи может значительно повысить вычислительную эффективность [11].

Есть еще один аспект, касающийся аналитического способа расчета производных, который заключается в том, что компоненты матрицы СЛАУ обратной задачи, получаемой в результате минимизации функционала (матрицы чувствительностей), могут вообще явно не рассчитываться, и для решения этой СЛАУ тогда используется метод сопряженных градиентов (МСГ). Однако, при использовании МСГ для решения СЛАУ обратной задачи (без явного вычисления компонент матрицы чувствительностей) невозможен адаптивный выбор коэффициентов регуляризации, что может приводить к существенному увеличению итераций в процессе решения обратной задачи и даже нарушению его сходимости. Это приводит к необходимости проведения детальных исследований по выбору коэффициентов регуляризации для обеспечения сходимости процесса минимизации целевого функционала. Кроме того, при реализации этой схемы могут резко возрасти требования к оперативной памяти [130], поскольку необходимо хранить факторизованную матрицу СЛАУ прямой задачи на большом числе временных слоев, что может сделать невозможным решение многих практических задач с использованием доступных вычислительных ресурсов.

Таким образом, наиболее эффективным представляется подход к решению обратной задачи, в котором матрица чувствительностей рассчитывается явно и для расчета производных по физическим параметрам используется аналитический или численный способ в зависимости от электроразведочной технологии, а для расчета производных по геометрическим параметрам – численный способ. В этом случае может быть использована адаптивная регуляризация, которая без дополнительных действий со стороны пользователя позволяет получать адекватные геофизические модели геологической среды и улучшает сходимость 3D-инверсии, а повышение эффективности численного способа расчета производных будет достигнуто за счет использования оптимизированных неконформных сеток, в которых границы трехмерных объектов совпадают с сеточными поверхностями.

В последнее время немало публикаций посвящено использованию неконформных шестигранных сеток [38,50,51,87,108], допускающих примыкание нескольких конечных элементов к грани одного конечного элемента. Такие сетки используются не только при решении электромагнитных задач, но и в других приложениях [46,49,68,84,129]. Однако, в подавляющем большинстве этих работ рассматриваются только сетки с ячейками в виде прямоугольных параллелепипедов и допускают примыкание только двух конечных элементов к грани одного конечного элемента (только в работе [49] рассматривается ситуация, когда к грани одного элемента примыкает больше двух конечных элементов, но и там при дроблении конечных элементов шаг по каждому направлению дробится только вдвое). Такие «регулярные» дробления существенно упрощают алгоритм построения сеток и соответствующих конечноэлементных аппроксимаций, но могут требовать большого числа дроблений при аппроксимации сложных сред, а главное, их довольно трудно применять в ситуации, когда для расчета производной по геометрическому параметру необходимо встроить в сетку один или несколько небольших 3D-объектов (образованных перемещаемой границей в исходном состоянии и после ее перемещения) и при этом учесть изогнутость границ.

Заметим также, что использование тетраэдральных сеток [35,37,127,132,133,134,135] или сеток с ячейками в виде призм с треугольным основанием [31] требует заметно больших вычислительных затрат из-за увеличения числа степеней свободы и несколько худших аппроксимационных свойств при использовании векторного метода конечных элементов (МКЭ) [33,41,79,82,114,121,128], который обладает наибольшей эффективностью при решении рассматриваемого в данной работе класса задач.

В качестве альтернативы в данной работе развиваются алгоритмы построения неконформных шестигранных оптимизированных сеток, которые сочетают в себе хорошие аппроксимационные свойства и возможность выполнения «нерегулярных» локальных дроблений (т.е. допускают произвольные стыковки нескольких элементов с гранью одного элемента) [93,98], что позволяет использовать конечноэлементные сетки с небольшим количеством ячеек, но обеспечивающих достаточную точность численного решения как при решении прямой задачи, так и при вычислении производных по геометрическим параметрам.

Последние тенденции развития геофизических технологий электроразведки таковы, что к одним из наиболее перспективных и быстроразвивающихся можно отнести аэрогеофизические технологии, использующие как вертолетные платформы [52,70,86], так и БПЛА [57,58,88]. Эти технологии характеризуются высокой эффективностью в части проведения полевых работ относительно размеров площадей и детальности съемок, включая труднодоступные территории. При этом выбор между использованием вертолетной платформы и БПЛА должен осуществляться на этапе проектирования работ в зависимости от характеристик целевых объектов и вмещающих сред [100,122]. Применение этих технологий чаще всего нацелено на поиск твердых полезных ископаемых, и в этой связи, как правило, реализуются комплексные аэрогеофизические съемки [28,29,44,74,137,138,139].

Очевидно, что для геологического прогнозирования и проектирования траекторий бурения скважин важно не только выявлять аномальные зоны по

данным различных методов, но и определять форму (геометрию) потенциально перспективных локальных структур, а также классифицировать их на основе физических свойств, полученных в результате геофизических исследований. В этой связи наиболее сложными являются довольно часто встречающиеся на практике ситуации, когда целевые тела (структуры) с аномальными физическими свойствами перекрыты неоднородными по этим свойствам приповерхностными слоями. В этом случае при использовании стандартной обработки геофизических данных трудно даже определить наличие целевых тел, не говоря уже об определении их формы и физических свойств с необходимой точностью.

Учитывая этот факт, актуально создание совместных/комплексных интерпретаций, позволяющих строить геолого-геофизические модели с определением формы потенциально перспективных локальных структур по совокупности данных геофизических методов в сложных средах, когда эти структуры перекрыты слоями с неоднородными физическими свойствами. Многие авторы [28,29,63,76] рассматривают только гравитационные и магнитные поля и не учитывают электромагнитную съемку, которая является наиболее информативной для определения формы и границ объектов. С другой стороны, авторы, изучавшие возможности 3D-инверсии аэроданных, отмечают, что качество результата 3D-инверсии может существенно зависеть от методологии ее реализации (например, [113]).

В данной работе предлагается подход к совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок в ситуациях, когда целевые заглубленные объекты находятся под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями [10,102]. Этот подход позволяет определить геометрию локальных (потенциально целевых) структур с повышенной электропроводностью и предварительно классифицировать их путем отсека заведомо слабомагнитных структур.

Другим классом перспективных электроразведочных технологий, но уже нацеленных главным образом на поиск и разведку месторождений углеводородов, являются технологии морской электроразведки [42,45,55,56,66,69,95,118,119,120].

Эти технологии при правильном проектировании могут обеспечить высокую разрешающую способность.

Так, наиболее перспективными представляются технологии, использующие дифференциальные измерительные системы (например, [69,92,95,96]), поскольку они, с одной стороны, позволяют снизить влияние вмещающей среды, тем самым повышая отклик от целевого объекта, а с другой стороны, обладают хорошим соотношением сигнал/магнитотеллурический шум [6].

В данной работе с использованием процедур 3D-моделирования и 3D-инверсии дается обоснование возможностей перспективной технологии «Звезда» [6,7,101], предлагаемой для проведения морских электроразведочных работ при поиске новых месторождений углеводородов и мониторинга границы нефтенасыщенной зоны в процессе их разработки.

Надежность геофизического прогноза, получаемого в результате обработки данных проведенных полевых работ, и качество проектирования этих работ существенно зависят от уровня эквивалентности: пределов неопределенности физических свойств и границ целевых геологических тел и ее влияния на решение геологической задачи (признание тела целевым, ошибка в траектории бурения скважины, положения границы нефтенасыщенной зоны и т.д.).

На сегодняшний день разработаны методы анализа эквивалентности геоэлектрических моделей для оценки результатов 1D-инверсий [22,39,40,48,53]. Но их применение к 3D-моделям, которые получены в результате 3D-инверсий и характеризуются значительно большим числом типов эквивалентности (из-за ограниченных размеров объектов по латерали) (см., например, [23]), не представляется возможным.

В данной работе рассматривается подход, в котором оценка эквивалентности проводится на основе изменения структуры стартовых моделей, что возможно благодаря использованию геометрических 3D-инверсий (а не традиционных voxel-инверсий), и повторных запусков локальных 3D-инверсий с локальной оценкой получаемых невязок. Конкретная последовательность действий максимально связывается с решаемой геологической задачей. В работе

приводятся примеры его применения на геофизической 3D-модели, построенной в результате 3D-инверсии данных аэроэлектромагнитной разведки полиметаллических руд [17], и при обосновании новой технологии «Звезда» для морских электроразведочных работ [6].

Важным аспектом применения предлагаемых методов совместной 3D-интерпретации геофизических данных и методов проектирования новых конфигураций измерительных систем и систем наблюдений, базирующихся на численном 3D-моделировании и геометрических 3D-инверсиях и включающих в себя анализ эквивалентности 3D-моделей, является их реализация в проблемно-ориентированном программном комплексе.

Поэтому в данной работе будут отдельно рассмотрены особенности этого программного комплекса, связанные с возможностью использования приемно-генераторных установок различного вида и соответствующих систем наблюдений для проектирования работ и обработки данных, а также с реализацией методов совместной интерпретации, включая работу с данными различных методов (как совместно, так и по отдельности) и параметризацию геологической модели.

Основной **научной проблемой** является проблема создания и реализации в проблемно-ориентированном программном комплексе новых методов обработки данных технологий геофизических зондирований Земли, позволяющих повысить их разрешающую способность и надежность геофизического прогноза.

Цель работы состоит в разработке эффективных методов 3D-инверсий для обработки данных технологий электроразведки воздушного, наземного и морского базирования, с привлечением данных магниторазведки, и анализе эквивалентности получаемых 3D-моделей, устанавливающим пределы неопределенности физических свойств и границ целевых геологических тел.

Научные задачи:

1. Разработка алгоритмов построения неконформных оптимизированных сеток для решения прямых трехмерных задач геоэлектрики с большим количеством трехмерных объектов и для расчета производных по геометрическим параметрам.

2. Разработка метода совместной 3D-интерпретации данных ЭМ и магнитной съемок при создании моделей существенно неоднородных сред.

3. Разработка способов анализа эквивалентности 3D-моделей геологической среды, получаемых в результате 3D-инверсий.

4. Реализация разработанных методов и специальных средств графического интерфейса пользователя в проблемно-ориентированном программном комплексе.

Методология и методы исследования

Методы решения обратных задач основаны на минимизации функционала невязки наблюдаемых и расчетных данных с линейризацией откликов на основе метода Гаусса-Ньютона со специальной адаптивной регуляризацией. Для моделирования трехмерных электромагнитных полей используется векторный метод конечных элементов на неконформных сетках с использованием технологии выделения части поля.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Алгоритмы построения оптимизированных неконформных конечноэлементных сеток, обеспечивающие совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов и решение трехмерных задач геоэлектромагнетизма с заданной точностью.

2. Метод совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок в ситуациях, когда целевые заглубленные объекты находятся под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями.

3. Методы проверки эквивалентности трехмерных геоэлектрических моделей, построенные на основе процедур конечноэлементного 3D-моделирования и геометрических 3D-инверсий.

4. Программный комплекс для проектирования электромагнитных зондирований, разработки и обоснования новых технологий и совместной обработки данных электромагнитной и магнитной съемки.

Научная новизна:

1. Предложен и реализован в программном комплексе алгоритм встраивания трехмерных объектов в неконформные конечноэлементные сетки, обеспечивающий совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов при решении прямых трехмерных задач геоэлектрики с большим количеством трехмерных объектов и при расчете производных по геометрическим параметрам в процедурах решения обратных задач.

2. Разработаны методы 3D-моделирования и 3D-инверсии для решения задач совместной обработки данных электромагнитной и магнитной съемок. Эти методы позволяют оценивать сверху магнитную восприимчивость для локальных проводящих структур, расположенных под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями.

3. Впервые проведено 3D-моделирование для новой старт-стопной технологии «Звезда». Это позволило обосновать преимущества технологии «Звезда» перед существующими технологиями при поиске морских месторождений углеводородов и при решении задачи мониторинга нефтенасыщенной зоны в процессе их разработки.

4. Предложен способ анализа эквивалентности полученных в результате 3D-инверсии геоэлектрических 3D-моделей, позволяющий определить пределы неопределенности физических свойств и границ целевых геологических тел и ее влияние на решение геологической задачи.

Достоверность результатов

Алгоритмы построения неконформных оптимизированных сеток протестированы путем сравнения получаемых численных решений с решениями на согласованных (конформных) сетках.

Адекватность получаемых физических свойств и геометрии локальных структур в условиях, когда они находятся под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями, с помощью предложенного и реализованного в проблемно-ориентированном программном комплексе метода совместной 3D-интерпретации подтверждена совпадением подобранных и

истинных моделей при тестировании на синтетических данных, а также данными бурения и хорошим совпадением практических и расчетных аэрогеофизических данных, полученных на месторождении полиметаллических руд на площади Creighton (Канада) [10,17,102].

Теоретическая значимость работы

Метод совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок может служить основой для создания методик комплексной многомерной обработки аэрогеофизических данных.

Результаты 3D-моделирования электромагнитных сигналов для новой конфигурации приемно-генераторной установки «Звезда» в совокупности с проблемно-ориентированным программным комплексом, реализующим 3D-моделирование и 3D-инверсии с анализом эквивалентности, могут служить теоретической основой для создания технологии мониторинга границы нефтенасыщенной зоны в процессе разработки морских месторождений углеводородов и соответствующей интерпретационной базы.

Практическая значимость работы

Разработанные подсистемы вычислительной части и инструментальные средства графического интерфейса в составе проблемно-ориентированного программного комплекса могут применяться при проектировании полевых электроразведочных работ, включая разработку новых конфигураций приемно-генераторных установок, а также для совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок с анализом эквивалентности получаемых 3D-моделей.

По результатам проведенных работ было зарегистрировано в ФИПС (Роспатент) 3 программы для ЭВМ [14,15,16] (Приложение А). Разработанное программное обеспечение применялось для проектирования полевых работ и трехмерной обработки практических данных, полученных на золоторудных месторождениях Дальнего Востока [2] и медно-порфириновых месторождениях на территории Северного Казахстана [24,32] (акты внедрения, Приложение Б), на

месторождении золото-порфирового типа в Приморье [1], на месторождении углеводородов в Северном море [6,7].

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении 4-х крупных научно-исследовательских работ, среди которых 2 проекта, выполненных в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в интересах и при софинансировании Индустриальных партнеров ООО Геофизическое предприятие «Сибгеотех» (соглашение № 14.574.21.0156 от 26.09.2017 г.) и ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания» (соглашение № 14.577.21.0216 от 03.10.2016 г.) и 3 проекта в рамках гос.заданий № 5.978.2017/ПЧ (2018-2019 гг.) и FSUN-2020-0012 (2020-2023 гг.), FSUN-2024-0003 (2024-2025 гг.), а также при выполнении междисциплинарного проекта, поддержанного грантом РФФИ № 20-61-47072.

Личный вклад

Разработан и реализован алгоритм встраивания трехмерных объектов в неконформные конечноэлементные сетки, обеспечивающий совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов. Разработан метод совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок в ситуациях, когда целевые объекты перекрыты неоднородными по электромагнитным и магнитным свойствам слоями. Предложены методы анализа эквивалентности 3D-моделей, получаемых в результате 3D-инверсии данных. Проведены исследования разработанных методов и алгоритмов на синтетических и практических данных электромагнитных и магнитных съемок. Разработаны инструментальные средства графического интерфейса и подсистемы проблемно-ориентированного программного комплекса, реализующие алгоритм совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок с анализом эквивалентности получаемых 3D-моделей.

В совместных публикациях автору принадлежат следующие результаты.

В работе [98] автором реализованы алгоритмы встраивания трехмерных объектов в неконформные конечноэлементные сетки, обеспечивающие

совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов. В работах [10,102] автором предложен алгоритм совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной аэросъемок, а в работе [13] – реализация инструментальных средств параметризации геологической модели для мультифизической обработки данных. В работах [6,7] автором проведен анализ возможностей технологии «Звезда» с исследованием области эквивалентности получаемых 3D-моделей. Кроме того, в работе [6] автору принадлежат результаты 3D-моделирования, демонстрирующие возможности технологии «Звезда» при решении задач мониторинга границы нефтенасыщенной зоны в процессе разработки морских нефтегазовых месторождений. В работах [8,12,90,91,94] автором предложены двухэтапные методики 3D-обработки аэроэлектроразведочных данных, а в работах [1,2,24,32,103] – способы проектирования работ и 3D-обработки для технологий с источником в виде заземленной электрической линии. В работе [123] автором проведены численные эксперименты для сравнения с результатами других авторов. В работах [95,107] автором разработаны алгоритмы построения сеток для расчета производных по геометрическим параметрам. Кроме того, в работах [11,18,95,107] автору принадлежат результаты исследований процедур многомерных 3D-инверсий на синтетических данных электромагнитных зондирований для измерительных систем наземного, воздушного и морского базирования. В работах [100,106,122] автору принадлежат результаты 3D-моделирования электромагнитных полей для технологии, в которой измерительная система буксируется с помощью БПЛА. В работах [92,96] автором реализован способ расчета сигналов от буксируемых многоканальных дифференциальных установок и для них проведены расчеты трехмерных электромагнитных полей для геоэлектрических моделей морских месторождений углеводородов. В работах [89,97,105] автору принадлежат результаты 3D-моделирования процессов индукционной вызванной поляризации и анализа ее влияния на сигналы, измеряемые вертолетной аэросистемой.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на международной научно-практической конференции «ГеоБайкал 2020» (Иркутск, 2020 г.); научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика» «ЕАГЕ Геомодель-2020» (Пермь, 2020 г.), «ЕАГЕ Геомодель-2021» (Геленджик, 2021 г.), «ЕАГЕ Геомодель-2022» (Геленджик, 2022 г.), «ЕАГЕ Геомодель-2023» (Санкт-Петербург, 2023), «ЕАГЕ Геомодель-2024» (Казань, 2024 г.); международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2021 (Новосибирск, 2021 г), АПЭП-2023 (Новосибирск, 2023 г.); научно-практической конференции «Морские технологии» (Санкт-Петербург, 2023), всероссийской научно-технической конференции молодых ученых «Наука. Технология. Инновации» «НТИ-2020» (Новосибирск, 2020 г.), «НТИ-2023» (Новосибирск, 2023 г), всероссийской конференции «XXII Уральская молодежная научная школа по геофизике» (Екатеринбург, 2021), «XXIII Уральская молодежная научная школа по геофизике» (Екатеринбург, 2022).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 30 научных работ, в том числе 3 научные публикации в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 8 научных публикаций, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Web of Science (включая 1 публикацию в журнале квартиля Q1, 3 публикации в журналах квартиля Q2 и 3 публикации в журналах квартиля Q3), 20 научных публикаций, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Scopus (включая 2 публикации в журналах квартиля Q1 и 4 публикации в журналах квартиля Q2), 9 публикаций, входящих в «Белый список» журналов (4 публикации в журналах первого уровня и 4 публикаций в журналах второго уровня).

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы (139 наименований) и 2-х приложений. Общий объем диссертации – 173 страницы, в том числе 63 рисунка и 2 таблицы.

Краткое содержание работы

Первая глава диссертационной работы посвящена методам решения прямых и обратных трехмерных задач электроразведки и магниторазведки. В ней представлены особенности алгоритма построения оптимизированных неконформных конечноэлементных сеток, обеспечивающего совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов, математические модели для расчета электромагнитного и магнитного полей, процедура мультифизичной 3D-инверсии и особенности расчета полей влияния различных параметров трехмерной геофизической модели.

Вторая глава диссертационной работы посвящена методу совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок в условиях, когда целевые объекты расположены под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями. В главе представлены результаты исследований, которые легли в основу разрабатываемого метода, основные этапы метода, демонстрация его работоспособности на синтетических и практических данных аэрогеофизической разведки.

В третьей главе диссертационной работы представлен анализ эквивалентности трехмерной геоэлектрической модели, полученной в результате 3D-инверсии данных аэроэлектромагнитной съемки, и результаты исследований преимуществ новой технологии морской электроразведки при поиске нефтегазовых месторождений и мониторинге границы нефтегазонасыщенной зоны при их разработке.

Четвертая глава диссертационной работы содержит описание разработанного программного комплекса. Приводится описание разработанных инструментальных средств графического интерфейса и подсистем вычислительной части.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

ГЛАВА 1 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ И МАГНИТОРАЗВЕДКИ

1.1 Алгоритмы построения оптимизированных неконформных конечноэлементных сеток, обеспечивающие совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов

Геоэлектрические модели геологической среды представляют собой набор слоев с субгоризонтальными границами, описываемыми бикубическими эрмитовыми сплайнами [20], внутри которых заданы 3D-неоднородности (объекты).

Для построения конечноэлементных аппроксимаций будут использоваться неконформные (несогласованные) шестигранные сетки [98], которые, с одной стороны позволяют описать сложную геометрию моделируемой среды, а с другой стороны, их использование позволяет сократить вычислительные затраты. Для таких сеток размер конечноэлементной СЛАУ в случае векторного МКЭ определяется числом нетерминальных ребер [20] в несогласованной сетке, а для узлового МКЭ – числом нетерминальных узлов [20].

Другая технология, которая позволяет сократить вычислительные затраты, – это группирование по положениям источника или по положениям приемника (в случае, когда используются технологии с большим источником, например, БПЛА-МПП [88] или ЭМЗ-ВП [1,32]). Система наблюдений делится на группы. Размер группы – это количество положений источника (или приемника) системы наблюдений, попадающих в эту группу. Группы формируются путем построения регулярной «группообразующей» сетки с шагами, заданными по направлениям x и y . Каждая группа определяется позициями системы, попадающими в одну ячейку этой регулярной сетки (т.е. размер группы регулируется размером шагов по x и y в «группообразующей» сетке).

Отметим, что как на этапе построения сетки, так и на этапе решения задачи в дальнейшем вводится понятие «шаблонных» z -координат [95,96,98], которые далее будут обозначаться как \tilde{z} . В шаблонных координатах горизонтальные границы сетки являются плоскими, а толщина каждого слоя/3D-объекта задается приблизительно равной средней толщине реального слоя/3D-объекта.

Для каждой группы строится своя локальная несогласованная шестигранная сетка. Ее построение включает в себя следующие этапы:

- 1) определяется размер и структура расчетной области в зависимости от положений приемно-генераторных установок в группе;
- 2) строится первичная базовая сетка в шаблонных координатах, которая не содержит внутренних границ расчетной области;
- 3) выполняются локальные сгущения конечноэлементной сетки в районе расположения приемно-генераторных установок;
- 4) выполняется «встраивание» геоэлектрических неоднородностей в виде горизонтальных слоев и трехмерных объектов в базовую сетку (преобразование первичной базовой сетки в базовую сетку);
- 5) осуществляется построение конечноэлементных сеток в реальных координатах, учитывающих перепады высот в рельефе, негоризонтальные границы слоев, наклонные и/или изогнутые границы локальных трехмерных неоднородностей (отображение шаблонных координат в реальные на основе сплайнов, описывающих субгоризонтальные границы модели).

Первый и второй этапы. Расчетная область, соответствующая каждой локальной сетке, на которой рассчитываются поля для одной группы, представляет собой параллелепипед. Размеры этого параллелепипеда зависят от общей электропроводности среды и уровня погрешности измерения экспериментальных данных (ниже этого уровня высокоточный расчет сигнала не имеет смысла).

Координаты центра области (x_c, y_c, \tilde{z}_c) рассчитываются как среднее координат положений системы наблюдений рассматриваемой группы (при

построении базовой сетки вместо z координаты используется \tilde{z} координата шаблона). Удаленные границы расчетной области определяются относительно системы наблюдений так, чтобы расстояние от каждой границы до ближайшей позиции было не меньше некоторой величины D (зависящей от электропроводности среды и временного диапазона измерений). Поэтому сначала вычисляются значения d_x, d_y и d_z так, чтобы все позиции системы наблюдений, принадлежащие группе, лежали внутри подобласти $(x_c - d_x, x_c + d_x) \times (y_c - d_y, y_c + d_y) \times (\tilde{z}_c - d_z, \tilde{z}_c + d_z)$. А затем из этой подобласти получается расчетная область удалением ее границ на величину D во всех направлениях:

$$\Omega = (x_c - d_x - D, x_c + d_x + D) \times (y_c - d_y - D, y_c + d_y + D) \times (\tilde{z}_c - d_z - D, \tilde{z}_c + d_z + D).$$

Третий этап. На данном этапе выполняются локальные сгущения сетки в окрестностях расположений приемно-генераторных установок. Для этого формируется структура данных, содержащая информацию о первичной базовой сетке. В этой структуре каждый конечный элемент определяется глобальными номерами его узлов и глобальными номерами его граней. При этом для каждой грани назначается список соседних с этой гранью конечных элементов. Эта структура подается как на вход алгоритму локальных дроблений конечных элементов, так и на вход следующему этапу, где происходит встройка в сетку слоев и локальных объектов. При выполнении локальных дроблений вначале определяются элементы, содержащие приемно-генераторные установки, а затем эти элементы дробятся вдвое по каждой из координат или только в плане, если шаг по вертикали много меньше шага по горизонтали.

Четвертый этап. Далее в сетку добавляются слои и трехмерные неоднородности.

Слои встраиваются по следующему принципу. Прообразы границ между слоями определяются их координатами $\tilde{z}, \tilde{z}_k^l, k = 1 \dots K - 1, K$ – номер слоя ($\tilde{z} = \tilde{z}_k^l$ – граница между k -м и $(k + 1)$ -м слоями в базовой сетке). При включении каждой из этих границ в базовую сетку проверяется близость ее координаты к уже

существующим \tilde{z} плоскостям сетки. Если какая-либо из этих \tilde{z} плоскостей сетки находится очень близко к вложенной границе $\tilde{z} = \tilde{Z}_k^l$, то эта плоскость смещается к уровню \tilde{Z}_k^l . Это сделано для предотвращения появления в сетке ячеек с очень маленькими вертикальными размерами.

Границы встраиваются в сетку от поверхности Земли $\tilde{z} = \tilde{z}_c$ до нижней границы расчетной области $\tilde{z} = \tilde{z}_c - d_z - D$ в цикле.

В базовой сетке формируются прообразы слоев реальной среды. На заключительном этапе внедрения слоев в базовую сетку всем ячейкам, расположенным внутри слоев, присваиваются соответствующие номера материалов.

Трехмерные неоднородности в виде многоугольников (определяющие боковые границы трехмерных объектов) разбиваются на прямоугольные параллелепипеды так, чтобы количество этих параллелепипедов было минимальным. Каждому из трехмерных прямоугольников, полученных в результате разделения, присваивается номер материала, определяющий электрофизические свойства исходного трехмерного объекта сложной формы. Добавление трехмерных неоднородностей осуществляется путем последовательного встраивания каждого из параллелепипедов, составляющих эти трехмерные неоднородности.

Алгоритм встройки параллелепипедов в базовую сетку содержит следующие шаги:

- 1) для каждого параллелепипеда определяются пересекающие его ячейки сетки, после чего они разделяются границами этого параллелепипеда (и некоторыми продолжениями этих границ) так, чтобы новые ячейки имели форму параллелепипеда;
- 2) устраняются терминальные узлы, которые образуют «перехлесты» и «стыковки по граням»;
- 3) устраняются висячие узлы в углах 3D объектов.

На рис. 1.1а показан фрагмент сечения (некоторой z -плоскостью) базовой сетки до встраивания параллелепипеда. На рис. 1.1б показано это сечение после первоначального («грубого») встраивания этого параллелепипеда в сетку.

«Грубое» встраивание заключается в определении ячеек сетки, пересекающих вложенный параллелепипед, и разделении их границами параллелепипеда (и некоторыми продолжениями этих границ) так, чтобы новые ячейки имели форму параллелепипеда.

Такое включение параллелепипеда в сетку может привести к так называемому «перехлесту». В рассматриваемом примере узлы и ребра, образующие «перехлесты», отмечены фигурными скобками и цифрой «1» и «2» на рис. 1.1б. Появление «перехлестов» может существенно ухудшить аппроксимацию решения, так как при построении конформного базиса (см. [20,124]) edge-функция будет ассоциироваться с длинным ребром, соединяющим узлы a и b в случае «1» (а также ребром, соединяющим узлы c и d в случае «2») на рис. 1.1б. Чтобы этого не допустить, необходимо дополнительно разбить окружающие конечные элементы. Заметим, что после этого дополнительного разбиения могут возникнуть следующие «перехлесты». В этом случае процедуру необходимо продолжить.

Ошибки численного решения могут сильно увеличиться в ситуации «стыковки по граням», показанной на рис. 1.1в цифрами «3»–«12». Это происходит, когда узлы, соответствующие «углу» объекта (вложенного параллелепипеда), «зависают» (т.е. являются терминальными). В этом случае к ребру, с которым связана edge-функция при построении конформного базиса, примыкают элементы с различной электропроводностью, а в конечноэлементном решении нормальная составляющая электрического поля становится непрерывной на границе между этими конечными элементами (с различной электропроводностью). Эту ситуацию можно устранить аналогичным образом: выполняются дополнительные разбиения соседних конечных элементов.

Заметим, что ситуации «перехлестов» и «стыковок по граням» могут возникать и на ребрах, ориентированных вдоль оси \tilde{z} . В этом случае они устраняются аналогичным образом.

Сечение конечноэлементной сетки со встроенным параллелепипедом после устранения ситуаций «перехлестов» и «стыковок по граням» показано на рис. 1.1г.

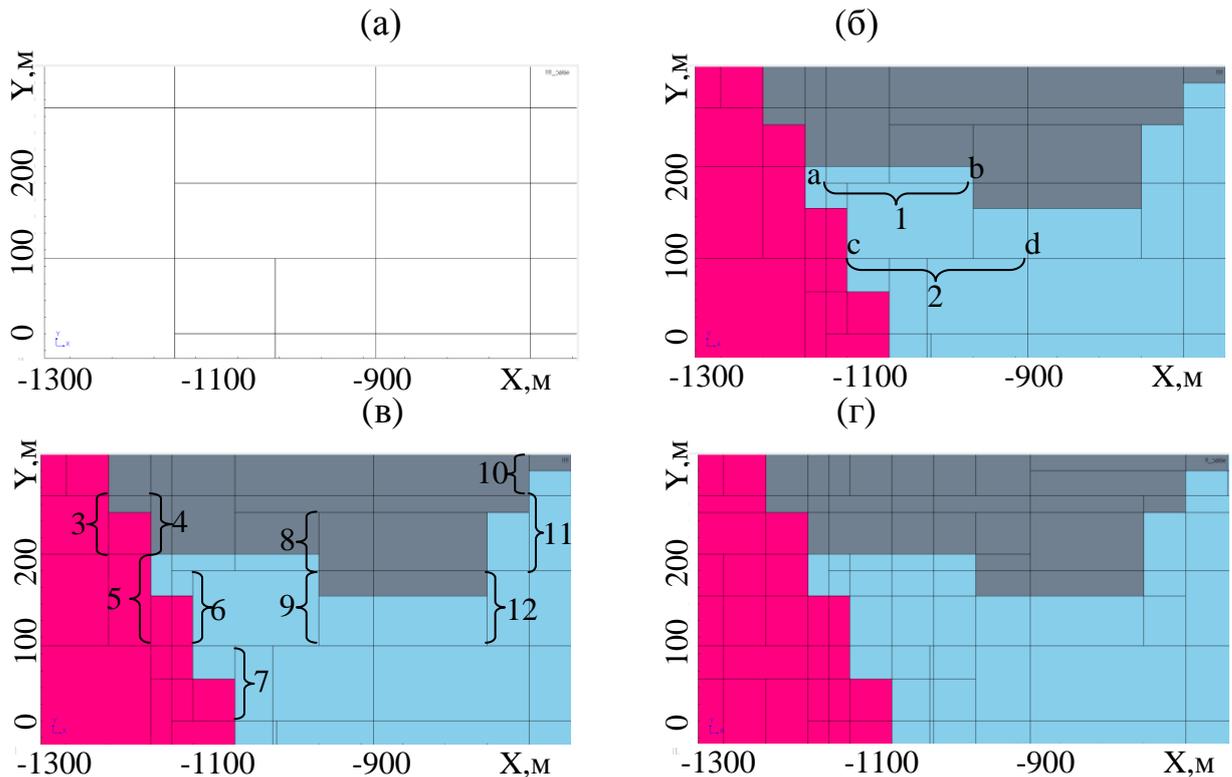


Рисунок 1.1 – Встраивание прямоугольных объектов в несогласованную сетку: 1, 2 – висячие узлы, образующие «перехлест»; 3-12 – висячие узлы, образующие «стыковки по граням». Фрагмент сетки, разрезанный плоскостью. Сетка перед встраиванием объектов (а). Сетка после «грубого» встраивания объектов с отмеченными «перехлестами» (б). Сетка после «грубого» встраивания объектов с отмеченными ситуациями «стыковка по граням» (в). Сетка после устранения ситуаций «перехлеста» и «стыковки по граням» (г)

Отметим, что, ситуация «висячих углов» возникает, когда конечный элемент, содержащий нетерминальное (большое) ребро, и конечный элемент с другим материалом, содержащий терминальное ребро, граничат только по этому ребру. Такая ситуация представлена на рис. 1.2: 3D-объекты (они показаны оранжевым и синим цветами) имеют «висячие углы» на ребре, т.е. к нетерминальному (большому) ребру примыкают терминальные ребра, соответствующие конечным элементам с разными материалами. Эти узлы обозначены белыми кружками на рис. 1.2б и 1.2в (данную ситуацию сложно увидеть в одной плоскости, поскольку элементы примыкают друг к другу не гранями, а ребрами). На рис. 1.2б,в числами 1-4 обозначены нетерминальные ребра (и определенные на них базисные функции), числами 5-13 – терминальные ребра (и определенные на них базисные функции). Выражение согласованных

базисных функций через несогласованные базисные функции для данной ситуации выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}\vec{\psi}_1^c &= \vec{\psi}_1^{nc} + \vec{\psi}_5^{nc} + \vec{\psi}_6^{nc} + \vec{\psi}_7^{nc}, & \vec{\psi}_2^c &= \vec{\psi}_2^{nc} + \vec{\psi}_8^{nc} + \vec{\psi}_9^{nc}, \\ \vec{\psi}_3^c &= \vec{\psi}_3^{nc} + \vec{\psi}_{10}^{nc} + \vec{\psi}_{11}^{nc}, & \vec{\psi}_4^c &= \vec{\psi}_4^{nc} + \vec{\psi}_{12}^{nc} + \vec{\psi}_{13}^{nc}\end{aligned}\quad (1)$$

Стоит отметить, что на рис. 1.2а-в приведена ситуация для одного угла объектов, на остальных углах ситуация такая же. На рис. 1.2г-е приведена сетка после устранения ситуации «висячих углов» на ребре.

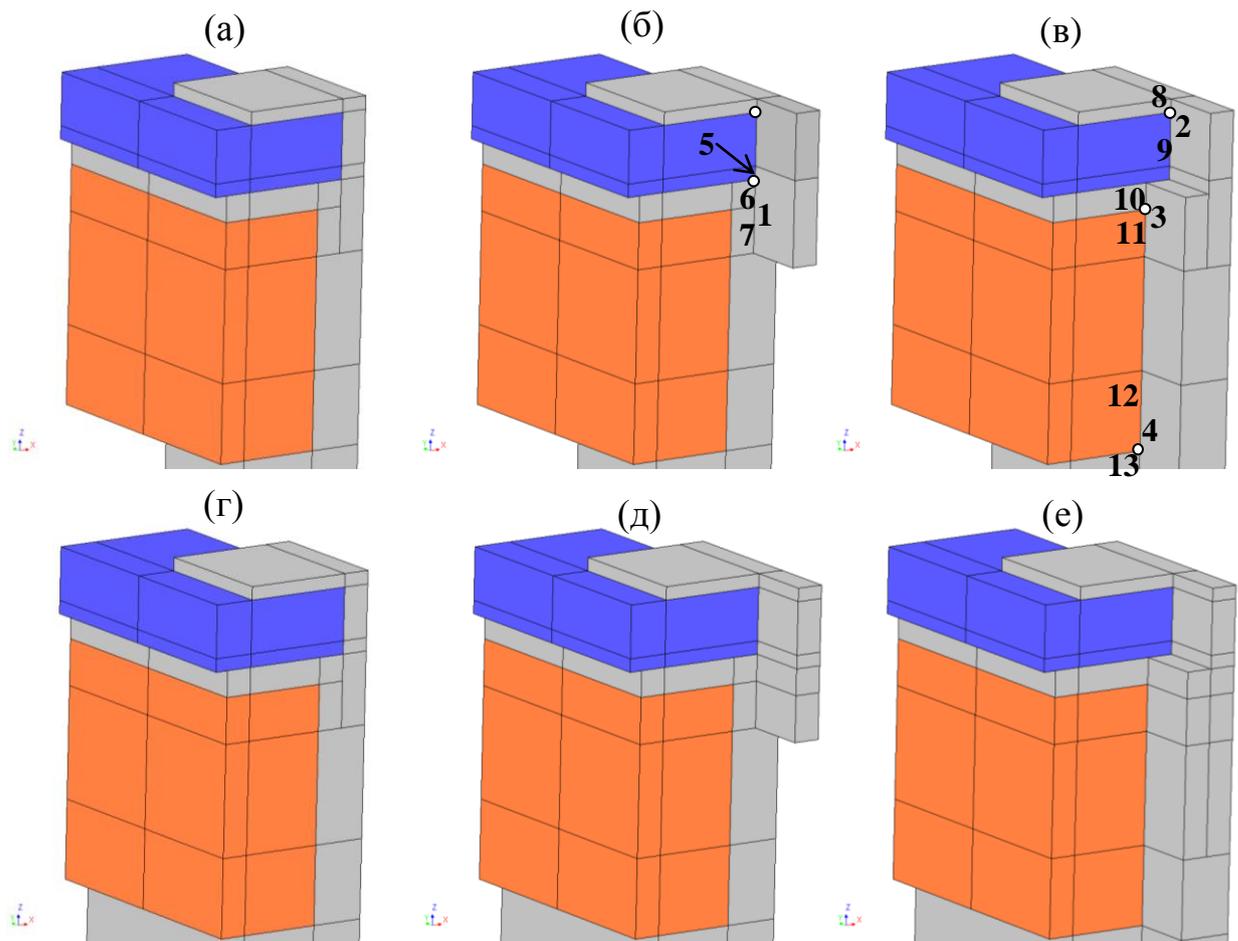


Рисунок 1.2 – Конечноэлементные сетки с «висячими углами» через ребро (а-в) и после устранения ситуации «висячие углы» через ребро (г-е)

Заметим, что хотя формально ситуация с «висячими углами» не является недопустимой с точки зрения построения конечноэлементных аппроксимаций, в ряде случаев она может приводить к очень существенным погрешностям и в конечном итоге даже приводить к тому, что не будет сходиться процесс при решении обратной задачи.

Покажем это для рассмотренной выше ситуации.

Итак, на рис. 1.2 показаны два 3D-объекта, которые не граничат друг с другом по вертикали. Верхний 3D-объект, показанный синим цветом, имеет сопротивление $1.24 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, нижний 3D-объект, показанный оранжевым цветом, – $0.29 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а вмещающая среда, показанная серым цветом, – $3660 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Заметим, что эта ситуация возникла в результате обработки данных аэроэлектроразведки на месторождении полиметаллических руд Creighton (Канада) [10,17,102].

На рис. 1.3 приведены сигналы в приемниках аэросистемы, расположенных над объектами (рис. 1.3а) и в 120 метрах от объектов (рис. 1.3б). На рис. 1.3а,б синим цветом показаны кривые для модели, содержащей и верхний, и нижний объекты, а серым цветом показаны кривые для модели, из которой исключен верхний объект (путем замены материалов соответствующих конечных элементов). На рис. 1.3в,г представлены разности кривых для модели с двумя объектами и модели без верхнего объекта.

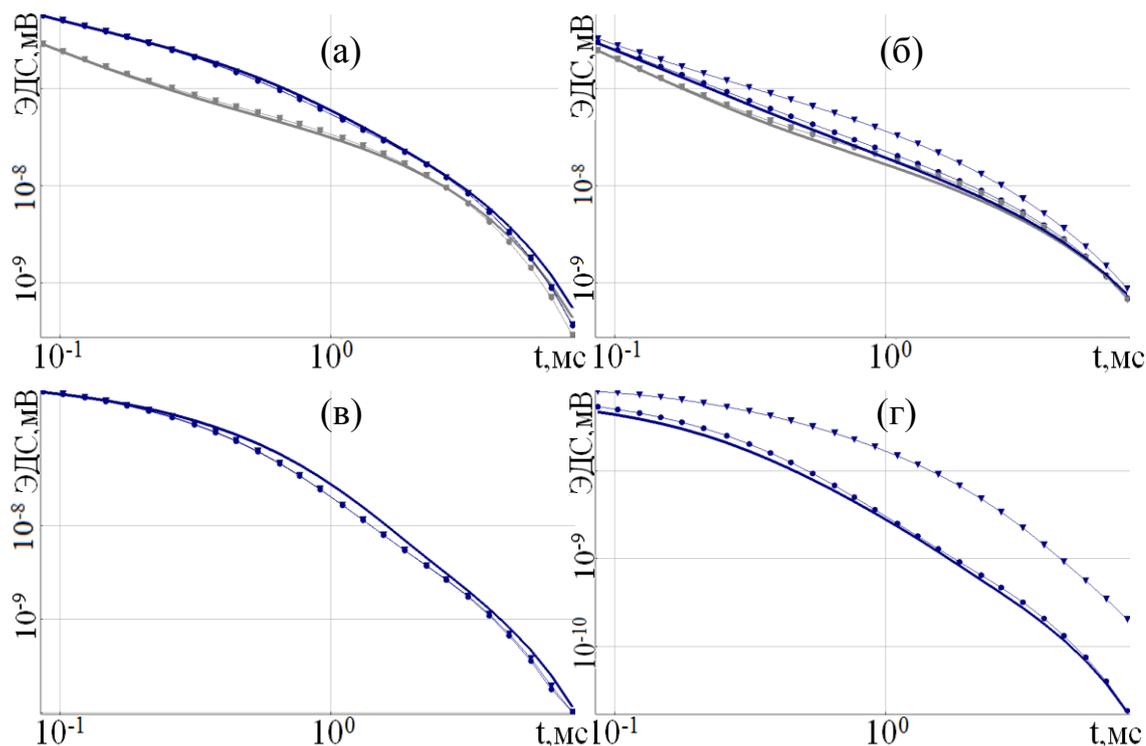


Рисунок 1.3 – Графики сигналов ЭДС для модели с двумя объектами (синие кривые) и для модели без верхнего объекта (серые графики) (а, б) и их разность (в, г) на разных сетках: треугольники – сетка с «висячими углами», круги – сетка после устранения «висячими углами», без маркеров – регулярная сетка. На рис. (а, в) графики показаны в точке над объектами, а на рис. (б, г) – сбоку (120 м)

На рис. 1.3а,б представлено по три кривые каждого цвета: кривые с маркерами в виде треугольников были рассчитаны на сетке с «висячими углами» (рис. 1.2а-в), кривые с маркерами в виде кружков – на сетке после устранения «висячих углов», а кривые без маркеров – на полностью согласованной сетке.

Из представленных результатов видно, что над объектами отличие сигналов на разных сетках невелико, в то время как на сигнал сбоку от объектов «висячие углы» влияют очень сильно: поле влияния нижнего объекта на сетке с «висячими углами» в 10 раз выше, чем уровень сигнала, полученного на регулярной сетке и сетке после устранения ситуации «висячих углов» (рис. 1.3г).

Заметим, что, когда в сетке присутствует только нижний объект (серые кривые) «висячие углы» практически не влияют. Не влияют они и в ситуации, если сопротивление нижнего ряда конечных элементов верхнего объекта заменить на сопротивление среды (исключив ситуацию «висячего угла» между ребрами 5 и 6 на рис. 1.2). Сигналы, посчитанные на трех сетках, хорошо совпадают, что видно из рис. 1.4.

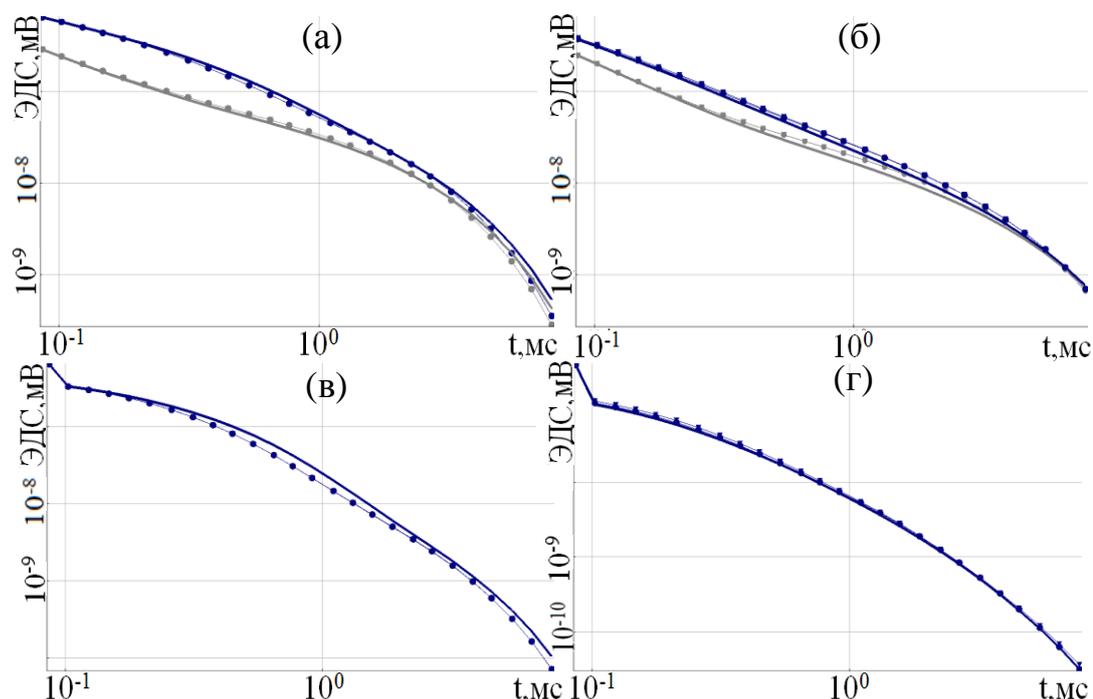


Рисунок 1.4 – Графики сигналов ЭДС для модели с двумя объектами (синие кривые) и для модели без верхнего объекта (серые графики) (а, б) и их разность (в, г) на трех сетках в ситуации, когда сопротивление нижнего ряда конечных элементов верхнего объекта заменено на сопротивление среды. Обозначения кривых аналогичны рисунку 1.3 (кривые с разными маркерами совпадают). На рис. (а, в) графики показаны в точке над объектами, а на рис. (б, г) – сбоку

Таким образом, «висячие углы» влияют далеко не всегда, однако, их необходимо устранять в любом случае, поскольку, если их влияние будет все же велико (как в приведенном выше примере для исходной модели с двумя объектами), это повлечет за собой серьезные проблемы при решении обратной задачи.

Вообще говоря, эта проблема была выявлена при анализе эквивалентности трехмерных моделей, полученных при обработке данных аэроэлектроразведки, (который будет подробно изложен в разделе 3.1). Но чтобы продемонстрировать эту проблему на простом примере был проведен следующий эксперимент.

Пусть истинной геоэлектрической моделью будет рассмотренная выше модель, содержащая два объекта. Ее вид сбоку еще раз показан на рис. 1.5а. Смоделируем для нее сигналы аэросистемы в двух вариантах: на сетке с «висячими углами» (см. рис. 1.2б,в) и на сетке, полученной после их устранения (см. рис. 1.2д,е). Эти сигналы будем использовать в качестве практических в процедуре решения обратной задачи. В качестве искомого будем рассматривать один геометрический параметр, соответствующий координате верхней кромки нижнего объекта (подробнее обратные задачи и параметры будут рассмотрены в разделе 1.4).

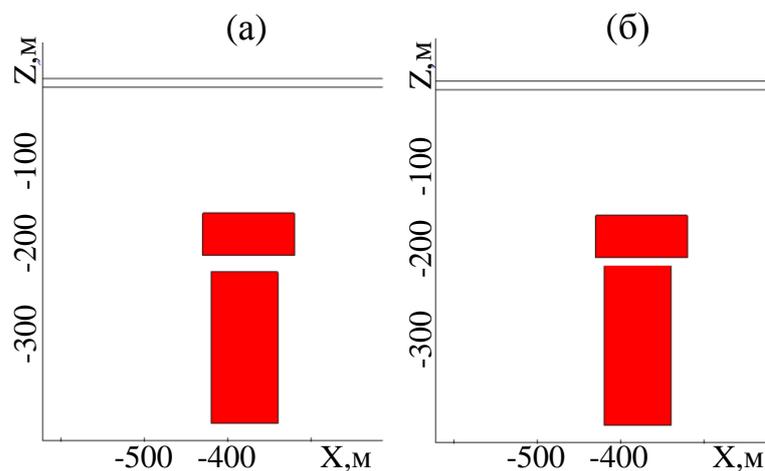


Рисунок 1.5 – Истинная (а) и стартовая (б) модели

Известно, что если в качестве стартовой модели мы возьмем модель, в которой значение искомого параметра будет отличаться от истинного на значение приращения, которое используется для расчета производных по параметру, то

решение обратной задачи должно быть получено за одну итерацию. Такая стартовая модель показана на рис. 1.5б.

Было проведено два эксперимента. Обратная задача была запущена на сетке с «висячими углами» и на сетке, полученной после их устранения. В первом случае после первой итерации было получено приращение параметра, близкое к нулевому, и сигналы практически не отличались от сигналов стартовой модели, что говорит о том, что соответствующая обратная задача не будет решена. Во втором случае после первой итерации было получено приращение, равное отличию стартовой модели от истинной и полученные сигналы практически совпали с сигналами для истинной модели. Эти сигналы показаны на рис. 1.6.

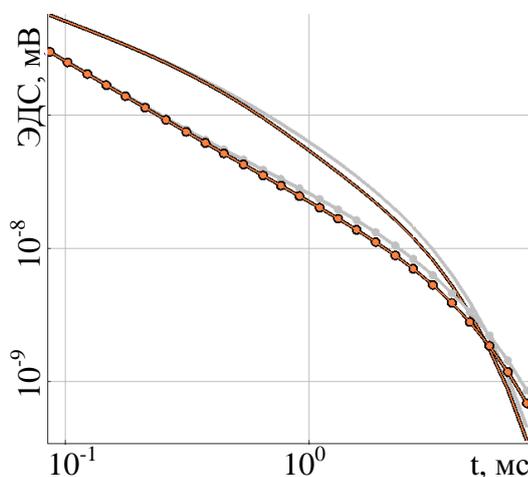


Рисунок 1.6 – Графики сигналов от истинной модели (черный цвет), стартовой модели (серый цвет) и модели, полученной после итерации решения обратной задачи (оранжевый цвет перекрывают кривые черного цвета) в точке над объектом (кривые без маркеров) и сбоку от него (кривые с маркерами)

Заметим, что время счета на сетке, полученной без устранения ситуации «висячих углов», и на сетке после ее устранения составляет порядка 2 мин., в то время как время счета на регулярной сетке составляет около 7.5 мин.

Приведем пример конечноэлементных сеток, получаемых при решении задач с большим количеством 3D-объектов.

На рис. 1.7 показаны сечения локальных базовых сеток, созданных для разных групп системы наблюдений БПЛА-МПП, после встраивания всех частей (параллелепипедов) трехмерных неоднородностей сложной формы.

Из рис. 1.7 видно, как меняется локальная сетка в зависимости от положения группы (смещаются границы и уточняемая область, меняется набор 3D неоднородностей). На рис. 1.8 показаны участки локальной сетки, созданной для одной из групп. На рис. 1.8а,б,в,г разрезы построены на разных уровнях геоэлектрической модели. Как видно из рис. 1.7 и 1.8, дополнительные уточнения базовой сетки выполняются вблизи границ трехмерных неоднородностей сложной формы. Уточнения в пределах локальных неоднородностей обусловлены устранением описанных выше ситуаций «перехлестов», «стыковок по граням» и «висячих углов». Эти уточнения появляются не только вблизи границ локальных неоднородностей, расположенных в рассматриваемом слое, но и вблизи границ трехмерных неоднородностей, расположенных в соседних слоях.

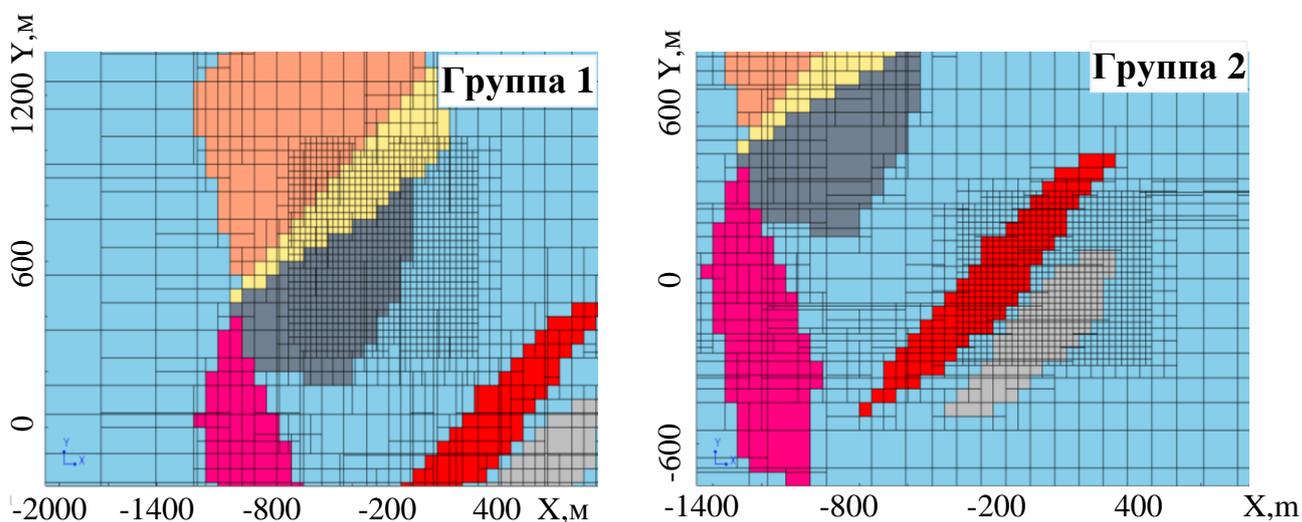


Рисунок 1.7 – Сечения локальных сеток для двух групп

Очевидно, что предложенные алгоритмы построения локальных сеток позволяют экономично (с минимальным добавлением ячеек и, соответственно, степенями свободы) встраивать небольшие и узкие объекты, сохраняя крупные ячейки внутри крупных объектов, когда эти объекты находятся вдали от положений системы наблюдений, принадлежащих группе. Крупные шаги сохраняются также в отдельных направлениях для вытянутых объектов и по границам крупных объектов. Фактически, предложенный алгоритм генерирует ячейки, размеры которых соответствуют шагам первичной базовой сетки и точно описывают границы трехмерных объектов сложной формы.

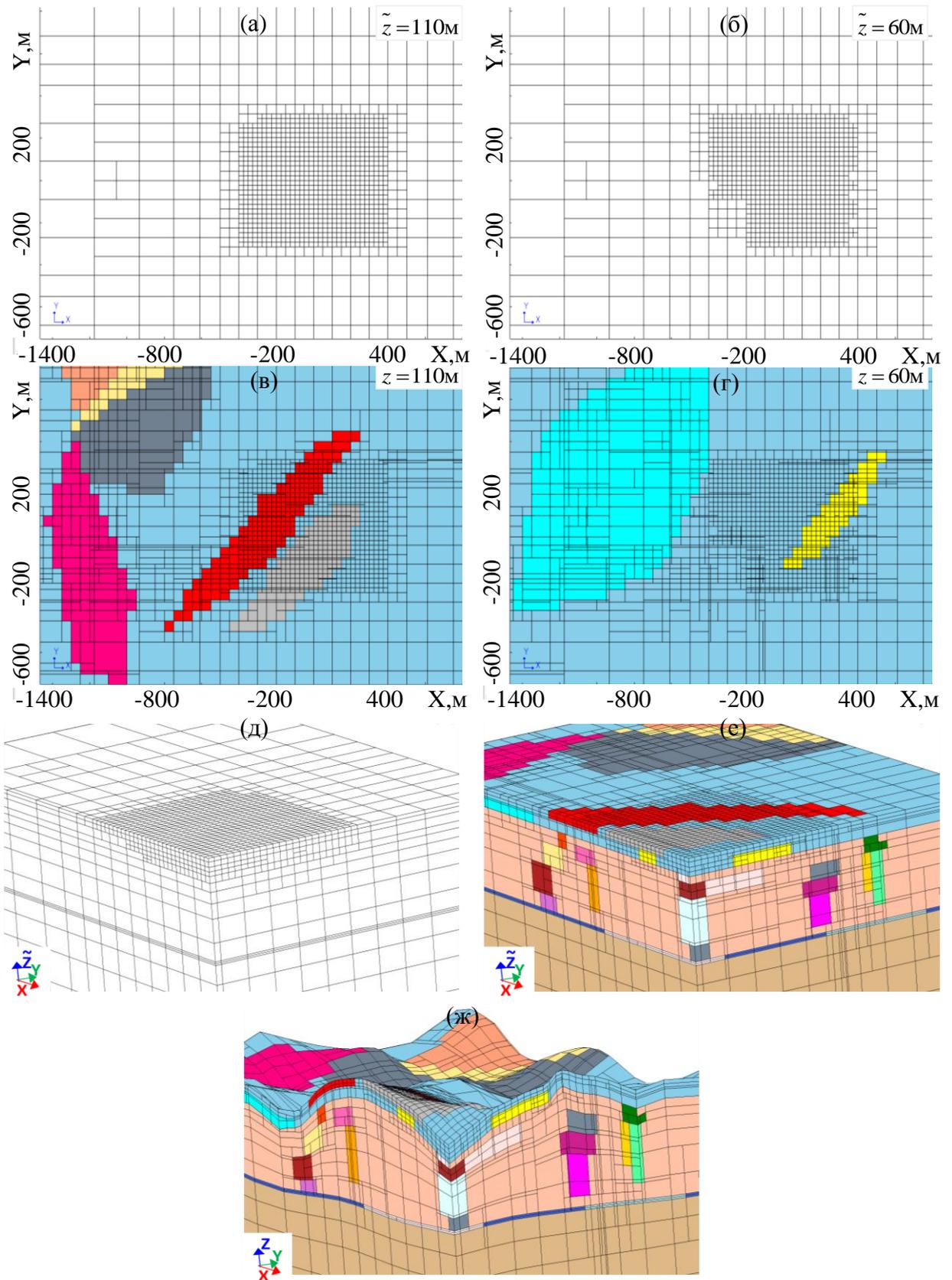


Рисунок 1.8 – Локальная сетка для одной группы: базовая сетка в сечении по $\tilde{z} = 110\text{M}$ (а) и $\tilde{z} = 60\text{M}$ (б), базовая сетка после «встройки» объектов в сечении по $\tilde{z} = 110\text{M}$ (в) и $\tilde{z} = 60\text{M}$ (г), базовая сетка в 3D (д), базовая сетка в 3D после «встройки» объектов (е) и сетка в реальных координатах в 3D (ж)

В целом, в зависимости от положения группы, включение объектов сложной формы и устранение ситуаций «перехлестов», «стыковок по граням» и «висячих углов» приводило к увеличению степеней свободы примерно на 20-40% (для соответствующих регулярных сеток, это привело бы к увеличению количества степеней свободы более чем на порядок). Обратим внимание, если не устранить ситуацию «висячих углов», то количество степеней свободы увеличится примерно на 7-10%. Конечно, не все ситуации с «висячими углами» требуют устранения. Так, например, если в рассматриваемом примере не устранить ситуацию «висячих углов», то время расчета можно сократить в среднем в 1,5 раза. При этом на некоторых участках ошибка решения может резко (в 2-3 раза) возрастать, а в некоторых случаях и на порядок. Можно, например, уменьшить ошибку, уменьшив шаг в первичной базовой сетке. Вычислительные эксперименты показали, что для получения подобной точности без исключения ситуации «висячих углов» необходимо уменьшить шаг первичной базовой сетки в четыре раза. В то же время уменьшение шага базовой сетки вдвое приводит к увеличению вычислительных затрат более чем в 2,5 раза. Поэтому гораздо выгоднее сделать специальную обработку ситуации «висячие углы». В этом случае вычислительные затраты будут в 5-10 раз меньше, чем при разрешении данной ситуации за счет уменьшения шага первичной базовой сетки.

Пятый этап. Для аппроксимации рельефа Земли, криволинейных границ слоев и трехмерных объектов используется отображение базовой сетки с ячейками параллелепипеда в сетку с шестигранными ячейками, грани которых аппроксимируют криволинейные поверхности (см. рис. 1.8ж).

Рассмотренный метод учета геометрии сложных неоднородностей не приводит к резкому увеличению степеней свободы, а, следовательно, может быть более удобным для использования в системах трехмерного моделирования геоэлектромагнитных полей.

Было проведено сравнение в точности расчета производных для проведения инверсии при прямой встройке объекта в сетку, рассмотренной выше, и при

усреднении значения электропроводности среды и объекта в элементах конечноэлементной сетки, когда объект частично пересекает элемент сетки. Для этого было создано три геоэлектрические модели с одинаковой приемно-генераторной установкой.

Приемно-генераторная установка состоит из гальванического источника, расположенного на дневной поверхности, и приемных линий. Длина генератора 1.6 км, длина приемника 25 метров. Расстояние между центрами приемников 25 метров, расстояние между профилями приемников 100 метров.

Геоэлектрическая модель 1 состоит из четырех слоев: $\rho_1=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_1=30 \text{ м}$; $\rho_2=1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_2=110$; $\rho_3=1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_3=10$; $\rho_4=1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_4=\infty$. В третий слой был помещен целевой объект с удельным сопротивлением $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Объект расположен в центре системы наблюдений, размер объекта $400\text{ м} \times 400\text{ м} \times 10\text{ м}$. Модель изображена на рис. 1.9. На рис. 1.9 P1 и P7 обозначают профили, а R11 и R32 обозначают приемники, в которых рассматривались сигналы.

Для вычислений использовались три сетки: грубая сетка с шагом 200 метров в области приемников, подробная сетка с шагом 100 метров в области приемников, очень подробная сетка с шагом 50 метров в области приемников. Сетки показаны на рис. 1.10.

Для расчета производной изменялась левая граница объекта по оси X. Приращение к границе объекта давалось внутрь объекта, то есть размер объекта уменьшался. На рис. 1.11 а,б изображены графики производных ($\delta E / \delta b_i$) от времени для положений приемника R11 и R32 при прямой встройке объекта на грубой сетке для различных значений приращений δb_i . Из представленных результатов видно, что при различных значениях приращений графики достаточно хорошо совпадают (заметим, что для решения обратной задачи точного значения производной не требуется, необходимо получить только ее правильный уровень).

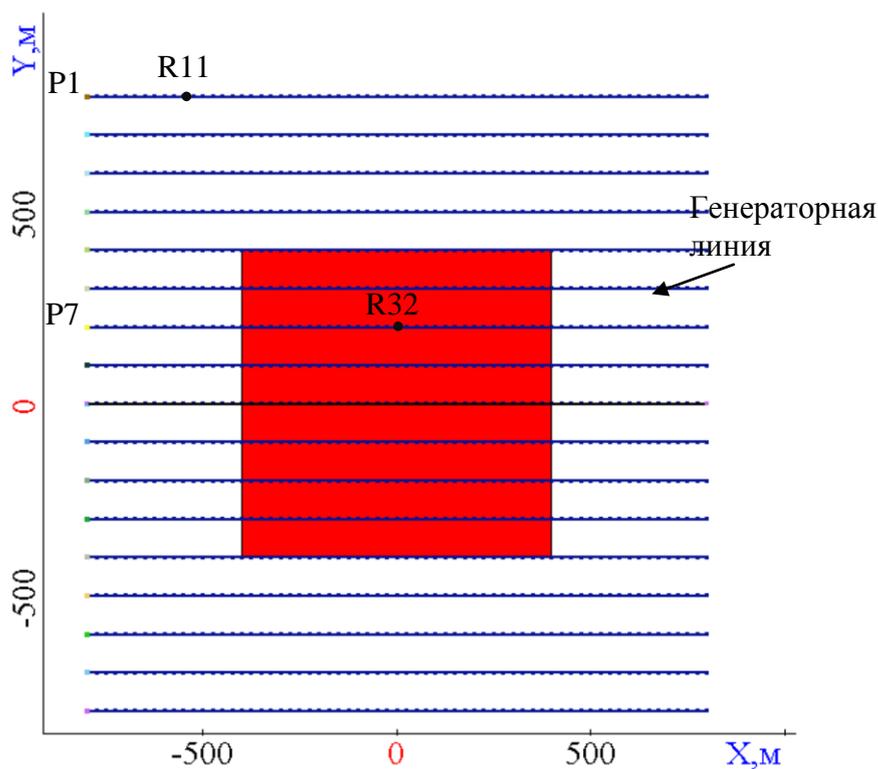


Рисунок 1.9 – Вид модели в плане с системой наблюдений и объектом

На рис. 1.11 в,г изображены графики производных ($\delta E / \delta b_i$) для положений приемника R11 и R32 при прямой встройке объекта (для $\delta b_i = -150$) и при усреднении электропроводности объекта и среды в элементах сетки на грубой сетке при различных δb_i (очевидно, что графики производных при $\delta b_i = -200$ для обоих способов расчета производных будут совпадать, поскольку положение границы после сдвига совпадет с линией исходной сетки). Из представленных результатов видно, что значения производной при прямой встройке объекта в сетку выше, чем значения, полученные при усреднении электропроводности в элементах сетки. Но если приращение перекрывает большую часть конечного элемента, то значение производной при усреднении электропроводности в элементах сетки, приближается к значению производной при прямой встройке.

На рис. 1.11 д,е представлены графики производных ($\delta E / \delta b_i$) при прямой встройке объекта (для $\delta b_i = -150$) и при усреднении электропроводности объекта

и среды в элементах сетки на грубой (для $\delta b_i = -150$) и подробной (для различных δb_i) сетках. Отметим, что на грубой сетке при $\delta b_i = -150$ приращение покрывает большую часть элемента исходной сетки, а на подробной сетке – полностью перекрывает конечный элемент.

Из представленных результатов видно, что при прямой встройке объекта графики производных на разных сетках хорошо совпадают. При использовании же усреднения электропроводности графики производных при $\delta b_i = -10$ и $\delta b_i = -50$ так же, как и на грубой сетке, существенно ниже (поскольку в этом случае приращение покрывает только 1/10 и 1/2 часть элемента. При $\delta b_i = -150$ графики производных, рассчитанных через усреднение, существенно приближаются к производным, рассчитанных путем прямой встройки, особенно на подробной сетке (это хорошо видно рис. 1.11 е), когда приращение перекрывает конечный элемент исходной сетки.

Еще более очевидным этот факт становится для модели 2. Эта модель основана на модели 1, но удельное сопротивление объекта в ней взято 1 Ом·м (т.е. увеличен контраст с вмещающей средой). Результаты расчетов производных для этой модели приведены на рис. 1.12. Из рис. 1.12д,е видно, что значения производной при $\delta b_i = -150$, рассчитанной через усреднение на подробной сетке, близки к значениям производной, рассчитанной через встройку объекта (еще раз отметим, что для этого метода расчета производные при различных приращениях и шагах исходной сетки близки друг к другу).

На рис. 1.13 показаны результаты для модели 3, в которой в отличие от модели 1 сопротивление слоя вмещающей среды взято 100 Ом·м. Из представленных результатов видно, что сделанные выше выводы справедливы и для этой модели.

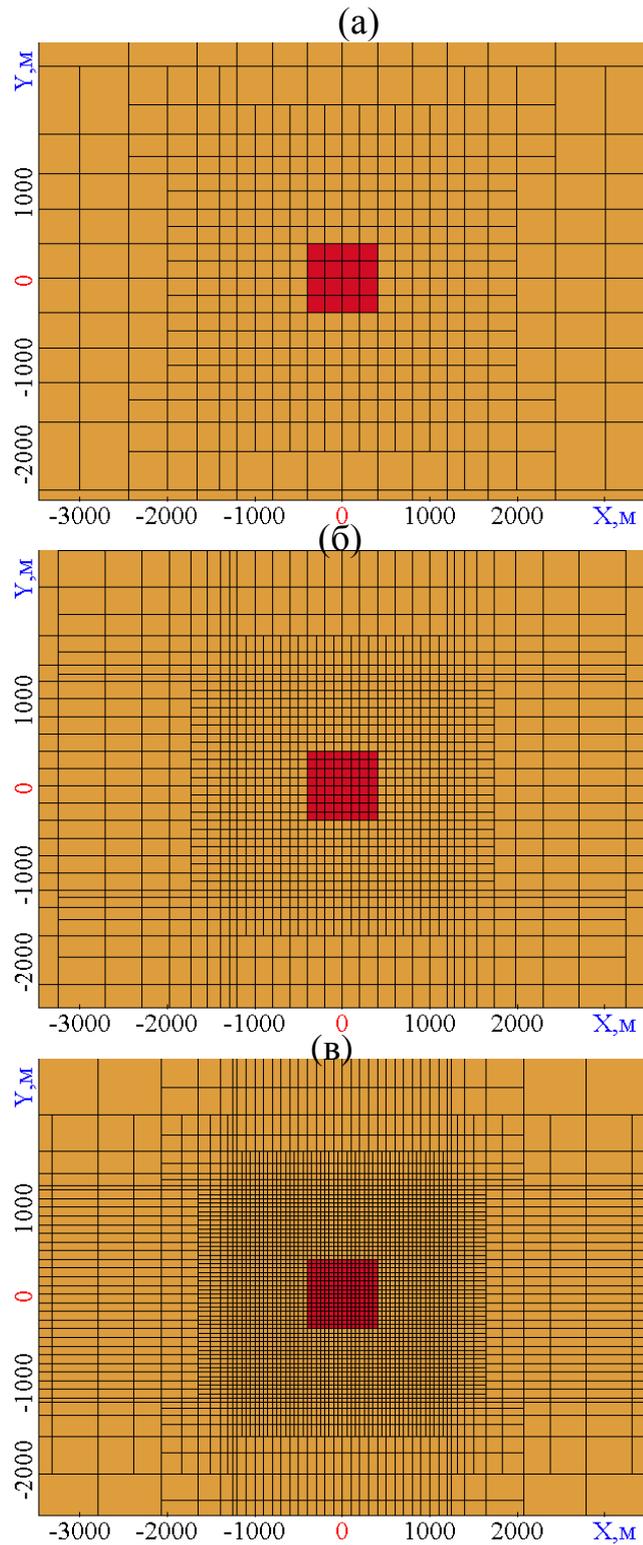


Рисунок 1.10 – Три сетки, на которых были проведены вычисления: грубая сетка с шагом 200 метров в области приемников (а), подробная сетка с шагом 100 метров в области приемников (б), очень подробная сетка с шагом 50 метров в области приемников (в)

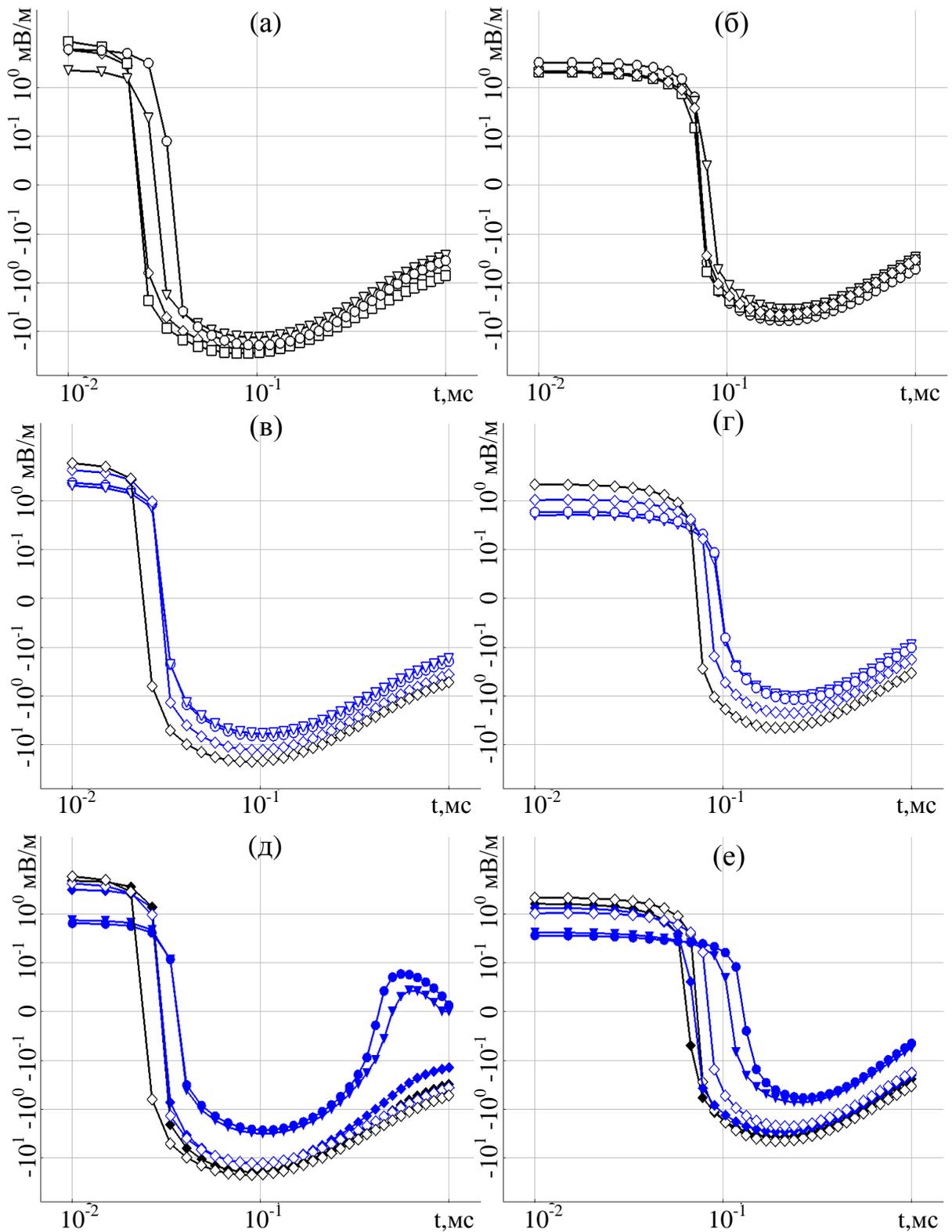


Рисунок 1.11 – Графики производной сигнала ($\delta E / \delta b_i$) для модели 1 в приемнике R32 (а, в, д) и в приемнике R11 (б, г, е) на грубой сетке (незакрашенные маркеры) и подробной сетке (закрашенные маркеры) при прямой встройке объекта (черные графики) и усреднении электропроводности в конечных элементах (синие графики): квадрат – $\delta b_i = -200$; ромб – $\delta b_i = -150$; треугольник – $\delta b_i = -50$; круг – $\delta b_i = -10$

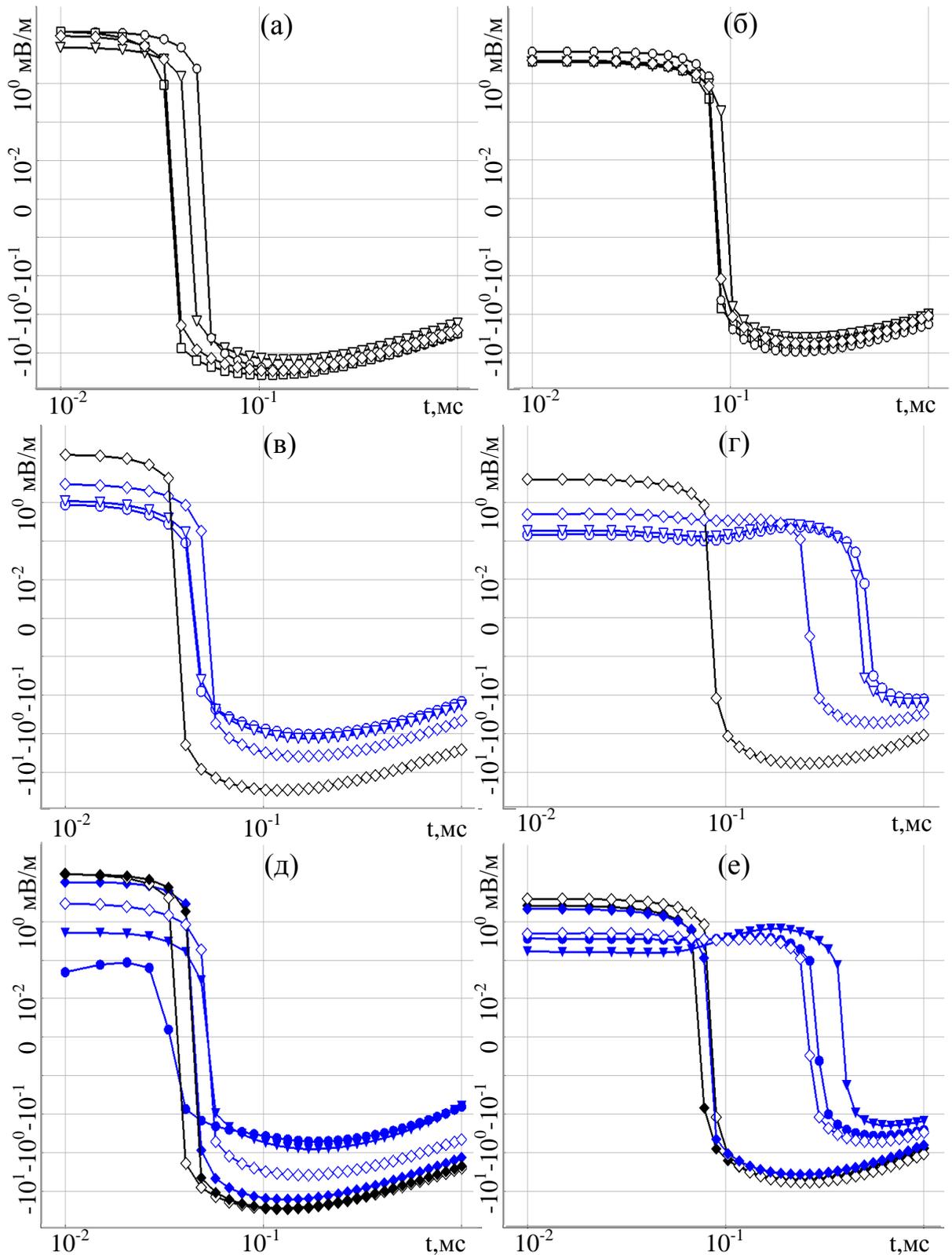


Рисунок 1.12 – Графики производной сигнала ($\delta E / \delta b_i$) для модели 2 на профиле P7 в приемнике R32 (а, в, д) и на профиле P1 в приемнике R11 (б, г, е) на грубой сетке (незакрашенные маркеры) и подробной сетке (закрашенные маркеры) при прямой встройке объекта (черные графики) и усреднении электропроводности в конечных элементах (синие графики) : квадрат – $\delta b_i = -200$; ромб – $\delta b_i = -150$; треугольник – $\delta b_i = -50$; круг – $\delta b_i = -10$

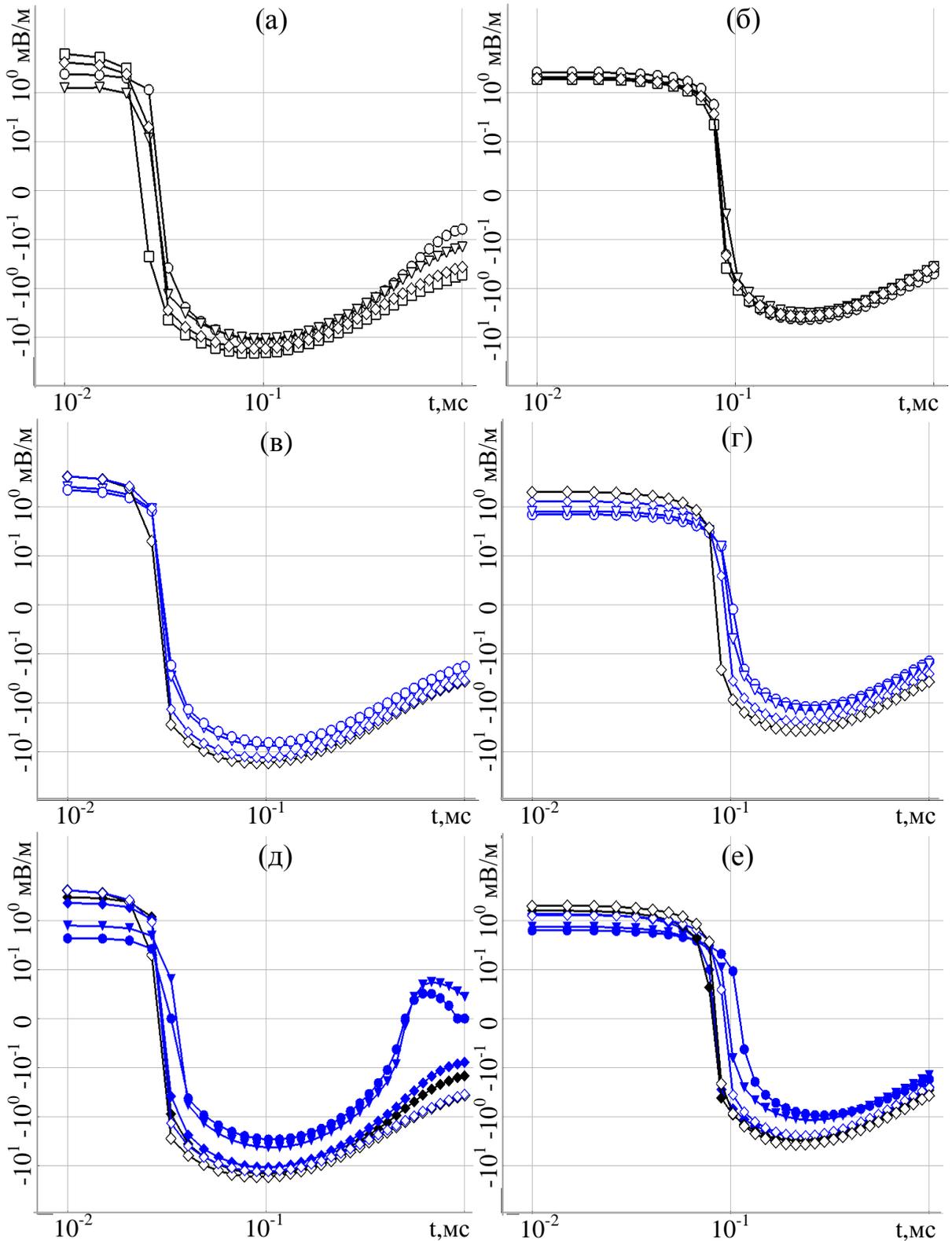


Рисунок 1.13 – Графики производной сигнала ($\delta E / \delta b_i$) для модели 3 на профиле Р7 в приемнике R32 (а, в, д) и на профиле Р1 в приемнике R11 (б, г, е) на грубой сетке (незакрашенные маркеры) и подробной сетке (закрашенные маркеры) при прямой выстройке объекта (черные графики) и усреднении электропроводности в конечных элементах (синие графики): квадрат – $\delta b_i = -200$; ромб – $\delta b_i = -150$; треугольник – $\delta b_i = -50$; круг – $\delta b_i = -10$

Таким образом, метод расчета производных через усреднение требует гораздо более подробных конечноэлементных сеток и, соответственно, существенно более высоких вычислительных затрат при решении обратных задач.

Тем не менее, метод расчета производных через усреднение был бы полезен в ситуации, когда для описания 3D-объекта в плане использовался бы контур (полигон), у которого в ходе выполнения 3D-инверсии смещались бы вершины в плане. Это позволило бы (при наличии в сигналах соответствующей чувствительности) уточнять границы 3D-объектов, имеющих сложную форму в плане.

Проанализируем возможности различных параметризаций и, соответственно, различных способов вычисления производных сигналов на следующем примере.

Рассмотрим геоэлектрическую модель 4. Она аналогична модели 1, но в ней форма 3D-объекта в плане изменена так, как показано на рис. 1.14. Синтезируем данные с помощью 3D-моделирования для системы наблюдений, показанной на рис. 1.14, и выполним 3D-инверсию в различных вариантах.

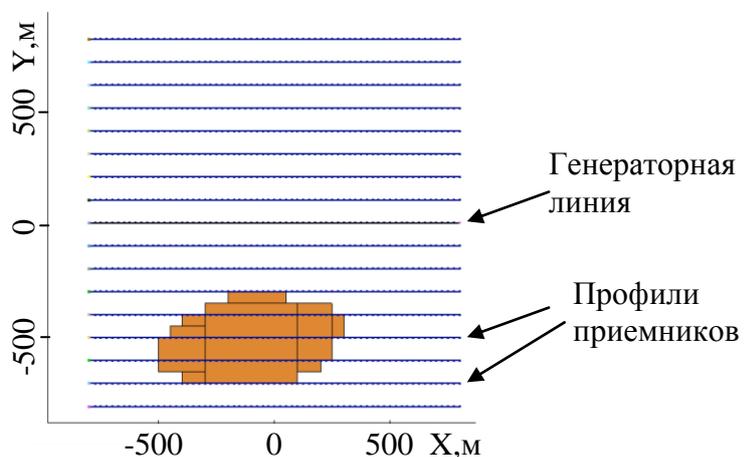


Рисунок 1.14– Вид сверху 3D-объекта в геоэлектрической модели 4

Вначале рассмотрим вариант 3D-инверсии, где искомое тело аппроксимируется с помощью параллелепипеда (-ов) и расчет производных выполняется посредством прямой встройки объекта в сетку. Было рассмотрено четыре варианта стартовых моделей, которые отличаются формой неоднородности в плане и параметризацией. Эти варианты стартовых моделей

показан на рис. 1.15а,в,д,ж. В первом случае (рис. 1.15а) 3D-объект в стартовой модели был вытянут вдоль оси Y и разбит вдоль этой координаты на 6 одинаковых блоков (границы между этими блоками показаны черными жирными линиями). В ходе 3D-инверсии определялось 19 геометрических параметров (это координаты по X левых и правых границ блоков, координаты по Y границ между блоками и границ крайних блоков) и 6 физических параметров (это значения электропроводности внутри блоков). Результат этой 3D-инверсии показан на рис. 1.15б. Видно, что в процессе 3D-инверсии блоки деформировались и изменили свое сопротивление. Сопротивление двух «ближних» блоков получилось близким к сопротивлению объекта истинной модели, а их форма в целом аппроксимирует границы объекта в истинной модели (граница истинного объекта показана черным цветом). Сопротивление остальных блоков (которые геометрически расположились вне границы истинного объекта) получилось близким к вмещающей среде. Таким образом, поставленную задачу поиска 3D-объекта можно считать решенной. В трех остальных вариантах стартовых моделей был задан только один блок (варианты отличались размером блока в стартовой модели), и определялось 4 геометрических параметра и один физический (рис. 1.15в,д,ж). Из результатов, представленных на рис. 1.15г,е,з видно, что во всех случаях полученный в результате 3D-инверсии блок хорошо соответствует объекту истинной модели. Отметим, что в это варианте инверсии для всех вариантов стартовых моделей при расчете использовалась грубая (шаг 200 м) сетка.

Таким образом, вариант 3D-инверсии, где искомое тело аппроксимируется с помощью параллелепипеда (-ов) и расчет производных выполняется посредством прямой встройки объекта в сетку позволяет получить результат, хорошо соответствующий истинной модели, на самой грубой сетке.

Теперь рассмотрим вариант 3D-инверсии, где форма искомого тела в плане ищется путем смещения узлов многоугольника, а при учете объекта сложной формы в трехмерной сетке используется усреднение электропроводности на конечных элементах.

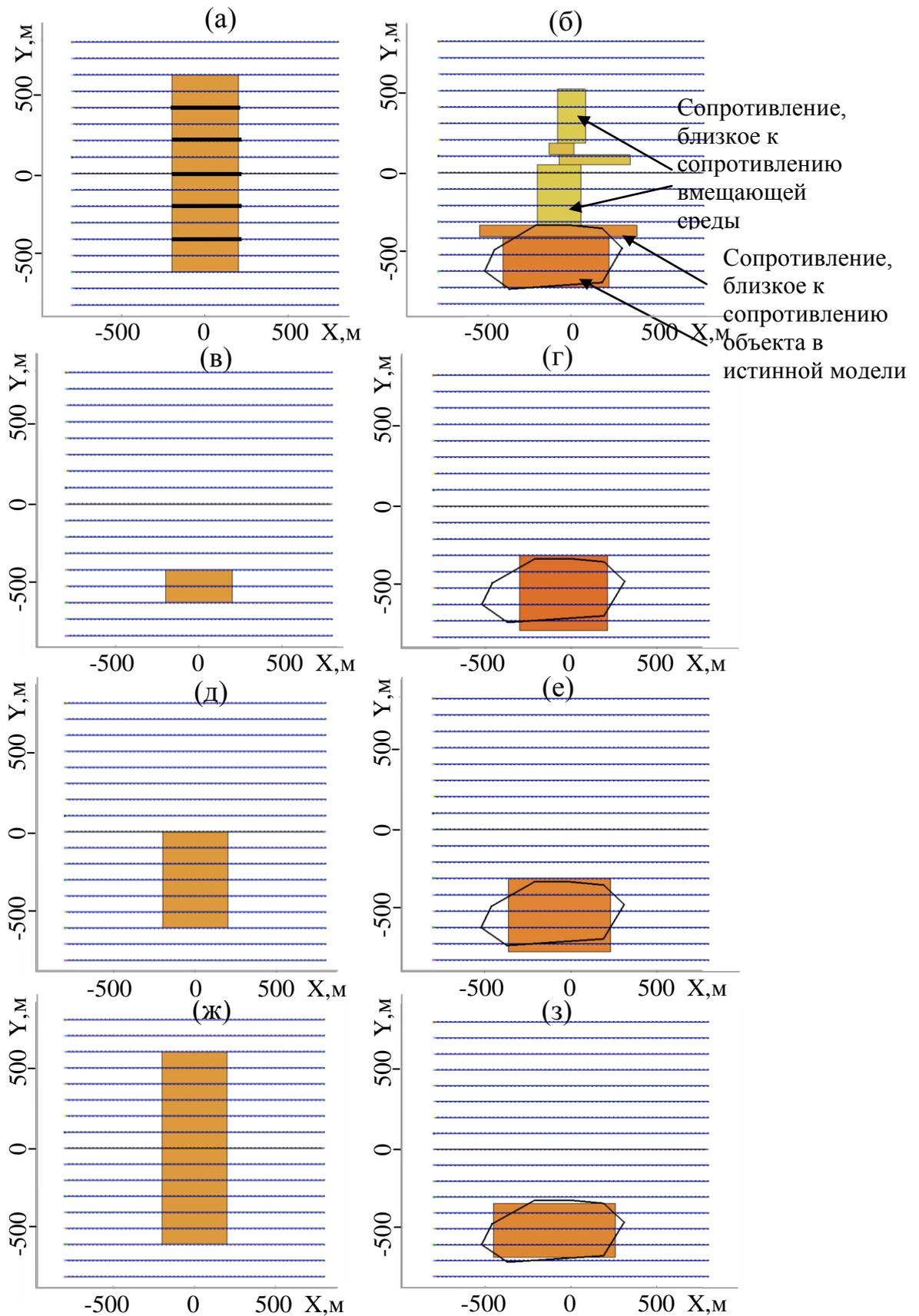


Рисунок 1.15– Результаты 3D-инверсий (б,г,е,з) при различных стартовых моделях и параметризациях (а,в,д,ж) для варианта 3D-инверсии, где искомое тело аппроксимируется с помощью параллелепипеда (-ов) и расчет производных выполняется посредством прямой встройки объекта в сетку

Для этого варианта инверсии было рассмотрено 2 варианта стартовых моделей и 3 конечноэлементные сетки: грубая (шаг 200 м), подробная (шаг 100 м) и очень подробная (шаг 50 м). В первом варианте (рис. 1.16а) в стартовой модели был задан объект небольшого размера, близкого к истинному.

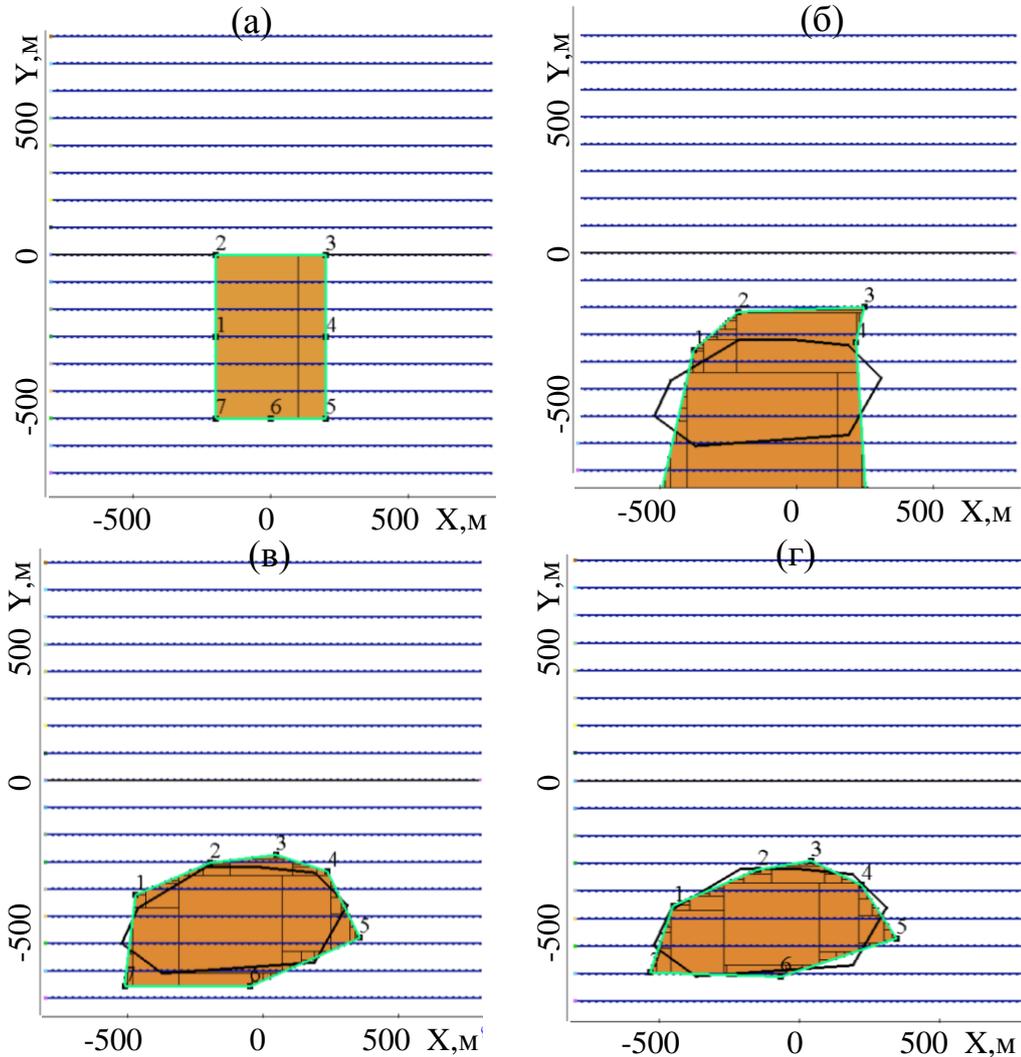


Рисунок 1.16 – Стартовая модель 1 (а) и результаты 3D-инверсий (б,в,г) при использовании грубой (б), подробной (в) и очень подробной (г) сеток для варианта 3D-инверсии, где форма искомого тела в плане ищется путем смещения узлов многоугольника, а при учете объекта сложной формы в трехмерной сетке используется усреднение электропроводности на конечных элементах

Из результатов, приведенных на рис. 1.16,в,г, видно, что на грубой сетке контур полигона, полученный в результате инверсии, довольно плохо описывает истинный объект (рис. 1.16б), а на подробных сетках – хорошо (см. рис. 1.16в,г).

На рис. 1.17 приведены аналогичные (рисунку 1.16) результаты, но для варианта стартовой модели с большим объектом. Из представленных результатов видно, что в этом случае результат фактически не был получен даже на очень подробной сетке.

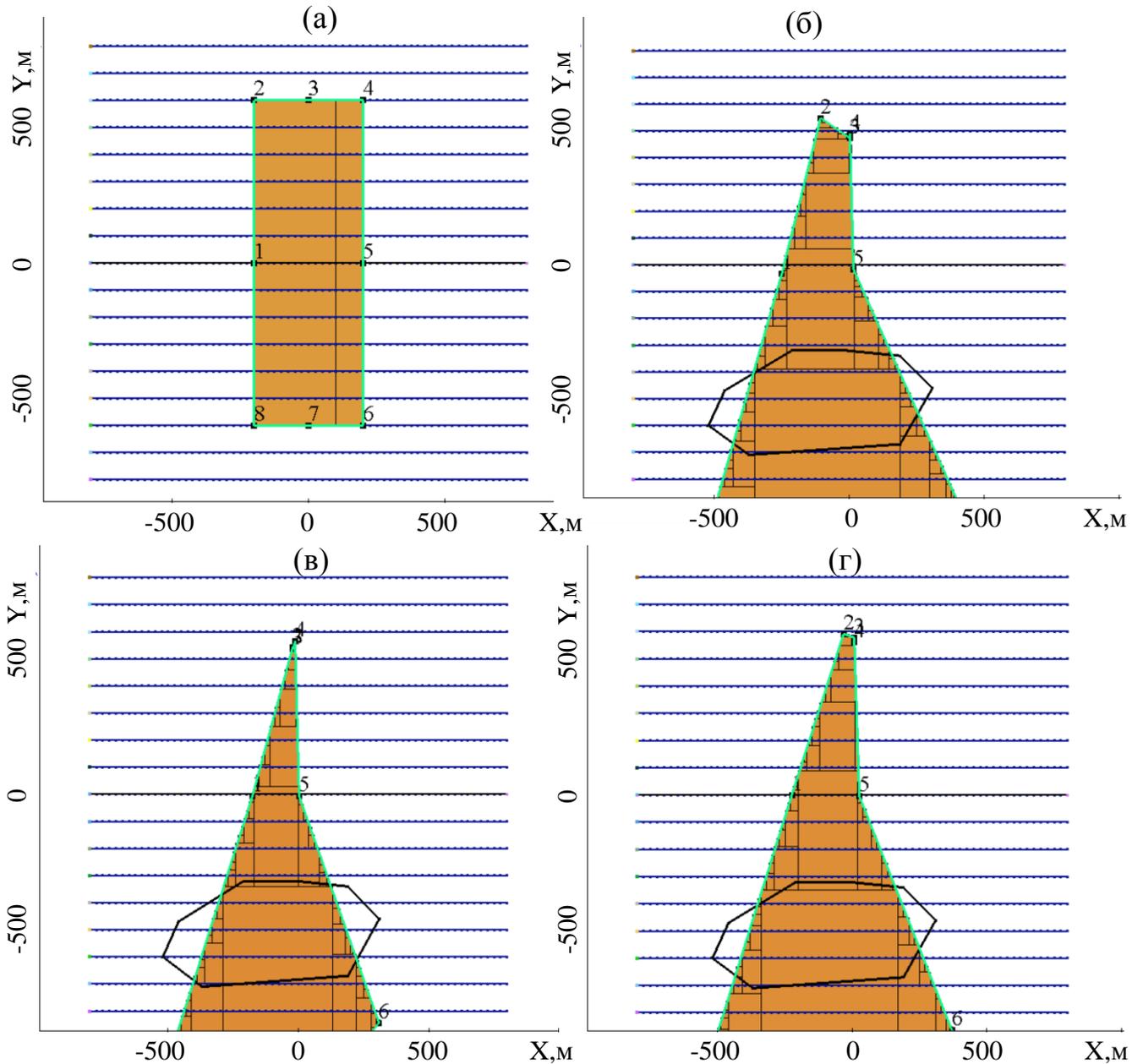


Рисунок 1.17 – Стартовая модель 2 (а) и результаты 3D-инверсий (б,в,г) при использовании грубой (б), подробной (в) и очень подробной (г) сеток для варианта 3D-инверсии, где форма искомого тела в плане ищется путем смещения узлов многоугольника

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

В качестве основного метода *геометрической* 3D-инверсии рекомендуется использовать вариант, когда искомые тела аппроксимируются с помощью параллелепипедов и расчет производных выполняется посредством прямой встройки объекта в сетку. И в этой связи при построении сеток важно использовать предложенную процедуру устранения «висячих углов».

Вариант 3D-инверсии, где форма искомого тела в плане ищется путем смещения узлов многоугольника, а при учете объекта сложной формы в трехмерной сетке используется усреднение электропроводности на конечных элементах, требует достаточно подробных сеток и может быть использован только на заключительном этапе для уточнения формы объекта (для этого этапа стартовая модель будет уже очень близкой к «истинной»). Соответствующий пример для мультифизических 3D-инверсий будет приведен в разделе 1.5.

1.2 Математические модели для расчета электромагнитных полей с контролируемым источником

1.2.1 Гальванический источник

Для решения задач с гальваническим источником используют две постановки. Первая из них сформулирована для векторного потенциала (А-формулировка), вторая — для напряженности электрического поля (Е-формулировка). При этом обе формулировки дают решения, близкие друг к другу по точности и вычислительным затратам. Однако реализация Е-формулировки с использованием выделения части поля требует определенной аккуратности в реализации и в ряде случаев может привести к резкому ухудшению точности численного решения на поздних временах. Это связано с тем, что при использовании векторного МКЭ численное решение может привести к ненулевому постоянному полю, которое является градиентом некоторой скалярной функции [123]. В данной работе используется А-постановка.

При решении задач поиска полезных ископаемых с гальваническим источником используются в основном поздние времена. В этом случае токи смещения не влияют на изучаемый процесс и можно воспользоваться законом Ампера

$$\nabla \times \frac{\vec{\mathbf{B}}}{\mu} = \vec{\mathbf{J}}^{source} + \sigma \vec{\mathbf{E}}, \quad (2)$$

где σ и μ — электропроводность и магнитная проницаемость моделируемой трехмерной среды, $\vec{\mathbf{B}}$ — индукция магнитного поля, $\vec{\mathbf{E}}$ — напряженность электрического поля, $\vec{\mathbf{J}}^{source}$ — источник, определяемый током в линии передатчика.

Для описания электромагнитного поля используется векторный потенциал $\vec{\mathbf{A}}$, удовлетворяющий уравнениям $\vec{\mathbf{B}} = \nabla \times \vec{\mathbf{A}}$ и $\vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathbf{A}}}{\partial t}$.

В этом случае $\vec{\mathbf{B}}$ и $\vec{\mathbf{E}}$ автоматически удовлетворяют соотношениям

$$\nabla \times \vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{\mathbf{B}} = 0, \quad (4)$$

и уравнение (2) принимает вид:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{\mathbf{A}} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{\mathbf{A}}}{\partial t} = \vec{\mathbf{J}}^{source}. \quad (5)$$

В рассматриваемых задачах почти всегда $\mu = \mu_0$, поэтому уравнение (5) принимает вид:

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \vec{\mathbf{A}} + \sigma \frac{\partial \vec{\mathbf{A}}}{\partial t} = \vec{\mathbf{J}}^{source}. \quad (6)$$

Ток в источнике постоянен (отличен от нуля) при $t \leq 0$ и равен нулю при $t > 0$ (ступенчатый ток). Для произвольного тока моделируемое поле можно получить с помощью интеграла свертки из поля ступенчатого тока [99].

При моделировании нестационарного процесса правая часть равна нулю. Для расчета начальных полей $\vec{\mathbf{A}}^0$, соответствующих нулевому моменту времени, используется скалярный электрический потенциал V , который полностью описывает стационарное электрическое поле в виде:

$$\vec{E}^0 = -\nabla V. \quad (7)$$

К обеим частям уравнения (6) применяется оператор $\nabla \cdot$. Тогда, учитывая (7), получается

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = -\nabla \cdot \vec{J}^{source}. \quad (8)$$

Поле \vec{A}^0 можно найти из решения дополнительного уравнения:

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta \vec{A}^0 = \vec{J}^{source} - \sigma \nabla V, \quad (9)$$

где $\Delta = \nabla \cdot \nabla$ – оператор Лапласа.

Для дискретизации по времени используется кусочно-постоянный шаг, который позволяет при использовании прямых решателей [116] факторизовать матрицу конечноэлементной СЛАУ только один раз на подинтервалах, где шаг по времени постоянен. На первых двух временных шагах используется стандартная неявная двухслойная схема, а на остальных временных шагах – неявная трехслойная схема «с перешагиванием назад» [93]. Использование трехслойной схемы позволяет почти на порядок сократить вычислительные затраты по сравнению с обычно используемой при решении таких задач двухслойной схемой (соответствующее обоснование для задач с гальваническим источником представлено в работе [123]).

Для снижения вычислительных затрат можно использовать подход с выделением поля (в англоязычной литературе такой подход называют «primary-secondary field approach» [19,21,30,36,50,83,93,112,123,124]), в котором первичное поле рассчитывается в некоторой одномерной среде. Одномерная среда выбирается таким образом, чтобы ее отклик был близок к отклику реальной трехмерной среды [124]. Для геоэлектрических сред с искривленными слоями применимо двухэтапное выделение поля [3,6,95,96], где одним из основных этапов является стандартное (одноэтапное) выделение части поля для геоэлектрических сред со строго горизонтальными слоями.

Рассмотрим математическую модель с одноэтапным выделением поля.

Итак, напряженность полного электрического поля \vec{E}^t и индукция полного магнитного поля \vec{B}^t представляются как:

$$\vec{\mathbf{E}}^t = \vec{\mathbf{E}}^s + \vec{\mathbf{E}}^p, \quad \vec{\mathbf{B}}^t = \vec{\mathbf{B}}^s + \vec{\mathbf{B}}^p, \quad (10)$$

где $\vec{\mathbf{B}}^p, \vec{\mathbf{E}}^p$ — магнитная индукция и электрическая напряженность первичного поля в одномерной среде с электропроводностью $\sigma^p(z)$, а $\vec{\mathbf{B}}^s, \vec{\mathbf{E}}^s$ — (магнитная индукция и электрическая напряженность вторичного поля) описывают поле влияния 3D-неоднородностей.

Поля $\vec{\mathbf{B}}^p$ и $\vec{\mathbf{E}}^p$ также удовлетворяют закону Ампера:

$$\nabla \times \frac{\vec{\mathbf{B}}^p}{\mu} = \vec{\mathbf{J}}^{source} + \sigma^p \vec{\mathbf{E}}^p, \quad (11)$$

Вводится векторный потенциал $\vec{\mathbf{A}}^s$, который связан с магнитной индукцией и электрической напряженностью вторичного поля соотношениями:

$$\vec{\mathbf{B}}^s = \nabla \times \vec{\mathbf{A}}^s, \quad \vec{\mathbf{E}}^s = -\frac{\partial \vec{\mathbf{A}}^s}{\partial t}. \quad (12)$$

Вычитание уравнения (11) из уравнения (2) (при условии, что $\mu = \mu_0$) с учетом соотношения (10) и (12) приводит к уравнению вида:

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \vec{\mathbf{A}}^s + \sigma \frac{\partial \vec{\mathbf{A}}^s}{\partial t} = (\sigma - \sigma^p) \vec{\mathbf{E}}^p. \quad (13)$$

Чтобы вычислить начальное поле $\vec{\mathbf{A}}^{s,0}$, решаются два уравнения:

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V^s) = -\nabla \cdot ((\sigma^p - \sigma) \vec{\mathbf{E}}^{p,0}), \quad (14)$$

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta \vec{\mathbf{A}}^{s,0} = -\sigma \nabla V^s + (\sigma - \sigma^p) \vec{\mathbf{E}}^{p,0}. \quad (15)$$

Фактически поле $\vec{\mathbf{A}}^{s,0}$ вычисляется путем решения трех скалярных уравнений для компонент векторного потенциала $\vec{\mathbf{A}}^{s,0}$. Конечноэлементная аппроксимация этих уравнений приводит к решению трех СЛАУ с одной и той же матрицей.

Таким образом, чтобы найти вторичное поле с использованием А-формулировки, решается уравнение (13) с начальным условием, найденным из решения уравнений (14) и (15).

Вариационные постановки для уравнений (14) и (15) имеют вид:

$$\int_{\Omega^{3D}} \sigma \nabla V^s \cdot \nabla \Psi d\Omega = \int_{\Omega^{3D}} ((\sigma - \sigma^p) \vec{\mathbf{E}}^{p,0}) \cdot \nabla \Psi d\Omega, \quad (16)$$

$$\frac{1}{\mu_0} \int_{\Omega^{3D}} (\nabla \vec{A}^{s,0}) \nabla \Psi d\Omega = - \int_{\Omega^{3D}} (\sigma \nabla V^s) \cdot \Psi d\Omega + \int_{\Omega^{3D}} ((\sigma - \sigma^p) \vec{E}^{p,0}) \cdot \Psi d\Omega, \quad (17)$$

где Ψ – пробная функция из Гильбертова пространства функций Φ , таких что

$$\int_{\Omega^{3D}} \Phi \cdot \Phi d\Omega < \infty \text{ и } \int_{\Omega^{3D}} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi d\Omega < \infty.$$

Скалярный электрический потенциал V^s и компоненты векторного потенциала $\vec{A}^{s,0}$ представляются в виде линейных комбинаций узловых трилинейных базисных функций на параллелепипедах:

$$V = \sum_{j=1}^{N^n} q_j^V \psi_j, \quad A_\xi^0 = \sum_{j=1}^{N^n} q_j^{A_\xi^0} \psi_j \quad (18)$$

где q_j^V и $q_j^{A_\xi^0}$ – веса базисных функций, N^n – количество узлов в конечноэлементной сетке.

Подставив (18) в (16) и (17) и поочередно заменив пробную функцию всеми базисными функциями, получим СЛАУ:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}^V \mathbf{q}^V &= \mathbf{G}^{\Delta,V} \mathbf{q}^{V^p}, \\ \mathbf{G}^{A^0} \mathbf{q}^{A_\xi^0} &= -\mathbf{D}^\xi \mathbf{q}^V + \mathbf{D}^{\Delta,\xi} \mathbf{q}^{V^p}, \end{aligned} \quad (19)$$

где компоненты матриц $\mathbf{G}^V, \mathbf{G}^{\Delta,V}, \mathbf{G}^{A^0}, \mathbf{D}^\xi$ и $\mathbf{D}^{\Delta,\xi}$ (ξ соответствует x, y и z) вычисляются по следующим формулам:

$$G_{ij}^V = \int_{\Omega^{3D}} \sigma \nabla \psi_i \cdot \nabla \psi_j d\Omega, \quad (20)$$

$$G_{ij}^{\Delta,V} = \int_{\Omega^{3D}} (\sigma - \sigma^p) \nabla \psi_i \cdot \nabla \psi_j d\Omega, \quad (21)$$

$$G_{ij}^{A^0} = \frac{1}{\mu_0} \int_{\Omega^{3D}} \nabla \psi_i \cdot \nabla \psi_j d\Omega, \quad (22)$$

$$D_{ij}^\xi = \int_{\Omega^{3D}} \sigma \frac{\partial \psi_j}{\partial \xi} \psi_i d\Omega, \quad (23)$$

$$D_{ij}^{\Delta,\xi} = \int_{\Omega^{3D}} (\sigma - \sigma^p) \frac{\partial \psi_j}{\partial \xi} \psi_i d\Omega. \quad (24)$$

Вариационная постановка для уравнения (13) при использовании двухслойной (на первых двух временных слоях) и трехслойной (на остальных временных слоях) схем по времени имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\mu_0} \int_{\Omega^{3D}} (\nabla \times \vec{\mathbf{A}}^{s,l}) \cdot (\nabla \times \vec{\Psi}) d\Omega + \frac{1}{\delta t_l} \int_{\Omega^{3D}} \sigma \vec{\mathbf{A}}^{s,l} \cdot \vec{\Psi} d\Omega = \\ & = \frac{1}{\delta t_l} \int_{\Omega^{3D}} \sigma \vec{\mathbf{A}}^{s,l-1} \cdot \vec{\Psi} d\Omega + \int_{\Omega^{3D}} ((\sigma - \sigma^p) \vec{\mathbf{E}}^{p,l}) \cdot \vec{\Psi} d\Omega, \quad l=1,2, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\mu_0} \int_{\Omega^{3D}} (\nabla \times \vec{\mathbf{A}}^{s,l}) \cdot (\nabla \times \vec{\Psi}) d\Omega + \chi_1^l \int_{\Omega^{3D}} \sigma \vec{\mathbf{A}}^{s,l} \cdot \vec{\Psi} d\Omega = \chi_2^l \int_{\Omega^{3D}} \sigma \vec{\mathbf{A}}^{s,l-\eta-1} \cdot \vec{\Psi} d\Omega + \\ & + \chi_3^l \int_{\Omega^{3D}} \sigma \vec{\mathbf{A}}^{s,l-1} \cdot \vec{\Psi} d\Omega + \int_{\Omega^{3D}} ((\sigma - \sigma^p) \vec{\mathbf{E}}^{p,l}) \cdot \vec{\Psi} d\Omega, \quad l=3,4,\dots \end{aligned} \quad (26)$$

где $\chi_1^l = \frac{3}{2\delta t_l}$, $\chi_2^l = -\frac{1}{2\delta t_l}$, $\chi_3^l = \frac{2}{\delta t_l}$, δt_l – шаг по времени, вектор-функции $\vec{\mathbf{A}}^{s,l}$,

$\vec{\mathbf{A}}^{s,l-1}$, $\vec{\mathbf{A}}^{s,l-\eta-1}$ определяют вектор-потенциал $\vec{\mathbf{A}}^s$ в l -й, $(l-1)$ -й и $(l-\eta-1)$ -й

момент времени, соответственно, $\vec{\Psi}$ – пробная вектор-функция из пространства

$\mathbf{H}^{\text{curl}}(\Omega^{3D})$ вектор-функций $\vec{\Phi}$, таких что $\int_{\Omega} \vec{\Phi} \cdot \vec{\Phi} d\Omega < \infty$ и

$$\int_{\Omega} (\nabla \times \vec{\Phi}) \cdot (\nabla \times \vec{\Phi}) d\Omega < \infty.$$

Вектор потенциал $\vec{\mathbf{A}}^{s,l}$ и напряженность электрического поля $\vec{\mathbf{E}}^{p,l}$ на каждом временном слое представляются в виде линейных комбинаций базисных вектор-функций (edge-функций) $\vec{\Psi}_j$:

$$\vec{\mathbf{A}}^{s,l} = \sum_{j=1}^{N^{BF}} q_j^l \vec{\Psi}_j, \quad \vec{\mathbf{E}}^{p,l} = \sum_{j=1}^{N^{BF}} e_j^{p,l} \vec{\Psi}_j, \quad (27)$$

где N^{BF} – количество базисных функций, а q_j^l , $e_j^{p,l}$ – веса базисных функций.

Подставляя (27) в (25) и (26) и заменяя пробную функцию $\vec{\Psi}$ поочередно базисными функциями $\vec{\Psi}_j$, получаем СЛАУ:

$$\left(\mathbf{G}^A + \frac{1}{\delta t_l} \mathbf{C}^A \right) \mathbf{q}^{A^s,l} = \frac{1}{\delta t_l} \mathbf{C}^A \mathbf{q}^{A^s,l-1} + \mathbf{C}^{\Delta,A} \mathbf{e}^{p,l}, \quad l=1,2 \quad (28)$$

$$\left(\mathbf{G}^A + \chi_1^l \mathbf{C}^A \right) \mathbf{q}^{A^s,l} = \mathbf{C}^A \left(\chi_2^l \mathbf{q}^{A^s,l-\eta-1} + \chi_3^l \mathbf{q}^{A^s,l-1} \right) + \mathbf{C}^{\Delta,A} \mathbf{e}^{p,l}, \quad l=3,4,\dots \quad (29)$$

а компоненты матриц \mathbf{G}^A , \mathbf{C}^A и $\mathbf{C}^{\Delta,A}$ вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}
G_{ij}^A &= \int_{\Omega} \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \bar{\psi}_i) \cdot (\nabla \times \bar{\psi}_j) d\Omega, \\
C_{ij}^A &= \int_{\Omega} \sigma \bar{\psi}_i \cdot \bar{\psi}_j d\Omega, \\
C_{ij}^{\Delta, A} &= \int_{\Omega^{3D}} (\sigma - \sigma^P) \bar{\psi}_i \cdot \bar{\psi}_j d\Omega.
\end{aligned} \tag{30}$$

Для расчета нормального поля \vec{E}^P могут быть использованы как полуаналитические методы [65,78], либо численные методы со специальными математическими моделями [123].

Отметим, что гальванический источник используется в морской электроразведке и наземных поисках. При этом в морских разведочных работах перспективным является использования комбинированных генераторов и приемников [6,7,69,77,92,95,96,101], что позволяет увеличить уровень аномального отклика от целевых объектов за счет снижения влияния фоновой проводящей среды. А при наземных работах вместе с заземленной электрической линией в качестве источника часто используются индукционные приемники, прикрепленные к беспилотному летательному аппарату, которые позволяют быстро производить полевые съемки, а так же в отличие от приемников типа линия нет проблем с заземлением [88].

1.2.2 Индукционный источник

Для расчета электромагнитного поля, возбуждаемого и принимаемого индукционными петлями во временной области, также удобно использовать векторный метод конечных элементов с edge-функциями на трехмерных шестигранных неконформных сетках [93].

Для «плоских» трехмерных моделей (с трехмерными неоднородностями, но без рельефа и изгибов границ слоев) эффективен подход выделения поля с расчетом первичного поля в горизонтально-слоистой среде. Для таких моделей этот подход позволяет сократить время счета почти на порядок. Для задач, в которых генераторно-приемная установка расположена в воздухе, а среда имеет сложный рельеф и изогнутые слои, в качестве первичного поля имеет смысл использовать поле в однородной непроводящей среде [93]. В этом случае конфигурацию источника не нужно задавать в трехмерной сетке (при расчете

вторичного поля) и можно существенно снизить требования к подробности сетки в окрестности положения источника. Это также дает ощутимый выигрыш, особенно при расчете поля в группе с большим количеством положений источника. Для задач, в которых генераторно-приемная установка расположена на дневной поверхности, а среда характеризуется сложным рельефом и изогнутыми слоями, можно использовать двухэтапное выделение поля [3].

Для расчета электромагнитного поля напряженность электрического поля представляется в виде суммы двух составляющих $\vec{E}^t = \vec{E}^p + \vec{E}^s$, где \vec{E}^p – напряженность первичного электрического поля, возбуждаемого источником электромагнитного поля в горизонтально-слоистой среде, а \vec{E}^s – напряженность электрического поля, определяемая полем влияния трехмерных неоднородностей (3D-объекты, изменяющийся рельеф дневной поверхности, изогнутые границы слоев и т.д.).

Вторичное поле (поле влияния трехмерных неоднородностей) $\vec{E}^s(x, y, z, t)$ без учета токов смещения в трехмерной расчетной области Ω может быть найдено из решения векторного дифференциального уравнения для вектор-потенциала $\vec{A}^s(x, y, z, t)$.

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \vec{A}^s + \sigma \frac{\partial \vec{A}^s}{\partial t} = (\sigma - \sigma^p) \vec{E}^p. \quad (31)$$

На удаленных границах $\partial\Omega$ трехмерной расчетной области Ω задаются нулевые касательные составляющие \vec{A}^s :

$$\vec{A}^s \times \vec{n} \Big|_{\partial\Omega} = \vec{0}, \quad (32)$$

где \vec{n} – нормаль к границе $\partial\Omega$.

Если источник является круглой (или близкой к ней по форме) петлей (как, например, в задачах аэроэлектроразведки), расположенной в горизонтальной плоскости относительно поверхности Земли, поле вектор-потенциала первичного электромагнитного поля \vec{A}^p в цилиндрической системе координат имеет

единственную ненулевую компоненту $A_\varphi(r, z, t)$, которая может быть найдена из решения осесимметричной задачи:

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta A_\varphi + \frac{1}{\mu_0 r^2} A_\varphi + \sigma^p \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} = I \delta^{rz}, \quad A_\varphi|_{\partial\Omega^{rz}} = 0, \quad (33)$$

где Δ – скалярный оператор Лапласа в цилиндрических координатах $\{r, z\}$, $I = I(t)$ – значение тока в источнике, $\delta^{rz} = \delta(r - r_\delta, z - z_\delta)$ – дельта-функция, сосредоточенная на окружности $r = r_\delta$, $z = z_\delta$ (соответствующей контуру петли), $\partial\Omega^{rz}$ – граница двумерной (осесимметричной) расчетной области Ω^{rz} .

Если же источник имеет произвольную многоугольную форму, то он разбивается на отрезки, а первичное поле вычисляется как сумма полей незаземленных диполей, расположенных в центрах отрезков и ориентированных по касательной к ним.

Вариационная постановка для уравнения (31) имеет вид:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{\mathbf{A}}^s \right) \cdot (\nabla \times \vec{\Psi}) d\Omega + \int_{\Omega} \sigma \frac{\partial \vec{\mathbf{A}}^s}{\partial t} \cdot \vec{\Psi} d\Omega = \int_{\Omega} (\sigma - \sigma^p) \vec{\mathbf{E}}^p \cdot \vec{\Psi} d\Omega, \quad (34)$$

где $\vec{\Psi}$ – пробная вектор-функция из пространства $\mathbf{H}^{\text{curl}}(\Omega)$ вектор-функций $\vec{\Phi}$, таких что $\int_{\Omega} \vec{\Phi} \cdot \vec{\Phi} d\Omega < \infty$ и $\int_{\Omega} (\nabla \times \vec{\Phi}) \cdot (\nabla \times \vec{\Phi}) d\Omega < \infty$.

Аппроксимация по времени $\frac{\partial \vec{\mathbf{A}}^s}{\partial t}$ выполняется с использованием неявной трехслойной схемы «с перешагиванием назад», предложенной в работе [93], где также дано обоснование ее преимуществ перед стандартной неявной схемой Эйлера.

Вектор потенциал $\vec{\mathbf{A}}^{s,l}$ и вектор напряженности нормального поля $\vec{\mathbf{E}}^{n,l}$ на каждом временном слое представляются в виде линейных комбинаций базисных вектор-функций (edge-функций) $\vec{\Psi}_j$ в виде (27).

Подставляя (27) в (34), учитывая дискретизацию по времени и заменяя пробную функцию $\vec{\Psi}$ поочередно базисными функциями $\vec{\Psi}_j$, получаем СЛАУ (29).

По полученному конечноэлементному решению в точках приема поля рассчитываются сигналы ε (ЭДС), которые в наиболее часто используемом на практике случае относительно небольших приемных петель могут быть вычислены в виде:

$$\varepsilon = - \left(\frac{\partial (\nabla \times \vec{A}^s)_z}{\partial t} + \frac{\partial B_z^p}{\partial t} \right) k_r \quad (35)$$

где k_r – момент приемной петли (произведение ее площади на количество витков).

1.3 Математические модели для расчета магнитных полей

При решении задач магниторазведки математическая модель для расчета стационарного магнитного поля $\vec{B}^{magn} = -\mu \nabla u$ в общем случае имеет вид [102]:

$$-\nabla \cdot \frac{\mu}{\mu_0} \nabla u = -\nabla \cdot \left(\frac{(\mu - \mu_0)}{\mu_0} \vec{H}^E + \vec{H}^C \right), \quad (36)$$

где u – скалярный магнитный потенциал, $\frac{(\mu - \mu_0)}{\mu_0} \vec{H}^E$ – намагниченность,

определяемая возможным отличием магнитной проницаемости μ тела (среды) от магнитной проницаемости вакуума μ_0 , \vec{H}^E – напряженность магнитного поля Земли (определяемая местоположением изучаемого участка), а \vec{H}^C – возможная собственная (остаточная) намагниченность.

После элементарных преобразований уравнение (36) примет вид:

$$-\Delta u = -\nabla \cdot \left(\frac{(\mu - \mu_0)}{\mu_0} \vec{H}^E + \vec{H}^C - \frac{(\mu - \mu_0)}{\mu_0} \nabla u \right). \quad (37)$$

Обозначим через \vec{M} полную намагниченность, которая определяется выражением, стоящим под знаком $\nabla \cdot$ в правой части (37). Эта намагниченность является полным источником аномального магнитного поля, измеряемого в приемниках.

Расчетную область можно представить в виде объединения подобластей Ω_k . Положим, что намагниченность $\vec{T}^k \delta(x - x_k, y - y_k, z - z_k)$ сосредоточена в центрах (x_k, y_k, z_k) подобластей Ω_k (где $\delta(x, y, z)$ – дельта-функция Дирака). Величина \vec{T}^k связана с намагниченностью \vec{M} в ячейках Ω_k соотношением:

$$\vec{T}^k = \int_{\Omega_k} \vec{M} d\Omega. \quad (38)$$

Магнитное поле \vec{B}^{magn} , создаваемое намагниченностью в ячейках Ω_k , может быть вычислено в приемниках с помощью простых аналитических выражений:

$$\vec{B}^{magn} \approx \sum_k \vec{B}^{T^k}, \quad B_{\xi}^{T^k} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \left(T_{\xi}^k \left(3 \frac{\xi^2}{r^2} - 1 \right) + T_{\eta}^k \left(3 \frac{\xi \eta}{r^2} \right) + T_{\zeta}^k \left(3 \frac{\xi \zeta}{r^2} \right) \right), \quad (39)$$

где ξ – это координата x , y или z точки измерения магнитного поля при переносе начала координат в центр Ω_k , η и ζ – две другие координаты, r – расстояние от центра Ω_k до точки измерения.

Несмотря на то, что наличие аномалий в магнитном поле может быть обусловлено различными факторами, чаще всего результаты интерпретации приводятся в терминах магнитной восприимчивости. Поэтому в качестве характеристики магнитных тел используют именно магнитную восприимчивость

$$\chi = \frac{|\vec{M}|}{|\vec{H}^E|} \cdot 10^3, \quad \text{где } \vec{M} \text{ – значение намагниченности в каждой ячейке } \Omega_k.$$

1.4 Математические модели для решения обратных задач

Геофизическая модель представляется как набор слоев и трехмерных неоднородностей.

Слои определяются физическими параметрами и поверхностями, которые описываются с помощью бикубических сплайнов [20]. В инверсии у слоя могут быть заданы следующие параметры: удельная электрическая проводимость слоя, расстояние между поверхностями определяющие границы слоя или опорные

точки, используемые для описания изогнутых границ слоев геологической модели [94].

Трехмерные неоднородности характеризуются параметрами: удельная электрическая проводимость, намагниченность (модуль и направление вектора) и геометрическими. Верхняя и нижняя поверхности трехмерных неоднородностей описываются бикубическими сплайнами, которые определяются по соседним поверхностям слоев. Форма трехмерных неоднородностей в плане может быть сложной, описанной полигоном, или прямоугольной, а боковые границы являются строго вертикальными [13].

В качестве одного из подбираемых материальных параметров используется намагниченность, поскольку значения магнитной проницаемости геологических объектов очень слабо отличаются от магнитной проницаемости вакуума. Использование намагниченности в качестве параметра позволяет рассчитывать магнитное поле с помощью аналитических выражений, а не решать соответствующее дифференциальное уравнение второго порядка с неоднородным коэффициентом магнитной проницаемости каким-либо сеточным методом.

Параметры геофизической модели будут определяться на основе минимизации функционала

$$\Phi^{\alpha}(\mathbf{b}) = \beta^{EM} \sum_{i=1}^{N^{EM}} \sum_{k=1}^T (\omega_{ik}^{EM} \delta \varepsilon_{ik}^{EM}(\mathbf{b}))^2 + \beta^M \sum_{j=1}^{N^M} (\omega_j^M \delta \varepsilon_j^M(\mathbf{b}))^2 + \sum_{p=1}^P \alpha_p (b_p - \bar{b}_p)^2 \rightarrow \min_{b_p}, \quad (40)$$

где N^{EM} – количество точек съемки электромагнитного поля (приемных электрических линий, положений БПЛА и т.д.), T – количество временных каналов для электромагнитной съемки, N^M – количество точек съемки магнитного поля, $\delta \varepsilon_{ik}^{EM} = \tilde{\varepsilon}_{ik}^{EM} - \varepsilon_{ik}^{EM}$, ε_{ik}^{EM} – сигналы электромагнитного поля, зарегистрированные в i -м приемнике в момент времени t_k , $\tilde{\varepsilon}_{ik}^{EM}$ – теоретический сигналы, полученные в результате моделирования электромагнитного поля,

$\delta\varepsilon_j^M = \tilde{\varepsilon}_j^M - \varepsilon_j^M$, ε_j^M – сигналы магнитного поля, зарегистрированные в j -м приемнике, $\tilde{\varepsilon}_j^M$ – теоретический сигналы, полученные в результате моделирования магнитного поля, b_p – компоненты вектора искомым параметров \mathbf{b} (геометрических и физических), \bar{b}_p – параметры, полученные на предыдущей итерации (определяющие регуляризирующую добавку в функционале (40)), α_p – параметры регуляризации.

Компоненты вектора $\mathbf{b} = \{b_p\}$, $p = 1 \dots P$ определяют значения геометрических и физических параметров.

Весовые коэффициенты ω_{ik}^{EM} и ω_j^M определяются как величины, обратные к значениям соответствующих измеренных сигналов. При этом если величины соответствующих сигналов ниже некоторого заданного порогового значения $\bar{\varepsilon}_{ik}^{EM}$ и $\bar{\varepsilon}_j^M$, которые определяется уровнем ошибки измерений, то при вычислении локального веса вместо сигнала берется соответствующее пороговое значение. Глобальные веса β^{EM} и β^M используются для приведения сигналов от разных съемок к одному уровню (или необходимым уровням, если нужно сделать какие-то данные более приоритетными).

Регуляризирующие параметры α_p выбираются адаптивно в процессе решения обратной задачи. При этом регуляризирующая добавка с параметрами α_p обеспечивает поиск очередного приближения искомого параметра в заданном диапазоне значений, что позволяет не нарушать геометрию структурных частей геологической модели и не приводит к нефизичным значениям (например, отрицательная электропроводность).

Для минимизации функционала используется метод Гаусса-Ньютона.

Линеаризуем отклонения $\delta\varepsilon_{ik}^{EM}$ и $\delta\varepsilon_j^M$:

$$\begin{aligned}\delta\varepsilon_{ik}^{EM}(\mathbf{b}) &\approx \delta\varepsilon_{ik}^{EM}(\mathbf{b}^0) + \sum_{p=1}^P \frac{\partial(\delta\varepsilon_{ik}^{EM})}{\partial b_p} \Delta b_p, \\ \delta\varepsilon_j^M(\mathbf{b}) &\approx \delta\varepsilon_j^M(\mathbf{b}^0) + \sum_{p=1}^P \frac{\partial(\delta\varepsilon_j^M)}{\partial b_p} \Delta b_p\end{aligned}\quad (41)$$

где \mathbf{b}^0 – значения параметров, полученных на предыдущей итерации,

$\Delta b_p = b_p - b_p^0$, $\frac{\partial(\delta\varepsilon_{ik}^{EM})}{\partial b_p}$ – производная, отражающая влияние измененного

параметра в i -м приемнике электромагнитной съемки в момент времени t_k ,

$\frac{\partial(\delta\varepsilon_j^M)}{\partial b_p}$ – производная, отражающая влияние измененного параметра в j -м

приемнике магнитной съемки.

Подставим представление (41) в функционал (40):

$$\begin{aligned}\Phi^\alpha(\mathbf{b}) &= \beta^{EM} \sum_{i=1}^{N^{EM}} \sum_{k=1}^T \left(\omega_{ik}^{EM} \delta\varepsilon_{ik}^{EM}(\mathbf{b}^0) + \omega_{ik}^{EM} \sum_{p=1}^P \frac{\partial(\delta\varepsilon_{ik}^{EM})}{\partial b_p} \Delta b_p \right)^2 + \\ &+ \beta^M \sum_{j=1}^{N^M} \left(\omega_j^M \delta\varepsilon_j^M(\mathbf{b}^0) + \omega_j^M \sum_{p=1}^P \frac{\partial(\delta\varepsilon_j^M)}{\partial b_p} \Delta b_p \right)^2 + \\ &+ \sum_{p=1}^P \alpha_p (b_p - \bar{b}_p)^2.\end{aligned}\quad (42)$$

В результате минимизации функционала (42) по $\Delta \mathbf{b}$ получаем СЛАУ вида (при $\bar{\mathbf{b}} = \mathbf{b}^0$)

$$(\mathbf{A} + \boldsymbol{\alpha}) \Delta \mathbf{b} = \mathbf{f}, \quad (43)$$

где элементы матрицы \mathbf{A} и вектор правой части \mathbf{f} определяются соотношениями

$$\begin{aligned}A_{\mu\nu} &= \beta^{EM} \sum_{i=1}^{N^{EM}} \sum_{l=1}^L \left(\omega_{il}^{EM} \right)^2 \frac{\partial(\delta\varepsilon_{il}^{EM})}{\partial b_\mu} \frac{\partial(\delta\varepsilon_{il}^{EM})}{\partial b_\nu} + \\ &+ \beta^M \sum_{j=1}^{N^M} \left(\omega_j^M \right)^2 \frac{\partial(\delta\varepsilon_j^M)}{\partial b_\mu} \frac{\partial(\delta\varepsilon_j^M)}{\partial b_\nu}, \quad \mu, \nu = 1 \dots P,\end{aligned}\quad (44)$$

$$f_{\mu} = -\beta^{EM} \sum_{i=1}^{N^{EM}} \sum_{l=1}^L (\omega_{il}^{EM})^2 \delta \varepsilon_{il}^{EM} \frac{\partial(\delta \varepsilon_{il}^{EM})}{\partial b_{\mu}} -$$

$$-\beta^M \sum_{j=1}^{N^M} (\omega_j^M)^2 \delta \varepsilon_j^M \frac{\partial(\delta \varepsilon_j^M)}{\partial b_{\mu}}, \quad \mu = 1 \dots P. \quad (45)$$

В СЛАУ (43) матрица α является диагональной матрицей с элементами α_m на главной диагонали, которые подбираются адаптивно [107].

Для отслеживания соответствия полученной модели практическим данным вычисляется значение функционала невязки

$$\Phi(\mathbf{b}) = \beta^{EM} \sum_{i=1}^{N^{EM}} \sum_{k=1}^T (\omega_{ik}^{EM} \delta \varepsilon_{ik}^{EM}(\mathbf{b}))^2 + \beta^M \sum_{j=1}^{N^M} (\omega_j^M \delta \varepsilon_j^M(\mathbf{b}))^2. \quad (46)$$

Для расчета полей влияния параметров границ трехмерных неоднородностей и их электропроводности (в случае, когда используется численный расчет производных) для электромагнитной задачи используется следующее уравнение:

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \vec{\mathbf{A}}^{s,change_m} + \sigma^{change_m} \frac{\partial \vec{\mathbf{A}}^{s,change_m}}{\partial t} = (\sigma^{change_m} - \sigma) \vec{\mathbf{E}}^{func}. \quad (47)$$

где $\vec{\mathbf{A}}^{s,change_m}$ – поле влияние, измененного параметра b_m , $\vec{\mathbf{E}}^{func}$ – поле, рассчитанное для геоэлектрической модели, полученной на предыдущей итерации, σ – удельная проводимость геоэлектрической модели, полученной на предыдущей итерации, σ^{change_m} – удельная проводимость геоэлектрической модели с измененным параметром.

Если же используется аналитический способ расчета по параметрам электропроводности внутри трехмерных объектов, то из соотношений (27) и (35) очевидно, что для того, чтобы вычислить производные сигналов по параметрам, нужно вычислить производные весов конечноэлементного решения $\frac{\partial \mathbf{q}^{A^s,l}}{\partial b_m}$.

Продифференцируем по параметру b_m , например, соотношение (29) и выразим из полученного уравнения производную вектора решения по параметру b_m [11]:

$$\frac{\partial \mathbf{q}^l}{\partial b_m} = (\mathbf{G}^A + \chi_1' \mathbf{C}^A)^{-1} \left(\begin{array}{l} \frac{\partial \mathbf{C}^A}{\partial b_m} \left(-\chi_1' \mathbf{q}^{A^s, l} + \chi_2' \mathbf{q}^{A^s, l-\eta-1} + \chi_3' \mathbf{q}^{A^s, l-1} \right) + \\ + \mathbf{C}^A \left(\chi_2' \frac{\partial \mathbf{q}^{A^s, l-\eta-1}}{\partial b_m} + \chi_3' \frac{\partial \mathbf{q}^{A^s, l-1}}{\partial b_m} \right) + \frac{\partial \mathbf{C}^{\Delta, A}}{\partial b_m} \mathbf{e}^{p, l} \end{array} \right).$$

Для систем (19) и (28) соотношения для вычисления производных получаются аналогично.

Заметим, что если при реализации аналитического метода использовать одну и ту же сетку как для расчета невязки (т.е. решения прямой задачи для очередного приближения геоэлектрической модели), так и для расчета производных, то он может не только не дать вычислительных преимуществ, но и стать более затратным, чем численный способ, где для расчета полей влияния всегда используются грубые сетки. При этом результаты 3D-инверсии будут примерно одинаковыми и различаться только в рамках эквивалентности.

Расчет полей влияния для физических параметров слоев, опорных точек, определяющих форму рельефа, расстояния между рельефами, физических параметров и границ объектов сложной формы происходит путем расчета прямой задачи (13)-(15) и (31) для задач с гальваническим источником и индукционным источником, соответственно.

Поля влияния параметров границ трехмерных неоднородностей и их намагниченности для задачи магниторазведки вычисляются численно, но сами сигналы вычисляются с помощью аналитических выражений (39).

1.5 Верификация процедуры мультифизической инверсии

Для проверки процедуры мультифизической инверсии с одновременным подбором параметров была создана синтетическая модель.

Для электромагнитной съемки была выбрана технология БПЛА-МПП [88]. Приемно-генераторная установка состоит из гальванического источника, расположенного на дневной поверхности, и приемной катушки, которая перемещалась с помощью беспилотного летательного аппарата. Длина генератора 2 км. Момент приемной катушки равен 2500 м². Приемник расположен в 40

метрах от дневной поверхности. Расстояние между приемниками составляет 20 метров, расстояние между профилями приемников – 100 метров. Для данной технологии применяется разбиение на группы по приемникам. Система наблюдений была разбита на 9 групп.

Магнитная съемка была совмещена с электромагнитной съемкой, т.е. приемник для магнитной съемки располагается там же, где приемник для электромагнитной съемки. Модуль напряженности магнитного поля Земли был взят 46.155 А/м, а направление описывается единичным вектором (0.34;0.14;0.93).

Геофизическая модель состоит из двух слоев: $\rho_1=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_1=30 \text{ м}$; $\rho_2=1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_2=\infty$. В модели заданы криволинейные границы между слоями. В первый слой на глубину 10 метров были помещены объекты-помехи (толщина объектов 20 метров) с измененной относительно слоя электропроводностью. Во второй слой на глубину приблизительно 120 метров был помещен целевой объект с удельным сопротивлением 10 Ом·м (толщина объекта 10 метров). На рис. 1.18а,б показано распределение удельного сопротивления в трехмерных объектах. Аномальными по магнитной восприимчивости объектами были два целевых объекта, один из которых совпадал с положением целевого объекта с аномальной электропроводностью, а второй совпадал по удельному сопротивлению со средой. Отметим, что в приповерхностном слое не было объектов, аномальных по магнитной восприимчивости. На рис. 1.18в показано распределение магнитной восприимчивости в трехмерных объектах, расположенных во втором слое.

Трехмерная инверсия выполнялась в два этапа. На первом этапе с помощью блочных структур подбиралось распределение физических характеристик в верхнем и нижнем слоях модели. На втором этапе уточнялись формы объектов, которые были определены как перспективные после первого этапа, с помощью полигонов, которые определяют форму объектов в плане.

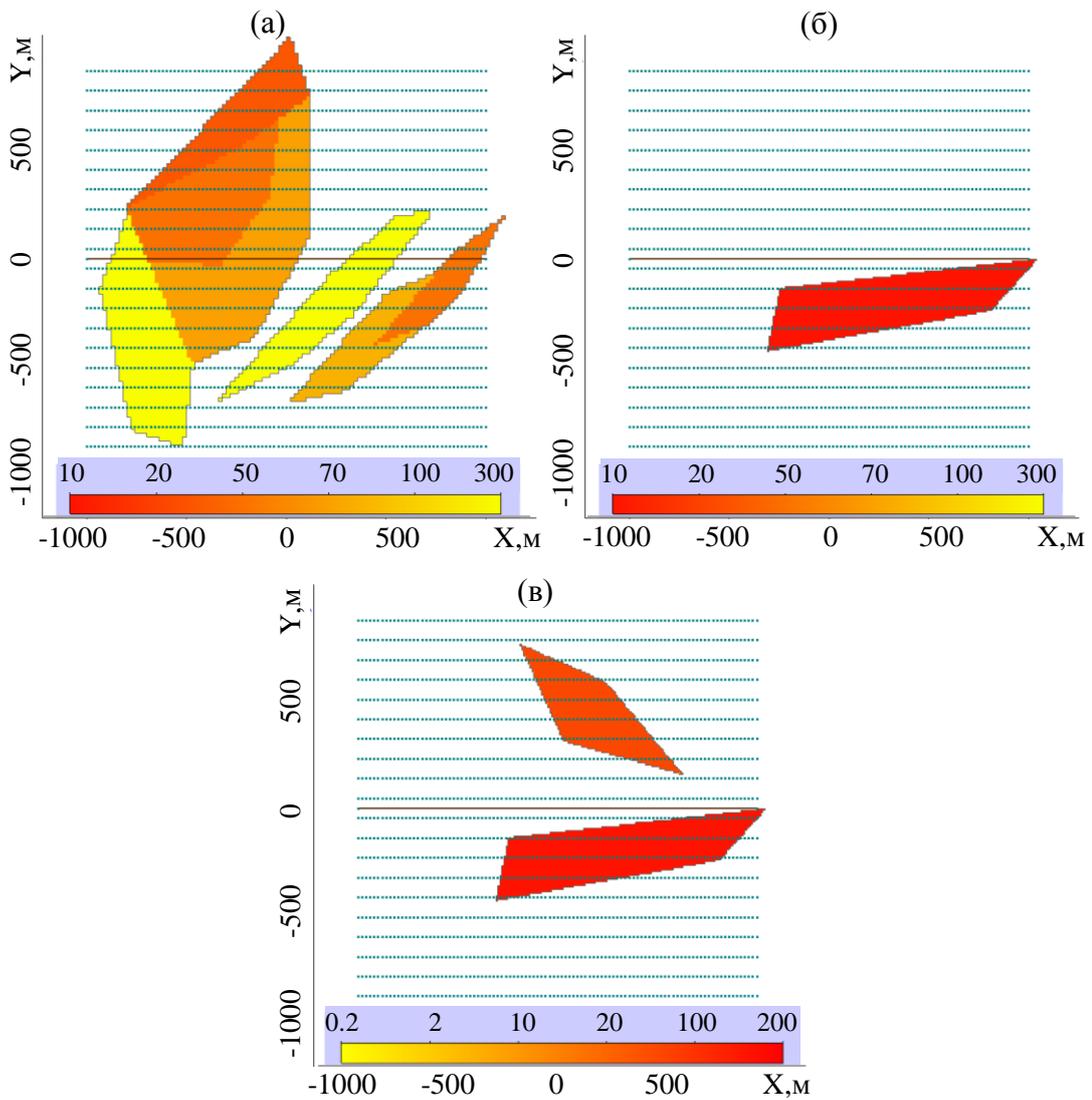


Рисунок 1.18 – Истинная модель: распределение удельного сопротивления в объектах-помехах в первом слое (а), распределение удельного сопротивления в целевом объекте во втором слое (б), распределение магнитной восприимчивости в целевых объектах во втором слое (в)

Для проведения инверсии на первом этапе было задано две блочные структуры, которые располагались на той же глубине, что и объекты в истинной модели. В верхнем слое была задана блочная структура с размером блоков $150 \times 200 \text{ м}^2$, а в нижнем слое размер блоков был взят $250 \times 250 \text{ м}^2$. В верхней блочной структуре подбирались границы между блоками и удельное сопротивление в них. В нижней блочной структуре подбирались границы между блоками, удельное сопротивление и намагниченность.

Результаты первого этапа инверсии показаны на рис. 1.19.

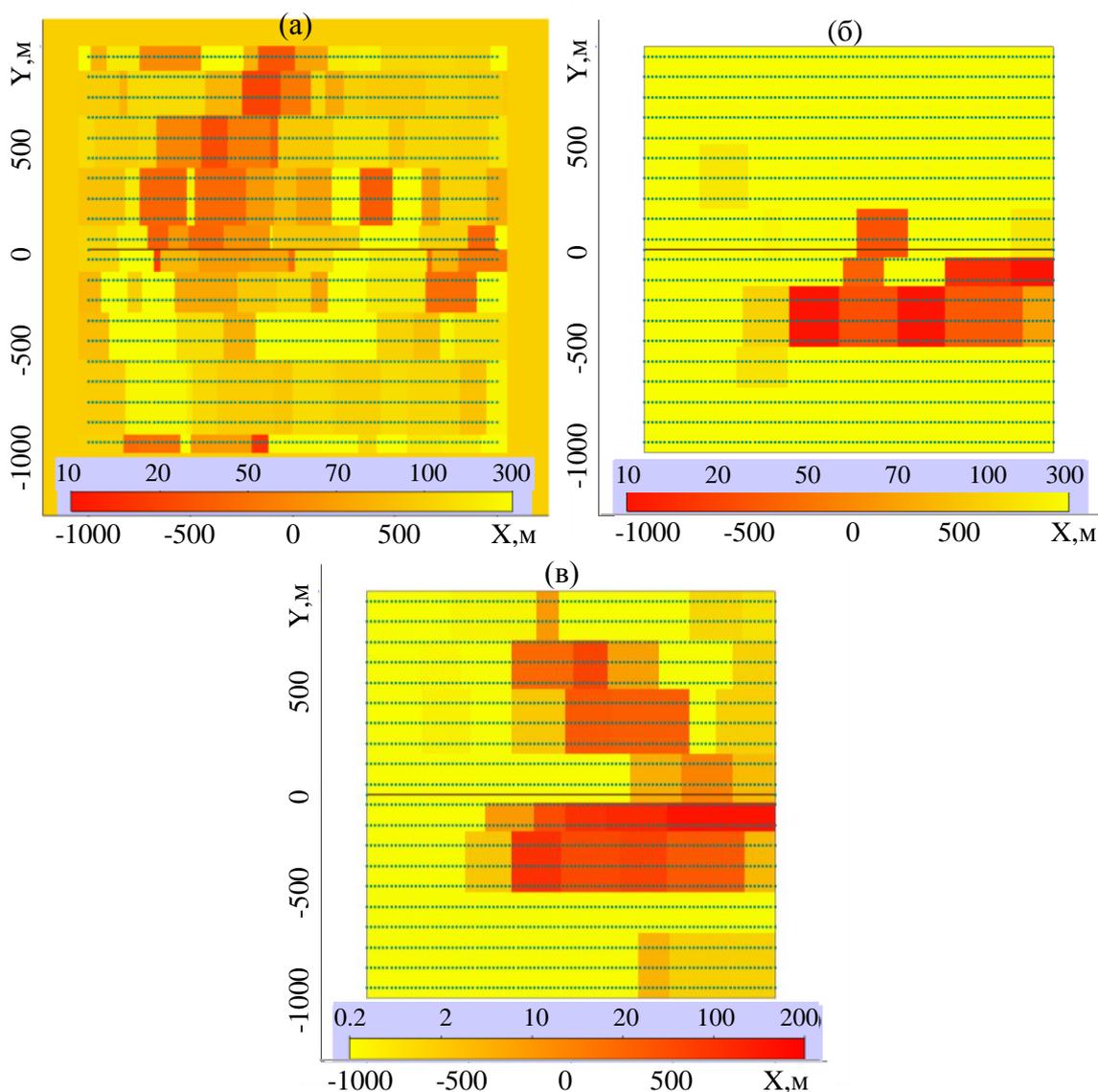


Рисунок 1.19 – Модель, полученная в результате первого этапа инверсии: распределение удельного сопротивления в первом слое (а), распределение удельного сопротивления во втором слое (б), распределение магнитной восприимчивости во втором слое (в)

По результатам инверсии в нижнем слое можно выделить две аномальные зоны, одна из которых имеет аномальные свойства по двум физическим параметрам, а вторая только по одному – по намагниченности. На их основе была построена стартовая модель, показанная на рис. 1.20а,г и содержащая два полигона. На втором этапе инверсии подбиралось сопротивление в «ближнем» полигоне, намагниченность в обоих полигонах (начальные значения были взяты

одинаковыми), а также форма полигонов. Подбор формы происходил через движение границ полигонов.

Через 5 итераций нелинейной инверсии была получена модель, представленная на рис. 1.20б,д. Из сравнения с объектами истинной модели (показанными на рис. 1.20в,е) видно, что форма восстановленных объектов очень хорошо соответствует форме истинных объектов.

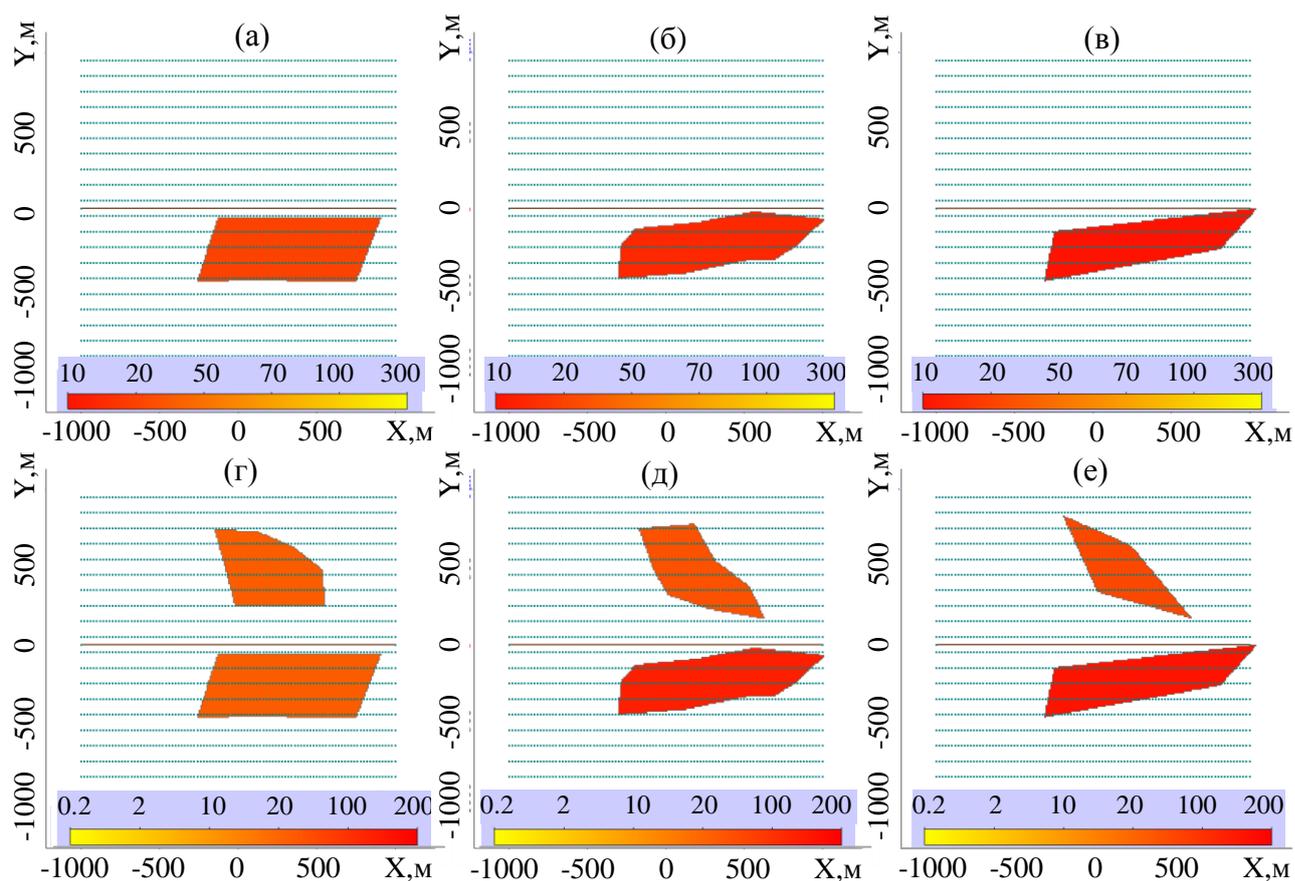


Рисунок 1.20 – Стартовая модель для второго этапа (а, г), модель, полученная в результате второго этапа инверсии (б, д), истинная модель (в, е): распределение удельного сопротивления в объектах второго слоя (а, б, в), распределение магнитной восприимчивости во втором слое (г, д, е)

Из представленных результатов видно, что форма и свойства целевых объектов, полученные в результате описанной выше двухэтапной 3D-инверсии с использованием на разных этапах различных параметризаций, хорошо соответствует истинным объектам.

Отметим, что в представленном примере использовалась достаточно подробная сетка, поскольку на втором этапе объекты сложной формы были

представлены с помощью полигонов, наложенных на сетку. Поскольку рассматриваемая задача характеризуется небольшой площадью наблюдения (характерной для БПЛА-технологий) и всего лишь одним положением источника, это не привело к существенному росту вычислительных затрат. Кроме того, стартовая модель для второго этапа инверсии была уже довольно близкой к истинной.

Но для больших систем наблюдения, характерных для аэрогеофизической разведки с использованием вертолетных платформ, которые будут рассмотрены в следующей главе, такой подход будет приводить к резкому росту вычислительных затрат и поэтому необходимо использовать параметризацию и разработанные алгоритмы неконформных сеток, в которых сеточные поверхности совпадают с границами трехмерных объектов.

Выводы по главе 1

1. Разработан алгоритм построения оптимизированных неконформных конечноэлементных сеток, обеспечивающий совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов и предназначенный как для решения прямых задач, в том числе с большим числом 3D-объектов, так и для расчета полей влияния геометрических параметров. Помимо непосредственного включения 3D-объектов в сетку и устранения «перехлестов», алгоритм включает в себя процедуру устранения «висячих углов» – ситуацию, когда к нетерминальному («большому») ребру примыкают терминальные ребра конечных элементов с разными материалами. При этом «большой» конечный элемент и «малые» конечные элементы могут иметь как общую грань, так и только общее ребро.

2. Показано, что если не устранять ситуацию «висячих углов», то в некоторых случаях ошибка может резко возрастать (даже на порядок), что в конечном итоге будет приводить к проблемам в решении обратных задач. При этом даже для геоэлектрических моделей с очень большим количеством встраиваемых объектов, получаемых из-за аппроксимации объектов сложной формы (что, как правило, используется при решении прямых задач при

проведении различного рода методических расчетов), время расчета электромагнитного поля возрастет всего лишь в 1.5 раза (при этом, если решать эту проблему уменьшением шага в базовой сетке, вычислительные затраты вырастут более, чем в 2.5 раза). Для геоэлектрических же моделей, характерных для обратных задач (которые являются наиболее вычислительно затратными), время расчета электромагнитного поля практически не изменится при устранении ситуации с «висячими углами» и резко возрастет при использовании регулярных (или более подробных базовых) сеток.

3. Представлена математическая модель для решения обратных задач электроразведки и магниторазведки, основанная на геометрической 3D-инверсии. Рассмотрены различные типы параметризации, в которых вектор искомых параметров содержит геометрические и физические свойства искомого объекта, и математические модели для расчета полей влияния параметров в зависимости от их типа.

4. Проведена оценка работоспособности процедуры мультифизической 3D-инверсии на синтетических данных электроразведки и магниторазведки для технологии, в которой измерительная установка буксируется с помощью БПЛА, а источником ЭМ поля является заземленная на дневной поверхности электрическая линия. Показано хорошее восстановление свойств и геометрии локальных целевых объектов, отличающихся по физическим параметрам от вмещающей среды, при условии, что мешающие геологические объекты (объекты-помехи), расположенные в приповерхностном слое, отличались от вмещающей среды только по электропроводности.

ГЛАВА 2 МЕТОД СОВМЕСТНОЙ 3D-ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И МАГНИТНОЙ СЪЕМОК В СИТУАЦИЯХ, КОГДА ЦЕЛЕВЫЕ ЗАГЛУБЛЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ НАХОДЯТСЯ ПОД НЕОДНОРОДНЫМИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И МАГНИТНЫМ СВОЙСТВАМ ПРИПОВЕРХНОСТНЫМИ СЛОЯМИ

В разделе 1.5 была рассмотрена ситуация, когда целевые объекты, неоднородные по магнитной восприимчивости, не были перекрыты неоднородными по магнитной восприимчивости слоями, и поэтому совместный подбор всех физических и геометрических параметров дал хорошие результаты. В данной главе будет рассмотрена ситуация, когда целевые объекты перекрыты слоями, неоднородными не только по электрическим, но и по магнитным свойствам, и предложен метод 3D-интерпретации для этого случая.

Вначале проведем более широкую верификацию решения обратной задачи магниторазведки и анализ эквивалентности получаемых магнитных моделей.

2.1 Верификация решения обратной задачи магниторазведки и анализ эквивалентности

Анализ эквивалентности проводится на модели магнитного тела, представленного на рис. 2.1. Рассматриваются две ситуации: Модель 1, когда тело расположено на глубине 50-100 м и имеет $\chi = 100$ (10^{-3} ед.СИ), и Модель 2, когда тело расположено на глубине 300-350 м и имеет $\chi = 400$ (10^{-3} ед.СИ). Рельеф и расположение полетных линий (на двух высотах: приблизительно 45 м и 100 м), а также значение поля Земли были взяты из практических данных, которые будут рассмотрены далее (в разделе 2.4). Модуль напряженности магнитного поля Земли был взят 46.065 А/м, а направление описывается единичным вектором (0.031;0.218;-0.975). Для представленных моделей вдоль полетных линий

(профилей) были получены синтетические данные по формуле (39) с учетом того, что согласно (38) и определения χ : $\vec{T}^k = \vec{M}^k \cdot \text{mes}(\Omega_k) = \chi \cdot \vec{H}^E \cdot \text{mes}(\Omega_k) \cdot 10^{-3}$.

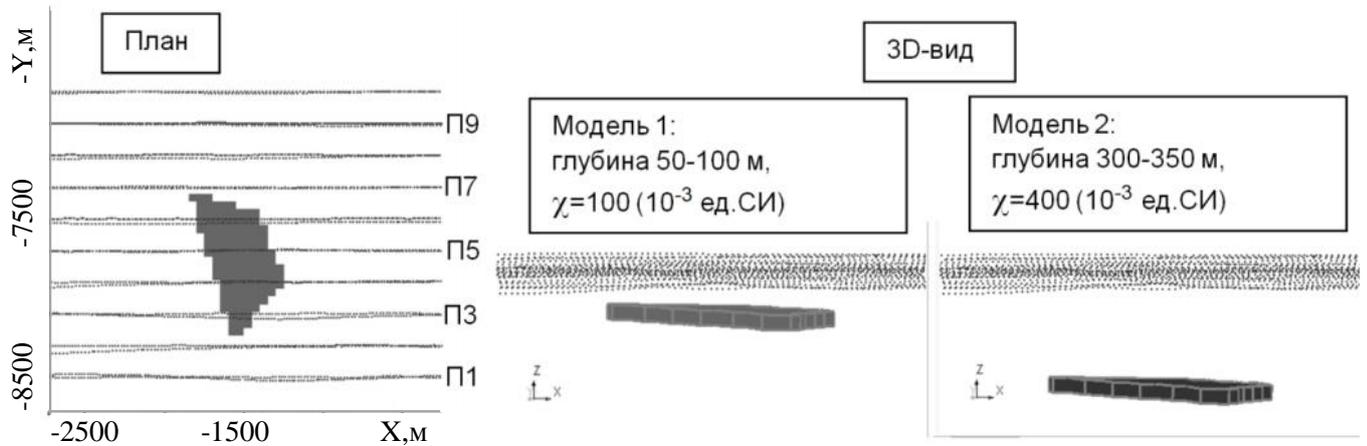


Рисунок 2.1 – Модели магнитного тела

Проведем 3D-инверсию в трех вариантах. В первых двух вариантах использовались блочные структуры с размерами блоков в плане $100 \times 200 \text{ м}^2$ и неподвижными латеральными границами. Толщина блоков была фиксирована, определялось их положение по глубине. При этом в первом варианте положение по глубине искалось для каждого блока отдельно, а во втором варианте – у всей блочной структуры в целом. В третьем варианте была задана локальная структура с подвижными латеральными границами, а глубина искалась единой для всей блочной структуры. Вид стартовых моделей представлен на рис. 2.2 (глубина блочных структур в стартовой модели была задана 200-250 м – средней между глубинами тел в Моделях 1 и 2).

Результаты 3D-инверсии данных магнитной съемки для первого варианта приведены на рис. 2.3, а для второго и третьего вариантов – на рис. 2.4. Графики сигналов для моделей, полученных в результате инверсии, и «практические» (синтетические) данные приведены на рис. 2.5. Из представленных результатов видно, что во всех трех вариантах получены адекватные результаты: определена форма в плане и положение аномалии по глубине. При этом наиболее точное восстановление характеристик получено в варианте 3.

В рассмотренных выше вариантах 1 и 2 использовалась локальная блочная структура, которая не покрывала часть боковых профилей. Этот факт позволил четко определить глубину аномалии магнитной восприимчивости. На практике

такой подход будет справедливым, если в поле наблюдаются локальные магнитные аномалии, а вмещающая среда является преимущественно слабомагнитной. Если же среда является существенно неоднородной по магнитным свойствам, необходимо покрывать блочной структурой всю область, и в этом случае возникает большая эквивалентность при определении глубины магнитной аномалии.

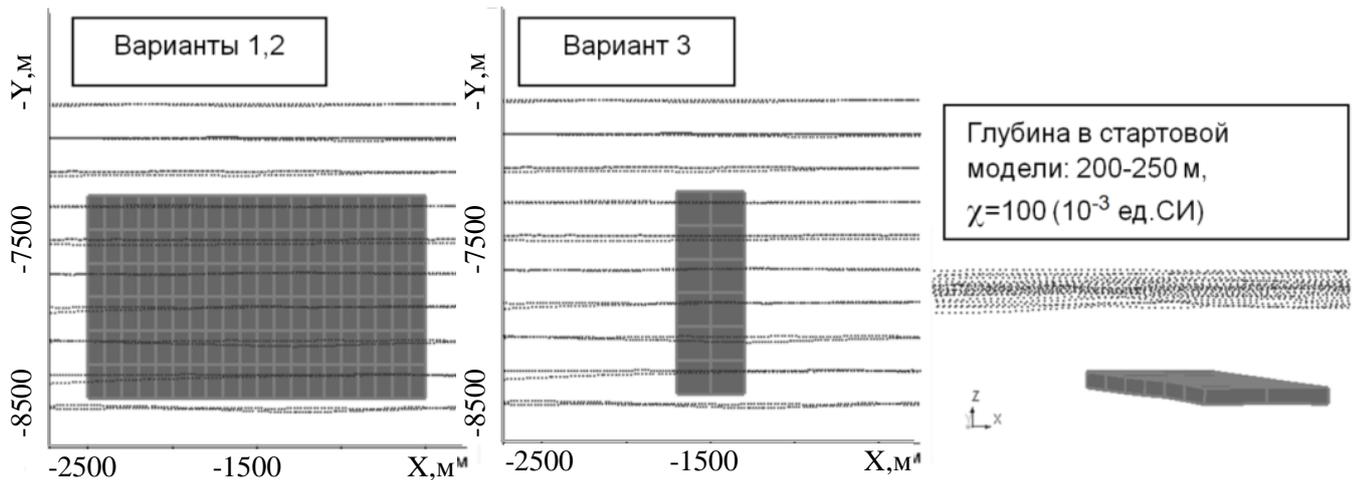


Рисунок 2.2 – Вид стартовых моделей

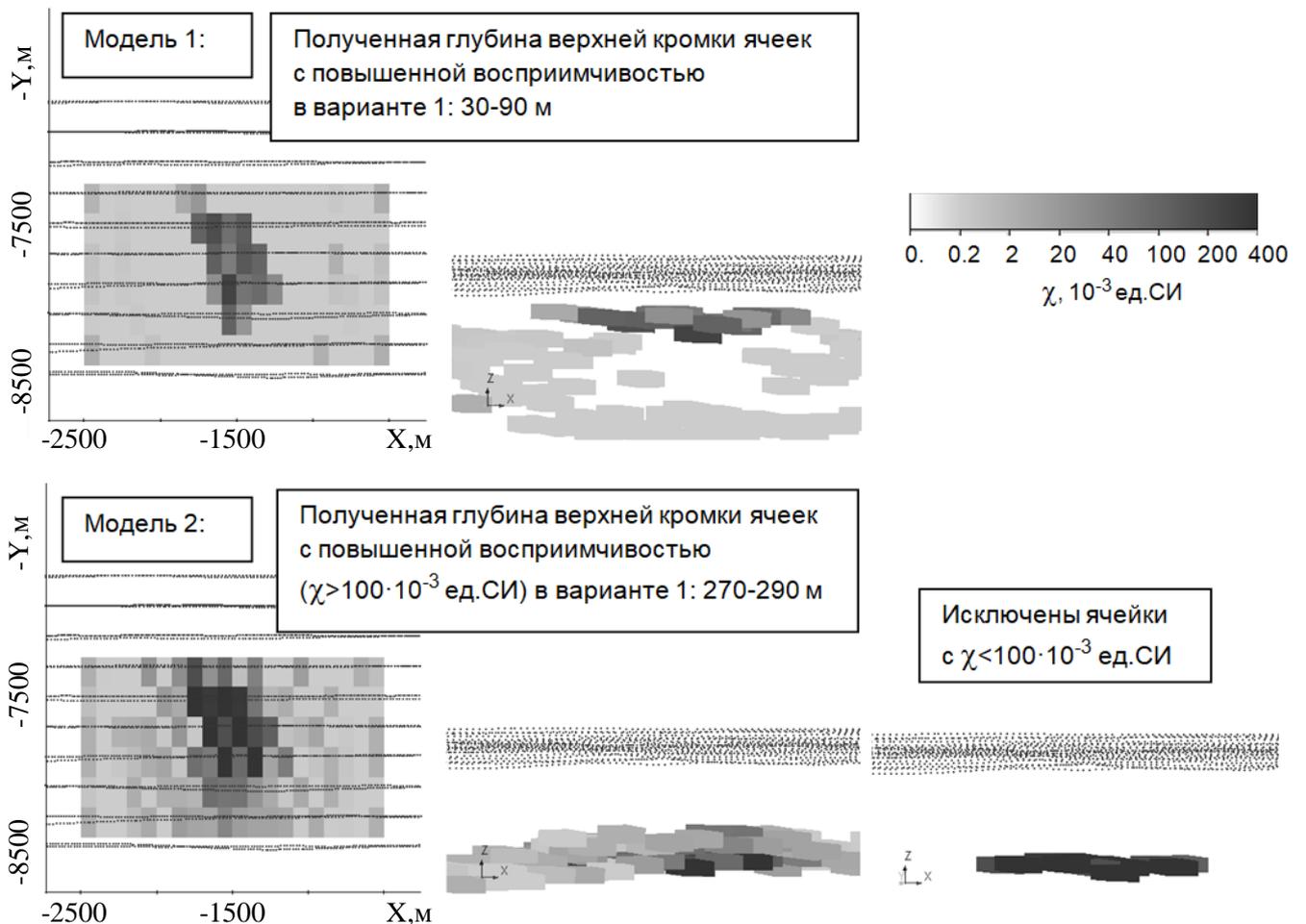


Рисунок 2.3 – Результаты 3D-инверсии синтетических данных в варианте 1

Для оценки эквивалентности для рассмотренных выше синтетических данных (сформированных для Моделей 1 и 2) проведем инверсию при следующих условиях. Для Модели 2, в которой тело расположено на глубине 300-350 м, зафиксируем блочную структуру на глубине 50-100 м, а для Модели 1, в которой тело расположено на глубине 50-100 м, блочную структуру, наоборот, расположим на глубине 300-350 м. Результаты этих инверсий представлены на рис. 2.6. Видно, что глубинное тело подбирается изменением магнитной восприимчивости в верхнем слое с очень хорошим совпадением «расчетных» сигналов с синтезированными «практическими»: невязки в сигналах практически отсутствуют. При этом форма тела в плане является «размазанной». Тело же, расположенное в верхней части, плохо подбирается в блочной структуре на глубине: в сигналах остаются существенные невязки.

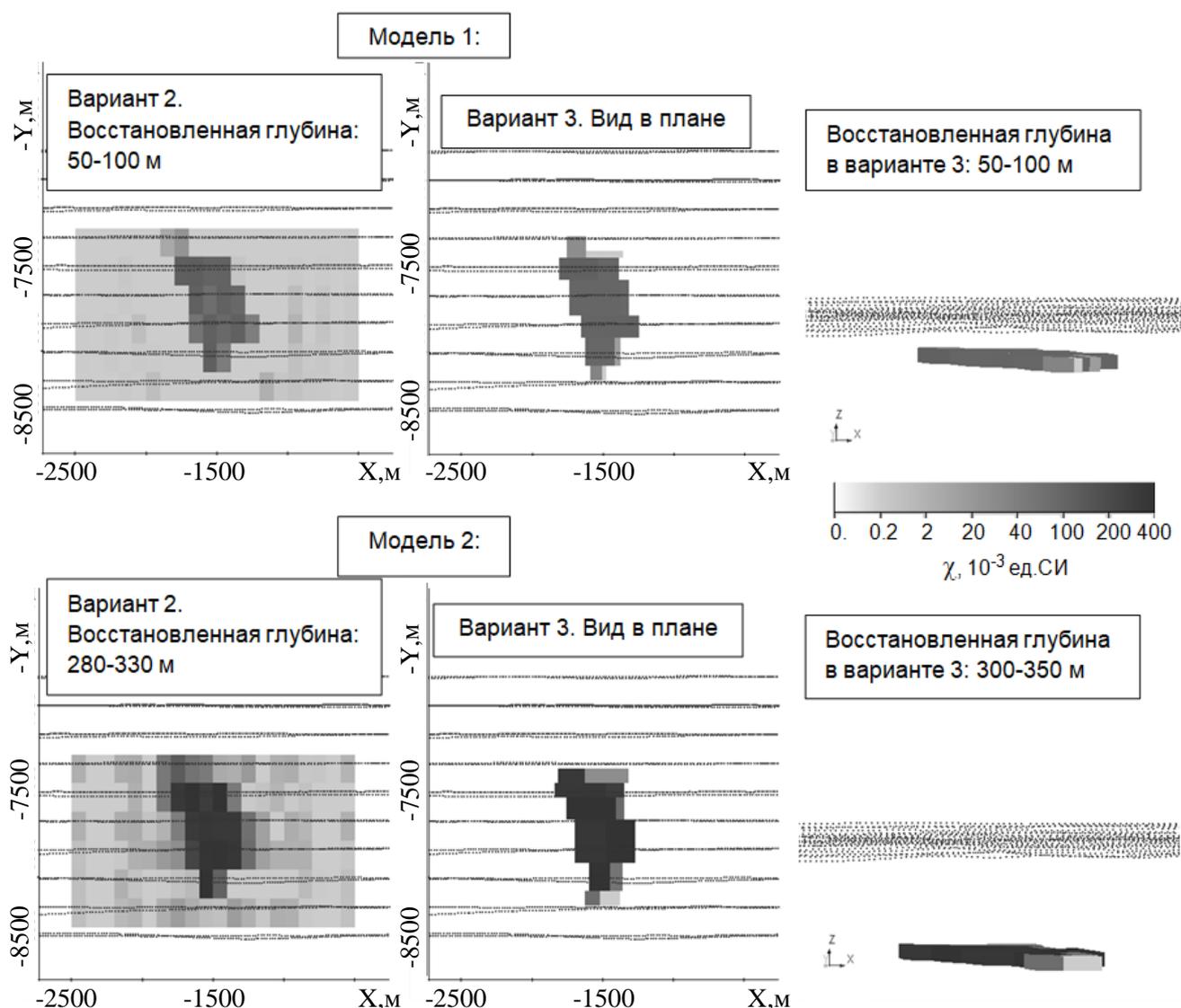


Рисунок 2.4 – Результаты 3D-инверсии синтетических данных в вариантах 2 и 3

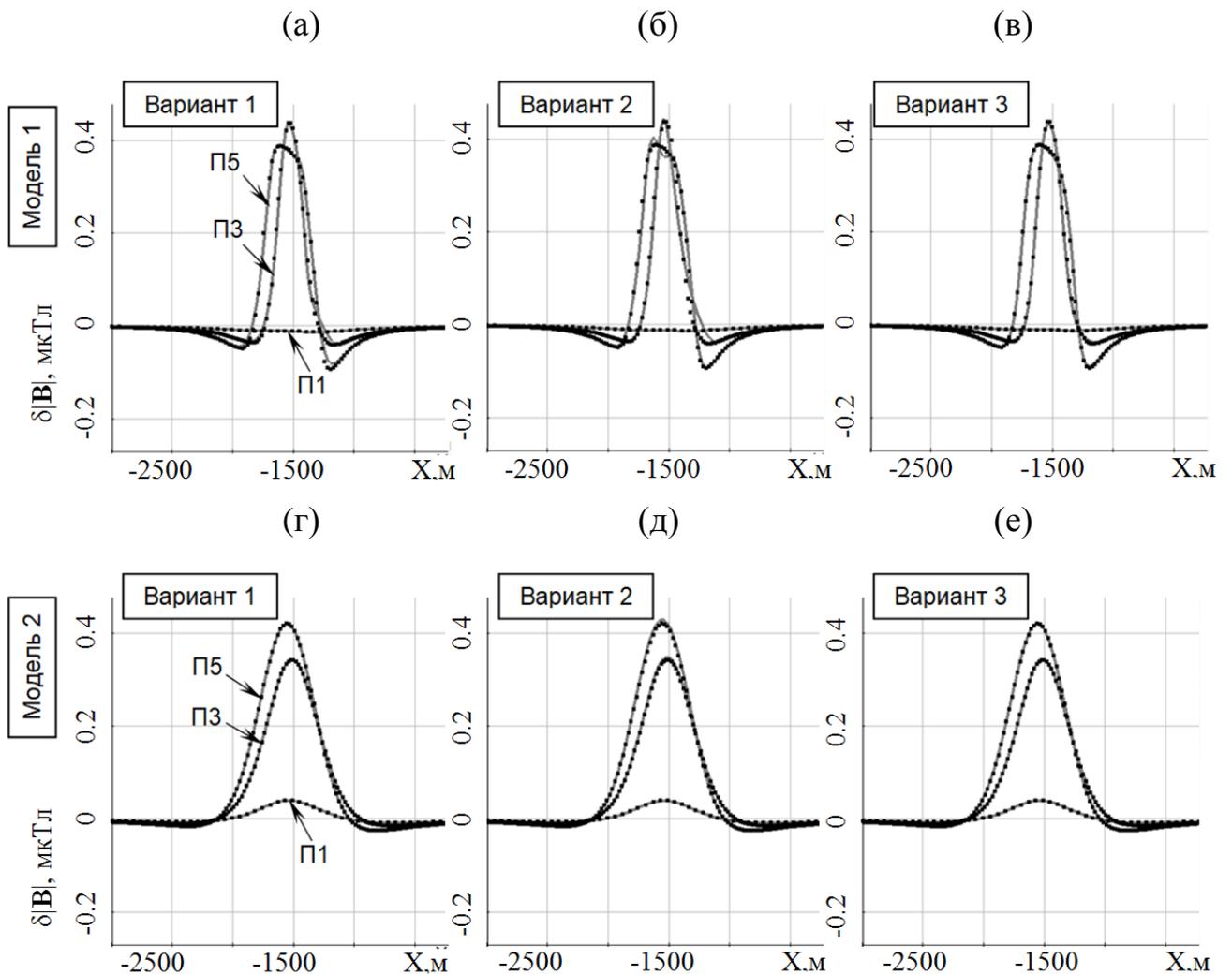


Рисунок 2.5 – Графики расчетных сигналов (серые линии) для моделей, полученных в результате инверсии, и «практических» (синтетических) сигналов (черные точки)

Таким образом, заглубленные магнитные аномалии могут быть подобраны изменением магнитной восприимчивости в верхних слоях при очень хорошем (фактически без невязок) совпадении расчетных сигналов с практическими сигналами. Поэтому в случае, когда верхние слои являются существенно неоднородными по магнитным свойствам, инверсия с помощью минимизации единого функционала не имеет смысла, так как магнитная съемка не дает дополнительной информации о свойствах потенциально целевых объектов.

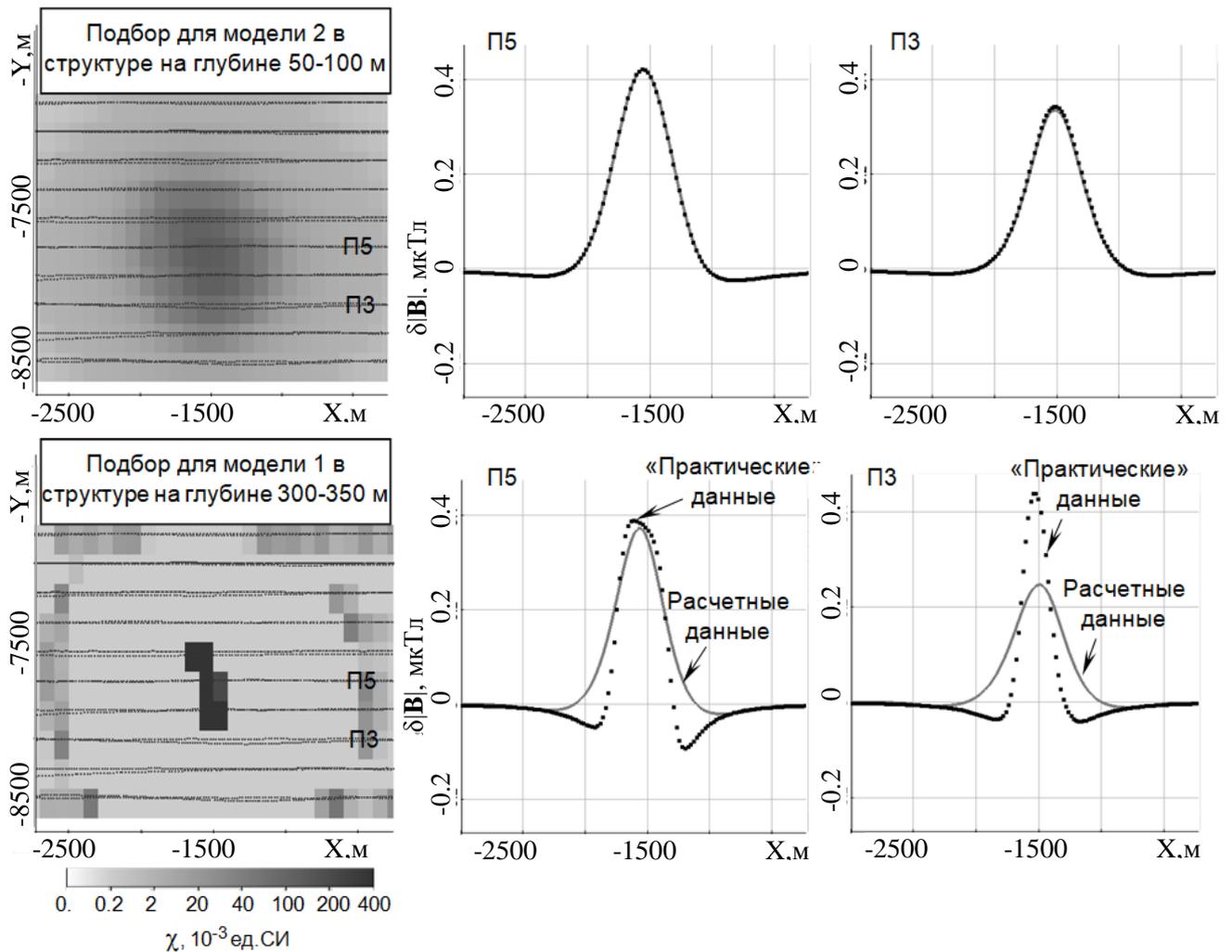


Рисунок 2.6 – Результаты 3D-инверсии для Модели 2 при подборе в блочной структуре на глубине 50-100 м и для Модели 1 при подборе в блочной структуре на глубине 300-350 м; «практические» (синтетические) сигналы показаны черными точками, расчетные сигналы – серыми линиями

Однако, то, что магнитные аномалии верхней части разреза не подбираются с помощью тел, расположенных на глубине, и что ЭМ съемка позволяет с достаточно высокой точностью обнаруживать высокопроводящие локальные неоднородности, определять их геометрию в плане и положение по глубине [94,107], позволяет предложить методику инверсии данных магнитной съемки хотя бы для того, чтобы оценить (сверху) магнитные свойства глубинных объектов, перекрытых неоднородным по магнитным свойствам верхним слоем.

В связи с этим предлагается алгоритм, который будет изложен в следующем пункте.

2.2 Алгоритм совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок в ситуациях, когда целевые заглубленные объекты находятся под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями

Рассмотренные в разделе 1.4 и работах [13,94,107] методы параметризации и метод расчета производной могут быть использованы для различных стратегий 3D-инверсии, которые, в свою очередь, могут выбираться в зависимости от типа решаемой геологической задачи. Многие геологические задачи по поиску твердых полезных ископаемых, решаемые аэроэлектроразведкой, характеризуется тем, что небольшие проводящие объекты располагаются в слабопроводящей фоновой среде под неоднородными перекрывающими слоями [75,85,94].

С учетом результатов, представленных в предыдущем разделе, и того, что рассматриваемая вмещающая среда может быть высоконеоднородной по магнитным свойствам и характеризоваться достаточно высокими значениями магнитной восприимчивости, совместную 3D-интерпретацию предлагается проводить следующим образом: сначала выполняется восстановление геометрии (потенциально целевых) локальных высокопроводящих тел по данным ЭМ съемки и затем определяется в них максимально возможная магнитная восприимчивость по данным магнитной съемки.

В работе [94] при выполнении 3D-инверсий была применена методика, в которой вначале с использованием части временных каналов восстанавливалось предварительное распределение электропроводности в перекрывающих породах, а затем по всему временному диапазону восстанавливались локальные тела под перекрывающими слоями с одновременной коррекцией свойств перекрывающих слоев над этими телами.

С учетом вышесказанного, совместная 3D-интерпретация будет состоять из следующих этапов [102].

На предварительном этапе выполняется:

а) предварительная 3D-инверсия данных ЭМ съемки по набору временных каналов, соответствующих ранним временам, с подбором распределения

электропроводности в перекрывающих породах; предварительная 3D-инверсия данных магнитной съемки в приповерхностном слое (например, 50-100 м);

б) 3D-моделирование электромагнитных полей для геоэлектрической модели приповерхностного слоя, полученной в результате предварительной 3D-инверсии, во всем временном диапазоне;

в) построение невязок практических и расчетных ЭМ данных на временных каналах, которые не использовались при выполнении предварительной 3D-инверсии, и выделение областей максимальных невязок.

На основном этапе выполняется построение локальных блочных структур под неоднородными приповерхностными слоями в областях существенных невязок в ЭМ данных (полученных на поздних временах), проводятся локальные 3D-инверсии с подбором геометрии и электропроводности локальных структур по всему временному диапазону, а также выполняется коррекция параметров электропроводности в блоках верхних слоев, расположенных над локальными структурами и на небольшом удалении от них.

На заключительном этапе выполняется поочередное задание в каждой из высокопроводящих (относительно глубинных) локальных структур, выделенных по данным ЭМ съемки, фиксированного значения магнитной восприимчивости, корректируются (путем повторных 3D-инверсий) значения магнитной восприимчивости в блоках приповерхностного слоя и проводится анализ получаемых невязок. Максимально возможная магнитная восприимчивость в локальных структурах определяется по сохранению низкого уровня невязок между практическими и расчетными данными магнитной съемки. Увеличение невязки свидетельствует о том, что такого уровня магнитной восприимчивости в выделенной по данным ЭМ съемки локальной структуре быть не может.

2.3 Обоснование работоспособности алгоритма на синтетических данных

Рассмотрим эту методику при совместной интерпретации данных аэрогеофизической съемки сначала на синтетических данных. Для этого рассмотрим модель, которая содержит неоднородный верхний слой на глубине

50-100 м и локальное магнитное тело на глубине 300-350 м. Соответствующие распределения χ представлены на рис. 2.7. Предположим, что есть два (расположенных в разных местах площади) потенциально целевых тела (полученные по результатам ЭМ съемки). При этом одно из них является аппроксимацией искомого тела с повышенной магнитной восприимчивостью, а второе имеет слабые магнитные свойства. Проведем инверсию при поочередной фиксации в этих телах повышенной χ и оценим получаемые невязки. Соответствующие результаты представлены на рис. 2.8.

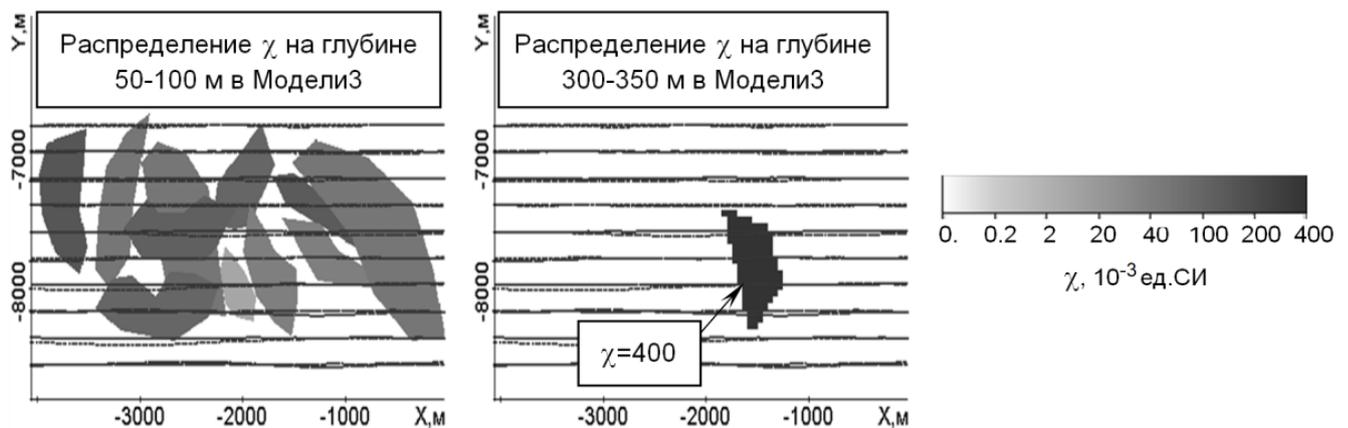


Рисунок 2.7 – Модель с неоднородным магнитным слоем и магнитным телом на глубине

Из результатов, представленных на рис. 2.8 видно, что для глубинного тела с повышенной магнитной восприимчивостью (глубинное тело 1) после проведения инверсии невязки в сигналах исчезают, а для глубинного тела со слабыми магнитными свойствами (глубинное тело 2) – остаются. Важно отметить, что в рассмотренном примере сигнал от локального глубинного тела выше, чем суммарный сигнал (в присутствии неоднородного верха), что свидетельствует о том, что при стандартной обработке определить положение возможного глубинного целевого объекта с высокими магнитными свойствами невозможно.

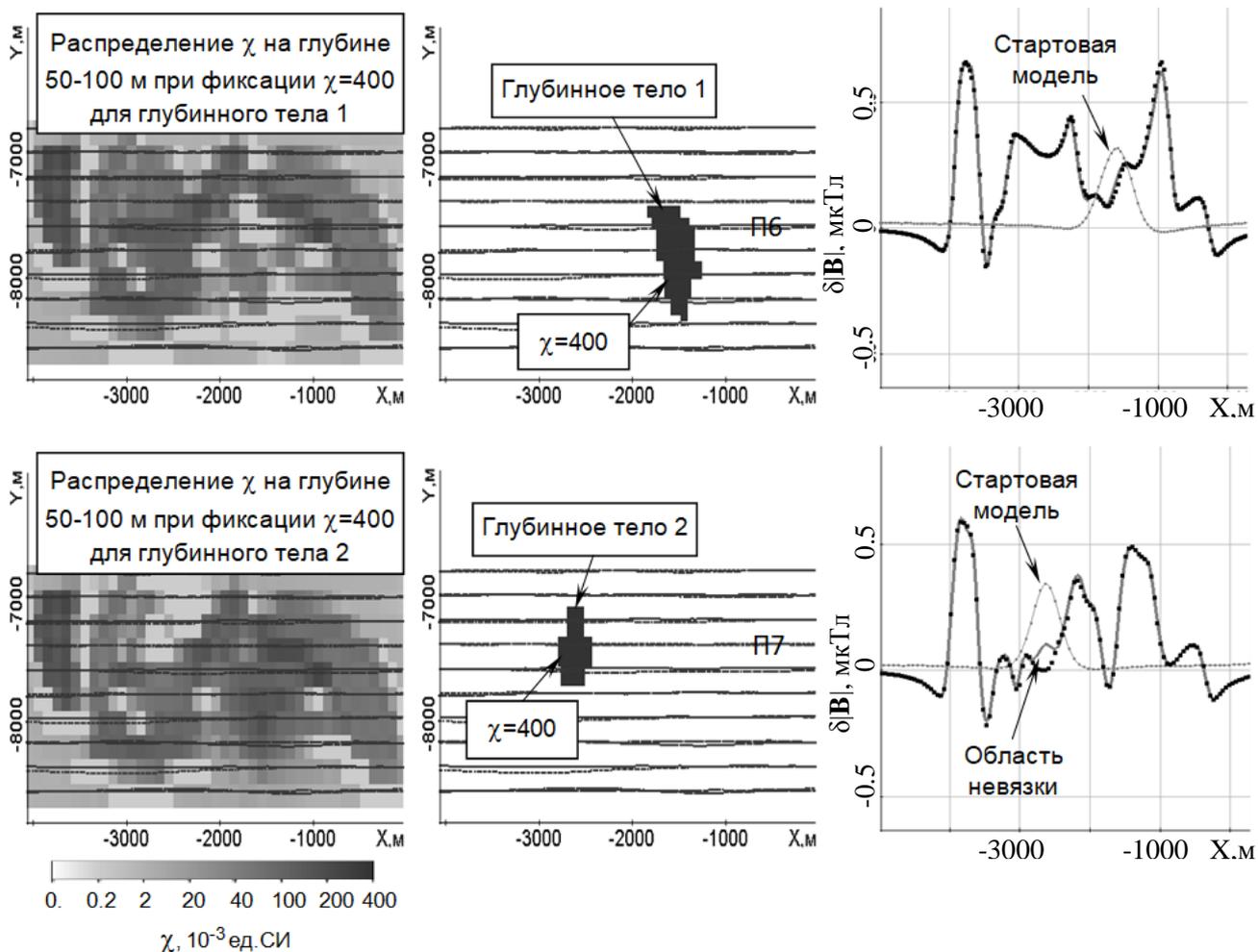


Рисунок 2.8 – Результаты 3D-инверсии при подборе в блочной структуре на глубине 50-100 м для двух тел с фиксированной χ на глубине 300-350 м; «практические» (синтетические) сигналы показаны черными точками, расчетные сигналы – серыми линиями без меток

В заключение отметим, что если у глубинного тела 1 (которое соответствует телу с повышенной магнитной восприимчивостью) зафиксировать более высокое значение χ , после выполнения инверсии в верхнем слое невязки в данных также останутся довольно большими (см. рис. 2.9). Поэтому фактически можно получить верхнюю оценку магнитной восприимчивости заглубленных тел, перекрытых неоднородным по магнитным свойствам слоем. Отметим также, что если перекрывающая глубинный объект неоднородная по магнитным свойствам среда не совпадает (но в определенных, хотя и довольно широких пределах) с

толщиной верхнего слоя, задаваемого в инверсии, полученные результаты для заглубленных тел остаются теми же.

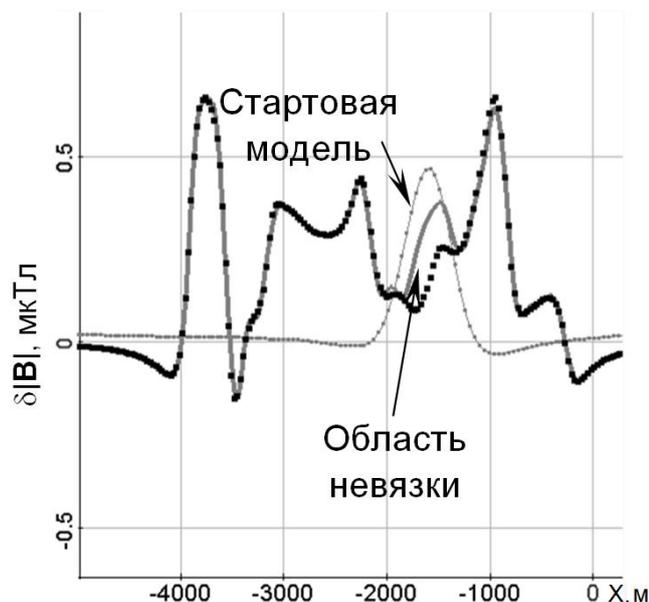


Рисунок 2.9 – Графики «практических» (черные точки) и расчетных (серые линии без меток) сигналов для модели, полученной в результате инверсии при фиксации глубинного тела 1 с $\chi = 600$ (10^{-3} ед.СИ)

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Если локальные тела с высокими магнитными свойствами являются достаточно обособленными, то 3D-инверсия позволяет определить как их положение и форму в плане, так и глубину. Если же перекрывающая искомый заглубленный объект среда в целом является магнитной и достаточно неоднородной, то 3D-инверсия позволяет сделать лишь оценку сверху магнитных свойств заглубленного объекта с использованием описанной выше методики, но этого может быть достаточно для исключения найденных проводящих тел из потенциально целевых из-за их низкой магнитной восприимчивости.

2.4 Обоснование работоспособности алгоритма на практических данных

Для апробации предложенного подхода использовались полевые данные электромагнитных (ЭМ) и магнитных измерений, выполненных на площади

Creighton (Канада) с помощью аэрогеофизической вертолетной платформы HeliTEM (<https://geophysical-data.canada.ca/Portal/Search>).

Система для измерения ЭМ поля представляет собой четырехвитковую генераторную петлю с радиусом 17.5 м и небольшой приемник, расположенный в центре. При проведении ЭМ измерений импульс тока в генераторной петле по времени имел форму полусинуса длительностью 7.66 мс. Далее в этом разделе все сигналы будут приведены после деления на ток. При выполнении 3D-инверсии использовались электромагнитные данные, измеренные для 120 тыс. положений аэросистемы (с шагом около 17 м вдоль профилей и расстоянием 200 м между профилями) на участке около 400 км² (около 2135 пог. км). Электромагнитные данные были измерены в диапазоне от 80 мкс до 8 мс на 26-и временных каналах. При пространственном группировании система наблюдений была разбита на 1600 групп (приблизительно по 70-80 положений аэросистемы в группе).

При выполнении предварительного этапа 3D-инверсии данных ЭМ съемки в приповерхностном слое была задана блочная структура с блоками размером 300x300 м² и общим количеством блоков 4914. Учитывая тот факт, что первое время съемки является достаточно поздним – 80 мкс, детализация самой верхней части разреза является проблематичной и поэтому для моделирования влияния перекрывающих пород использовался один слой с фиксированной толщиной 10 м, верхняя и нижняя границы которого повторяли рельеф дневной поверхности. Таким образом, для каждой группы положений аэросистемы на одной итерации нелинейной 3D-инверсии решалось в среднем около 1500-2000 задач (это произведение количества положений аэросистемы в группе на количество параметров с ненулевой чувствительностью для данной группы).

При выполнении расчетов использовались 20 шестиядерных и 10 четырехядерных компьютеров (с процессорами I7 и I5) с 16-ю Гб оперативной памяти. При этом в дневное время часть компьютеров передавалась под другие задачи и затем возвращалась для продолжения выполнения 3D-инверсии (без

прерывания процесса) [12,91]. В результате время выполнения этого этапа инверсии составило около 5 суток.

Для проведения 3D-инверсии данных магнитной съемки использовалось одновременно два набора данных, измеренных на разной высоте и разными измерительными системами. Первый набор данных измерялся одновременно с данными ЭМ съемки на высоте примерно 45 м, датчик магнитного поля на вертолетной платформе HeliTEM установлен рядом с датчиком ЭМ поля, и чтобы обеспечить отсутствие влияния электромагнитного поля на данные магнитной съемки, магнитные измерения производятся в конце паузы между электромагнитными импульсами. Второй набор данных измерялся с помощью самолетной системы на высоте примерно 100 м. Модуль напряженности магнитного поля Земли в этом районе составляет 46.065 А/м, а направление описывается единичным вектором (0.031;0.218;-0.975).

Предварительная 3D-инверсия данных магнитной съемки проводилась в течение одного дня на одном восьмиядерном компьютере с 64 Гб памяти. Размеры ячеек под профилями съемки были взяты равными 100x200 м² (глубина расположения этих ячеек от 50 до 100 м), а за границами съемки – 300x500 м². Общее количество ячеек составило 24736.

На рис. 2.10 приведено предварительное распределение удельного электрического сопротивления в перекрывающем слое, распределение невязки на времени 767 мкс (которое, очевидно, не входило в диапазон времен, используемый на этом этапе 3D-инверсии), а также распределение магнитной восприимчивости, полученное в ходе предварительной инверсии данных магниторазведки (показано распределение только в ячейках, расположенных под профилями). Из представленного распределения магнитной восприимчивости видно, что среда является неоднородной и магнитной, поэтому, как было показано в предыдущем разделе, при проведении совместной интерпретации возможна только оценка сверху магнитных свойств высокопроводящих локальных структур, которые будут выделены по данным ЭМ съемки.

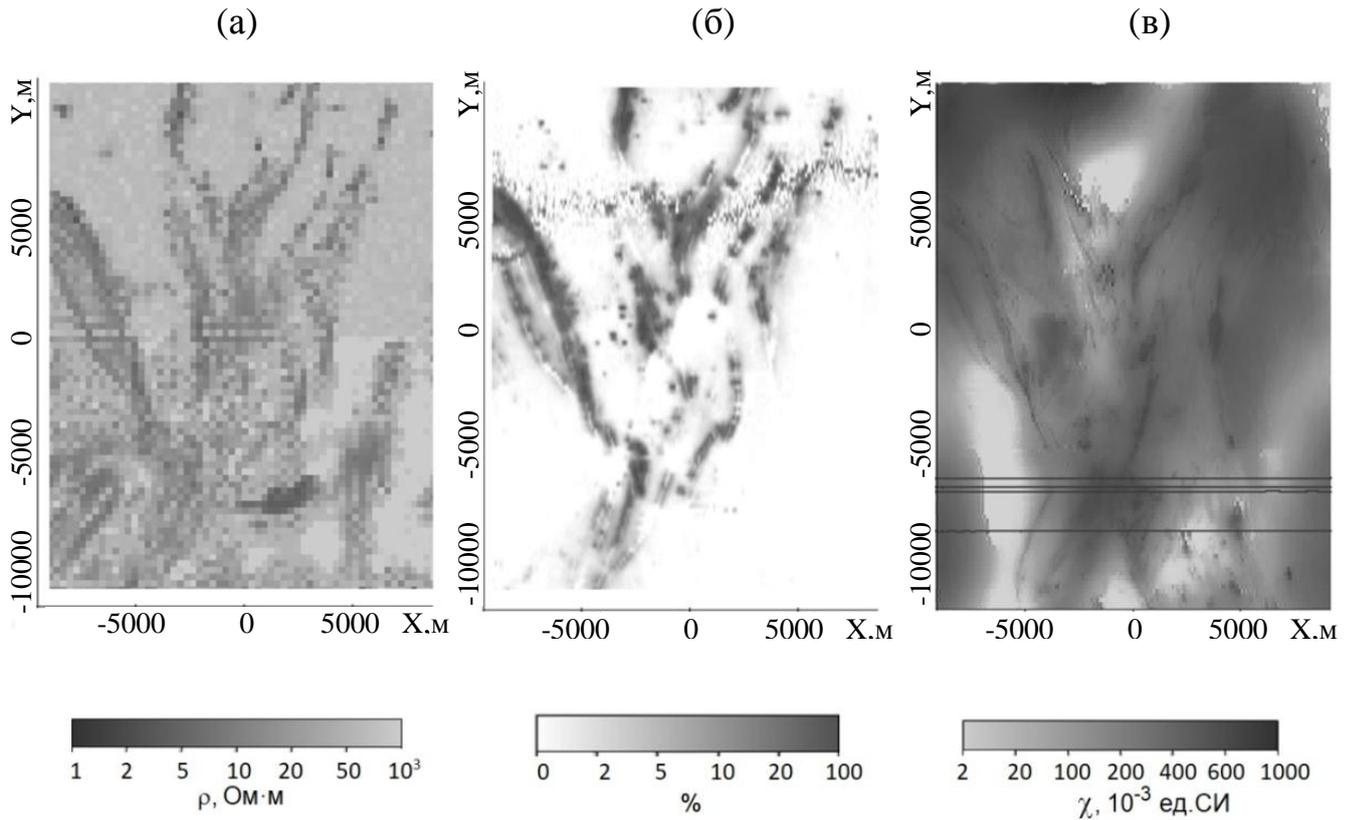


Рисунок 2.10 – Результаты предварительного этапа совместной 3D-интерпретации: предварительное распределение сопротивления в перекрывающемся слое (а), невязки в ЭМ данных на времени 767 мкс (б) и предварительное распределение магнитной восприимчивости (в)

Далее рассмотрим южную часть участка (для $Y \leq -4000$ м).

На рис. 2.11 приведены измеренные и расчетные (полученные после предварительного этапа обработки ЭМ данных) графики сигналов ЭМ съемки вдоль четырех профилей, соответствующих координатам $Y = -6400$ м, -6750 м, -6950 м, -8750 м, положение которых показано на рис. 2.10в. Два профиля $Y = -6750$ м и $Y = -6950$ м пересекают основное тело месторождения Bigstone Lake [47,74]. Сигналы представлены на трех временных каналах: 86 мкс, 213 мкс и 767 мкс.

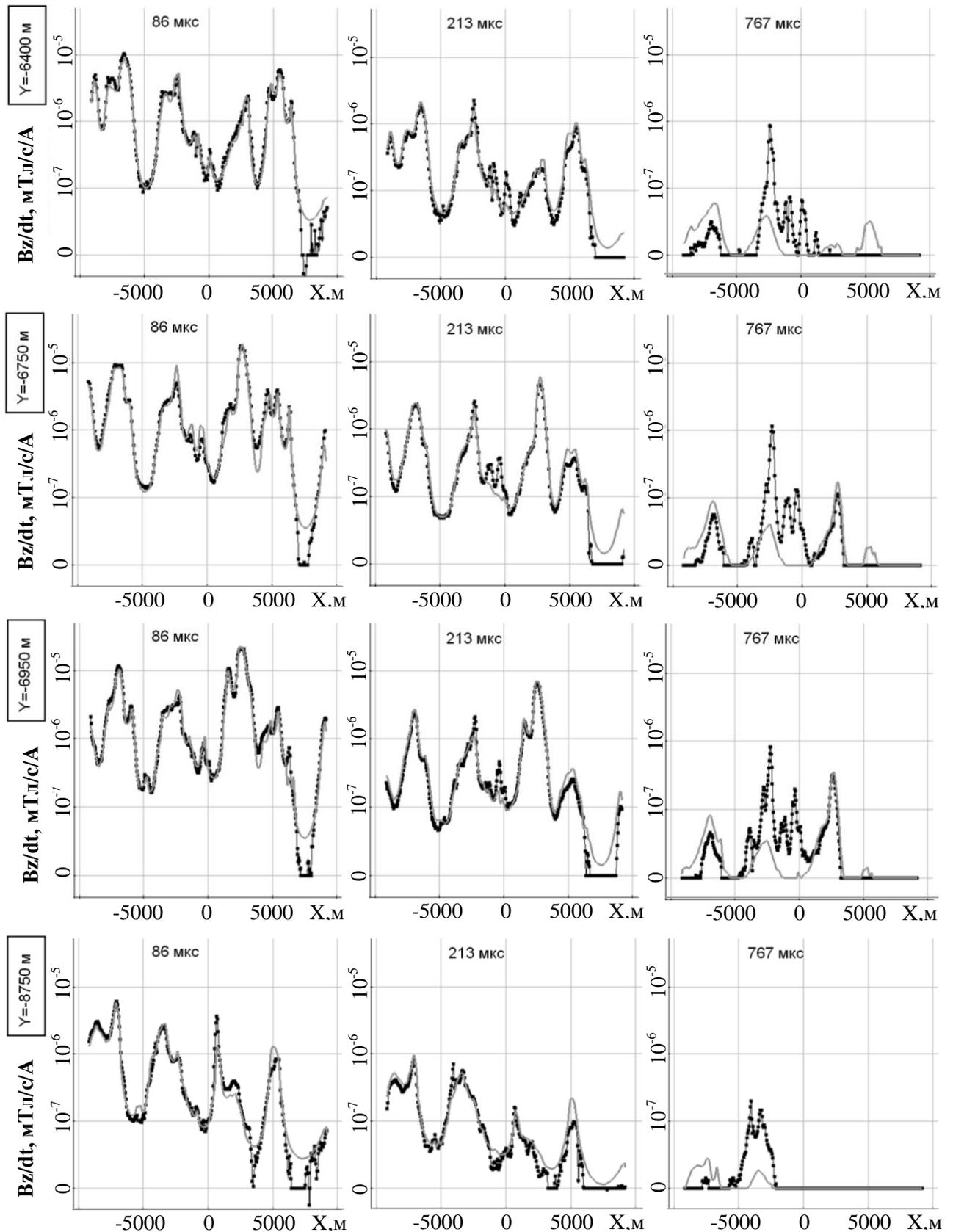


Рисунок 2.11 – Графики измеренных (черные линии с метками) и расчетных (серые линии без меток) сигналов ЭМ съемки вдоль четырех профилей на трех временных каналах (расчетные графики получены после предварительного этапа инверсии, т.е. после подбора верхней части разреза)

Из представленных результатов видно, что измеренные и расчетные сигналы хорошо совпадают на первом и преимущественно хорошо на втором из рассматриваемых трех временных каналах. Исключение составляет только крайняя правая часть профилей при x примерно 6000-8000 м, где измеренные сигналы имеют очень низкие значения (заметим, что пороговое значение $\bar{\varepsilon}^{EM}$ весов было задано равным $5 \cdot 10^{-8}$) и существенно ниже расчетных сигналов. Эта ситуация может быть вызвана влиянием вызванной поляризации [5,59,64,80,97,105,110] или ошибкой в данных (например, из-за собственных процессов), что невозможно разделить из-за низкого сигнала.

На третьем из рассматриваемых (среднем) и особенно на поздних временных каналах на отдельных участках профилей появляются существенные отклонения: измеренные сигналы значительно превышают расчетные, что свидетельствует о наличии более глубокозалегающих проводящих структур. Расположение этих зон в плане хорошо видно по распределению невязки на времени 767 мкс, показанному на рис. 2.10б. На следующем этапе в этих зонах будут восстановлены более глубокие локальные проводящие структуры. Заметим, что есть некоторые участки, где на поздних временах расчетные сигналы превышают измеренные. К ним относятся, например, левые части профилей при $x < -6000$ м. Это также может свидетельствовать о некотором влиянии процессов вызванной поляризации в перекрывающих (приповерхностных) породах, но данный вопрос находится за рамками данного исследования.

На рис. 2.12 представлены графики измеренных и расчетных сигналов магнитной съемки вдоль четырех профилей, полученные в ходе предварительной инверсии (в блочной структуре).

Из рис. 2.12 видно следующее. Несмотря на то, что в модели для инверсии была задана только блочная структура на глубине 50-100 м, измеренные и расчетные данные достаточно хорошо совпадают, что подтверждает результаты исследований на синтетических данных, представленных в разделах 2.1, 2.3. В распределении магнитной восприимчивости, представленном на рис. 2.10в, видны

только некоторые общие особенности поведения этой характеристики и судить о целевых объектах по этим результатам довольно сложно.

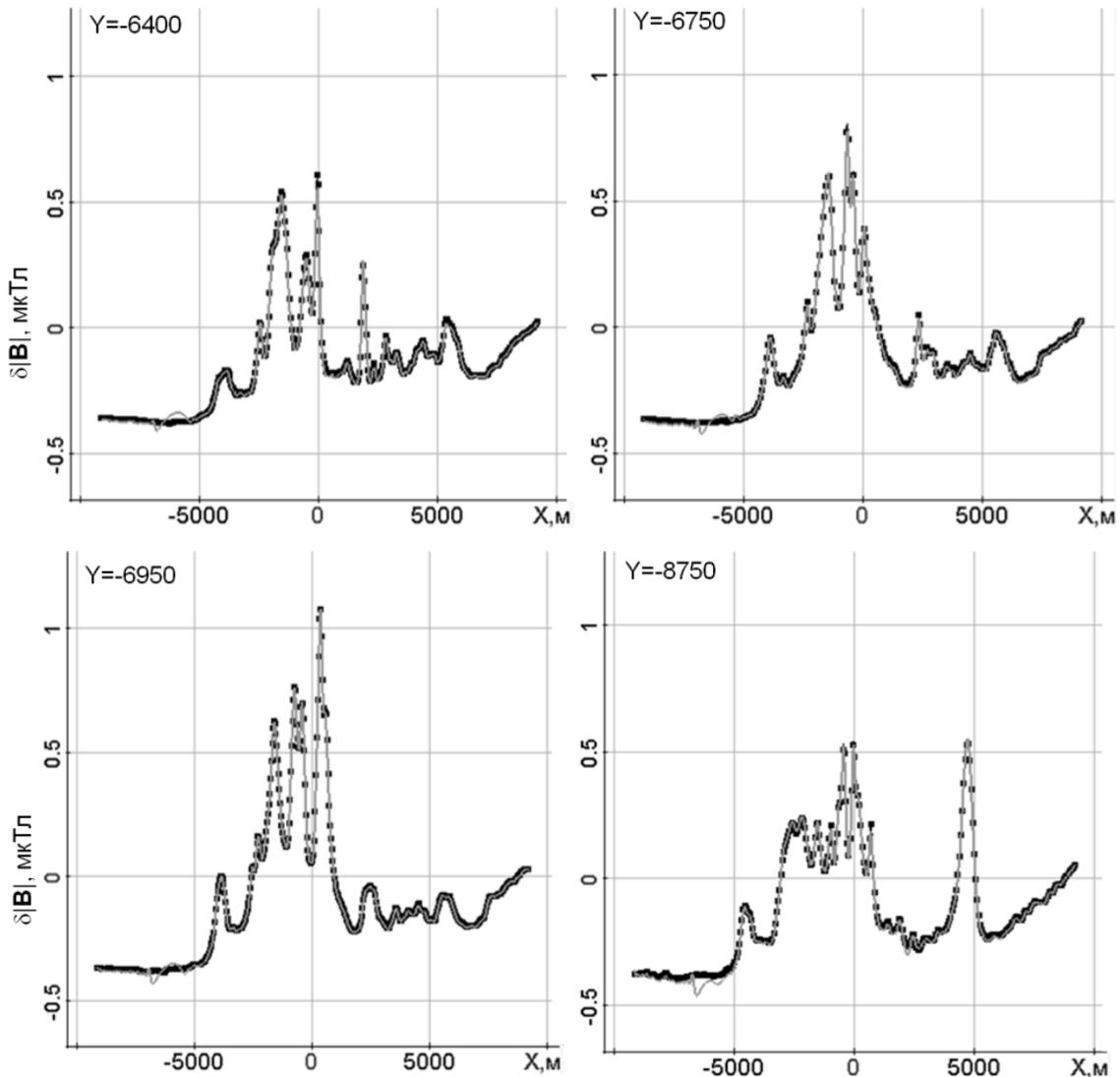


Рисунок 2.12 – Графики измеренных (черные линии с метками) и расчетных (серые линии без меток) сигналов магнитной съемки, полученных в ходе предварительной инверсии (в блочной структуре), вдоль четырех профилей

Результаты 3D-инверсии данных ЭМ съемки. Для проведения основного этапа 3D-инверсии данных ЭМ съемки в областях высокой невязки (построенной по ЭМ данным) было задано начальное положение локальных блочных структур. Эти структуры показаны на рис. 2.13.

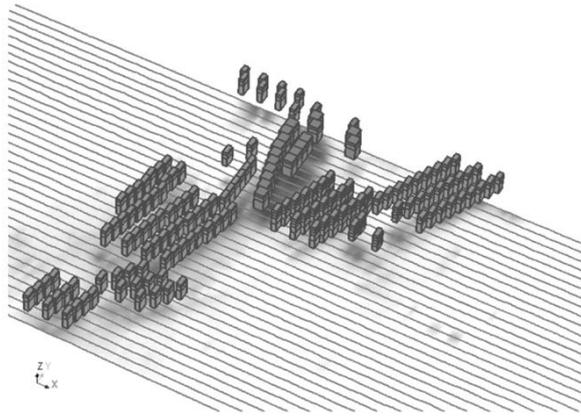


Рисунок 2.13 – Стартовое состояние локальных блочных структур для основного этапа 3D-инверсии данных ЭМ съемки

Этот этап инверсии был разбит еще на два подэтапа. На первом подэтапе зафиксировали размер блоков по X , позволяя самим блокам перемещаться по оси X , а границам блоков двигаться по оси Z (вдоль оси Y блоки не смещались и были поставлены так, чтобы проекция соответствующего профиля пересекала их центр), а на втором подэтапе «левая» и «правая» координаты блоков по X уточнялись независимо друг от друга. Удельное электрическое сопротивление блоков уточнялось на обоих подэтапах. Также в геофизическую модель была включена блочная структура, описывающая сопротивление перекрывающих пород (полученная на предварительном этапе и показанная на рис. 2.10а), причем значения сопротивления в блоках, расположенных над локальными блочными структурами и на некотором расстоянии от них, были включены в вектор искомых (в процессе 3D-инверсии) параметров.

На рис. 2.14 представлены блочные структуры, которые были получены в результате этого этапа 3D-инверсии данных ЭМ съемки. При этом на рис. 2.14а показаны только блоки, у которых полученное сопротивление (ρ) меньше 15 Ом·м. Также на рис. 2.14а отмечены структуры **M1**, **M2** и **M3**. На рис. 2.14б приведен укрупненный вид блочной структуры **M1** и части структуры **M2**. Блочная структура **M1** соответствует основному телу месторождения Bigstone Lake [47,74], где пробурено 6 скважин, по которым были выполнены измерения магнитной восприимчивости и проведен литологический анализ [47,74] (траектории скважин и их номера показаны на рис. 2.14б). Забегая вперед

отметим, что структуры **M2** и **M3** были выбраны для анализа как пример магнитной и немагнитной локальных проводящих структур, выделенных по данным ЭМ съемки.

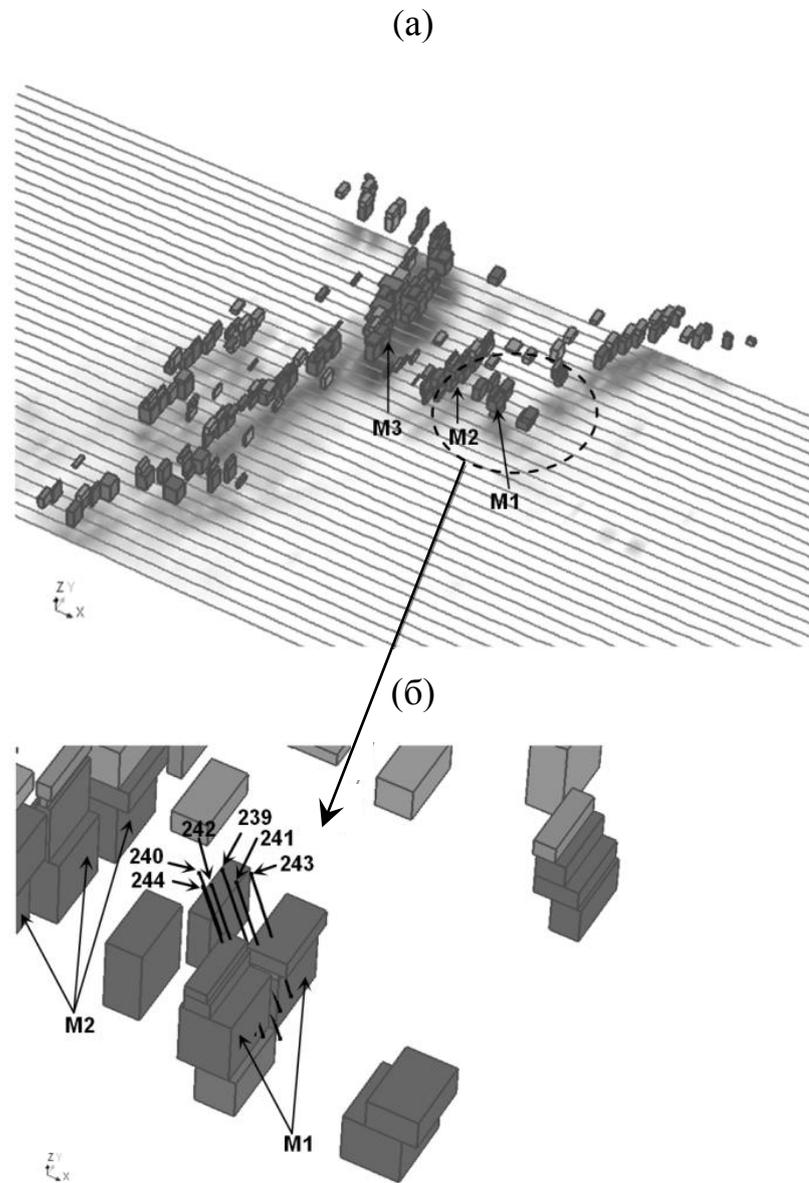


Рисунок 2.14 – Блочные структуры, полученные в результате 3D-инверсии данных ЭМ съемки: (а) блоки с $\rho < 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; (б) укрупненный вид блочных структур **M1** и **M2**; вертикальными линиями и номерами обозначены скважины, пробуренные на месторождении Bigstone Lake [47,74]

На рис. 2.15 приведены графики измеренных и расчетных сигналов ЭМ съемки, которые получены на этапе 3D-инверсии с определением геометрии и свойств локальных структур, вдоль четырех профилей, соответствующих координатам $Y=-6400$ м, -6750 м, -6950 м, -8750 м. Два профиля $Y=-6750$ м и $Y=-6950$ м пересекают основное тело месторождения Bigstone Lake [47,74]. Сигналы представлены на двух временных каналах: 213 мкс и 767 мкс. На графиках отмечены зоны, которые соответствуют проекциям блочных структур **M1**, **M2** и **M3** на профили съемки. Видно, что отличия, которые были между измеренными и расчетными сигналами на поздних временах после первого этапа (см. рис. 2.11), практически исчезли, при этом блочная структура **M2** проявляется преимущественно двумя максимумами.

На рис. 2.16 приведены графики зависимости измеренных и расчетных сигналов ЭМ съемки от времени в некоторых точках профилей, пересекающих проекцию блочной структуры **M1**. Видно, что, несмотря на сильные пространственно-временные изменения, расчетные сигналы достаточно хорошо соответствуют измеренным.

Анализ данных магнитной съемки. Перейдем к заключительному этапу совместной 3D-интерпретации, где оценим магнитные свойства выделенных по данным ЭМ съемки высокопроводящих локальных структур.

Аналогично тому, как это было сделано на синтетических данных (см. рис. 2.8 – 2.9 и описание к ним), в магнитную модель, показанную на рис. 2.10в, поочередно добавляя локальные структуры, представленные на рис. 2.14а, и фиксируя в них магнитную восприимчивость, будем повторять 3D-инверсию данных магнитной съемки в блочной структуре, расположенной на глубине 50-100 м.

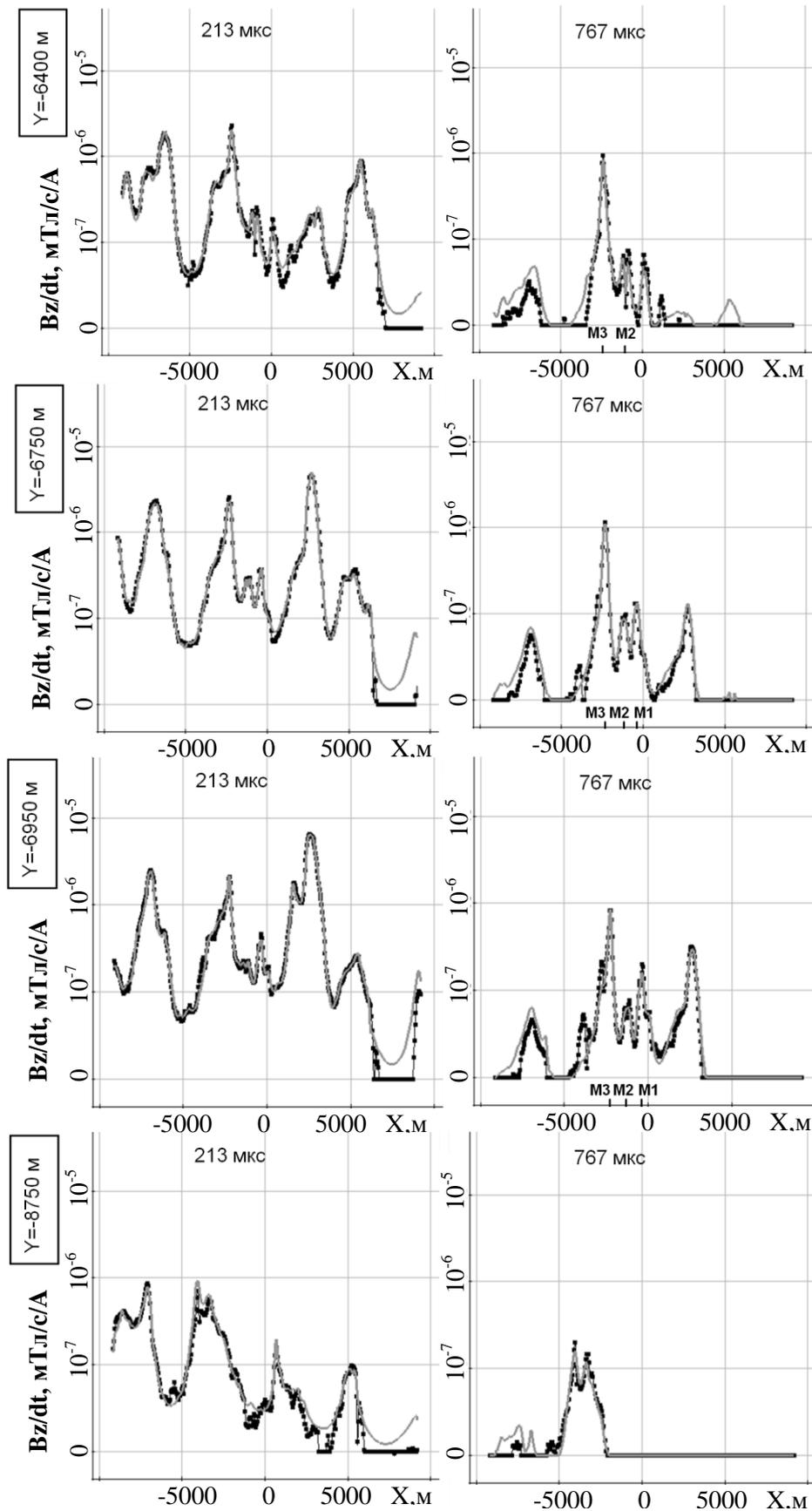


Рисунок 2.15 – Графики измеренных (черные линии) и расчетных (серые линии) сигналов ЭМ съемки вдоль четырех профилей на двух временных каналах, полученные в результате этапа 3D-инверсии данных ЭМ съемки с определением геометрии и свойств локальных структур

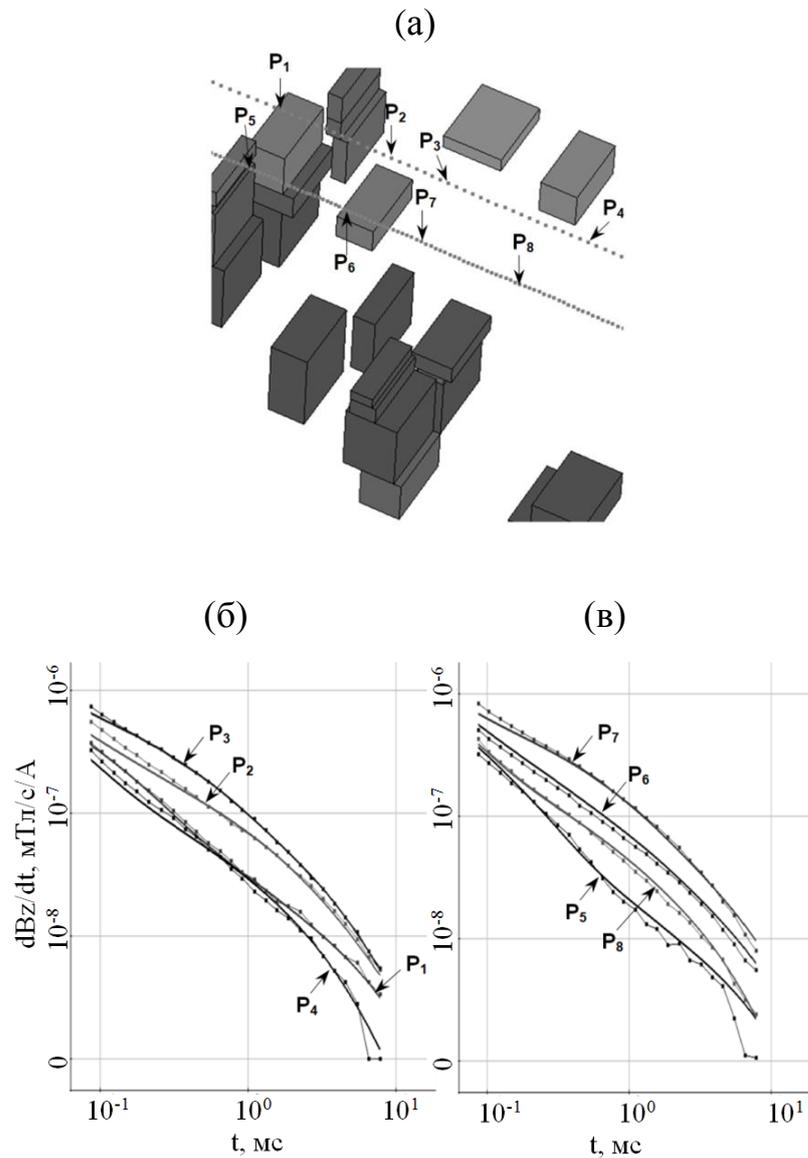


Рисунок 2.16 – Графики измеренных (с метками) и расчетных (без меток) сигналов ЭМ съемки в некоторых точках (расположенных над и сбоку от локальной блочной структуры) профилей, проходящих над основным телом месторождения Bigstone Lake [47,74]

На рис. 2.17 – 2.19 приведены результаты 3D-инверсий в виде графиков практических и расчетных сигналов магнитного поля при помещении в модель локальных структур **M1**, **M2** и **M3** и фиксации в них различных значений магнитной восприимчивости. Для сравнения на этих рисунках представлен также график для стартовой модели, которая формировалась как результаты предварительной 3D-инверсии данных магнитной съемки (рис. 2.10в) с добавленной соответствующей глубинной структурой с фиксированным значением

χ . Пунктиром на этих графиках отмечена проекция центра структуры на соответствующий профиль съемки.

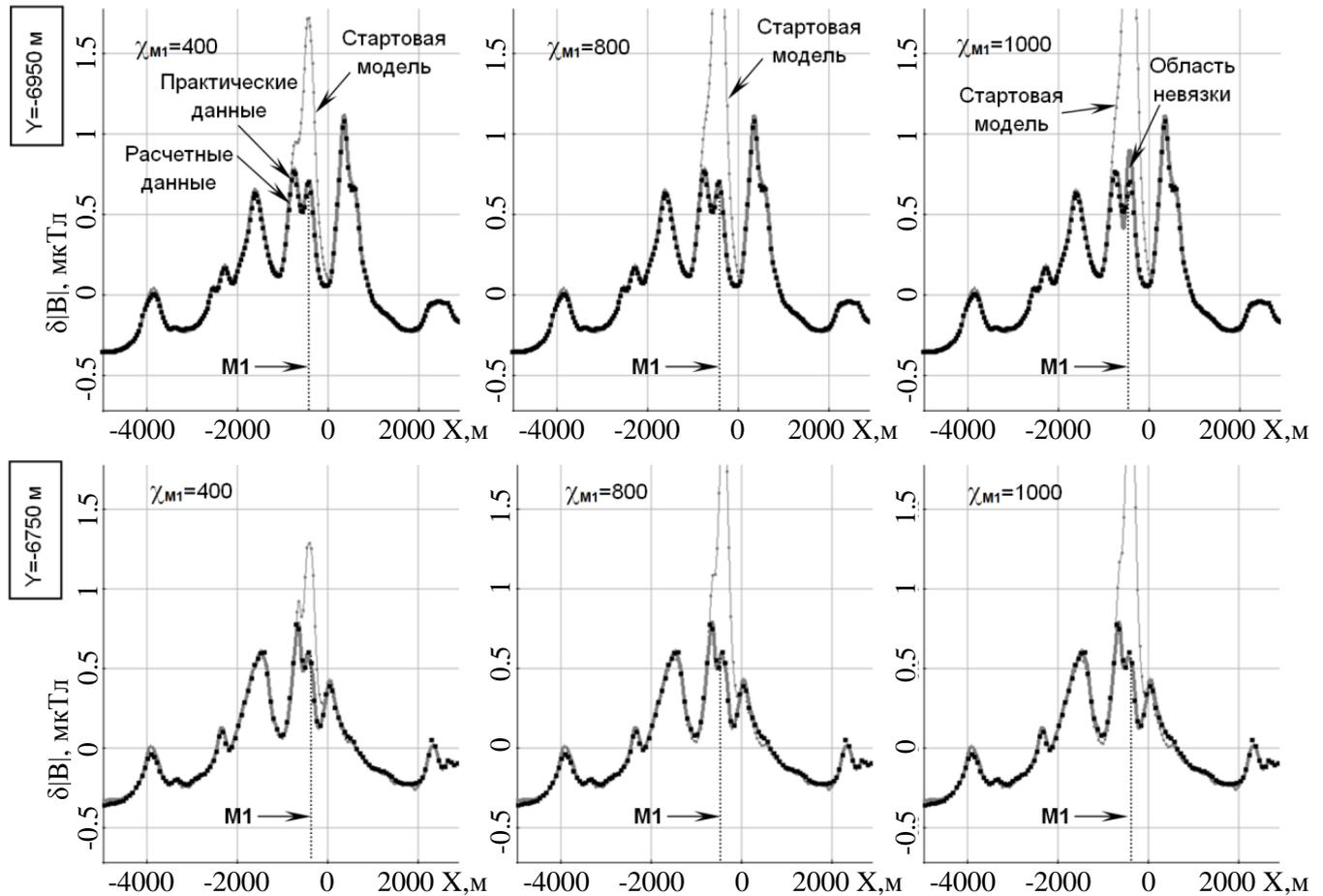


Рисунок 2.17 – Графики расчетных сигналов (светлые линии без меток) для модели, полученной в результате 3D-инверсии данных магнитной съемки при помещении в модель магнитной структуры **M1** с различными значениями χ (10^{-3} ед.СИ), и графики практических сигналов (черные точки) вдоль профилей, пересекающих проекцию этой структуры. Отмечены области невязки между измеренными и расчетными данными

Из результатов, представленных на рис. 2.17 – 2.18, видно, что магнитная восприимчивость структур **M1** и **M2** может достигать 800 (10^{-3} ед.СИ). При дальнейшем повышении значений χ в этих структурах появляется невязка между расчетными (полученными в результате 3D-инверсии) и практическими данными.

Результаты, представленные на рис. 2.19, свидетельствуют о том, что высокопроводящая структура **M3** не характеризуется столь высокими значениями

магнитной восприимчивости, поскольку даже при значении $\chi = 400$ (10^{-3} ед.СИ) наблюдается достаточно существенная невязка.

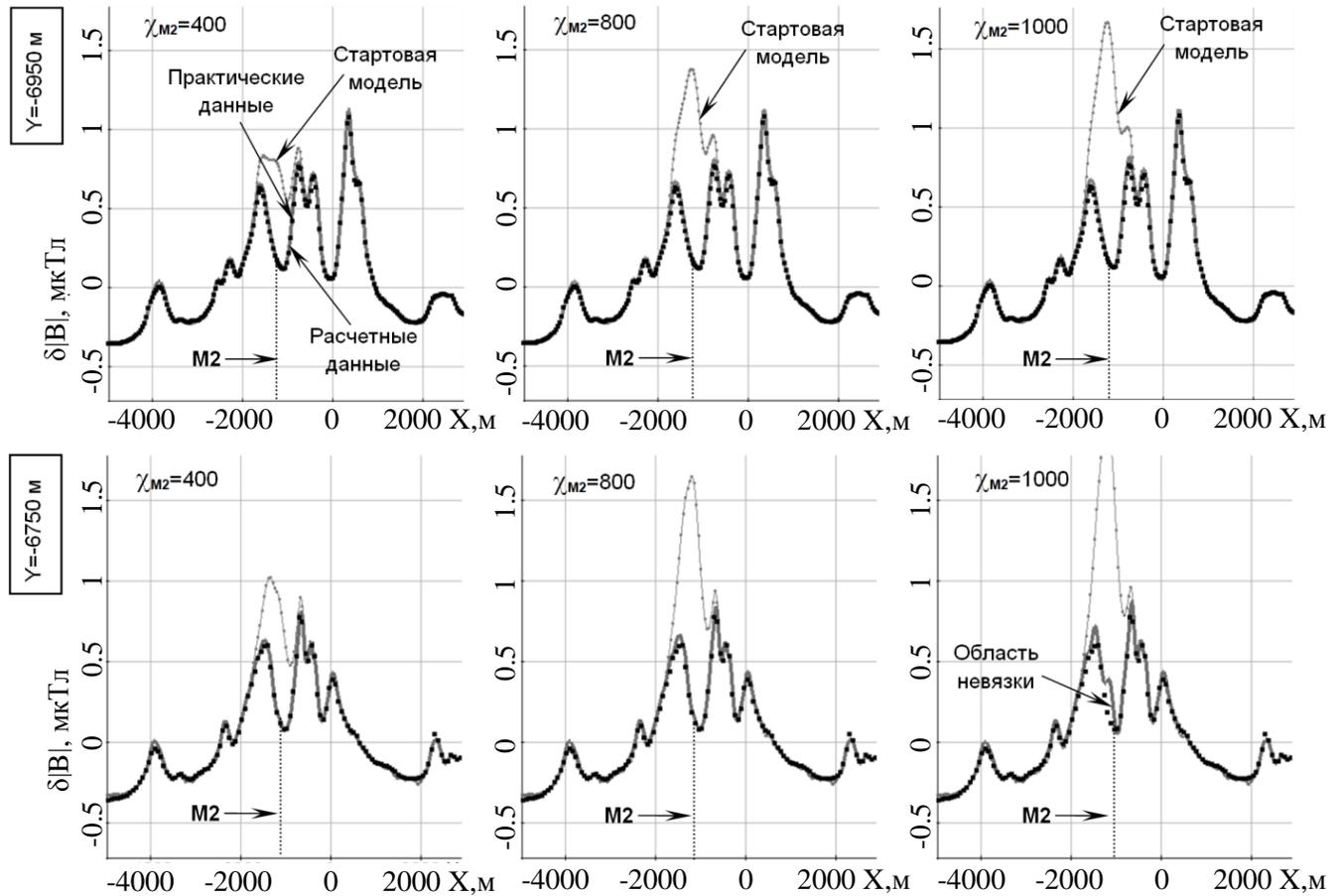


Рисунок 2.18 – Графики расчетных сигналов (светлые линии без меток) для модели, полученной в результате 3D-инверсии данных магнитной съемки при помещении в модель магнитной структуры **M2** с различными значениями χ (10^{-3} ед.СИ), и графики практических сигналов (черные точки) вдоль профилей, пересекающих проекцию этой структуры. Отмечены области невязки между измеренными и расчетными данными

Таким образом, предложенный подход позволяет предварительно классифицировать выделенные по данным ЭМ съемки локальные высокопроводящие структуры по возможному наличию в них повышенных значений магнитной восприимчивости. Важно также отметить, что проекция локальной структуры **M2** на профиль съемки соответствует минимуму в сигналах магнитной съемки и при стандартной обработке (по уровню измеренных сигналов) эта область никогда не будет отнесена к перспективной (по критерию

повышенных значений магнитной восприимчивости). Предложенный же подход с использованием процедуры 3D-инверсии позволяет получить гораздо более объективные оценки физических свойств. Отметим, что время выполнения таких инверсий составляет несколько минут.

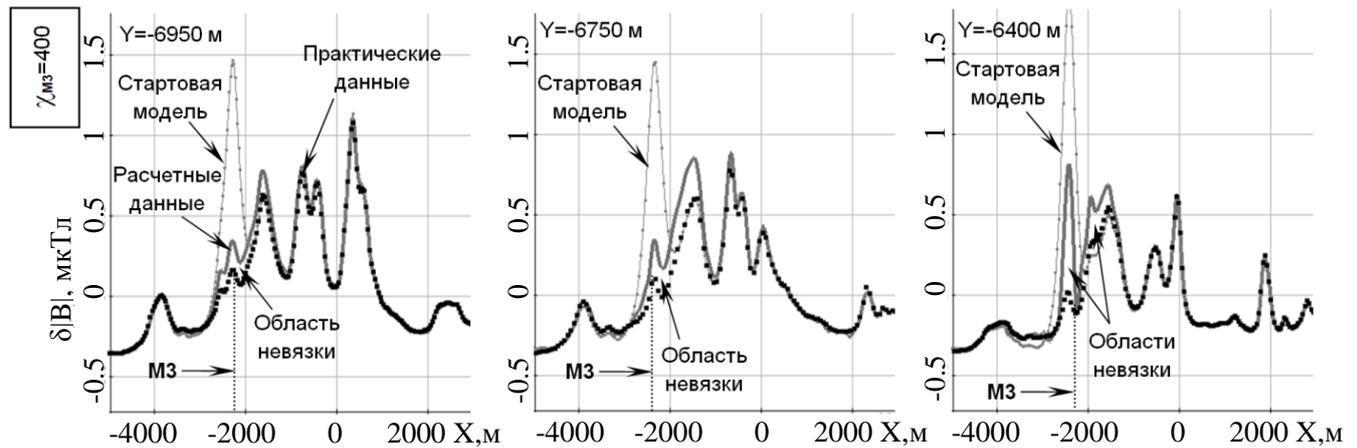


Рисунок 2.19 – Графики расчетных сигналов (светлые линии без меток) для модели, полученной в результате 3D-инверсии данных магнитной съемки при помещении в модель магнитной структуры **M3** с магнитной восприимчивостью $\chi=400$ (10^{-3} ед.СИ), и графики практических сигналов (черные точки) вдоль профилей, пересекающих проекцию этой структуры. Отмечены области невязки между измеренными и расчетными данными

Сопоставление результатов совместной 3D-интерпретации с данными бурения. Приведем результаты сопоставления данных магнитной восприимчивости, измеренных по скважинам, и литологии, представленных в [47,74], с результатами совместной 3D-интерпретации, выданных вдоль траекторий скважин, показанных на рис. 2.14. Это сопоставление представлено на рис. 2.20 и рис. 2.21. Как видно из представленных результатов, зоны повышенной электропроводности и магнитной восприимчивости хорошо соответствуют выделенным по скважинам богатому цинком массивному сульфидному горизонту (1) и нижележащей богатой медью зоне (2).

Таким образом, предложенный подход к совместной 3D-инверсии позволяет не только выделить перспективные зоны, но и довольно корректно спланировать траектории бурения скважин.

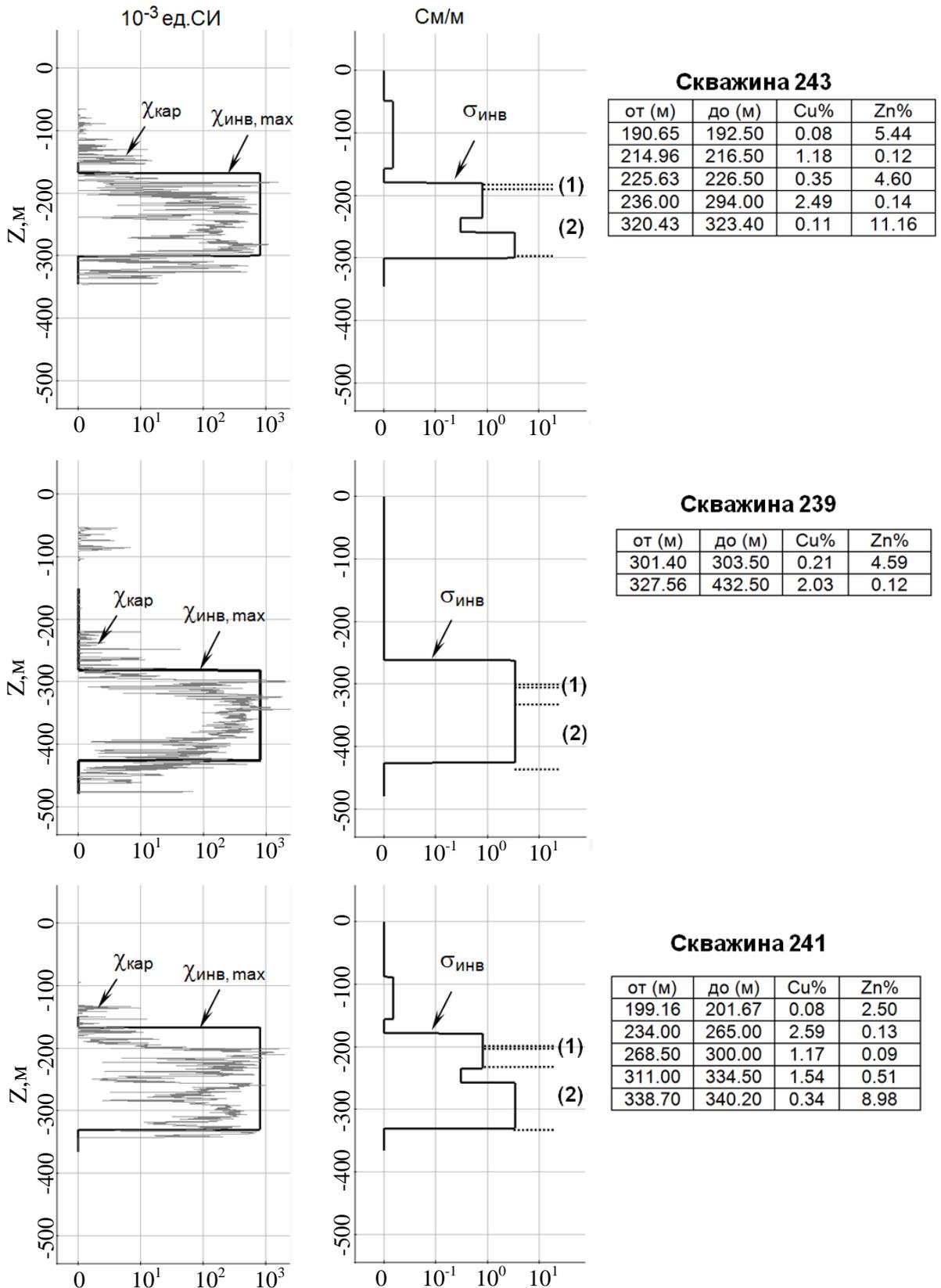


Рисунок 2.20 – Сравнение данных магнитной восприимчивости ($\chi_{кар}$) и литологии по скважинам 243, 239 и 241 ([47,74]) с результатами совместной 3D-интерпретации ($\chi_{инв,мах}$ и $\sigma_{инв}$); значения $\chi_{инв,мах}$ и $\sigma_{инв}$ выданы вдоль траекторий скважин, показанных на рис. 2.14. Обозначения: **(1)** – богатый цинком массивный сульфидный горизонт, **(2)** – богатая медью зона

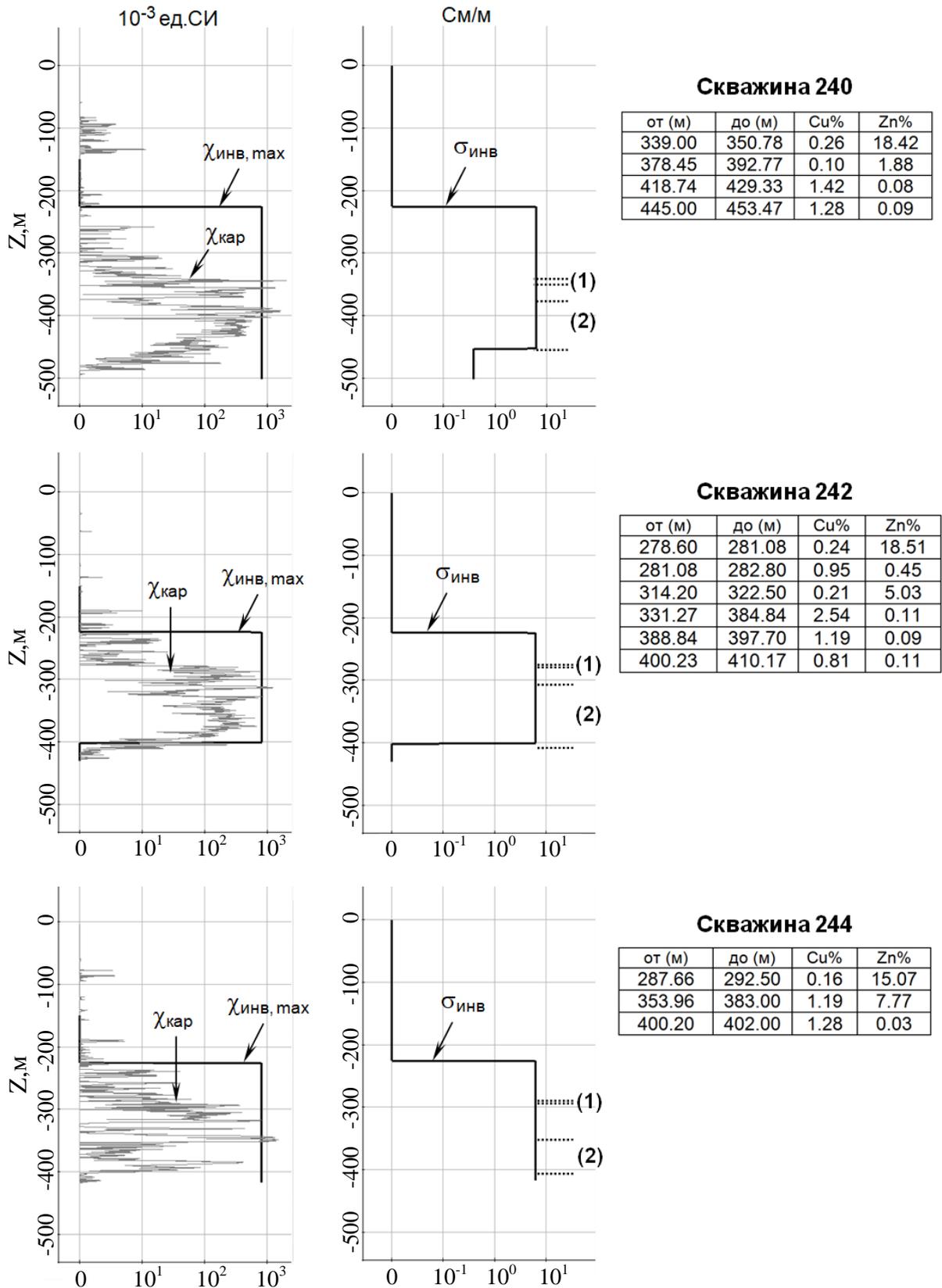


Рисунок 2.21 – Сравнение данных магнитной восприимчивости ($\chi_{\text{кар}}$) и литологии по скважинам 240, 242 и 244 ([47,74]) с результатами мультифизической 3D-инверсии ($\chi_{\text{инв,мах}}$ и $\sigma_{\text{инв}}$); значения $\chi_{\text{инв,мах}}$ и $\sigma_{\text{инв}}$ выданы вдоль траекторий скважин, показанных на рис. 2.14. Обозначения: (1) – богатый цинком массивный сульфидный горизонт, (2) – богатая медью зона

Выводы по главе 2

1. Проведены исследования эквивалентности при определении глубины тел с повышенными магнитными свойствами. Показано, что если локальные тела с высокими магнитными свойствами расположены в слабомагнитной вмещающей среде, то 3D-инверсия позволяет достаточно точно определить как их форму в плане, так и положение по глубине. Если верхняя часть вмещающей среды является неоднородной по магнитным свойствам, т.е. магнитные характеристики не могут быть восстановлены в локальных структурах, а должны быть восстановлены сразу на всей большой площади, то относительно глубокие (200-500 м) магнитные аномалии могут быть (эквивалентно) «восстановлены» неоднородностями верхнего слоя (например, 50-100 м) с хорошим уровнем совпадения расчетных и наблюдаемых данных даже для двух серий съемок на разных высотах. С другой стороны, локальные приповерхностные тела с повышенными магнитными свойствами не могут быть «восстановлены» неоднородностями на глубине.

2. На основе результатов исследования эквивалентности при определении глубины тел с повышенными магнитными свойствами и полученных ранее положительных результатов восстановления свойств и геометрии локальных проводящих объектов по данным ЭМ съемки [94] разработан метод совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок. Он основан на 3D-моделировании и 3D-инверсии и позволяет оценивать сверху магнитную восприимчивость для локальных проводящих структур, расположенных под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями.

3. Работоспособность предложенного подхода показана как на синтетических данных, так и на практических данных аэрогеофизических исследований, проведенных на площади Creighton (Канада) при поиске полиметаллических руд. Качество реконструкции морфологии и физических свойств локальных структур подтверждено сравнением с результатами бурения набора наклонных скважин.

ГЛАВА 3 МЕТОДЫ ПРОВЕРКИ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ПОСТРОЕННЫЕ НА ОСНОВЕ ПРОЦЕДУР КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ 3D-ИНВЕРСИЙ

Анализ эквивалентности получаемых в результате решения обратных задач геофизических моделей должен являться важной составляющей процесса интерпретации геофизических данных. Фактически, на основе его результатов должны быть установлены пределы неопределенности физических свойств и границ целевых геологических тел, а также сделан вывод о влиянии этой неопределенности на решение поставленной геологической задачи: признание тела целевым, ошибка в траектории бурения скважины, положения границы нефтенасыщенной зоны и т.д.

При этом анализ эквивалентности важен как на этапе интерпретации геофизических данных с целью повышения надежности геофизического прогноза, так и на этапе проектирования работ с целью обоснования возможностей рассматриваемой технологии для поставленной геологической задачи.

В литературе достаточно широко представлены методы анализа эквивалентности геоэлектрических моделей для оценки результатов 1D-инверсий [22,39,40,48,53]. Но для 3D-моделей эти аспекты практически не рассматриваются, а предлагаемые методы оценки эквивалентности 1D-моделей к ним слабо применимы из-за значительно большего числа параметров (это несколько тысяч параметров) и из-за того, что возникают другие типы эквивалентности (из-за ограниченных размеров объектов по латерали) (см., например, [23]).

В данной работе предлагается проводить оценку эквивалентности на основе следующих принципов:

1) изменение структуры стартовой модели для целевых тел с повторением локальных 3D-инверсий и локальной оценкой получаемых невязок;

2) изменение и фиксация отдельных параметров целевых тел, полученных в результате 3D-инверсии, с повторением локальных 3D-инверсий при этих условиях и локальной оценкой получаемых невязок.

Конкретная последовательность действий максимально связывается с решаемой геологической задачей.

Ниже, в разделе 3.1 будет представлена последовательность действий и результаты анализа эквивалентности для 3D-модели, рассмотренной в предыдущей главе (в п. 2.4) и полученной в результате 3D-инверсии практических данных аэроэлектроразведки на площади Creighton (Канада). В разделе 3.2 будет рассмотрена новая перспективная технология «Звезда» [101] с обоснованием ее преимуществ перед существующими технологиями и анализом эквивалентности при восстановлении границ нефтегазонасыщенной зоны.

3.1 Анализ эквивалентности 3D-модели, полученной в результате 3D-инверсии данных аэроэлектроразведки

Как уже говорилось выше, оценку эквивалентности желательно максимально связать с решаемой геологической задачей. В данном случае потенциально целевыми объектами являются проводящие тела, залегающие под неоднородным перекрывающим приповерхностным слоем. Одним из таких объектов, выделенных в результате 3D-инверсии, является структура **M1**, которая составлена из нескольких блоков (см. рис. 2.14б).

Анализ эквивалентности проводится для этой структуры при фиксированных параметрах остальных локальных структур и блоков верхнего слоя.

Эквивалентность получаемых моделей оценивается по критерию изменения $\delta\Phi$ функционала ошибки Φ (взвешенных невязок между измеренными и расчетными данными):

$$\delta\Phi = \frac{\Phi^C - \Phi^R}{\Phi^R} \cdot 100\%, \quad \Phi(\mathbf{b}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L (\omega_{il} \delta\varepsilon_{il}(\mathbf{b}))^2}{N \cdot L}}, \quad (48)$$

где Φ^R – значение функционала ошибки для модели, полученной в результате 3D-инверсии, Φ^C – значение функционала ошибки для моделей, получаемых при оценке эквивалентности, N – количество положений аэросистемы.

Для проведения представленных ниже исследований используются 118 положений аэросистемы, расположенных непосредственно над и несколько сбоку от структуры, с 4-х полетных линий (профилей), две из которых расположены над структурой и две по бокам от структуры (расстояние между линиями составляет 200 м). Значение Φ для полученной в результате 3D-инверсии модели и этого набора приемников составило $\Phi^R = 0.189$.

Вначале анализируется возможность получения эквивалентных моделей при использовании других стартовых моделей, содержащих меньшее число блоков. Использование меньшего числа блоков снижает количество эквивалентных моделей, но может ухудшать точность восстановления геометрии тела и, как следствие, увеличивать функционал ошибки. Рассматриваются три блочные структуры, показанные в верхнем ряду рис. 3.1. Структуры состоят из двух частей. Части этих структур с меньшими координатами по оси y будут называться «ближними» (так как на рис. 3.1 эти части расположены ближе к наблюдателю), а их части с большими координатами по оси y – «дальними» (на рис. 3.1 эти части расположены дальше от наблюдателя). В нижнем ряду рис. 3.1 показаны результаты 3D-инверсий для этих трех структур, обозначенные нами как M1_C1, M1_C2, M1_C3. Значение Φ для полученной в результате 3D-инверсии модели и этого набора приемников составило $\Phi^R = 0.189$. Значение функционала ошибки для структуры M1_C2 составило $\Phi^C = 0.195$ ($\delta\Phi = 3.1\%$), а для структуры M1_C3 – $\Phi^C = 0.227$ ($\delta\Phi = 20.1\%$).

Полагается, что область эквивалентности определяется изменением функционала ошибки $\delta\Phi$ в пределах 5%. Таким образом, модель M1_C2, представленную на рис. 3.1б, можно считать эквивалентной, а модель M1_C3 на

рис. 3.1в – нет. При этом полученные эквивалентные модели M1_C1 и M1_C2 достаточно хорошо совпадают (по крайней мере, по критерию проектирования траектории скважин). Так, «ближняя» часть структур включает в себя две основные составляющие. Первая составляющая имеет сопротивление первые единицы Ом·м с верхней кромкой на глубине 140 м и размером 70-80 м по оси x (в модели M1_C1 на рис. 3.1а она представлена двумя близкими по размеру в плане и сопротивлению блоками B2, B3, а в модели M1_C2 ей соответствует блок B2). Второй составляющей соответствует блок B4 в модели M1_C1 и блок B3 в модели M1_C2 с сопротивлением первые десятые доли Ом·м, верхней кромкой на глубине 220 м и размером 140-150 м по x. «Дальняя» часть структуры также является составной и имеет размер по x примерно 90-110 м. Верхняя кромка этой части структуры расположена на глубине 160-170 м, а ее сопротивление меняется с глубиной от первых единиц до десятых долей Ом·м.

Далее анализируются отдельные параметры блоков структуры M1_C1 и оценивается возможность получения эквивалентных моделей. Для моделей, у которых значения Φ^C будут выше, чем 0.189 (полученное для модели M1_C1), будет приводиться только значение $\delta\Phi$.

Блоки B1, B6. Они не представляют интереса с точки зрения целевых объектов, но их исключение может повлиять на параметры блоков, залегающих ниже. Исключаются блоки B1, B6 и подбираются электропроводности и z-координата верхней кромки блоков B2, B7. В результате исключения блоков B1, B6 z-координата верхней кромки блока B2 составила -110 м (вместо -140 м), а блока B7 – -150 м (вместо -160 м). При этом сопротивление блока B2 увеличилось с 2.6 до 4.8 Ом·м, а блока B7 – с 1.24 до 1.4 Ом·м. Так, в результате инверсии была получена модель, у которой $\delta\Phi = 1.6\%$, и эту модель **M1_C1_B2*(σ, z^{up})B3 ÷ B5B7*(σ, z^{up})B8 ÷ B10** можно признать эквивалентной. Здесь и далее символом «*» обозначаются измененные блоки, а в скобках указываются их измененные параметры, среди которых электропроводность

блока σ и его границы по осям x (левая x^l и правая x^r), y (ближняя y^{near} и дальняя y^{far}), z (верхняя z^{up} и нижняя z^{down}).

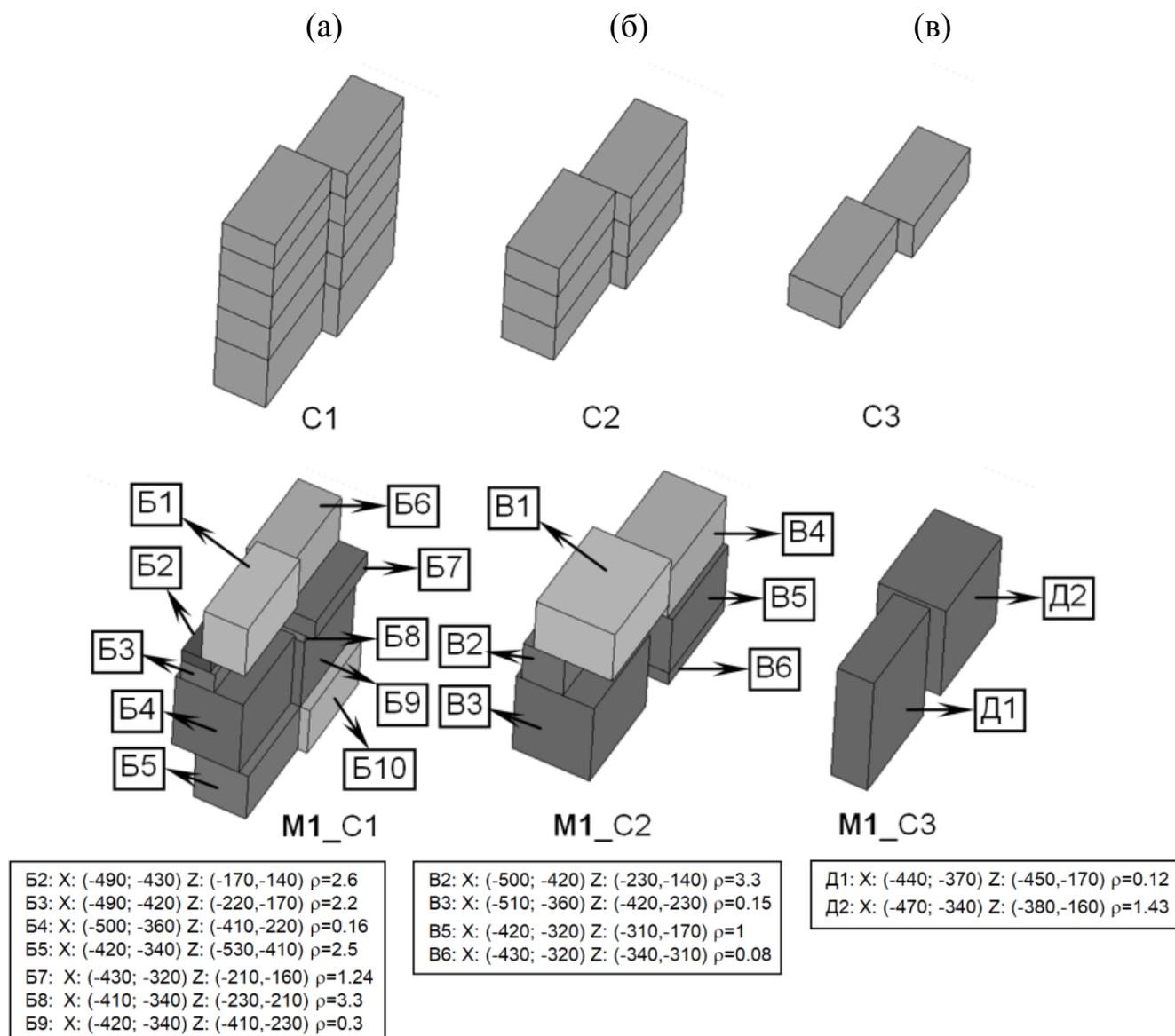


Рисунок 3.1 – Стартовое состояние блочных структур и результат 3D-инверсии

Блоки B5, B10. В результате инверсии со структурой, из которой исключили самые нижние блоки B5, B10, где подбирались электропроводности следующего ряда блоков B4, B9, была подобрана модель, у которой $\delta\Phi$ составляет менее 1%. Поэтому можно считать блоки B5, B10 незначимыми, а полученную модель $M1_C1_B1 \div B3B4^*(\sigma)B6 \div B8B9^*(\sigma)$ – эквивалентной.

Блоки B2, B3. Анализируется эквивалентность для блоков B2, B3. Вначале они исключаются из модели и выполняется инверсия с подбором сопротивления,

а также x - и z - координат блоков Б1, Б4, расположенных выше и ниже блоков Б2, Б3. Для полученной в результате инверсии модели $\delta\Phi=20\%$, что говорит о том, что блоки Б2, Б3 нельзя исключить из модели. Далее анализируется влияние их размера и положения вдоль оси y . Уменьшение дальней y -координаты блоков Б2, Б3 на 50 м с подбором электропроводности и x -координат этих блоков привело к получению модели с $\delta\Phi=4.8\%$, что позволяет считать эту модель эквивалентной. Последовательное увеличение ближней y -координаты с подбором электропроводности и x -координат этих блоков показало, что их размер не менее 80 м вдоль оси y . Таким образом, анализ эквивалентности для блоков Б2, Б3 показал, что их нельзя исключить из модели, но для определения их размера и положения вдоль оси y , перпендикулярной профилям съемки, необходима более плотная сеть профилей. Эта модель обозначена как $M1_C1_B1B2*(\sigma, x^l, x^r, y^{near}, y^{far})B3*(\sigma, x^l, x^r, y^{near}, y^{far})B4 \div B10$.

Блок Б4. Анализируется влияние размера блока Б4 по y через уменьшение размер блока Б4 вдоль y (увеличив ближнюю и уменьшив дальнюю y -координаты на 50 м). В результате инверсии с подбором сопротивления внутри этого блока, x -координат и z -координаты нижней кромки значение $\delta\Phi$ составило 15%. Последовательно увеличивая ближнюю y -координату блока Б4 и повторяя инверсию, получается, что размер блока Б4 вдоль y составляет не менее 80 м. При этом размер блока по x увеличился более, чем в 2 раза, z -координата нижней кромки опустилась на -110 м, а сопротивление немного увеличилось. Эта модель обозначена как $M1_C1_B1 \div B3B4*(\sigma, x^l, x^r, y^{near}, z^{down})B5 \div B10$. Что касается положения верхней и нижней кромок этого блока, то можно заключить, что классической эквивалентности $\sigma * h$ здесь нет: уменьшение размера по z этого блока с соответствующим (подбираемым) смещением вниз блока и увеличением электропроводности приводит к значимому увеличению функционала. В данном случае эквивалентность связана со слабой чувствительностью к нижней границе блока Б4. Проведенные расчеты показывают, что толщина этого блока составляет не менее 70 м (модель

M1_C1_B1 ÷ **B3B4** * (z^{down}) **B5** ÷ **B10**, при $\delta\Phi = 2.4\%$), при этом стоит отметить, что для эквивалентной модели с уменьшенным размером вдоль γ это значение увеличивается.

Блок Б7. Выполняется инверсия с исключением блока Б7, в ходе которой подбираются электропроводности, а также x -координаты блоков Б6, Б8, Б9, расположенных выше и ниже блока Б7. Для полученной в результате инверсии модели $\delta\Phi = 9\%$, что говорит о том, что эта модель не является эквивалентной и этот блок из модели исключить нельзя. Далее анализируется, к чему будет приводить изменение координат блока Б7 вдоль оси γ . Уменьшив размер блока Б7 вдоль γ , увеличив ближнюю и уменьшив дальнюю y -координаты на 50 м, проводится инверсия, в которой будет подбираться сопротивление внутри этого блока и координаты по x . Для полученной в результате инверсии модели $\delta\Phi = 18\%$. К существенному увеличению Φ приводит и только увеличение ближней y -координаты. Последовательно уменьшая размер блока Б7 вдоль γ путем только уменьшения дальней y -координаты и повторяя инверсию, получается, что размер блока Б7 вдоль γ составляет не менее 100 м. При этом размер блока по x увеличился почти в 1.5 раза, а сопротивление уменьшилось почти в пять раз. Данная модель называется **M1_C1_B1** ÷ **B6B7** * ($\sigma, x^l, x^r, y^{far}$) **B8** ÷ **B10**. Увеличение дальней y -координаты не может превышать 50 м ($\delta\Phi = 4.7\%$).

Блок Б8. Выполняется инверсия с исключением блока Б8, в которой подбираются x -координаты границ и сопротивления выше и ниже лежащих блоков Б7, Б9. Полученный в результате $\delta\Phi = 5.2\%$ свидетельствует о том, что совсем исключать этот блок из модели нельзя. Сместив нижнюю границу блока Б7 до координаты нижней границы блока Б8, исключив блок Б8, и выполняется подбор электропроводности в блоке Б7. Было получено значение $\delta\Phi = 1\%$. Сопротивление увеличилось в 1.6 раза. Эта модель — **M1_C1_B1** ÷ **B6B7** * (σ, z^{down}) **B9** ÷ **B10**.

Блок Б9. Исключение Б9 из модели с подбором электропроводности и x -координат вышележащих блоков Б7, Б8 привело к $\delta\Phi = 18\%$. Это говорит о том, что этот блок из модели исключить нельзя. Уменьшение размера блока вдоль γ

путем увеличения ближней и уменьшения дальней y -координат на 50 м и инверсия с подбором электропроводности, x - и z -координат этого блока привели к $\delta\Phi = 6.3\%$. Уменьшение размера вдоль y путем только увеличения ближней y -координаты также приводит к значимому увеличению Φ . Последовательно уменьшая размер блока Б9 вдоль y путем уменьшения дальней y -координаты и повторяя инверсию, получается, что размер блока Б9 вдоль y составляет не менее 100 м, при этом размер блока по x увеличился в 2 раза, z -координата нижней кромки опустилась на 80 м, а сопротивление увеличилось почти в 2 раза. Эта модель – $M1_C1_B1 \div B8B9^*(\sigma, x^l, x^r, y^{far}, z^{down})B10$. Что касается положения верхней и нижней кромок этого блока, то так же, как и для блока Б4, можно заключить, что классической эквивалентности $\sigma * h$ здесь нет. Проведенные расчеты показывают, что толщина этого блока составляет не менее 100 м. Эта модель – $M1_C1_B1 \div B8B9^*(z^{down})B10$.

Стоит отметить, что по критерию проводки скважин полученные эквивалентные модели достаточно близки. На рис. 3.2–3.3 показаны графики электропроводности вдоль скважин **243** (которая пересекает «дальнюю» часть структуры) и **244** (которая пересекает «ближнюю» часть структуры) для полученных выше эквивалентных моделей. Видно, что с геологической точки зрения принципиальной разницы между полученными эквивалентными моделями нет.

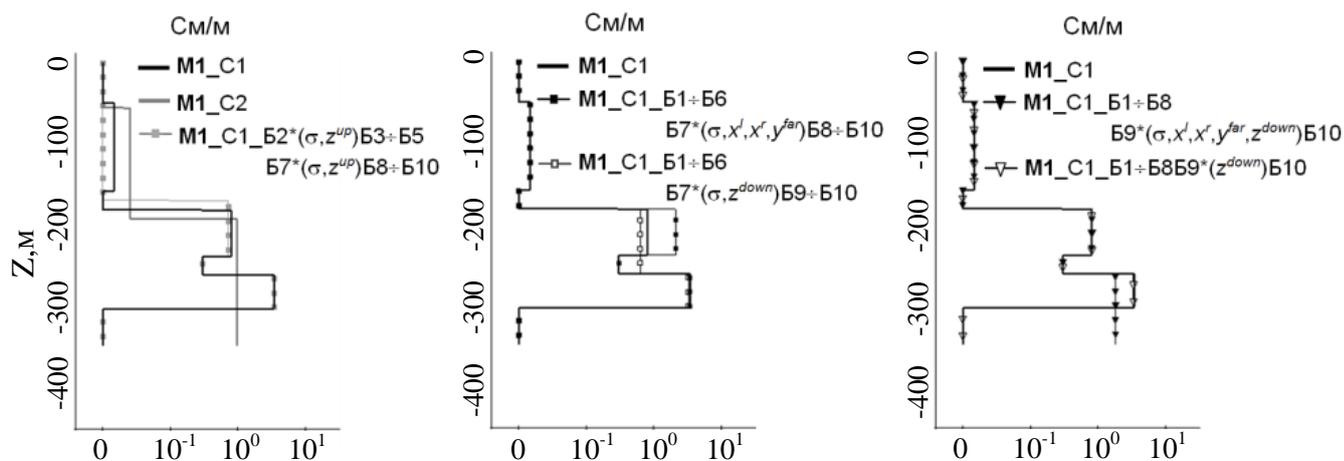


Рисунок 3.2 – Графики электропроводности вдоль скважины **243** для эквивалентных моделей (показаны только те эквивалентные модели, графики которых отличаются друг от друга по этой скважине)

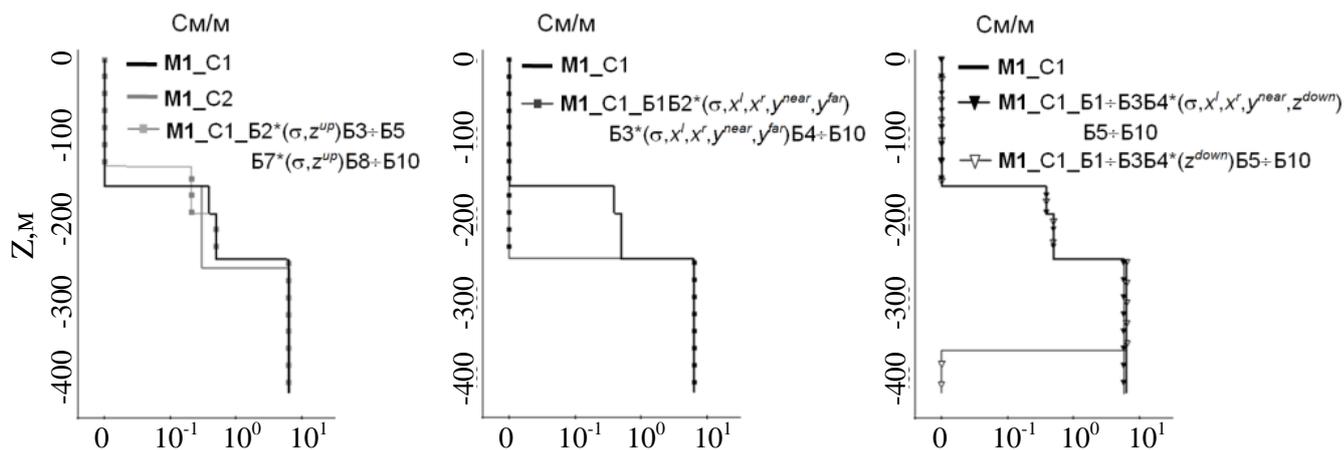


Рисунок 3.3 – Графики электропроводности вдоль скважины **244** для эквивалентных моделей (показаны только те эквивалентные модели, графики которых отличаются друг от друга по этой скважине)

3.2 Обоснование новой высокоразрешающей технологии «Звезда» для морских электроразведочных работ

В работе [77] был рассмотрен круговой электрический диполь, который первоначально использовался как источник для возбуждения электромагнитного поля, радиальная компонента которого измеряется на приемной электрической линии. Однако, такая установка имела достаточно плохое соотношение сигнал/магнитотеллурический шум и поэтому была рассмотрена «обратная» установка с той же самой разрешающей способностью: в ней электромагнитное поле возбуждается горизонтальным электрическим диполем, а измеряется восемью радиально расположенными электрическими линиями. Исследования показывают, что для этой установки соотношение сигнал/магнитотеллурический шум по крайней мере не хуже, чем для технологии ВЭД-ВЭЛ [55,56].

Последующие исследования показали, что если использовать другую взаимную конфигурацию возбуждающего электрического диполя и многолучевого «радиального» измерителя, то это может существенно повысить уровень относительной аномалии при картировании небольших и глубоких залежей углеводородов. Эта конфигурация включает в себя расположенный на морском дне восьмилучевой приемник-«звезду» и два горизонтальных электрических диполя-источника (ГЭД), которые могут располагаться как на

морском дне, так и у поверхности воды. Центры источников смещены друг относительно друга на некоторое расстояние (до 90 м). Центр измерительной системы («звезды») располагается так, чтобы смещения (в разные стороны) между центрами электрических диполей-источников и проекцией центра измерительной системы на линию, где расположены источники, были одинаковыми и находились в диапазоне от 10 до 45 м. Один из электродов измерительной системы помещается в ее центр, а остальные (внешние) электроды размещаются вокруг центрального электрода, образуя линии длиной в диапазоне от 100 до 500 м. Источником поля являются знакопеременные токовые импульсы прямоугольной формы, разделенные паузами, в течение которых измеряются сигналы в приемнике. В результате для каждого положения установки получаем два набора сигналов «Звезда-» и «Звезда+» (соответственно, от двух источников). Схема этой установки показана на рис. 3.4. Более детально особенности конфигурации такой установки рассмотрены в работе [101].

Если бы установка включала в себя только один горизонтальный электрический диполь, центр которого был бы расположен непосредственно напротив центра «звезды», то измеренный сигнал содержал бы только отклик от трехмерных изменений среды (т.е. сигнал в одномерной среде от такой установки был бы равен нулю). Однако, по предыдущему опыту работы с такими установками (обладающими нулевым «нормальным» полем) известно, что интерпретация (инверсия) полученных сигналов очень неустойчива. Поэтому в рассматриваемой технологии было предложено использовать два источника, немного смещенных в разные стороны относительно центра «звезды», что, с одной стороны, позволяет сохранить высокий уровень относительной аномалии (влияния трехмерного объекта), а с другой стороны, получить отклик от одномерной среды путем вычитания сигналов, измеренных от этих источников. Еще одним немаловажным фактом является то, что сигналы «Звезда-» и «Звезда+» по-разному реагируют на разные края целевого объекта, и это является еще одним преимуществом рассматриваемой технологии «Звезда», особенно при решении задач мониторинга.

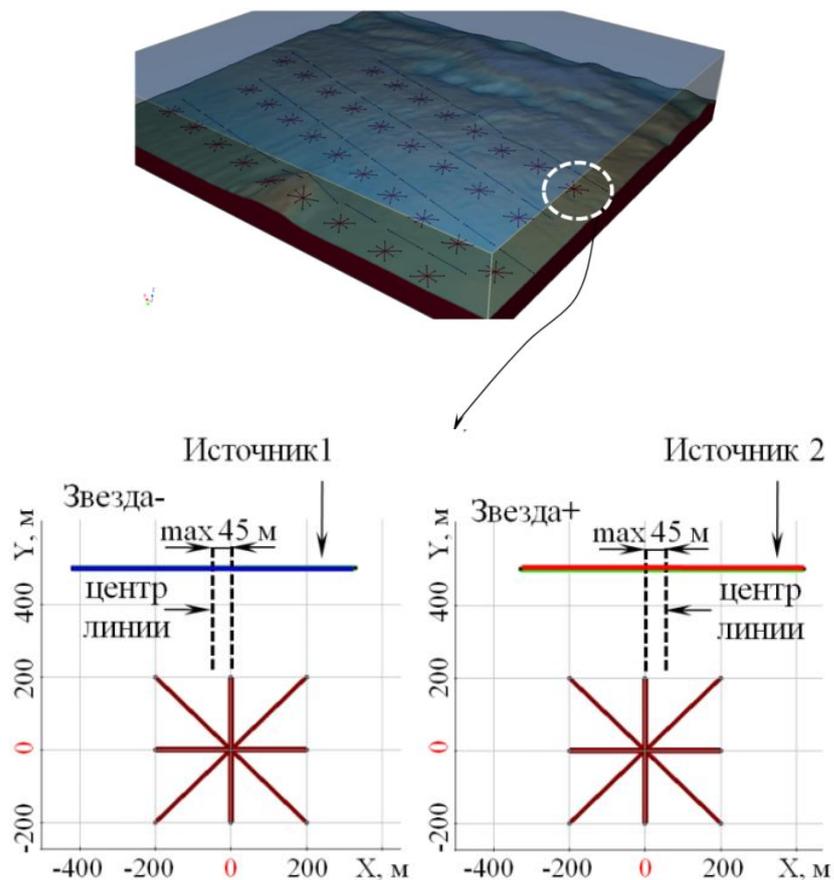


Рисунок 3.4 – Схема расположения источников и приемника для технологии «Звезда»

3.2.1 Сравнение разрешающей способности технологии «Звезда» с разрешающей способностью технологий ГЭД-ГЭЛ и ВЭД-ВЭЛ

Рассмотрим модель шельфового месторождения углеводородов [109], представленную на рис. 3.5–3.6. На рис. 3.5 показаны данные каротажа по продуктивной (график показан синим цветом) и двум непродуктивным скважинам. Видно, что наличие углеводородов проявляется резким (до 130 Ом·м) повышением сопротивления, а значения сопротивлений в остальных слоях являются достаточно схожими по латерали, что позволило сформировать геоэлектрическую модель. Поверхности основных слоев и рельефа морского дна были построены по данным сейсморазведки. Сама модель месторождения состоит из двух частей: западной и восточной. Мощность резервуара в западной части по данным сейсморазведки и каротажа составляет в максимуме 40 м, а в восточной части предположительная мощность составляет в максимуме 80 м. При этом

наличие западной части подтверждается данными со скважины, а наличие восточной части находится под вопросом.

Для проведения сравнительного анализа рассматривалось 3 сценария, которые показаны на рис. 3.6. При этом сравнивались:

- чувствительность измерений к западной части месторождения относительно вмещающей среды (сценарий 1);
- чувствительность измерений к восточной части месторождения относительно вмещающей среды с западной частью месторождения для различных удельных сопротивлений целевого объекта вдоль линии 1 (сценарий 2);
- чувствительность измерений к положению водонефтяного контакта (ВНК) на севере восточной части месторождения вдоль линии 2 (сценарии 2 и 3).

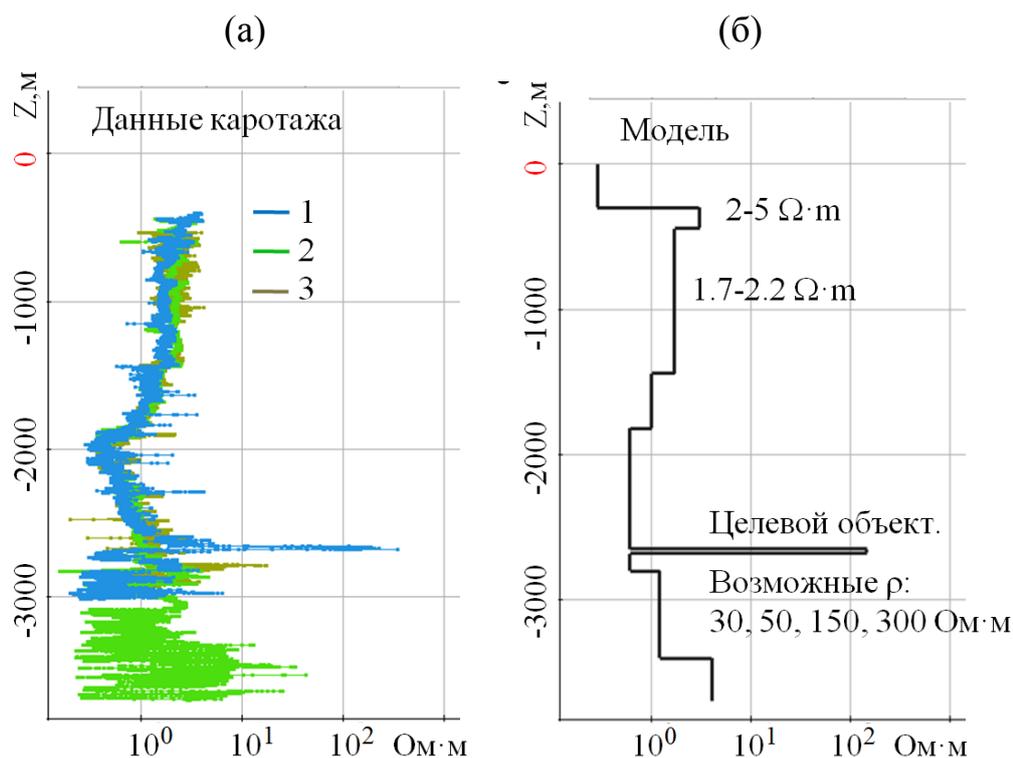


Рисунок 3.5 – Данные каротажа по продуктивной (1) и непродуктивным (2,3) скважинам (а) и геоэлектрическая модель, составленная по данным каротажа (б), для месторождения Novus [109]

На рис. 3.7–3.8 представлены сигналы («Звезда») для технологии «Звезда» вдоль линий съемки, показанных на рис. 3.6, в момент времени 2 с после

выключения тока (из сигналов исключено влияние изгибов слоев вмещающей среды). Видно, что целевой объект характеризуется дипольной аномалией, экстремумы которой тяготеют к краям целевого объекта (для больших по латерали объектов экстремумы аномалии будут соответствовать их краям), при этом даже уменьшение сопротивления целевого объекта до 30 Ом·м позволяет сохранить достаточно высокий уровень относительного аномального сигнала. Кроме того, из представленных графиков видно, что значимую относительную аномалию дает не только объект в целом, но и смещение его краев.

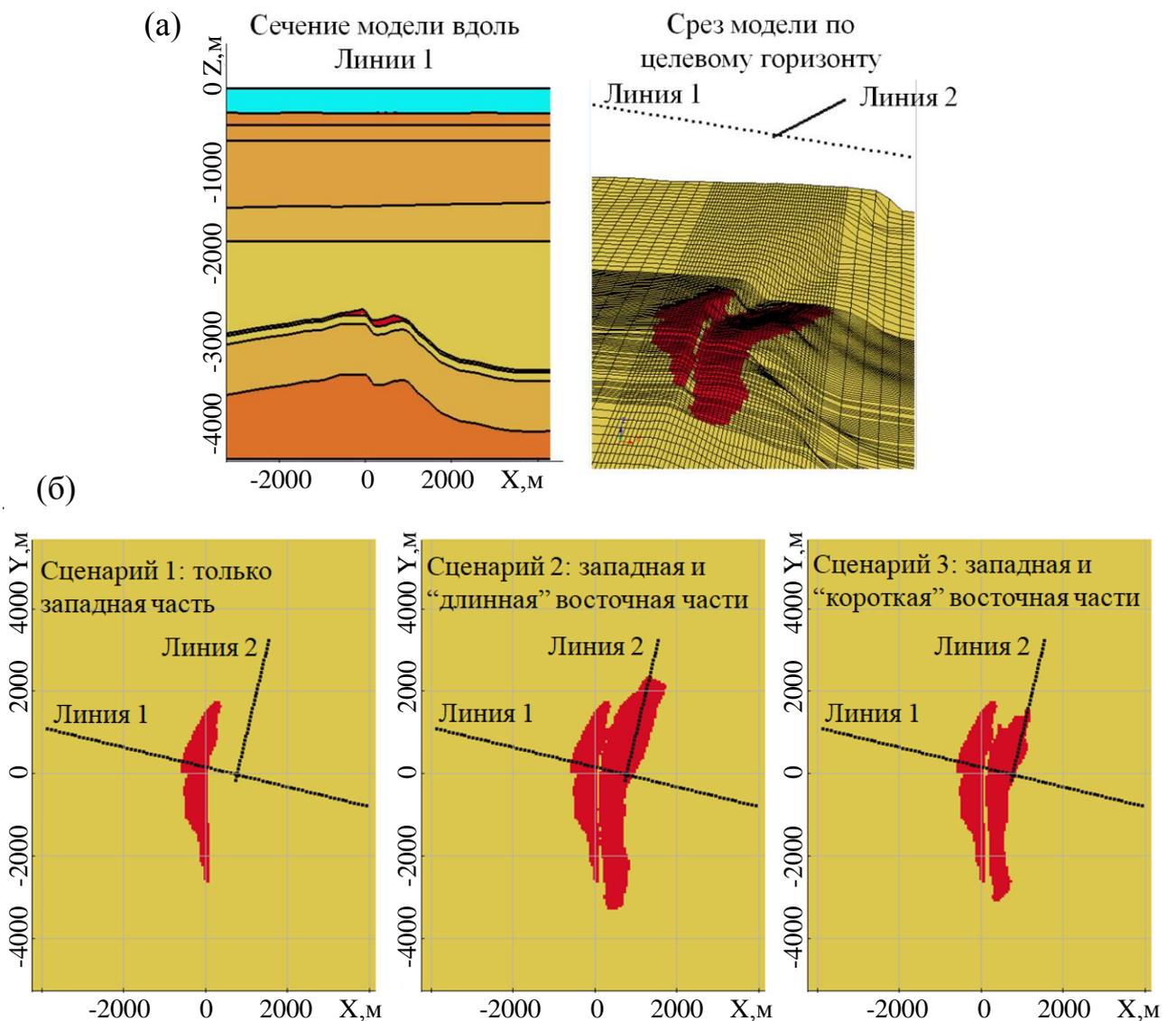
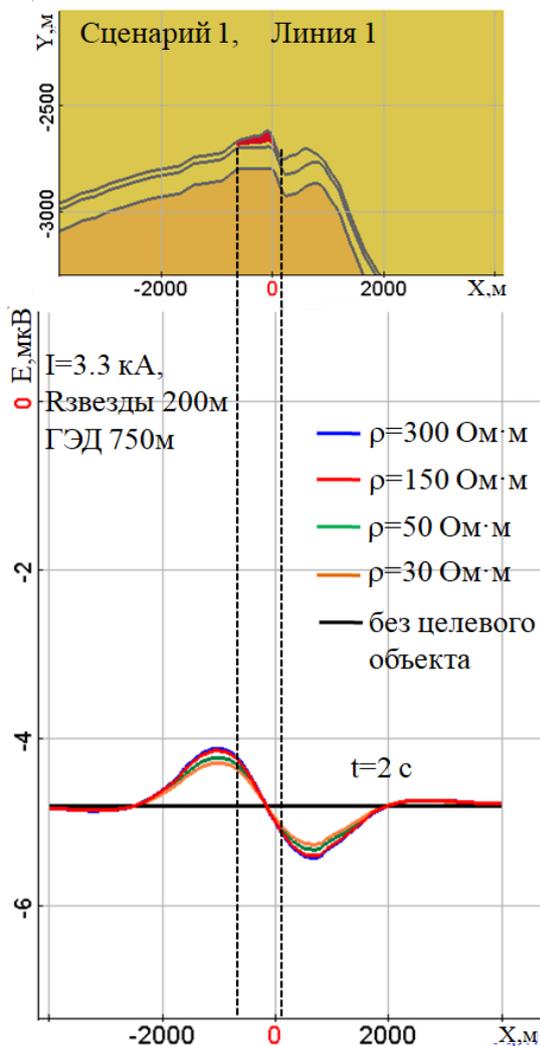


Рисунок 3.6 – Вид геоэлектрической модели (а); варианты (сценарии) для исследования разрешающей способности (б)

На рис. 3.9 для сценариев 1 и 2 представлены графики сигналов («Звезда-») от времени в точке $X=-600$ м, примерно соответствующей максимуму аномального сигнала по профилю. Для сценария 1 на рис. 3.9б представлены также графики зависимости относительного аномального сигнала от времени. Из рис. 3.9 видно, что целевой объект может быть выделен в сигнале в некотором диапазоне времен, который со стороны ранних времен ограничивается уровнем относительной аномалии, а со стороны поздних времен – уровнем измеримости сигнала (поэтому ниже указан уровень проявления объекта для левой и правой границ этого диапазона времен).

(а)



(б)

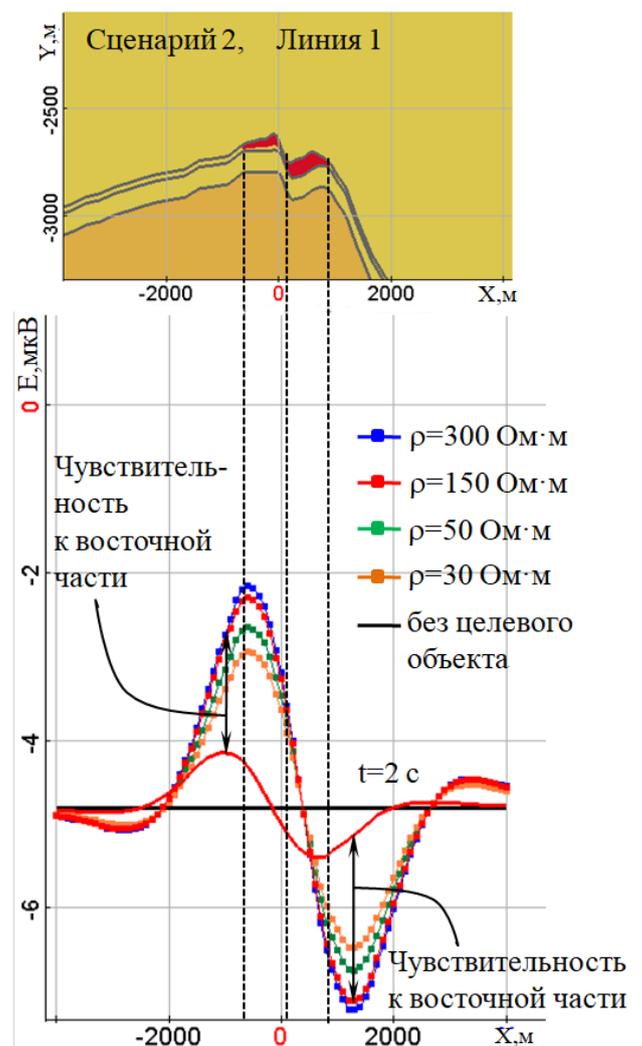


Рисунок 3.7 – Сигналы вдоль линии 1 для сценария 1 (только западная часть месторождения) (а) и для сценария 2 (обе части месторождения) (б)

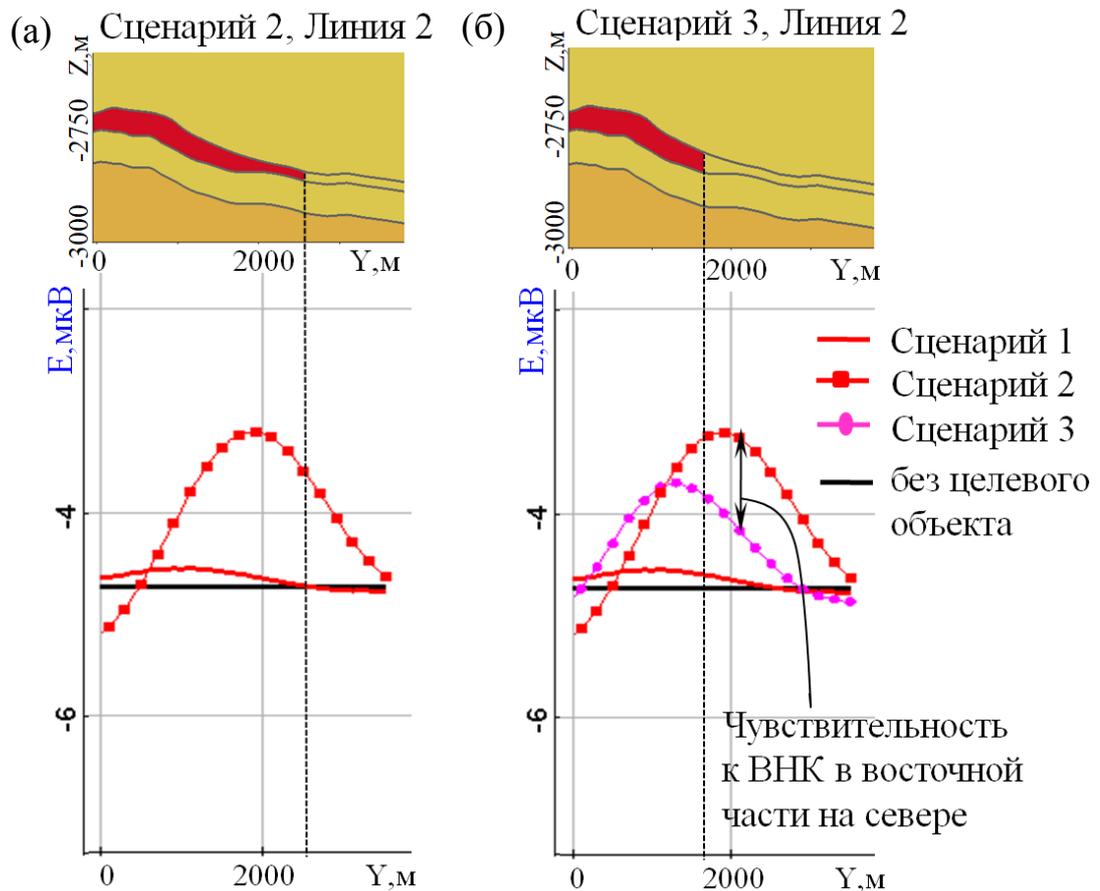


Рисунок 3.8 – Измеренный сигнал вдоль линии 2 для сценария 2 («длинная» восточная часть) (а) и сценария 3 («короткая» восточная часть) (б) для целевого объекта с сопротивлением $150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

На рис. 3.10а показаны графики сигналов от времени, рассчитанные с целевым объектом и без него для двух значений удельного сопротивления вышележащего слоя: $1.7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $2.2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а на рис. 3.10б – относительные отклонения от сигнала, рассчитанного без целевого объекта при сопротивлении вышележащего слоя $1.7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Из представленных результатов видно, что хотя изменение сопротивления вышележащего слоя влияет на измеряемые сигналы до самых поздних времен, но, с одной стороны, это влияние начинается раньше, чем влияние целевого объекта (см. рис. 3.10б: в диапазоне 300-500 мс влияние изменения сопротивления слоя составляет от 10 до 20 %, в то время как влияние целевого объекта в этом диапазоне составляет от 1 до 5 %), а с другой стороны, в области поздних времен оно существенно меньше, чем влияние целевого объекта. Следовательно, влияние слоя отделимо от влияния объекта и при необходимости

его сопротивление может быть уточнено в результате инверсии (хотя целевой объект можно довольно уверенно выделить и при несколько отличающихся значениях сопротивлений верхних слоев).

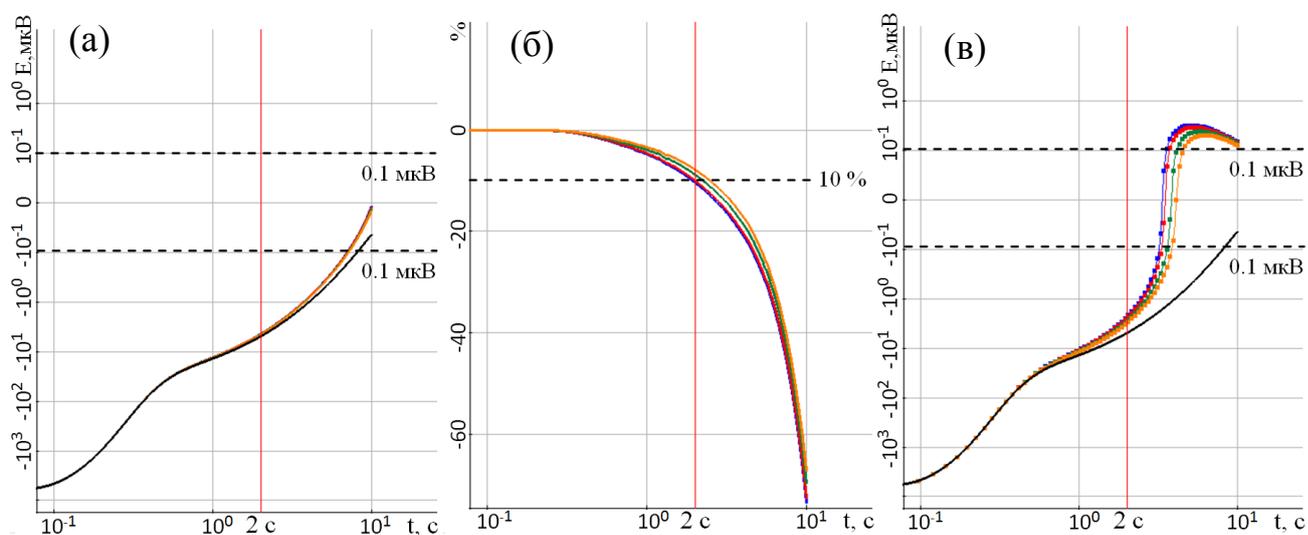


Рисунок 3.9 – Сигналы от времени в точке $X=-600$ м на линии 1 для сценария 1 (а,б) и для сценария 2 (в); на рис. б показаны относительные отклонения кривых, рассчитанных для моделей с различным сопротивлением целевого объекта для сценария 1, относительно сигналов, рассчитанных без целевого объекта (показаны черным цветом на рис. а); цвета кривых, рассчитанных для моделей с целевым объектом различного сопротивления: $30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – оранжевый цвет, $50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – зеленый цвет, $150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – красный цвет, $300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – синий цвет

Результаты сравнения абсолютных и относительных сигналов, демонстрирующих чувствительность рассматриваемой технологии «Звезда» и технологии ВЭД-ВЭЛ, представлены в табл. 1–2. При выполнении 3D-моделирования длина источника в технологии «Звезда» была взята равной 750 м, а длины лучей приемника – 200 м и 400 м. Заметим, что, как показали исследования, для глубинных объектов увеличение длины лучей в 2 раза позволяет увеличить сигнал в 4 раза. Это, безусловно, является важным положительным фактором. Значение тока в источнике было взято равным 3.3 кА. Параметры для технологии ВЭД-ВЭЛ были взяты в соответствии с используемыми в настоящее время при проведении морских работ: длина генераторной линии (ВЭД) – 300 м, длина приемной линии (ВЭЛ) – 3 м, ток – 6 кА.

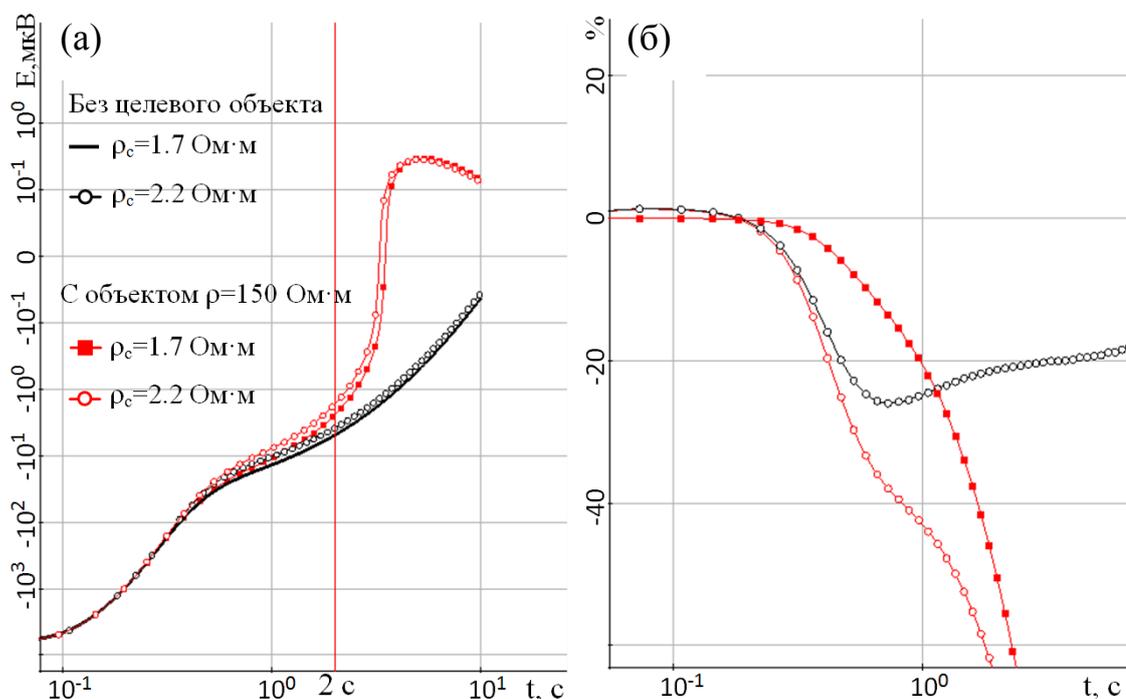


Рисунок 3.10 – Сигналы от времени в точке $X=-600$ м на линии 1 для сценария 2 в сравнении с сигналами без целевого объекта для двух значений сопротивления третьего слоя: $\rho_c = 1.7 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ и $\rho_c = 2.2 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ (а); относительные отклонения сигналов от сигнала, рассчитанного для модели без целевого объекта при $\rho_c = 1.7 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ (б)

Таблица 1 – Чувствительность к восточной части поля (относительно западной части)

t, с	Параметры установки	ГЭД/Звезда/Ток	ГЭД/Звезда/Ток	ВЭД/ВЭЛ/Ток
		750м/200м/3.3кА	750м/400м/3.3кА	300 м/3 м/6 кА
2	Аномальный сигнал, мкВ	2	8	0.0063
	Относительный сигнал, %	40	40	2.6
5	Аномальный сигнал, мкВ	0.7	2.8	0.0011
	Относительный сигнал, %	>100	>100	4.7

По результатам 3D-моделирования для рассматриваемых геоэлектрических условий, размеров и положения целевых объектов можно сделать следующие выводы.

Технология «Звезда» имеет высокую чувствительность к восточной части месторождения относительно вмещающей среды с западной частью: от 40 % на средних временах (левая граница диапазона анализа аномального сигнала) для

сигналов 2 мкВ (для «звезды» с длинами лучей 200 м) и 8 мкВ (для «звезды» с длинами лучей 400 м) до более 100 % на поздних временах (правая граница анализируемого диапазона) для сигналов 0,7 мкВ (для «звезды» с лучами 200 м) и 2,8 мкВ (для «звезды» с лучами 400 м). Кроме того, технология «Звезда» имеет достаточную чувствительность к западной части месторождения относительно вмещающей среды: от 13% для сигналов 0,6 мкВ (для «звезды» с лучами 200 м) и 2,4 мкВ (для «звезды» с лучами 400 м) до 40 % для сигналов 0,2 мкВ (для «звезды» с лучами 200 м) и 0,8 мкВ (для «звезды» с лучами 400 м). При этом высокие уровни аномальных сигналов для технологии «Звезда» сохраняются при понижении сопротивления целевого объекта до 30 Ом·м.

Таблица 2 – Чувствительность к западной части поля (относительно вмещающей среды)

t, с	Параметры установки	ГЭД/Звезда/Ток 750м/200м/3.3кА	ГЭД/Звезда/Ток 750м/400м/3.3кА	ВЭД/ВЭЛ/Ток 300 м/3 м/6 кА
2	Аномальный сигнал, мкВ	0.6	2.4	0.0022
	Относительный сигнал, %	13	13	0.9
5	Аномальный сигнал, мкВ	0.2	0.8	0.00036
	Относительный сигнал, %	40	40	1.6

Для того чтобы оценить возможность измерения абсолютного сигнала, были проанализированы данные, представленные в работе [55]. В ней на рис. 4 представлены данные измерений в Баренцевом море (месторождение Snohvit, 70° с.ш.). Сила тока в вертикальной линии-источнике была 6000 А. Длина вертикального приемника – 10 м. Сигналы, показанные на рис. 4 в работе (Helwig et al., 2013) даны в единицах В/(А·м) (т.е. нормированы на ток и длину приемной линии). В момент времени $t=6$ с после выключения тока величина сигнала составляла 4×10^{-13} В/(А·м). Поэтому можно сделать вывод, что сигнал $2,4 \times 10^{-8}$ В (0.024 мкВ) был успешно измерен приемником длиной 10 м.

Рассматриваемая в работе технология, так же как и технология ВЭД/ВЭЛ, является старт-стопной, и поэтому можно обеспечить достаточное количество

накоплений. Поэтому предполагается, что сигналы от 0.2 мкВ должны быть достаточно уверенно измерены в морских условиях.

Технологии ВЭД-ВЭЛ и ГЭД-ГЭЛ не позволяют выявить наличие восточной части месторождения. Уровень аномального сигнала в технологии ВЭД-ВЭЛ составляет менее 6,5 нВ (0,0065 мкВ) при относительной чувствительности 3%, а в технологии ГЭД-ГЭЛ уровень аномального сигнала составляет около 1 нВ (0,001 мкВ) при относительном отклике 0,3%.

3.2.2 Анализ точности картирования границ целевых объектов и анализ эквивалентности

С помощью методов 3D-моделирования и 3D-инверсии, представленных в главе 1 и работах [6,95], оценим точность определения краев целевого объекта для сценариев 1 и 2 (т.е. без восточной части месторождения и при ее наличии). Положения установок на площади и результаты представлены на рис. 3.11.

Слева на рис. 3.11 представлены срезы на уровне целевого объекта для обоих сценариев. Для выполнения 3D-инверсии использовалась блочная структура, состоящая из 5 рядов, содержащих по два блока в каждом ряду. Стартовое значение сопротивлений в блоках было взято равным 1 Ом·м при фоновом сопротивлении (вмещающей среды) 0.6 Ом·м. Эта модель показана на центральных кадрах рис. 3.11. Справа на рис. 3.11 представлены результаты 3D-инверсии. Видно, что 3D-инверсия позволяет выявить восточную часть месторождения (в случае ее присутствия), а также позволяет определить положение ВНК (границы целевого объекта) как для сценария 2 (в присутствии восточной части), так и для сценария 1 (в случае наличия только западной части месторождения). Погрешность определения границ составляет в среднем 100-200 м, исключая участки с малой чувствительностью, которые показаны на рис. 3.11 белым пунктиром.

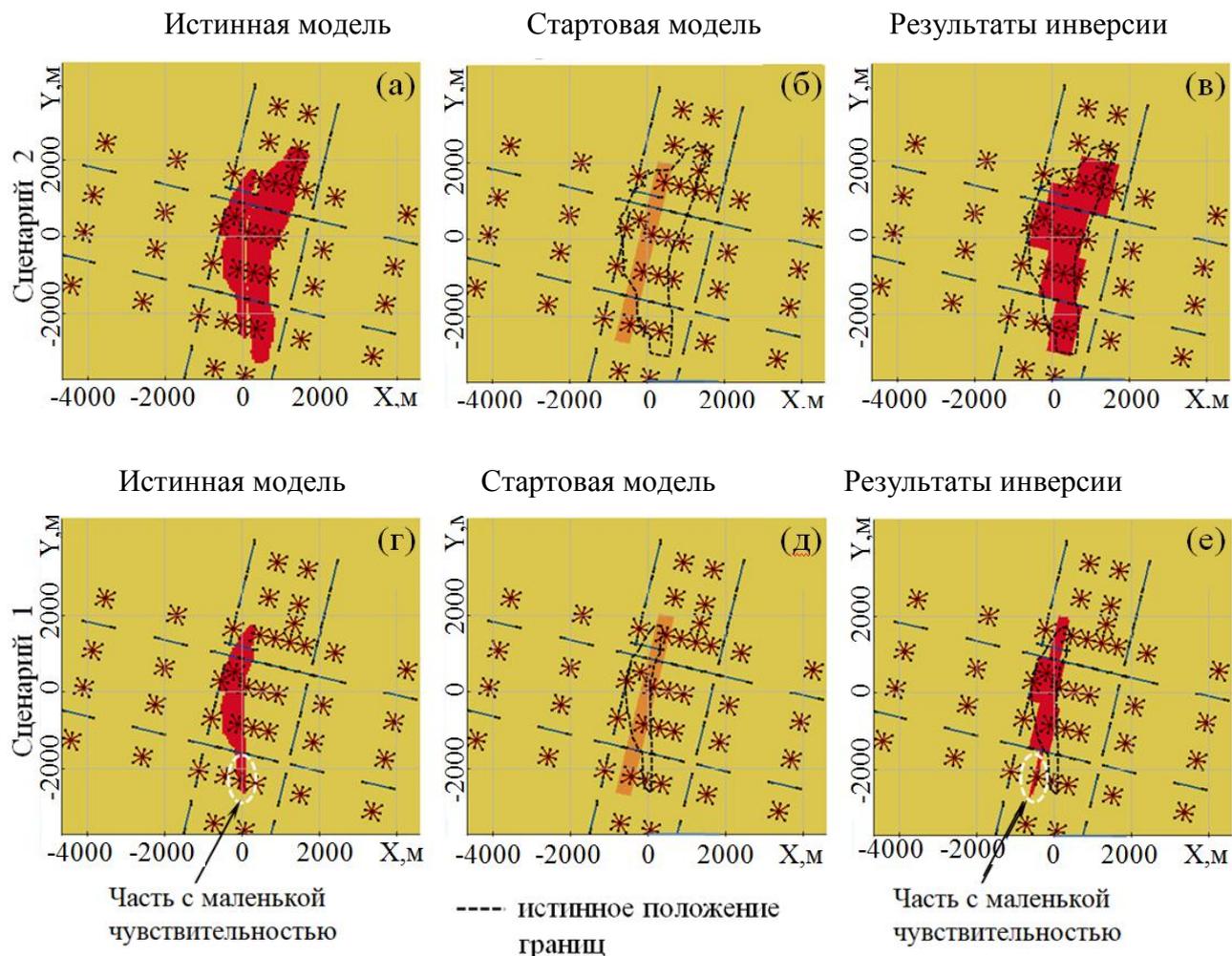


Рисунок 3.11 – Анализ точности определения краев целевых объектов: результаты 3D инверсии для сценариев 2 (а,б,в) и 1 (г,д,е) в виде срезов на уровне целевого горизонта для истинной (а,г) и стартовой (б,д) моделей, а также для модели, восстановленной в результате 3D-инверсии (в,е)

Для большей наглядности на рис. 3.12 вместе с распределением в плане для истинной, стартовой и полученной в результате инверсии моделей показаны разрезы вдоль линий 1 и 2, показанных на рис. 3.6. Представленные результаты подтверждают сделанные выше выводы.

Было также проведено исследование эквивалентности при определении границы целевого объекта и его сопротивления. При формировании синтетических данных сопротивление целевого объекта в истинной модели было взято равным 150 Ом·м. При проведении 3D-инверсии это сопротивление было

получено равным 100 Ом·м. Исследование эквивалентности проводилось следующим образом.

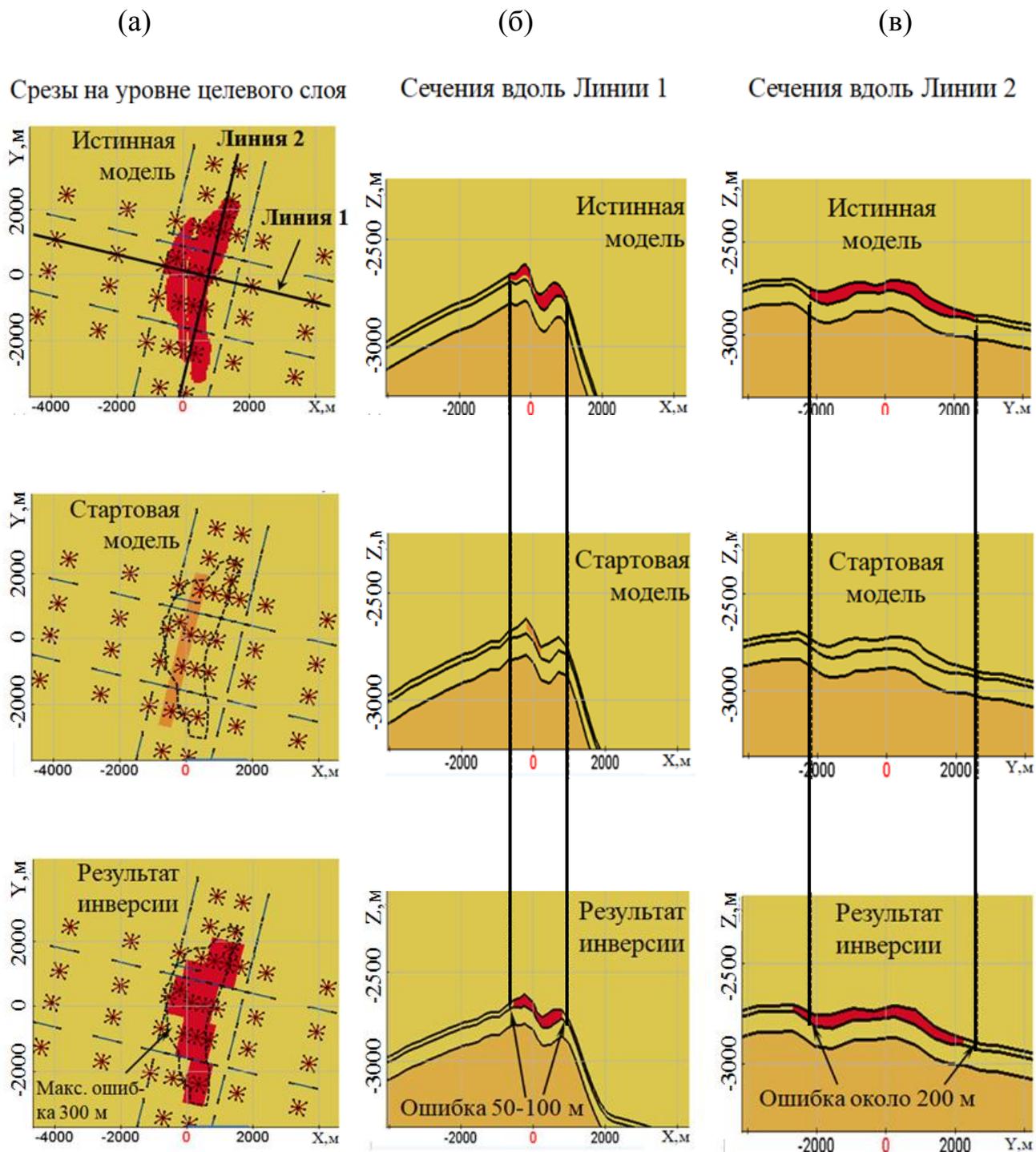


Рисунок 3.12 – Анализ точности определения краев целевых объектов: результаты 3D инверсии для сценария 2. Представлены срезы на уровне целевого горизонта (а) и разрезы вдоль линий 1 (б) и 2 (в) для истинной и стартовой моделей, а также для модели, восстановленной в результате 3D-инверсии

Модель, полученная в результате инверсии, принималась за исходную, для нее фиксировалось другое удельное электрическое сопротивление и производился поиск границ. Если сигналы, полученные для новой модели, отличались от старой менее чем на уровень ошибки (в данной работе этот уровень 70 нВ), то модели считались эквивалентными. На рис. 3.13 приведен пример одной из эквивалентных моделей, в которой целевой объект был взят с сопротивлением 35 Ом·м.

На рис. 3.14 приведены сигналы в момент времени $t=5\text{с}$ для 8-и «звезд», расположенных вдоль линии 2, показанной на рис. 3.13. Для истинной и подобранной в результате инверсии моделей сигналы приведены на рисунке слева (черные и красные точки), а для подобранной и эквивалентной моделей – на рисунке справа (красные и зеленые точки). Из представленных результатов видно, что отличие между сигналами для эквивалентных моделей меньше, чем их отличие от сигналов для истинной модели (и поэтому можно признать эти модели эквивалентными).

Таким образом, для рассматриваемой ситуации получена следующая зона эквивалентности: удельное сопротивление целевого объекта от 30 Ом·м и выше и при изменении положения границы от 150 м и менее.

Аналогичные исследования проводились для ситуации, когда удельное сопротивление целевого объекта в истинной модели было взято равным 35 Ом·м. В результате исследований была получена очень близкая зона эквивалентности с нижней границей 20 Ом·м (вместо 30 Ом·м, когда в истинной модели сопротивление целевого объекта было взято 150 Ом·м).

В целом же важно отметить, что выявленная зона эквивалентности не ухудшает решение рассматриваемой задачи. Полученное минимальное сопротивление (20 Ом·м) также будет свидетельствовать о наличии целевого объекта, а изменение положения границ у эквивалентных моделей не превышает 150 м.

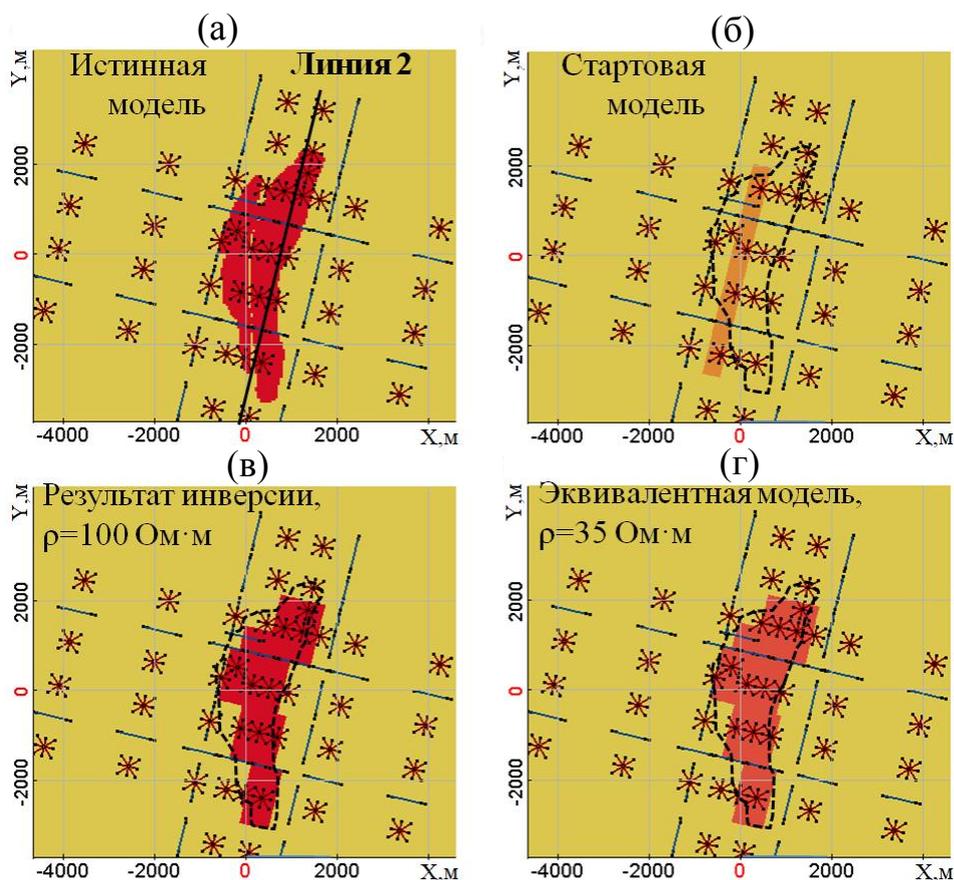


Рисунок 3.13 – Оценка эквивалентности при определении границы целевого объекта и его сопротивления: *a* – истинная модель; *б* – стартовая модель; *в* – результат инверсии; *г* – эквивалентная модель

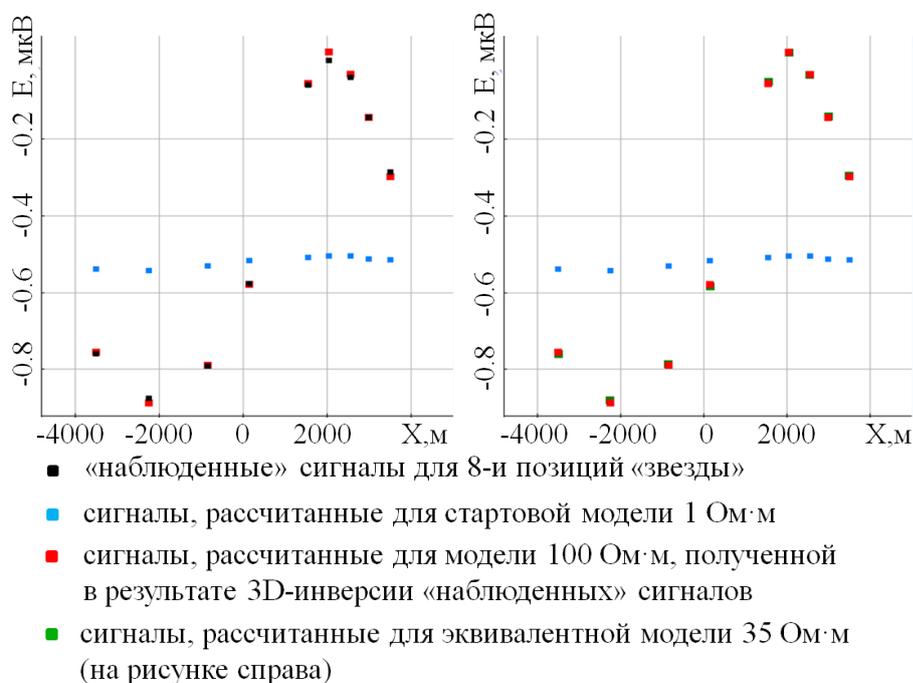


Рисунок 3.14 – Сигналы в момент времени $t=5$ с для 8-и «звезд», расположенных вдоль линии 2, для истинной, стартовой, подобранной в результате инверсии и эквивалентной моделей

3.2.3 Возможности технологии «Звезда» для решения задач мониторинга

В заключение рассмотрим еще один важный аспект, связанный с возможностями технологии «Звезда» для решения задач мониторинга границы нефтенасыщенной зоны (ГНЗ). Для этого рассмотрим геоэлектрическую модель другого месторождения [67,125,126], план и разрез для которой показаны на рис. 3.15.

В процессе добычи нефть от границ месторождения вытеснялась, замещаясь водой. Рассмотрены несколько смещений границы нефтенасыщенной зоны (ГНЗ) с различных сторон месторождения (эти смещения показаны на рис. 3.15). Поскольку при этом нельзя точно сказать, какой процент нефти остается после вытеснения, рассмотрены не только различные смещения ГНЗ, но и различные значения удельного сопротивления участка, соответствующего разнице положений смещенного и стартового положения ГНЗ (зона вытеснения показана оранжевым цветом на рис. 3.15). На рис. 3.16а,б показаны графики сигналов, которые получены для модели со стартовым значением ГНЗ и для моделей со смещенным положением ГНЗ для различных вариантов остаточной нефти (т.е. для различных значений удельного сопротивления области, оставшейся после вытеснения основного объема нефти). На рис. 3.16в,г приведены отклонения сигналов для моделей со смещенным положением ГНЗ и различных сопротивлений после вытеснения относительно сигналов, рассчитанных для стартового положения ГНЗ.

Из представленных результатов видно, что сигналы в технологии «Звезда» имеют достаточно ощутимую чувствительность к смещению ГНЗ и к разным сопротивлениям после вытеснения нефти. При этом из рис. 3.16в,г, видно, что положение ГНЗ определяется сменой знака между отрицательным и положительным экстремумами в графиках отклонений сигналов, полученных при смещении этой границы, а сопротивление области, оставшейся после вытеснения основного объема нефти, определяется уровнем этих экстремумов. Этот факт открывает хорошие перспективы для использования технологии «Звезда» при решении мониторинговых задач, особенно в совокупности с возможностями

гидродинамического моделирования и основанных на нем методов решения соответствующих обратных задач по данным нефтедобычи (см. например, работу [104]).

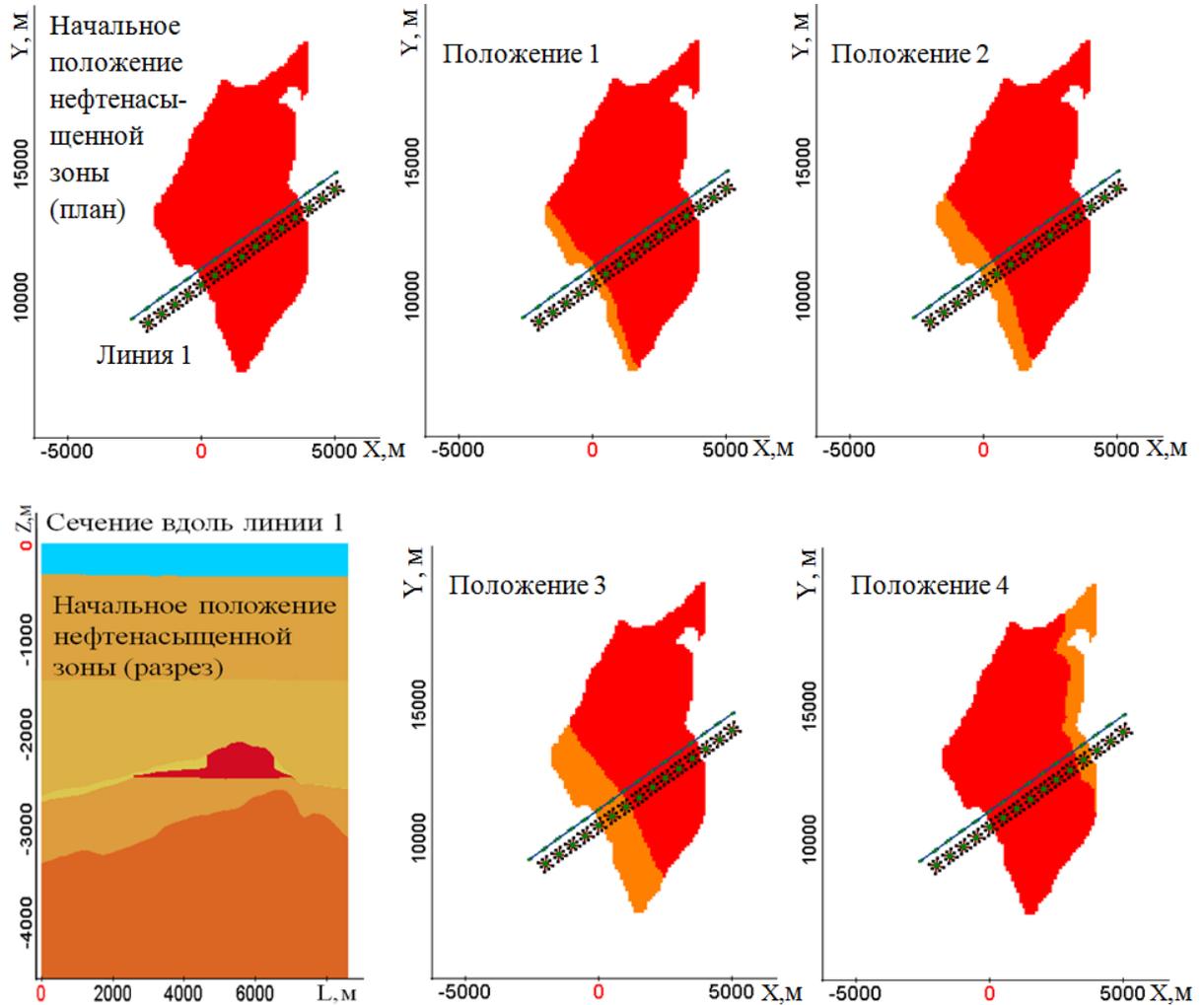


Рисунок 3.15 – Геоэлектрическая модель месторождения Heidrun [67,125,126], для которой будут проанализированы возможности технологии «Звезда» для решения задач мониторинга; красным цветом показано положение нефтенасыщенной зоны, оранжевым цветом показана зона после вытеснения нефти водой с сопротивлением ρ_w

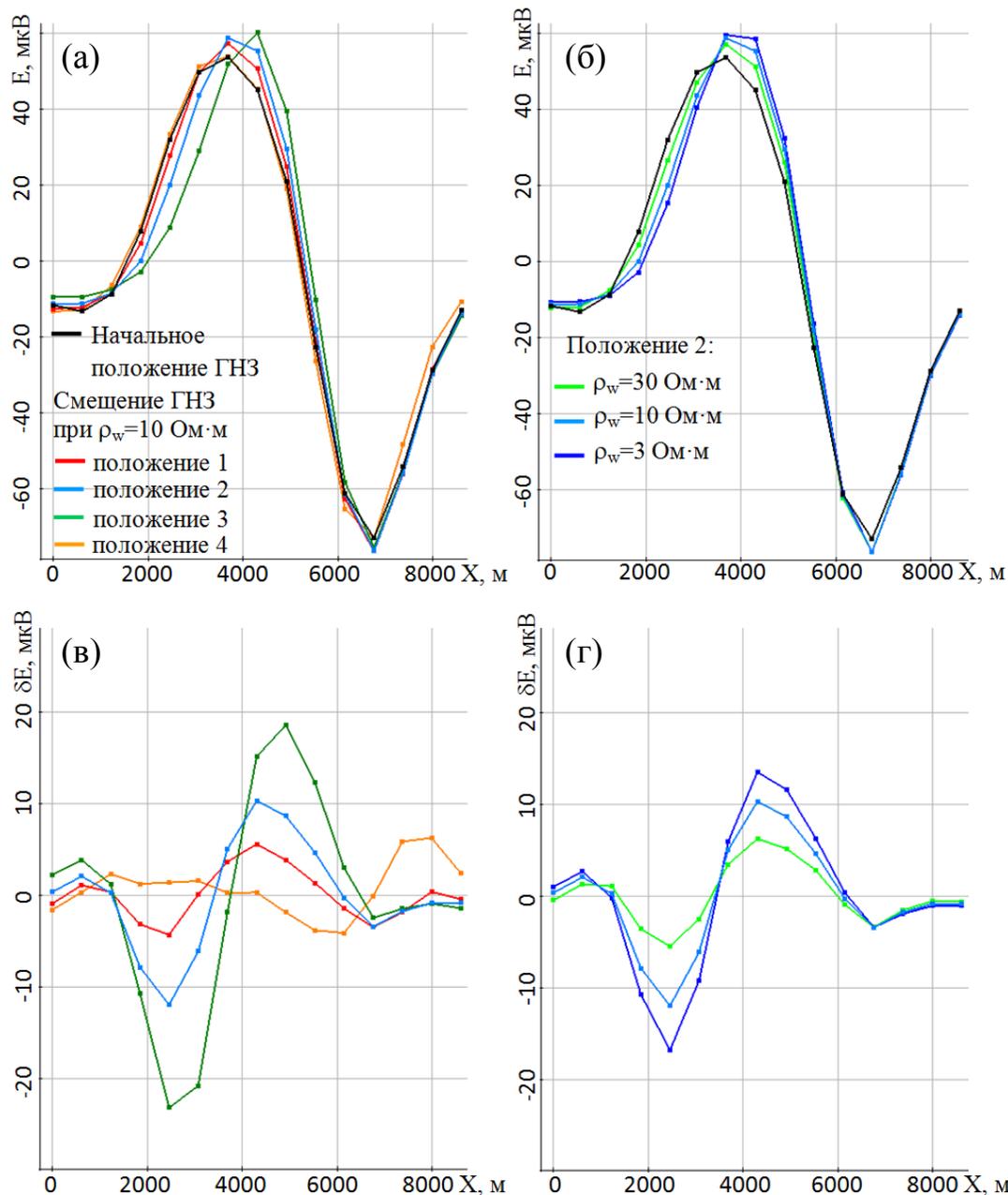


Рисунок 3.16 – Сигналы вдоль линии 1 при $t=1.5 \text{ с}$: *а* – при различных положениях границы нефтенасыщенной зоны (ГНЗ) для значения сопротивления после вытеснения $\rho_w=10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; *б* – при различных ρ_w для положения 2 ГНЗ; *в* – влияние смещения ГНЗ для $\rho_w=10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ относительно начального положения ГНЗ; *г* – влияние разных ρ_w для положения 2 ГНЗ относительно начального положения ГНЗ (сигналы приведены для $I=7 \text{ кА}$)

Выводы по главе 3

1. Предложены методы проверки эквивалентности трехмерных геоэлектрических моделей, основанные на использовании процедур конечноэлементного 3D-моделирования и геометрических 3D-инверсий. Их работоспособность продемонстрирована на 3D-модели, полученной в результате 3D-инверсии практических данных аэроэлектроразведки на площади Creighton (Канада), и при обосновании возможностей новой перспективной технологии «Звезда» [101] при восстановлении границ нефтегазонасыщенной зоны.

2. Анализ эквивалентности трехмерной геоэлектрической модели, полученной в результате 3D-инверсии данных аэроэлектроразведки на площади Creighton (Канада), показал, что основная эквивалентность связана с размерами блоков между полетными линиями. Она возникает, в основном, из-за того, что расстояние между полетными линиями составляет порядка 200 м. При этом для большинства блоков эквивалентные модели характеризуются уменьшением размера блоков между профилями за счет увеличения их размера вдоль полетной линии и изменения сопротивления. Поэтому при проведении 3D-инверсии по полной модели, положения границ блоков локальных структур между полетными линиями (т.е. в направлении Y) были зафиксированы. Еще одна эквивалентность связана со слабой чувствительностью к положению нижней кромки нижних проводящих блоков. Остальные параметры целевых объектов (локальных структур) для рассмотренной системы наблюдений определяются достаточно надежно. В целом, было получено, что по критерию проводки скважин полученные эквивалентные модели достаточно близки и с геологической точки зрения принципиальной разницы между полученными эквивалентными моделями нет.

2. Исследования возможностей применения технологии «Звезда» на морском шельфе показали, что эта технология позволяет получить гораздо более высокий уровень как абсолютного, так и относительного сигнала от залежей небольшого размера, расположенных на достаточно больших глубинах, по сравнению с известными как старт-стопными (ВЭД-ВЭЛ), так и буксируемыми

(ГЭД-ГЭЛ) технологиями.

3. Выполненный для технологии «Звезда» анализ эквивалентности «сопротивление целевого объекта – положение его границы» показал, что выявленная зона эквивалентности не ухудшает решение рассматриваемой задачи: для рассмотренных геоэлектрических условий, характерных для шельфовых зон, полученное минимальное сопротивление 30 Ом·м вместо истинного 150 Ом·м также будет свидетельствовать о наличии целевого объекта, а разница в положении границ у эквивалентных моделей не превышает 150 м.

4. Исследование возможности решения мониторинговых задач показало, что может быть предложен достаточно простой способ интерпретации результатов, основанный на том, что положение границы нефтенасыщенной зоны определяется сменой знака между отрицательным и положительным экстремумами в графиках отклонений сигналов, полученных при смещении этой границы в процессе добычи нефти, а сопротивление области, оставшейся после вытеснения основного объема нефти, определяется уровнем этих экстремумов. При этом уровень эквивалентности «смещение границы – сопротивление в зоне вытеснения» оказывается невысоким. Кроме того, в перспективе возможно комбинирование процедур инверсии электромагнитных данных с результатами гидродинамического моделирования и решения соответствующих обратных задач (представленных, например, в работе [104]), что позволит дополнительно повысить точность определения положения границы нефтенасыщенной зоны при проведении мониторинговых работ.

ГЛАВА 4 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ, РАЗРАБОТКИ И ОБОСНОВАНИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ

4.1 Интерфейсная часть

Пост- и пре- процессорные части объединены в рамках графического интерфейса пользователя. В графическом интерфейсе реализовано задание геофизических моделей, систем наблюдения, решения прямых и обратных задач электроразведки и магниторазведки. Поскольку программный комплекс предназначен для проведения трехмерных инверсий, то предусмотрена возможность задания стартовых моделей инверсии и загрузка полевых систем наблюдения с измеренными сигналами.

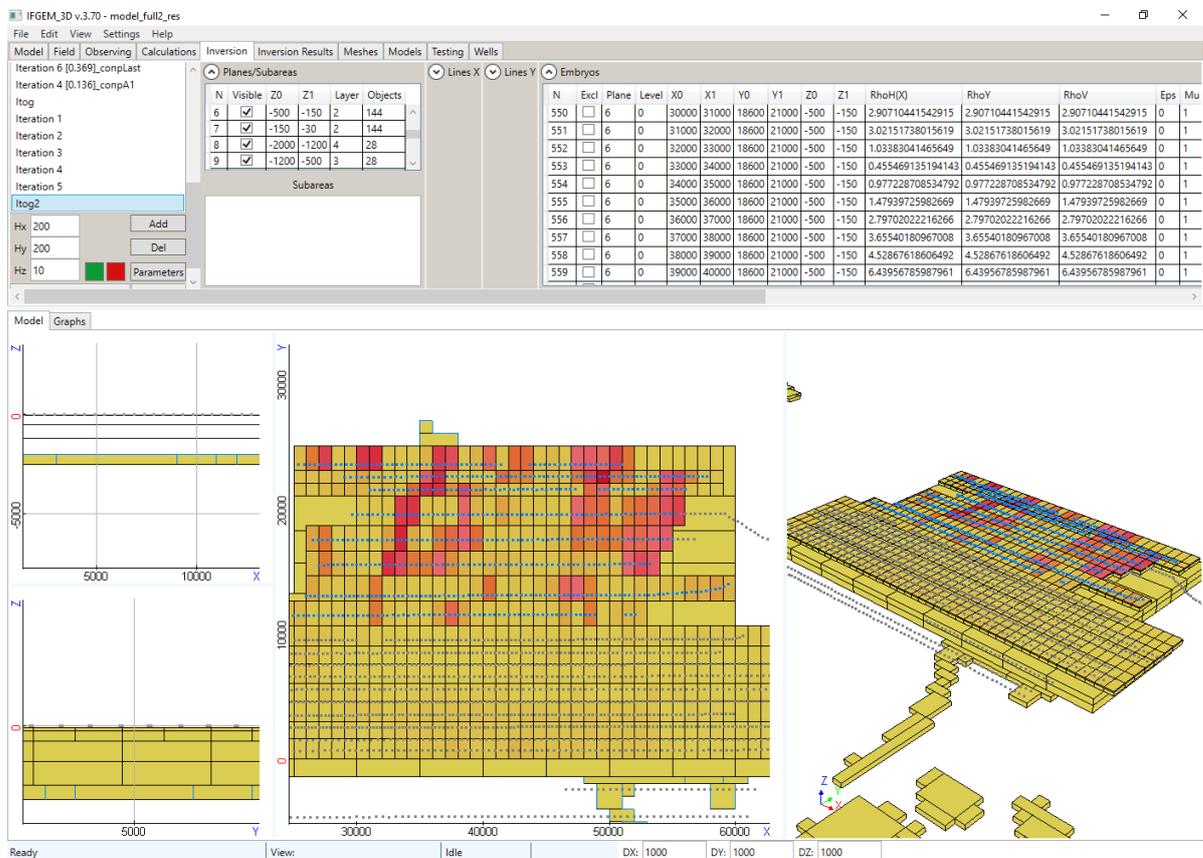


Рисунок 4.1 – Фрагменты интерфейсной части программного комплекса, где формируется стартовая модель для 3D-инверсии

4.1.1 Принципы задания мультифизичных данных и параметров

Поскольку важной составляющей параметризации является возможность задания части параметров общими для нескольких трехмерных неоднородностей, которые имеют прямоугольную форму в плане и строго вертикальные боковые границы, было введено понятие «макропараметра». Кроме того, это понятие позволяет в целом упростить процедуру задания параметров, поскольку самих трехмерных неоднородностей и их составных частей может быть очень много, и в дальнейшем автоматизировать ее.

«Макропараметр» применяется к одной или нескольким трехмерным неоднородностям, имеет свое уникальное имя и содержит блоки геометрических и физических параметров.

Блок геометрических параметров включает в себя координаты шести границ 3D-неоднородности(-ей) (к которым применен соответствующий «макропараметр»), при этом границы по Z являются шаблонными (понятие «шаблонный» было введено в разделе 1.1 и работе [98]). Шаблонная сетка по Z используется для удобства задания стартовых моделей. Основа шаблонной сетки по Z строится по шаблонным координатным слоям. Каждая из границ может быть трех типов:

а) «свободная» – в этом случае ее координата ищется в процессе инверсии независимо от координат границ других трехмерных неоднородностей;

б) «общая» – в этом случае она является общей для границ нескольких объектов;

в) «фиксированная» – в этом случае она в процессе инверсии не меняется.

В свою очередь, «общие» границы также подразделяются на три типа:

а) «общие по параметру» – в этом случае общими являются границы, по которым контактируют трехмерные неоднородности, к которым приписан одинаковый «макропараметр»;

б) «соседи» – в этом случае общими с указанной границей становятся границы всех трехмерных неоднородностей, которые контактируют с трехмерной неоднородностью, к которой приписан этот «макропараметр»;

в) «одинаковая координата» – в этом случае общими с указанной границей становятся границы всех трехмерных неоднородностей, имеющих ту же координату в стартовой модели.

Блок физических параметров позволяет для каждого физического параметра задать признак: является ли этот параметр фиксированным или его следует подбирать в процессе 3D-инверсии. Для подбираемых параметров может быть также указан признак «общий». В этом случае все трехмерные неоднородности, к которым применен «макропараметр» с одинаковым именем будут иметь одинаковые (подбираемые) материальные параметры.

Внутренняя структура представления геологической модели позволяет для каждой трехмерной неоднородности задать свой набор «макропараметров», что, в свою очередь, позволяет задать любую конфигурацию параметров, которые будут определяться в процессе мультифизической 3D-инверсии для построения трехмерной многопараметрической геологической модели.

Заметим, что, конечно, возможна конфигурация параметров, при которой в процессе инверсии трехмерные неоднородности будут «наезжать» друг на друга. В этом случае то, какая из неоднородностей будет перекрывать другую неоднородность, определяется присвоенным им приоритетом.

Кроме того, для каждой трехмерной неоднородности должен быть определен ее тип в соответствии с типами данных, используемых в мультифизической инверсии. В рассматриваемом нами случае, это типы: электрический, магнитный или общий. Фактически, тип объекта определяет типы данных, которые используются для поиска его геометрических параметров.

Помимо «макропараметров» система включает еще два типа параметров:

а) вертикальные смещения контрольных точек «рельефа», позволяющие подбирать форму (и глубину) поверхностей слоев (и, соответственно, форму (и глубину) трехмерных неоднородностей, расположенных внутри них);

б) смещения в плане контрольных точек «полигонов», позволяющие подбирать произвольную форму объектов в плане. Здесь, в свою очередь, реализовано два способа параметризации: в одном случае параметрами являются

смещения точек (вершин), а в другом – смещения ребер в ортогональном направлении.

В рассматриваемой программной системе мультифизической 3D-инверсии используется так называемая «структурная сетка». Эта сетка используется как в прямых задачах при построении конечноэлементных сеток для расчета электромагнитных полей и численном интегрировании для расчета магнитных полей, так и в обратных задачах, когда значения геометрических параметров (за исключением специальных параметров – контрольных точек) берутся строго из набора координат структурной сетки [107]. Кроме того, размер приращения этих геометрических параметров определяется размером шага структурной сетки. В целом, это позволяет избежать слишком маленьких элементов в сетке и существенно снизить проблемы, связанные с обусловленностью матрицы, точностью выдачи конечноэлементного решения и вычислительными затратами в целом.

Рассматриваемые в данной работе классы геологических задач нацелены, в первую очередь, на поиск локальных геологических объектов на фоне неоднородной вмещающей среды, а также на поиск крупных структурных изменений в самой вмещающей среде.

Для описания неоднородных слоев среды предлагается использовать блочные структуры, которые могут поворачиваться относительно системы координат (более подробно об этом рассказывается в работе [107]), и контрольные точки, расставленные по некоторой регулярной сети [94]. В графическом интерфейсе предусмотрены инструментальные средства, которые для каждого блока автоматически формируют набор «макропараметров», обеспечивающие перемещение блоков вдоль одной оси и рядов блоков вдоль другой, а также параметры для подбора формы их верхней и нижней поверхностей. Для разных типов данных блочные структуры могут формироваться так, чтобы границы их блоков (и рядов блоков) двигались независимо. В другом варианте внутри каждого блока блочной структуры ищется

весь набор физических (материальных) параметров (в этом смысле геометрические границы блоков являются общими для всех типов данных).

4.1.2 Задание системы наблюдений

Система наблюдений определяется системой «профилей». Каждый профиль характеризуется координатами положений приемно-генераторной установки (это условная точка, определяющая положение источника и приемников), которая, в свою очередь, характеризуется относительными (условной точки) координатами точек, описывающих форму источника (заземленную линию или индукционную петлю) и приемников (заземленных линий или индукционных петель). При этом источник и/или приемники, если они не буксируются воздушным или морским судном, а расположены на земле (или на дне) привязываются к соответствующей поверхности, что обозначает то, что при проведении моделирования их следует строго располагать на рельефе дневной поверхности или морского дна.

Применяемые в электроразведке системы наблюдений можно разбить на два типа.

Первый тип: источник и приемник (или система приемников, возможно, разная для каждого положения источника) перемещаются вдоль профилей. К этому типу относятся вертолетные (и самолетные) аэроэлектромагнитные съемки (рассмотренные, например, в главах 2, 3 и в работах [90,91,94,98,107]), наземные, так называемые профильно-площадные съемки, а также морские съемки с буксируемой приемно-генераторной системой (рассмотренные в главе 3 и работах [92,95,96]).

Второй тип: от одного или нескольких закрепленных источников измерения выполняются вдоль нескольких профилей. К этому типу относятся технологии ЭМЗ-ВП (электромагнитные зондирования и вызванная поляризация) и БПЛА-МПП (метод переходных процессов с использованием БПЛА). В обеих технологиях используется источник в виде заземленной электрической линии, а в качестве приемника – небольшая заземленная линия (ЭМЗ-ВП) или индукционная петля, буксируемая с помощью БПЛА (см. раздел 1.5 и работы [13,100,106,122]).

Кроме того, при реализации БПЛА-МПП в качестве источника может также использоваться большая индукционная петля (см. раздел 4.3 и работу [106]).

В электроразведке могут использоваться сложные генераторы и приемники из набора заземленных электрических линий (см., например, раздел 3.2 и работы [6,7,77,95,101,136]). Для формирования сигналов используются матрицы для генераторов и приемников, которые показывают взаимодействие между соответствующими линиями. Значения в матрице обозначают, что сигнал от соответствующей линии будет суммироваться с остальными сигналами с заданным значением. Сложные генераторы и сложные приемники могут использоваться совместно или по отдельности. Если используется матрица для генераторов, то будут получены сигналы, заданные с помощью матрицы для приемников или без нее, для каждой строки из матрицы для генераторов.

При решении задач проектирования система наблюдения и параметры установок задаются пользователем с использованием соответствующих окон и таблиц, а при обработке практических данных загружаются из файлов соответствующих форматов. Для аэрогеофизических съемок используются файлы в стандартном для них формате *csv. Для остальных технологий используются свои уникальные форматы. Например, для данных загрузки данных съемок с установками второго типа используются файлы csv формата, но в таких файлах в строках пишется положение приемника, а не установки, и указывается положение генератора для каждого приемника.

Так как плотность аэрогеофизической съемки очень большая (2-5 метров между положениями), что может быть излишним при обработке, разработана система осреднения данных. Есть несколько вариантов сократить объем данных. Данные можно усреднить как среднее арифметическое или по медиане по соседним положениям.

И, наконец, с учетом того, что программная система предназначена для сопровождения комплексных геофизических съемок, профили характеризуются типом «задачи»: электроразведка и магниторазведка. В проекте одновременно могут присутствовать как данные только одного типа съемки, так и от нескольких

(см. раздел 1.5, главу 2 и работы [8,13]), в том числе может использоваться несколько наборов данных одного типа.

Описанная система имеет гибкую структуру и может наращиваться данными других типов.

4.1.3 Весовые функции

Весовые коэффициенты определяются как произведение локальных и глобальных весов.

Локальные веса – это величины, обратные к значениям соответствующих измеренных сигналов (возможно, в некоторой степени). При этом если величина соответствующего сигнала ниже некоторого заданного порогового значения (которое определяется уровнем ошибки измерений), то при вычислении локального веса вместо сигнала берется это пороговое значение. Можно понизить влияние всей кривой или отдельным временным каналам. Кроме того, можно сделать это сразу для группы приемников (отдельным каналам или профилям).

Для установок с индукционным генератором и множеством приемников, например, такая установка используется в технологии ЗСБ, предусмотрен автоматический выбор одной весовой кривой для одного положения установки. Весовая кривая берется из приемника, который расположен ближе к центру генератора.

Глобальные веса используются для приведения сигналов от разных съемок к одному уровню или необходимым уровням, если нужно сделать какие-то данные более приоритетными.

Стоит отметить, что весовые функции могут меняться в зависимости от этапа обработки.

4.1.4 Группирование

В диссертации приведены примеры работы с различными системами наблюдений (см. главу 2 и разделы 1.5, 3.2). В зависимости от типа технологии применяются различные способы группирования.

Для любого типа группирование выполняется с помощью построения регулярной сетки в плоскости XY. Размер группы определяется количеством источников или приемников, попадающих в элемент сетки. По умолчанию сетка строится равномерная, но для систем наблюдений с различной плотностью съемки и для выполнения быстрых расчетов на разных по мощностям вычислительных узлах предусмотрена возможность задания неравномерной сетки.

Размер группы влияет на скорость вычислений. При решении прямых задач главным критерием по скорости счета является размер группы (относительно других групп). При решении обратных задач скорость расчета определяется еще и количеством параметров, для которых будет происходить расчет полей влияния в рамках данной группы [91,94].

Для первого типа группирование выполняется по источникам. Пример такого группирования представлен в главах 2, 3.

Для второго типа технологий группирование выполняется по приемникам. В этом случае, конечно, увеличивается количество решаемых задач, но за счет того, что существенно уменьшаются расчетные области и дискретизации, а также появляется возможность эффективного распараллеливания, время счета существенно сокращается. Пример такого группирования представлен в разделе 1.5.

При этом предусмотрена возможность расчета части системы наблюдений.

4.1.5 Функции для работы с данными

Как практические, так и расчетные данные, привязаны к соответствующей системе наблюдений. Данные характеризуются типом «задачи» и «именем». При этом часть имен в системе зарезервировано.

«*Practical*». Подразумеваются как экспериментальные. Данные определяются как «*Practical*», если они загружены из файла с помощью соответствующих вкладок.

«*Direct*». Данные, полученные в результате запуска прямой задачи для модели, заданной в препроцессоре, автоматически загружаются в систему с именем «*Direct*».

«*Iteration1*», «*Iteration2*»... В эти разделы автоматически помещаются данные, которые получаются в результате решения обратной задачи.

Кроме того, могут загружаться сторонние данные (например, полученные при расчетах в других проектах) и тогда им будут даваться имена, указанные пользователем.

Также предусмотрен инструментарий, позволяющий работать как с практическими, так и расчетными данными. Пользователю предоставляется возможность выполнения операций, таких как сложение, вычитание, деление, умножение и расчет среднеквадратичного отклонения. Результирующие данные привязываются к соответствующей системе наблюдений с выбранными типом «задачи» и «именем».

Этот инструментарий предназначен для использования в многоэтапных методиках 3D-интерпретаций, а также его удобно использовать при анализе чувствительности и эквивалентности (см. главы 2, 3).

4.1.6 Проведение локальных инверсий магниторазведки

При проведении совместной 3D-интерпретации данных электроразведки и магниторазведки, описанной в главе 2, на последнем этапе проводилось большое количество локальных 3D-инверсий данных магниторазведки, в которых рассматривалась не вся площадь, на которой проходила обработка данных, а только та, где были выявлены потенциально целевые объекты. При этом, несмотря на то, что рассматривается только локальная область, необходимо учитывать влияние на сигналы всех магнитных тел.

Для быстрого проведения локальных инверсий магниторазведки был разработан следующий инструментарий. Он заключается в том, что указывается область в плане, в которой будет проводиться локальная инверсия, и объекты, которые находятся за пределами заданной области, исключаются из прямых

расчетов. Для исключения объектов из прямых расчетов в инверсии, выполняется запуск прямой задачи магниторазведки с объектами, которые находятся за пределами области, в которой будет проводиться локальная инверсия. Полученные сигналы передаются на вход инверсии и вычитаются из практических данных (корректировка весовых функций происходит автоматически).

4.1.7 Определение параметров конечноэлементной сетки

Для того чтобы сократить время, связанное с подготовкой к проведению исследований для различных задач электроразведки, были определены параметры для построения оптимальных сеток: размер расчетной области, шаги базовой сетки, коэффициент разрядки для сетки.

Параметры выбираются в зависимости от особенностей системы наблюдений и геоэлектрической среды. Учитывается положение приемников и генераторов относительно дневной поверхности, длина временной шкалы, наличие в среде криволинейных границ между слоями и электропроводность слоев, а также тип выделения поля и тип источника. Если генератор или приемник расположен на дневной поверхности или внутри слоя, например, морская электроразведка, то предполагается использование метода двойного выделения [3,6,95,96]. Для рассмотренной в главе 2 системы наблюдений использовалось одноэтапное выделения поля из непроводящей среды. Если в среде отсутствуют криволинейные границы между слоями, то используется одноэтапное выделение поля из горизонтально-слоистой среды.

Для определения оптимальных параметров было проведено большое количество расчетов для различных систем наблюдений и геоэлектрических сред и проанализирована погрешность на вложенных сетках и путем увеличения размера расчетной области.

Полученные в результате исследований параметры для построения сеток заложены в программную систему, при этом пользователю предоставляется возможность их корректировки.

4.1.8 Визуализация результатов моделирования электромагнитных и магнитных полей и инверсии в виде графиков

Были разработаны инструментальные средства для анализа результатов, полученных при моделировании электромагнитных и магнитных полей и в результате 3D-инверсии. Для этого были разработаны средства отображения сигналов для различных типов систем наблюдений. Для всех рассмотренных электромагнитных технологий предоставлена возможность отображать данные в приемнике от времени, для технологий первого типа – по профилю, для технологий второго типа – по профилю приемников. При этом сделан удобный инструментарий задания цветов, маркеров, подписей, масштабов, а также сохранения в графические файлы векторного (emf) и растрового (png) форматов для оформления отчетов по интерпретации данных геологоразведочных работ.

Предусмотрены функции, позволяющие оценить отклонения между сигналами, полученными от различных моделей, например, расчета функционала (48) (см. раздел 3.1).

Для анализа качества инверсии предусмотрена возможность сравнения с данными бурения. Для сравнения строится цифровая трехмерная модель с учетом трехмерных неоднородностей, рельефа дневной поверхности и криволинейных границ между слоями (см. главы 2, 3). По построенной трехмерной цифровой модели среды выполняется выдача значений физических параметров вдоль скважины с сохранением результатов в файл, в формате для просмотра в постпроцессоре (см. раздел 2.4, 3.1 и 3.2.1).

4.2 Вычислительная часть

Представленные в диссертационной работе методы моделирования и алгоритм проведения трехмерной совместной инверсии интегрированы в состав программного комплекса [14,15,16] (Приложение А).

Укрупненная архитектура комплекса для решения задач электроразведки и магниторазведки приведена на рис. 4.2. Комплекс предназначен для трехмерной обработки данных и проведения методических расчетов.

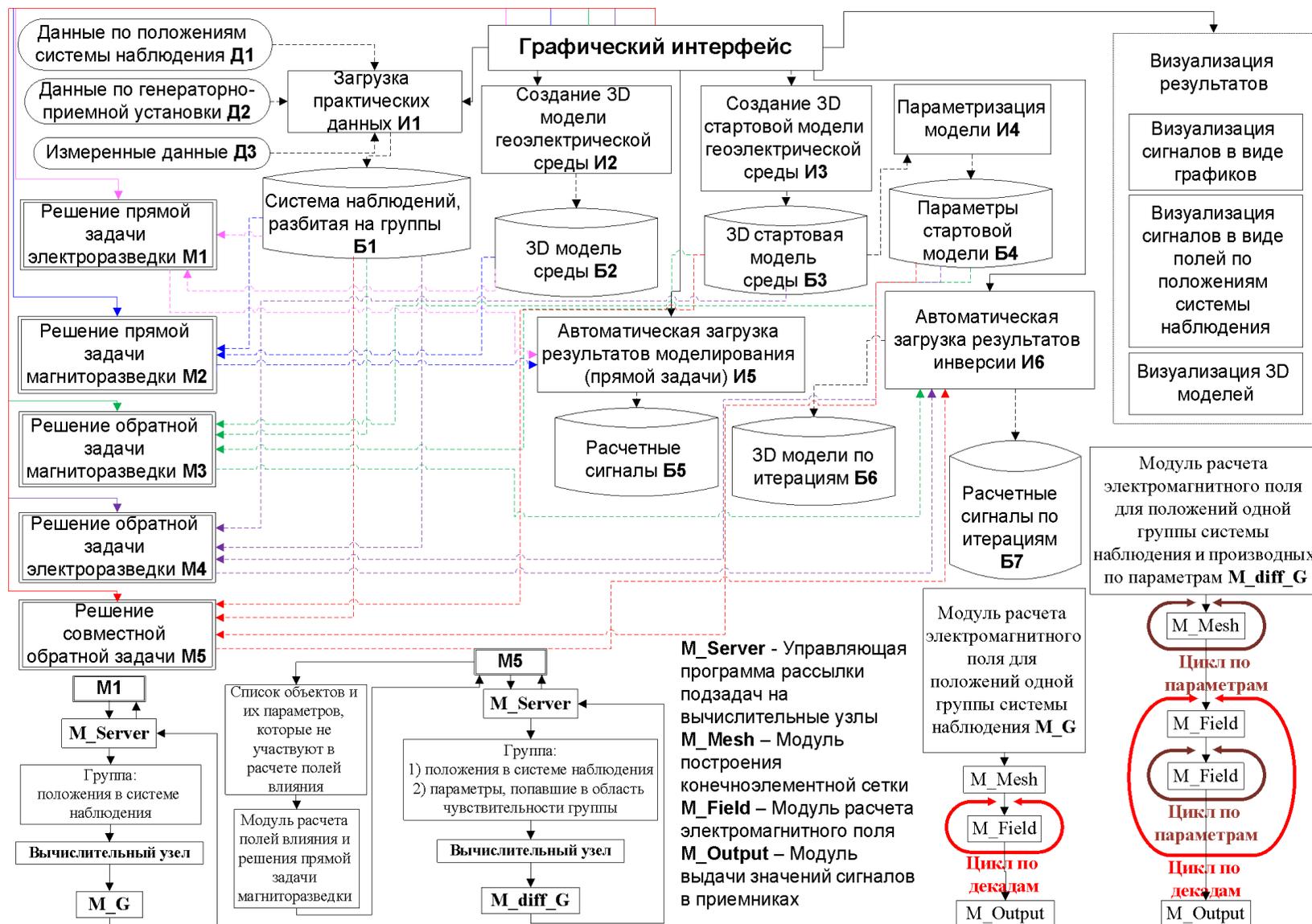


Рисунок 4.2 – Укрупненная схема архитектуры программного комплекса 3D-обработки данных геологоразведки

Был реализован алгоритм построения конечноэлементной сетки (КЭ) из раздела 1.1.

Алгоритм построения конечноэлементной сетки реализован набором нескольких модулей. Стоит отметить, что модули, используемые для построения конечноэлементной сетки, универсальны, они не привязаны к конкретному типу решаемой задачи.

Первый модуль определяет размеры расчетной области, на ее основе строит первичную базовую сетку, определяет материалы, которые входят в сетку на основе геоэлектрической модели, описанной с помощью слоев (в шаблонных координатах) и трехмерных неоднородностей, расположенные в слоях. На основе положения приемника и генератора генерируется область дробления сетки и определяется шаг для подобластей первичной базовой сетки.

Шаблонные координаты слоев получены из усредненных значений Z координат криволинейных границ слоев. Область усреднения определяется на основе типа установки. Шаблонные координаты слоев подаются на вход первому модулю, который выполняет первый и второй этапы алгоритма. Данное усреднение выполняется для того, чтобы при использовании технологий выделения поля, нормальное поле было рассчитано от среды, наиболее близкой к трехмерной среде [95,96].

Следующий модуль строит аппроксимацию криволинейных границ между слоями. Запускается программа для автоматического построения сглаживающих сплайнов [4].

Для обработки практических данных информация о криволинейных границах между слоями может быть получена из сейсмических данных. Причем эти данные сейсмической обработки могут не покрывать всю расчетную область. Для решения этой проблемы реализован алгоритм экстраполяции данных.

Другой проблемой может быть очень большое число точек, в этом случае возрастает время решения СЛАУ для определения весов сплайна. Для уменьшения этих временных затрат анализируется распределение точек рельефа в пространстве. Для рельефов, у которых одинаковое распределение точек в

пространстве, сборка матрицы и ее факторизация выполняется один раз. Кроме того, для решения проблем малого и большого числа точек в интерфейсной части предусмотрены инструментальные средства для работы с криволинейными границами.

Третий модуль строит базовую сетку вдоль осей X, Y, Z [98].

Следующий модуль выполняет «встраивание» геоэлектрических неоднородностей в виде горизонтальных слоев и трехмерных объектов в базовую сетку и отображение базовой сетки с ячейками в виде параллелепипедов в сетку с шестигранными ячейками, грани которых аппроксимируют изогнутые поверхности. Примеры построенных сеток показаны в разделе 1.1 и работах [94,95,107].

Был реализован алгоритм решения мультифизической обратной задачи, которая описана в разделе 1.4, для проведения совместной трехмерной интерпретации данных электроразведки и магниторазведки. Запуск инверсии выполняется из интерфейсной части программного комплекса после ввода практических данных, задания для них весовых коэффициентов, а также задания стартовой модели.

Модуль, выполняющий инверсию, запускает расчет прямых задач. При одновременной обработке данных электроразведки и магниторазведки, прямые расчеты для них запускаются параллельно.

Расчет прямой задачи для очередного приближения геофизической модели и расчет полей влияния для задачи магниторазведки выполняется в папке запуска инверсии. Расчет прямой задачи и полей влияния для задачи электроразведки выполняется на вычислительных узлах в распределенной системе. Задачи распределяются между узлами на основе размера группы и мощностей вычислительного узла [91].

Расчет магнитного поля в приемниках выполняется параллельно.

Расчет, выполняющийся на узле, распараллелен на нескольких уровнях. Расчет производных по параметрам и прямой задачи выполняются последовательно в рамках одной декады (группа времен с одинаковым шагом

между ними) (см. [91,94,98,107]). Решение конечноэлементной СЛАУ функциональной задачи распараллелено на все физические ядра, выделенные для данного расчета. Далее считаются поля влияния. Они считаются параллельно на всех физических ядрах, выделенных для данного расчета. При этом есть еще распараллеливание конечноэлементной СЛАУ. Если памяти, требующейся для параллельного расчета производных по параметрам, не хватает, то количество полей влияния, которые считаются параллельно, уменьшается, а свободные ядра распределяются между ними для распараллеливания решения СЛАУ.

Построение конечноэлементной сетки для расчета производных по параметрам выполняется на первой декаде для каждого параметра.

Производные по параметрам трехмерных неоднородностей, которые не находятся внутри расчетной области для обрабатываемой группы положений (см. раздел 1.1), принимаются равными нулю и соответствующие задачи не решаются. Более того, изменения параметров блоков блочных структур, которые попадают в расчетную область, но расположены достаточно далеко от подобласти, содержащей положения системы, оказывают очень слабое влияние на сигнал. Поэтому соответствующие производные также принимаются равными нулю и никакие вычисления не выполняются.

Одна итерация инверсии выполняется в два этапа. На первом этапе поля влияния считаются для всех параметров. На втором этапе относительно модели, полученной на первом этапе, считаются поля влияния только для физических параметров трехмерных неоднородностей и параметров слоев. Данный подход позволяет улучшить сходимость инверсии.

Регуляризирующие параметры выбираются адаптивно в процессе решения обратной задачи. При этом регуляризирующая добавка с параметрами обеспечивает поиск очередного приближения искомого параметра в заданном диапазоне значений, что позволяет не нарушать геометрию структурных частей геологической модели и не приводит к нефизичным значениям (например, отрицательная электропроводность).

4.3 Пример использования программного комплекса для проектирования электроразведочных работ

Для демонстрации использования программного комплекса для проектирования работ была построена геоэлектрическая модель одной из кимберлитовых трубок в Якутии. Полученная геоэлектрическая модель хорошо соответствует геологической модели, представленной в [94], что подтверждает высокое качество данных аэроэлектромагнитной разведки и выполненной 3D-инверсии.

На данной модели кимберлитовой трубки проводился анализ возможностей вертолетной съемки и съемки с двумя модификациями технологии, использующей БПЛА.

Первая технология использует вертолетную платформу «Импульс-А», радиус генераторной петли — 7 м, длительность импульса тока — 1 мс. На рис. 4.3а представлена геоэлектрическая модель кимберлитовой трубки, перекрытой неоднородными верхними слоями. Вторая и третья технологии используют БПЛА для перемещения петлевого приемника. Во второй технологии источником является заземленная электрическая линия длиной 1200 м. Местоположение источника и одна из линий съемки, по которой перемещается приемник с помощью БПЛА, показаны на рис. 4.3б. И, наконец, в третьей технологии источник представляет собой большую петлю размером 1x1 км² (ее расположение показано на рис. 4.3в).

Однако прежде, чем непосредственно сравнить возможности различных технологий, была проведена оценка уровня измеряемых сигналов для технологии БПЛА-МПП с источником в виде заземленной горизонтальной электрической линией.

На рис. 4.4 показано расположение заземленного источника и приемников вдоль линий полета L4 и L5 для технологии БПЛА-МПП. Кроме того, показан геоэлектрический разрез, полученный в результате 3D-инверсии.

На рис. 4.5 показаны экспериментальные сигналы и соответствующие теоретические сигналы, рассчитанные для модели, представленной на рис. 4.4 (для сравнения на этом рисунке также показаны сигналы, рассчитанные для

модели горизонтально-слоистой среды, которая использовалась в качестве исходной модели для инверсии). Все сигналы представлены для единичного тока и приемника единичной площади и одного витка.

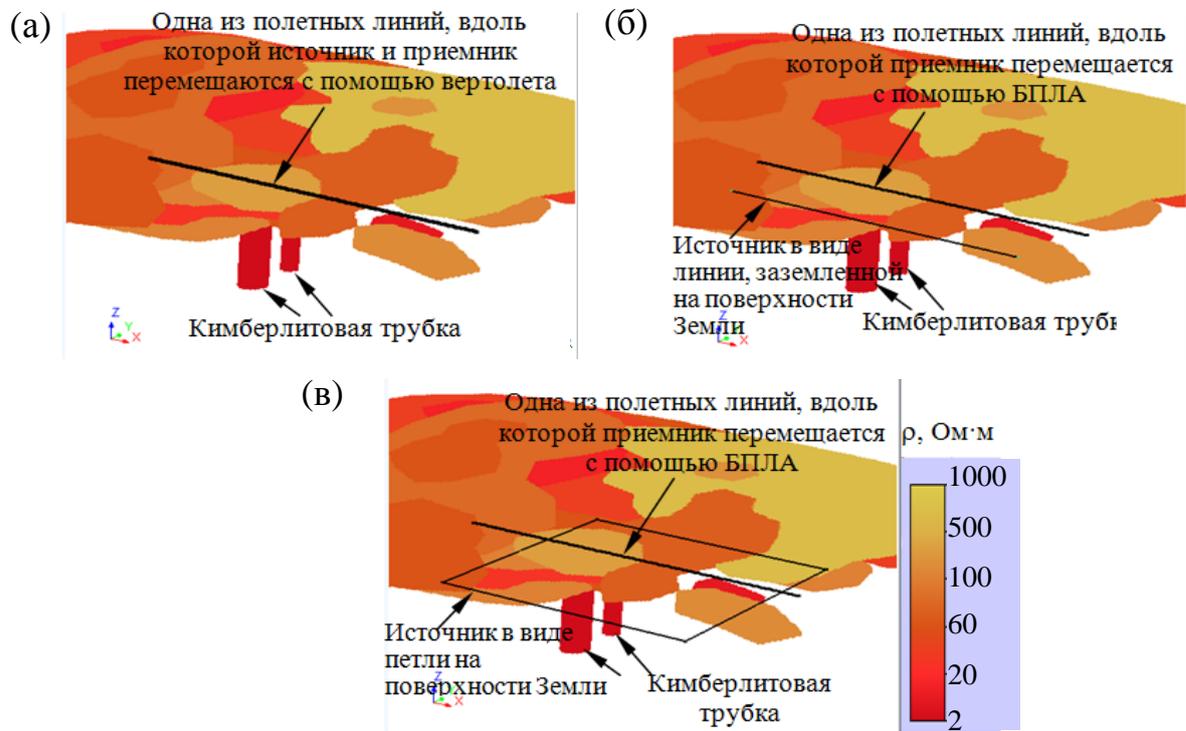


Рисунок 4.3 – Геоэлектрическая модель кимберлитовой трубки с перекрывающим неоднородным слоем, расположение источников и профиля съемки: (а) технология с использованием вертолетной платформы, (б) технология БПЛА-МПП с использованием в качестве источника заземленной электрической линии; (в) Технология БПЛА-МПП с использованием в качестве источника большой петли, расположенной на дневной поверхности

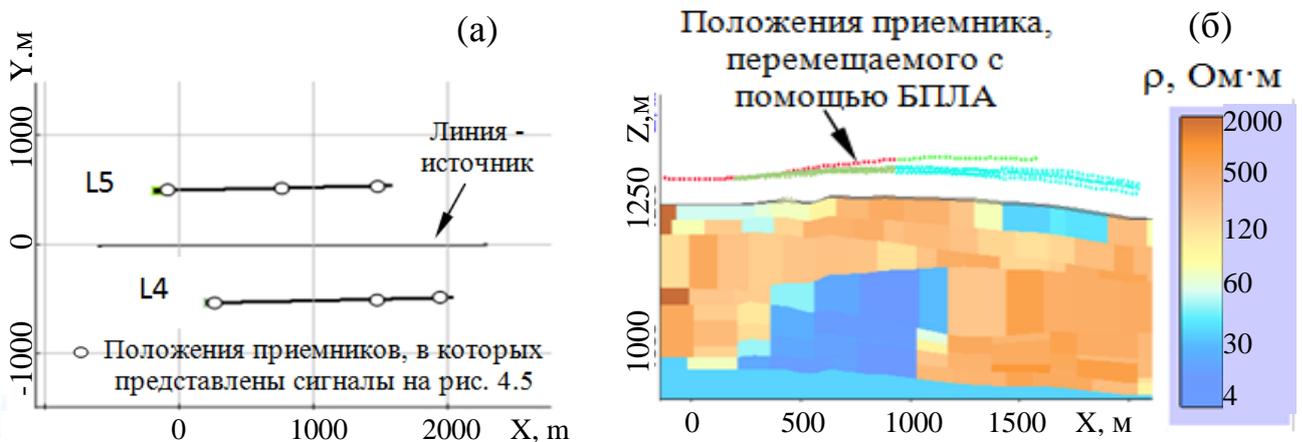


Рисунок 4.4 – Расположение источника и приемников вдоль линий полета L4 и L5 для технологии БПЛА-МПП (а); геоэлектрический разрез, полученный в результате 3D-инверсии (б)

Из рис. 4.5 видно, что при токе 1А нижний уровень измеряемого сигнала составляет около 10^{-4} мВ. Стоит отметить, что увеличение витков приемника приведет и к увеличению шума, поэтому увеличения уровня измеряемого сигнала можно добиться либо за счет увеличения тока в источнике, либо за счет уменьшения шумов в приемнике (вызванных его колебаниями и влиянием БПЛА).

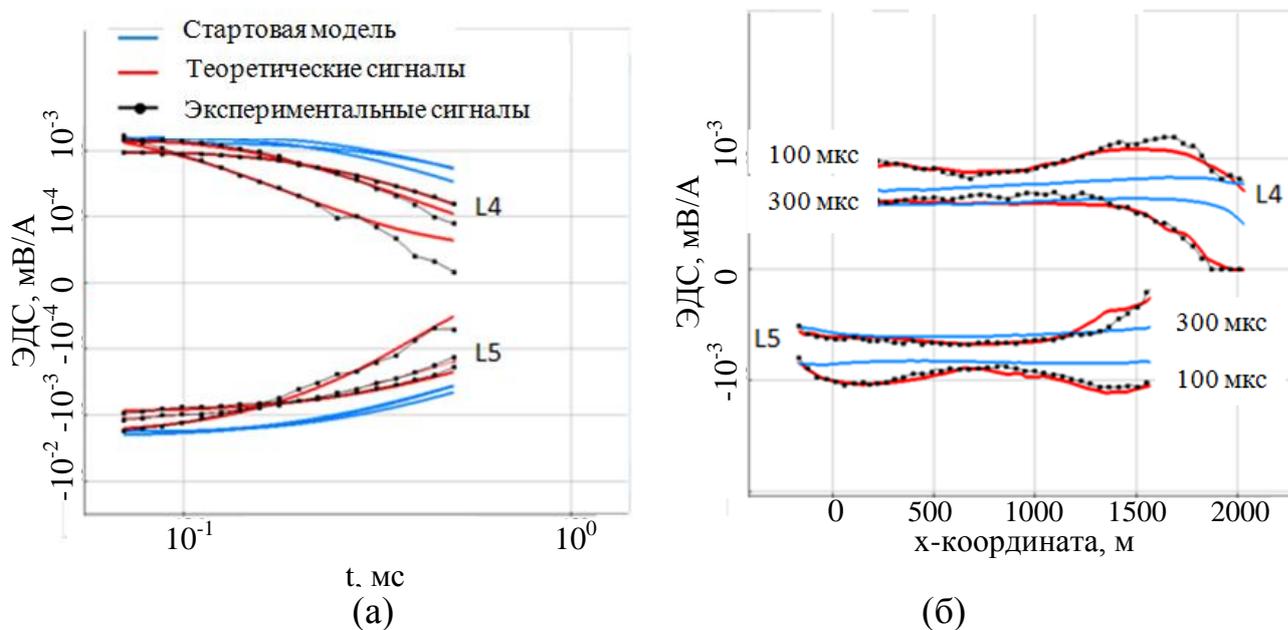


Рисунок 4.5 – Зависимость сигналов БПЛА-МПП от времени в некоторых точках профилей L4 и L5 (а) и сигналов вдоль профилей на двух временных каналах (б)

На рис. 4.6 показаны сигналы вдоль линии съемки для трех технологий электроразведки. Как и ранее, все сигналы представлены для единичного тока и приемника единичной площади и одного витка. На всех рисунках для каждого временного канала показаны две кривые: одна – для модели с включением кимберлитовой трубки, другая – для модели без нее. Видно, что для всех технологий относительная аномальная реакция кимберлитовой трубки со временем увеличивается.

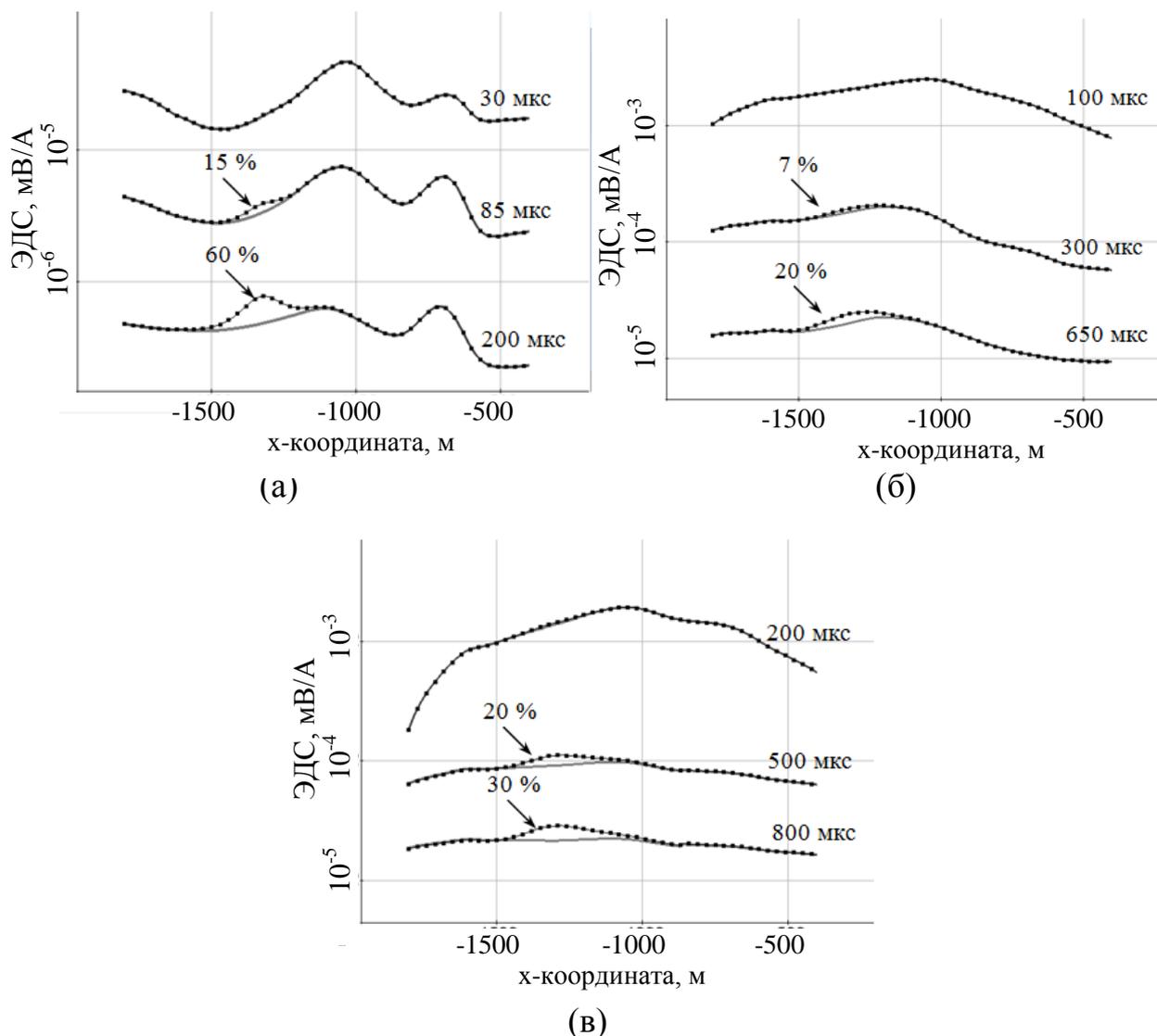


Рисунок 4.6 – Сигналы по профилю съемки для нескольких временных каналов, полученные путем 3D-моделирования для технологий «Импульс-А» с вертолетной платформой для перемещения установки (а), БПЛА-МПП с заземленной электрической линией в качестве источника (б) и БПЛА-МПП с большой петлей в качестве источника (в): модель с кимберлитовой трубкой (кривые черного цвета) и без кимберлитовой трубки (кривые серого цвета)

Согласно данным, представленным в [94], на времени 200 мс вертолетная платформа «Импульс-А» стабильно измеряет сигнал. Поэтому можно сказать, что относительный аномальный отклик для первой из рассматриваемых технологий достигает 60% (см. рис. 4.6а).

Результаты, представленные на рис. 4.6б, показывают, что приемлемый уровень относительной аномалии (20%) для технологии БПЛА-МПП с

источником в виде заземленной электрической линии достигается только в момент времени 650 мс, где уровень сигнала почти на порядок ниже того сигнала, который был успешно измерен в эксперименте, представленном выше. Это говорит о том, что для решения рассматриваемой задачи необходимо увеличить ток почти на порядок или уменьшить шумы в приемнике.

Если в технологии БПЛА-МПП в качестве источника используется большая индукционная петля, то относительный уровень аномалии и уровень сигнала немного выше, чем при заземленной электрической линии (см. рис. 4.6в). Кроме того, увеличение тока в таком источнике осуществить проще, поскольку он не заземлен. Однако в ходе экспериментов необходимо отдельно изучать уровень «паразитных» токов, которые остаются в генераторной петле после выключения основного импульса и могут оказать существенное влияние на измерения.

Сравнительный анализ показал, что при поиске кимберлитовых трубок, представляющих собой локальные вертикальные тела небольшого размера в плане, наибольшую разрешающую способность имеет технология «Импульс-А», использующая вертолетную платформу. Различные модификации технологий БПЛА-МПП, как минимум, требуют повышения уровня измеряемого сигнала. В этом случае более предпочтительной представляется технология, использующая в качестве источника большую индукционную петлю, но необходимы экспериментальные работы для оценки уровня «паразитных» токов.

Таким образом, если при поиске достаточно крупных рудных объектов технологии БПЛА-МПП выглядят более перспективными из-за значительного снижения затрат на проведение работ [100], то при поиске небольших целевых объектов лучше использовать технологии аэроэлектроразведки, в которых источник движется вместе с приемником.

Пример применения программного комплекса для обоснования совместной обработки данных электроразведки и магниторазведки рассмотрен в разделе 2.4. Пример применения программного комплекса для обоснования новых технологий был рассмотрен в разделе 3.2.

Выводы по главе 4

1. Разработаны подсистемы вычислительной части, включающие построение оптимизированных неконформных сеток при решении трехмерных прямых и обратных задач, а также инструментальные средства графического интерфейса, включающие работу с мультифизическими данными, весовыми функциями и построением стартовых моделей для мультифизической 3D-инверсии, автоматизированное определение оптимальных настроек для построения конечноэлементных сеток, визуализацию результатов 3D-инверсии для проведения сравнительного анализа с данными практических измерений и результатов бурения. Эти подсистемы включены в состав проблемно-ориентированного программного комплекса и могут применяться при проектировании полевых электроразведочных работ, включая разработку новых конфигураций приемно-генераторных установок, а также для совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок с анализом эквивалентности получаемых 3D-моделей.

2. Продемонстрирована работоспособность программного комплекса для предложенного в данной работе комплекса методов: для решения задач совместной 3D-интерпретации практических аэрогеофизических данных большого объема (раздел 2.4), обоснования новых технологий электромагнитных зондирований (раздел 3.2) и проектирования работ (раздел 4.3), а также анализа эквивалентностей 3D-моделей для различных технологий электроразведки (разделы 3.1 и 3.2.2).

3. По результатам проведенных работ было зарегистрировано в ФИПС (Роспатент) 3 программы для ЭВМ [14,15,16] (Приложение А). Разработанное программное обеспечение применялось для проектирования полевых работ и трехмерной обработки практических данных, полученных на золоторудных месторождениях Дальнего Востока и медно-порфировых месторождениях на территории Северного Казахстана (акт внедрения, Приложение Б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан алгоритм построения оптимизированных неконформных конечноэлементных сеток, обеспечивающий совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов и предназначенный как для решения прямых задач, в том числе с большим числом 3D-объектов, так и для расчета полей влияния геометрических параметров. Помимо непосредственного включения 3D-объектов в сетку и устранения «перехлестов», алгоритм включает в себя процедуру устранения «висячих углов» – ситуацию, когда к нетерминальному («большому») ребру примыкают терминальные ребра конечных элементов с разными материалами. При этом «большой» конечный элемент и «малые» конечные элементы могут иметь как общую грань, так и только общее ребро.

Показано, что если не устранять ситуацию «висячих углов», то в некоторых случаях ошибка может резко возрасти (даже на порядок), что в конечном итоге будет приводить к проблемам в решении обратных задач. При этом даже для геоэлектрических моделей с очень большим количеством встраиваемых объектов, получаемых из-за аппроксимации объектов сложной формы (что, как правило, используется при решении прямых задач при проведении различного рода методических расчетов), время расчета электромагнитного поля возрастет всего лишь в 1.5 раза (при этом, если решать эту проблему уменьшением шага в базовой сетке, вычислительные затраты вырастут более, чем в 2.5 раза). Для геоэлектрических же моделей, характерных для обратных задач (которые являются наиболее вычислительно затратными), время расчета электромагнитного поля практически не изменится при устранении ситуации с «висячими углами» и резко возрастет при использовании регулярных (или более подробных базовых) сеток.

2. На основе результатов исследования эквивалентности при определении глубины тел с повышенными магнитными свойствами и полученных ранее положительных результатов восстановления свойств и геометрии локальных

проводящих объектов по данным ЭМ съемки разработан метод совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок. Он основан на 3D-моделировании и 3D-инверсии и позволяет оценивать сверху магнитную восприимчивость для локальных проводящих структур, расположенных под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями.

Работоспособность предложенного подхода показана как на синтетических данных, так и на практических данных аэрогеофизических исследований, проведенных на площади Creighton (Канада) при поиске полиметаллических руд. Качество реконструкции морфологии и физических свойств локальных структур подтверждено сравнением с результатами бурения набора наклонных скважин.

3. Предложены методы проверки эквивалентности трехмерных геоэлектрических моделей, основанные на использовании процедур конечноэлементного 3D-моделирования и геометрических 3D-инверсий. Их работоспособность продемонстрирована на 3D-модели, полученной в результате 3D-инверсии практических данных аэроэлектроразведки на площади Creighton (Канада), и при обосновании возможностей новой перспективной технологии «Звезда» при восстановлении границ нефтегазонасыщенной зоны.

Для 3D-модели, полученной в результате 3D-инверсии данных аэроэлектроразведки, показано, что основная эквивалентность возникает из-за большого расстояния между полетными линиями, и еще одна эквивалентность связана со слабой чувствительностью к положению нижней кромки нижних проводящих блоков. Остальные параметры выявленных локальных целевых объектов для рассмотренной системы наблюдений определяются достаточно надежно и в целом, было получено, что по критерию проводки скважин полученные эквивалентные модели достаточно близки и с геологической точки зрения принципиальной разницы между полученными эквивалентными моделями нет.

Для технологии «Звезда» показаны ее преимущества по сравнению с известными старт-стопными (ВЭД-ВЭЛ) и буксируемыми (ГЭД-ГЭЛ)

технологиями при решении задачи оконтуривания нефтегазовых залежей небольшого размера на шельфе, а также перспективы ее использования для решения мониторинговых задач. При этом анализ эквивалентности «сопротивление целевого объекта – положение его границы» показал, что выявленная зона эквивалентности не ухудшает решение рассматриваемых задач.

4. Разработаны подсистемы вычислительной части и инструментальные средства графического интерфейса, которые включены в состав проблемно-ориентированного программного комплекса.

Работоспособность программного комплекса для предложенного в данной работе комплекса методов продемонстрирована на примере решения задач совместной 3D-интерпретации практических аэрогеофизических данных большого объема на площади Creighton (Канада) при поиске полиметаллических руд, обоснования новой технологии «Звезда» для электромагнитных зондирований на шельфе, а также анализа эквивалентностей 3D-моделей для различных технологий электроразведки.

Разработанное программное обеспечение применялось для проектирования полевых работ и трехмерной обработки практических данных, полученных на золоторудных месторождениях Дальнего Востока и медно-порфириновых месторождениях на территории Северного Казахстана (акт внедрения, Приложение Б).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков, П.Г. Первые результаты опытно-методических работ на месторождении золото-порфирового типа в Приморье / П.Г. Бирюков, С.А. Терешкин, М.С. Шкиря, А.П. Сивенкова, А.А. Гишлиев //22-я уральская молодежная научная школа по геофизике: сборник научных материалов. Пермь – 2021. – С. 12-16.
2. Бирюков, П.Г. Применение импульсной электроразведки для выделения кварц-сульфидных жил на Дальнем Востоке / П.Г. Бирюков, А.С. Башкеев, И.Н. Горячев, А.П. Сивенкова, М.С. Шкиря // XXIII Уральская Молодежная научная школа по геофизике. Сборник научных материалов. - Екатеринбург. - 2022. - С. 24-28.
3. Вагин, Д. В. Методы и реализующее их программное обеспечение для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектромагнетизма, термоупругости и многофазной фильтрации : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : дис. ... д-ра техн. наук / Д. В. Вагин ; Персова М. Г. (науч. рук.) . – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. – 300 с. – Место защиты: Новосиб. гос. техн. ун-т.
4. Киселев, Д.С. Разработка методов моделирования геоэлектромагнитных полей и восстановления трехмерных сред с искривленными границами геоэлектрических слоев : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : дис. ... канд. техн. наук / Д. С. Киселев ; Соловейчик Ю.Г. (науч. рук.) . – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – 186 с. – Место защиты: Новосиб. гос. техн. ун-т.
5. Кожевников, Н. О., Антонов, Е. Ю. Индукционно-вызванная поляризация и оценка ее проявления с помощью нормированных переходных характеристик //Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61. – №. 10. – С. 1428-1444. <https://doi.org/10.15372/GiG2019159>.

6. Персова, М.Г. Анализ возможностей технологий морской электроразведки при решении задач картирования и мониторинга нефтегазовых месторождений с помощью 3D-моделирования и геометрической 3D-инверсии / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, А.П. Сивенкова, Д.В. Вагин, Д.С. Киселев // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. -2024. -Том 69. -№ 2 – С. 274–302.
7. Персова, М.Г. Возможности многомерной инверсии данных морской электроразведки при решении задачи поиска нефтегазовых месторождений. Опыт и перспективы/ М. Г. Персова, Ю. Г. Соловейчик, А. П. Сивенкова, Д. В. Вагин, Д. С. Киселев //Инженерная и рудная Геофизика 2023. – 2023. – С. 719-724.
8. Персова, М.Г. Возможности применения совместной 3D-инверсии для обработки аэрогеофизических данных. Методика и анализ чувствительности / М. Г. Персова, Ю. Г. Соловейчик, А. П. Сивенкова, Д. В. Вагин, Д. С. Киселев, А. С. Киселева //Инженерная и рудная Геофизика 2023. – 2023. – С. 485-492.
9. Персова, М.Г. Зондирование становлением поля трехмерных сред и проблемы интерпретации //Сибирский журнал индустриальной математики. – 2009. – № 2(38). – С. 84-96.
10. Персова, М.Г. Об идентификации заглубленных объектов с высокой магнитной восприимчивостью, перекрытых неоднородным по магнитным свойствам верхним слоем, по данным комплексных аэрогеофизических съемок /М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, А.П. Сивенкова, Д.В. Вагин // Инженерная и рудная геофизика – 2024 : сб. материалов 20 науч.-практ. конф. и выст., Казань, 13 - 16 мая 2024 года – Москва : ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ, 2024. – С. 315–319. - ISBN 978-5-9651-1491-7.
11. Персова, М.Г. Особенности расчета чувствительностей при реализации геометрических 3D-инверсий в задачах электроразведки / М. Г. Персова, Ю. Г. Соловейчик, Д. В. Вагин, А. П. Сивенкова, Е. И. Симон, М. Г.

Токарева. // Вычислительные технологии. – 2025. – Т. 30. – № 1. – С. 64–79. DOI 10.25743/ICT.2025.30.1.007.

12. Персова, М.Г. Параллельная реализация геометрической 3D-инверсии данных аэроэлектроразведки / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.С. Киселев, А.С. Киселева, А.П. Сивенкова, Д.В. Вагин //Инженерная и рудная геофизика 2022. – 2022. – С. 457-464.
13. Персова, М.Г. Подход к мультифизичной 3D-инверсии данных электроразведки, магниторазведки и гравиразведки при поиске твердых полезных ископаемых / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, Д.С. Киселев, А.П. Сивенкова, А.С. Киселева, А.М. Гриф //Инженерная и рудная геофизика 2022. – 2022. – С. 422-429.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662177 от 18.09.2019. Информационно-программная система обработки данных для сопровождения электромагнитных технологий геологоразведки / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., Гриф А.М., Киселев Д.С., Кошкина Ю.И., Патрушев И.И., Сивенкова А.П., Симон Е.И., Токарева М.Г.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664136 от 09.11.2020. Программный модуль для расчета процесса индукционной вызванной поляризации / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., Сивенкова А.П.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661749 от 15.07.2021. Программный модуль для расчета нестационарных электромагнитных полей, порождаемых заземленной электрической линией в трехмерных средах с сложной геометрией поверхностей геологических слоев/ Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., Сивенкова А.П.
17. Сивенкова, А.П. Анализ эквивалентности трехмерных моделей при 3D-интерпретации данных аэроэлектроразведки // Системы анализа и обработки данных, 2024. – Том 94. – .№2 – С. 69 – 84

18. Сивенкова, А. П., Персова, М.Г. Интерпретация данных электромагнитного зондирования по технологии MobileMT // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 30 нояб.–4дек. 2020 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 152-155.
19. Соловейчик, Ю.Г. Математическое моделирование на базе метода конечных элементов трехмерных электрических полей в задачах электроразведки / Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, В.С. Моисеев, А.В. Васильев //Физика земли. – 1997. – №. 9. – С. 67-71.
20. Соловейчик, Ю.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач / Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, М.Г. Персова //Новосибирск. – 2007. – 896с.
21. Соловейчик, Ю.Г. Моделирование нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов / Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, В.С. Моисеев, Г.М. Тригубович //Физика Земли. – 1998. – Т. 10. – С. 78-84.
22. Табаровский, Л. А., Эпов, М. И. Оценка разрешающей способности электромагнитных методов //Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – №. 5. – С. 568-578.
23. Тригубович, Г.М., Персова, М.Г., Соловейчик Ю.Г. 3D-электроразведка становлением поля // Новосибирск: Наука. –2009. –218 с.
24. Шойхонова, Т.С. Трехмерная инверсия данных импульсной электроразведки для поисков зон сульфидной минерализации на территории северного Казахстана / Т.С. Шойхонова, Е.А. Крайнова, М.С. Шкиря, А.Ю. Белова, А.П. Сивенкова //22-я уральская молодежная научная школа по геофизике: сборник научных материалов. Пермь – 2021. – С. 130-135.
25. Abbas, M. Hydrogeophysical characterization and determination of petrophysical parameters by integrating geophysical and hydrogeological data at the limestone vadose zone of the Beauce aquifer / M. Abbas, J. Deparis, A. Isch, C. Mallet, C. Jodry, M. Azaroual, B. Abbar, J. M. Baltassat //Journal of

- Hydrology. – 2022. – T. 615. – Art. 128725.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128725>.
26. Aghasi, A. A geometric approach to joint inversion with applications to contaminant source zone characterization / A. Aghasi, I. Mendoza-Sanchez, E. Miller, C. Ramsburg, L. Abriola // *Inverse Problems* – 2013 – T. 29 – № 11 – Art. 128725. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/29/11/115014>.
27. Ahmed, S. A new chapter in groundwater geophysics in India: 3D aquifer mapping through Heliborne Transient Electromagnetic Investigations // *Geological Society of India*. – 2014. – T. 84. – №. 4. – C. 501-503.
28. Alencar de Matos, C., Mendonça, C. A. Poisson magnetization-to-density-ratio and magnetization inclination properties of banded iron formations of the Carajás mineral province from processing airborne gravity and magnetic data // *Geophysics*. – 2020. – T. 85. – №. 5. – C. K1-K11. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0421.1>.
29. Ardestani, V. E., Fournier, D., Oldenburg, D. W. Gravity and magnetic processing and inversion over the Mahallat geothermal system using open source resources in Python // *Pure and Applied Geophysics*. – 2021. – T. 178. – №. 6. – C. 2171-2190. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02763-6>.
30. Badea, E.A. Finite-element analysis of controlled-source electromagnetic induction using Coulomb-gauged potentials / E.A. Badea, M.E. Everett, G.A. Newman, O. Biro // *Geophysics*. – 2001. – T. 66. – №. 3. – C. 786-799. <https://doi.org/10.1190/1.1444968>.
31. Bakr, S.A., Pardo, D. A multi-domain decomposition-based Fourier finite element method for the simulation of 3D marine CSEM measurements // *Computational Geosciences*. – 2017. – T. 21. – C. 345-357. <https://doi.org/10.1007/s10596-017-9615-6>.
32. Belova, A.Y. Application of 3D Modeling of Electromagnetic Sounding Data to Identify Zones of Sulfide Mineralization of Copper-Porphyry Type in The Territory of Northern Kazakhstan / A.Y. Belova, M.S. Shkirya, M.G. Persova, A.P. Sivenkova, T.S. Shoykhonova, Y.A. Davydenko // *Engineering and*

- Mining Geophysics 2021. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – T. 2021. – №. 1. – C. 1-11. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152039>.
33. Bossavit, A. Computational electromagnetism: variational formulations, complementarity, edge elements. – Academic Press, 1998
 34. Cagniard, L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting //Geophysics. – 1953. – T. 18. – №. 3. – C. 605-635. <https://doi.org/10.1190/1.1437915>.
 35. Cai, H. Parallelized 3D CSEM modeling using edge-based finite element with total field formulation and unstructured mesh / H. Cai, X. Hu, J. Li, M. Endo, B. Xiong //Computers & Geosciences. – 2017. – T. 99. – C. 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.11.009>.
 36. Castillo-Reyes, O. Parallel 3-D marine controlled-source electromagnetic modelling using high-order tetrahedral Nédélec elements/ O. Castillo-Reyes, J. de la Puente, L.E. García-Castillo, J.M. Cela //Geophysical Journal International. – 2019. – T. 219. – №. 1. – C. 39-65. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz285>.
 37. Castillo-Reyes, O., de la Puente, J., Cela, J.M. PETGEM: A parallel code for 3D CSEM forward modeling using edge finite elements //Computers & Geosciences. – 2018. – T. 119. – C. 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.07.005>.
 38. Caudillo-Mata, L. A., Haber, E., Schwarzbach, C. An oversampling technique for the multiscale finite volume method to simulate electromagnetic responses in the frequency domain //Computational Geosciences. – 2017. – T. 21. – C. 963-980. <https://doi.org/10.1007/s10596-017-9647-y>.
 39. Christensen, N.B. Resolution attributes for geophysical inversion models: Depth of investigation and novel measures //Near Surface Geophysics. – 2022. – T. 20. – №. 1. – C. 3-15. <https://doi.org/10.1002/nsg.12188>.

40. Christensen, N.B., Lawrie, K.C. Resolution analyses for selecting an appropriate airborne electromagnetic (AEM) system //Exploration Geophysics. – 2012. – Т. 43. – №. 4. – С. 213-227. <https://doi.org/10.1071/EG12005>.
41. Chung, Y. Three-dimensional modelling of controlled-source electromagnetic surveys using an edge finite-element method with a direct solver / Y. Chung, J.S. Son, T.J. Lee, H.J. Kim, C. Shin //Geophysical Prospecting. – 2014. – Т. 62. – №. 6. – С. 1468-1483. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12132>
42. Constable, S. Instrumentation for marine magnetotelluric and controlled source electromagnetic sounding //Geophysical Prospecting. – 2013. – Т. 61. – С. 505-532. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2012.01117.x>.
43. Cox L.H., Wilson G.A., Zhdanov M.S. 3D inversion of airborne electromagnetic data //Geophysics. – 2012. – Т. 77. – №. 4. – С. WB59-WB69. <https://doi.org/10.1190/GEO2011-0370.1>.
44. Di Massa, D. Joint interpretation of AEM and aeromagnetic data acquired over the Drybones kimberlite, NWT (Canada) / D. Di Massa, M. Fedi, G. Florio, A. Vitale, A. Viezzoli, V. Kaminski //Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Т. 158. – С. 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.07.004>.
45. Du, Z. Total hydrocarbon volume in place: Improved reservoir characterization from integration of towed-streamer EM and dual-sensor broadband seismic data / Z. Du, G. Namu, J. May, C. Reiser, J. Midgley //First Break. – 2017. – Т. 35. – №. 9. – С. 89-96. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.35.9.90115>.
46. Favino, M. Fully-automated adaptive mesh refinement for media embedding complex heterogeneities: application to poroelastic fluid pressure diffusion / M. Favino, J. Hunziker, E. Caspari, B. Quintal, K. Holliger, R. Krause //Computational Geosciences. – 2020. – Т. 24. – С. 1101-1120. <https://doi.org/10.1007/s10596-019-09928-2>.
47. Fleming, D., Sidhu, G. Diamond Drilling Assessment Report (MAW758 - BIGSTONE PROJECT) //Vancouver, Foran Mining Corporation. - 2015. -309 с. URL: <http://mineral-assessment.saskatchewan.ca> (Дата обращения 27.06.2023).

48. Fullagar, P.K. Rapid approximate inversion of airborne TEM / P.K. Fullagar, G.A. Pears, J.E. Reid, R. Schaa //Exploration Geophysics. – 2015. – T. 46. – №. 1. – C. 112-117. <https://doi.org/10.1071/EG14046>.
49. Ganis, B., Pencheva, G., Wheeler, M. F. Adaptive mesh refinement with an enhanced velocity mixed finite element method on semi-structured grids using a fully coupled solver //Computational Geosciences. – 2019. – T. 23. – C. 149-168. <https://doi.org/10.1007/s10596-018-9789-6>
50. Grayver, A. V., Bürg, M. Robust and scalable 3-D geo-electromagnetic modelling approach using the finite element method //Geophysical Journal International. – 2014. – T. 198. – №. 1. – C. 110-125. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu119>.
51. Haber, E., Schwarzbach, C. Parallel inversion of large-scale airborne time-domain electromagnetic data with multiple OcTree meshes //Inverse Problems. – 2014. – T. 30. – №. 5. – Art. 055011. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/30/5/055011>.
52. Han, Y. Investigation on an airborne magnetic and HeliTEM survey on Flin Flon area: дис. – University of Saskatchewan. - 2019.
53. Hansen, T.M., Minsley, B.J. Inversion of airborne EM data with an explicit choice of prior model //Geophysical Journal International. – 2019. – T. 218. – №. 2. – C. 1348-1366. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz230>.
54. Haroon A. Marine dipole–dipole controlled source electromagnetic and coincident-loop transient electromagnetic experiments to detect seafloor massive sulphides: Effects of three-dimensional bathymetry / A. Haroon, S. Hölz, R.A. Gehrmann, E. Attias, M. Jegen, T.A. Minshull, B.J. Murton //Geophysical Journal International. – 2018. – T. 215. – №. 3. – C. 2156-2171. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy398>.
55. Helwig S.L. Vertical dipole CSEM: technology advances and results from the Snøhvit field / S.L. Helwig, A.W. El Kaffas, T. Holten, Ø. Frafjord, K. Eide //First break. – 2013. – T. 31. – №. 4. – C. 63–68. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.31.4.67466>

56. Holten T. Vertical source, vertical receiver, electromagnetic technique for offshore hydrocarbon exploration / T. Holten, E.G. Flekkøy, B. Singer, E.M. Blixt, A. Hanssen, K.J. Måløy //First break. – 2009. – T. 27. – №. 5. – C. 89–93.<https://doi.org/10.3997/1365-2397.27.1299.28934>.
57. Jackisch, R. Drone-borne hyperspectral and magnetic data integration: Otanmäki Fe-Ti-V deposit in Finland / R. Jackisch, Y. Madriz, R. Zimmermann, M. Pirttijärvi, A. Saartenoja, B.H. Heincke, H. Salmirinne, J-P.Kujasalo, L. Andreani, R. Gloaguen //Remote sensing. – 2019. – T. 11. – №. 18. – Art. 2084. <https://doi.org/10.3390/rs11182084>.
58. Jackisch, R. Integrated geological and geophysical mapping of a carbonatite-hosting outcrop in Siilinjärvi, Finland, using unmanned aerial systems / R. Jackisch, S. Lorenz, M. Kirsch, R. Zimmermann, L. Tusa, M. Pirttijärvi, A. Saartenoja, H. Ugalde, Y. Madriz, M. Savolainen, R. Gloaguen //Remote Sensing. – 2020. – T. 12. – №. 18. – Art. 2998. <https://doi.org/10.3390/rs12182998>.
59. Ji, Y. 3D numerical modeling of induced-polarization grounded electrical-source airborne transient electromagnetic response based on the fictitious wave field methods / Y. Ji, X. Meng, W. Huang, Y. Wu, G. Li //Applied Sciences. – 2020. – T. 10. – №. 3. – Art. 1027. <https://doi.org/10.3390/app10031027>.
60. Johansen S. E. et al. Deep electrical imaging of the ultraslow-spreading Mohns Ridge / S.E. Johansen, M. Panzner, R. Mittet, H.E.F. Amundsen, A. Lim, E. Vik, M. Landrø, B. Arntsen //Nature. – 2019. – T. 567. – №. 7748. – C. 379-383. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1010-0>.
61. Kaminski, V., Legault, J. M., Kumar, H. The Drybones kimberlite: a case study of VTEM and ZTEM airborne EM results //ASEG Extended Abstracts. – 2010. – T. 2010. – №. 1. – C. 1-4. <https://doi.org/10.1071/ASEG2010ab092>.
62. Kaminski, V., Oldenburg, D. The geophysical study of Drybones kimberlite using 3D Time Domain EM Inversion and 3D ZTEM inversion algorithms //ASEG Extended Abstracts. – 2012. – T. 2012. – №. 1. – C. 1-4. <https://doi.org/10.1071/ASEG2012ab324>.

63. Kamm, J. Joint inversion of gravity, magnetic, and petrophysical data—A case study from a gabbro intrusion in Boden, Sweden / J. Kamm, I. A. Lundin, M. Bastani, M. Sadeghi, L.B. Pedersen // *Geophysics*. – 2015. – T. 80. – №. 5. – C. B131-B152. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0122.1>.
64. Kang, S., Oldenburg, D.W., Heagy, L.J. Detecting induced polarisation effects in time-domain data: a modelling study using stretched exponentials // *Exploration Geophysics*. – 2020. – T. 51. – №. 1. – C. 122-133. <https://doi.org/10.1080/08123985.2019.1690393>.
65. Key, K. 1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers // *Geophysics*. – 2009. – T. 74. – №. 2. – C. F9-F20. <https://doi.org/10.1190/1.3058434>.
66. King R.B., Constable S., Maloney J.M. A case study in controlled source electromagnetism: Near seabed hydrocarbon seep systems of Coal Oil Point, California, USA // *Marine and Petroleum Geology*. – 2022. – T. 139. – Art. 105636. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105636>.
67. Knai, T.A., Knipe, R.J. The impact of faults on fluid flow in the Heidrun Field // *Geological Society, London, Special Publications*. – 1998. – T. 147. – №. 1. – C. 269-282. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.147.01.18>.
68. Lee, S., Wheeler, M.F. Modeling interactions of natural and two-phase fluid-filled fracture propagation in porous media // *Computational Geosciences*. – 2021. – T. 25. – №. 2. – C. 731-755. <https://doi.org/10.1007/s10596-020-09975-0>.
69. Legeydo, P.Y., Ageenkov, E.V. Differentially-normalized Method of Electroinvestigation (DNME)-An Efficient Instrument for HC Exploration Off-and Onshore // *SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition*. – SPE, 2011. – Art. SPE-149910-MS. <https://doi.org/10.2118/149910-MS>.

70. Liu, Y., Yin, C. 3D inversion for multipulse airborne transient electromagnetic data //Geophysics. – 2016. – T. 81. – №. 6. – C. E401-E408. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0481.1>.
71. Lu X. Surface geometry inversion of transient electromagnetic data / X. Lu, CG Farquharson, PG Leli`evre // Geophysics – 2024– T. 89. – № 4. – C. E177-E192. <https://doi.org/10.1190/ GEO2023-0566.1>
72. Macnae, J. 3D-spectral CDIs: a fast alternative to 3D inversion? //Exploration Geophysics. – 2015. – T. 46. – №. 1. – C. 12-18. <https://doi.org/10.1071/EG14036>.
73. Macnae, J. Airborne Electromagnetic Systems //ASEG Extended Abstracts. – 2007. – T. 2007. – №. 1. – C. 1-4. <https://doi.org/10.1071/ASEG2007ab082>.
74. Mahmoodi, O. New airborne geophysical surveys in the Creighton–Flin Flon area / O. Mahmoodi, R.O. Maxeiner, R. Morelli, O. Boulanger //Summary of Investigations. – 2018. – T. 2. – Miscellaneous Report 2018-4.2. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23861.01762>.
75. McMillan, M.S. 3D parametric hybrid inversion of time-domain airborne electromagnetic data / M. S. McMillan, C. Schwarzbach, E. Haber, D.W. Oldenburg //Geophysics. – 2015. – T. 80. – №. 6. – C. K25-K36. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0141.1>.
76. Milano, M. Joint interpretation of magnetic and gravity data at the Golgohar mine in Iran / M. Milano, R. Varfinezhad, H. Bizhani, M. Moghadasi, A.N. Kalateh, H. Baghzendani //Journal of Applied Geophysics. – 2021. – T. 195. – Art. 104476. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104476>.
77. Mogilatov, V. Theoretical and methodological substantiation of transient electromagnetic sounding from the Arctic drift ice / V. Mogilatov, P. Osipova , A. Zlobinskiy //Russian Geology and Geophysics. – 2020. – T. 61. – C. 1187-1195. <https://doi.org/10.15372/RGG2019130>.
78. Mogilatov, V., Goldman, M. Generalized Tikhonov's algorithm for accurate calculation of one-dimensional transient responses directly in time domain

- //Geophysical Prospecting. – 2020. – T. 68. – №. 2. – C. 690-708.
<https://doi.org/10.1111/1365-2478.12843>.
79. Monk, P. Finite element methods for Maxwell's equations. – Oxford university press, 2003.
80. Müller, D., Kwan, K., Groves, D.I. Geophysical implications for the exploration of concealed orogenic gold deposits: A case study in the Sandy Lake and Favourable Lake Archean greenstone belts, Superior Province, Ontario, Canada //Ore Geology Reviews. – 2021. – T. 128. – Art. 103892.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103892>.
81. Nabighian, M. N., Macnae, J. C. Time domain electromagnetic prospecting methods //Electromagnetic methods in applied geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B. – Society of Exploration Geophysicists, 1991. – C. 427-520. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802686.ch6>.
82. Nédélec, J. C. Mixed finite elements in \mathbb{R}^3 //Numerische Mathematik. – 1980. – T. 35. – C. 315-341.
83. Newman, G.A., Alumbaugh, D.L. Frequency-domain modelling of airborne electromagnetic responses using staggered finite differences //Geophysical Prospecting. – 1995. – T. 43. – №. 8. – C. 1021-1042.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1995.tb00294.x>.
84. N'Guessan, M.A. High order time integration and mesh adaptation with error control for incompressible navier–stokes and scalar transport resolution on dual grids / M.A. N'Guessan, M. Massot, L. Series, C. Tenaud //Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2021. – T. 387. – Art. 112542.
<https://doi.org/10.1016/j.cam.2019.112542>.
85. Oldenburg, D.W., Haber, E., Shekhtman, R. Three dimensional inversion of multisource time domain electromagnetic data //Geophysics. – 2013. – T. 78. – №. 1. – C. E47-E57. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0131.1>.
86. Osmani I.A. Assessment Report On Helicopter-borne Electromagnetic/Magnetic (HELITEM) Survey: Red Lake Mining District, Northwestern Ontario. - NTS Map Sheet 052/02. – 2012.

87. Pardo, D. Simulation of marine controlled source electromagnetic measurements using a parallel fourier hp-finite element method / D. Pardo, M.J. Nam, C. Torres-Verdín, M.G. Hoversten, I. Garay // *Computational Geosciences*. – 2011. – T. 15. – №. 1. – C. 53-67. <https://doi.org/10.1007/s10596-010-9195-1>.
88. Parshin, A. Lightweight unmanned aerial system for time-domain electromagnetic prospecting – the next stage in applied UAV-geophysics / A. Parshin, A. Bashkeev, Y. Davidenko, M. Persova, S. Iakovlev, S. Bukhalov, N. Grebenkin, M. Tokareva // *Applied Sciences*. – 2021. – T. 11. – №. 5. – Art. 2060. <https://doi.org/10.3390/app11052060>.
89. Persova, M.G. 3D Modeling of Time-domain AEM Fields with IP Effect in Complex Media with Topography/ M. G. Persova, Y. G. Soloveichik, D. V. Vagin, A. P. Sivenkova, A. S. Kiseleva, D. S. Kiselev, M. G. Tokareva // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2022. – T. 27. – №. 1. – C. 23-32. <https://doi.org/10.32389/JEEG21-027>.
90. Persova, M.G. An approach to the geometric 3D inversion of airborne EM data for detection and geometrization of local targets overlapped by laterally inhomogeneous layers / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, A.P. Sivenkova, Y.I. Koshkina // *Engineering and Mining Geophysics 2020*. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – T. 2020. – №. 1. – C. 1-8. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051090>.
91. Persova, M.G. Application of 3D Airborne Electrical Survey Data Processing in a Distributed Computing System when Solving the Problem of Searching for Polymetallic Ores / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.S. Kiselev, A.P. Sivenkova, D.A. Leonovich, M.G. Tokareva // *2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. – IEEE, 2023. – C. 1240-1243. <https://doi.org/10.1109/APEIE59731.2023.10347904>.
92. Persova, M.G. Comparative Analysis of the Resolution of Marine Electromagnetic Technologies in the Time and Frequency Domains / M.G.

- Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, A.P. Sivenkova, Y.I. Koshkina, M.G. Tokareva //2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2023. – C. 1210-1214. <https://doi.org/10.1109/APEIE59731.2023.10347768>.
93. Persova, M.G. Finite element solution to 3-D airborne time-domain electromagnetic problems in complex geological media using non-conforming hexahedral meshes / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, Y.I. Koshkina //Journal of Applied Geophysics. – 2020. – T. 172. – Art. 103911. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103911>.
94. Persova, M. G. Geometric 3-D inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to kimberlite pipes prospecting in a complex medium / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, G.M. Trigubovich, D.V. Vagin, A.M. Grif, D.S. Kiselev, A.P. Sivenkova //Journal of Applied Geophysics. – 2022. – T. 200. – Art. 104611. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104611>.
95. Persova, M.G. Geometric 2.5 D inversion of marine time domain electromagnetic data with application to hydrocarbon deposits prospecting / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, J.K. Kjerstad, A.P. Sivenkova, A.S. Kiseleva, D.S. Kiselev //Journal of Applied Geophysics. – 2023. – T. 212. – Art. 104996. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104996>.
96. Persova, M.G. Improving the Accuracy of 3-D Modeling Electromagnetic Fields in Marine Electrical Prospecting Problems / M. G. Persova, Y. G. Soloveichik, D. V. Vagin, A. P. Sivenkova, A. S. Kiseleva, M. G. Tokareva //2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2021. – C. 583-586. <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647511>.
97. Persova, M.G. Improving The Computational Efficiency of 3-D Modeling of Induced Polarization in Airborne Time-Domain Electromagnetic Problems / M. G. Persova, Y. G. Soloveichik, D. V. Vagin, A. S. Kiseleva, A. P. Sivenkova, E. I. Simon //Engineering and Mining Geophysics 2021. – European

- Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – T. 2021. – №. 1. – С. 1-9.
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152081>.
98. Persova, M. G. Improving the computational efficiency of solving multisource 3-D airborne electromagnetic problems in complex geological media / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, A. P. Sivenkova, A.M. Grif //Computational Geosciences. – 2021. – Т. 25. – №. 6. – С. 1957-1981.
<https://doi.org/10.1007/s10596-021-10095-6>.
99. Persova, M.G. Numerical scheme for modelling the electromagnetic field in airborne electromagnetic survey taking into account follow currents in transmitter loop / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, Y.I. Koshkina, E.I. Simon //2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2018. – С. 216-221. <https://doi.org/10.1109/APEIE.2018.8546324>.
100. Persova, M.G. Resolution Analysis of Airborne Electromagnetic Survey Using Helicopter Platform and UAV / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, A.P. Sivenkova, E.I. Simon //2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2021. – С. 591-594.
<https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647480>.
101. Persova, M. G., Soloveichik, Y. G., Kjerstad, J. K. Пат. WO2022186701A1, WIPO PCT, МПК G01V3/12, Method and apparatus for performing a CSEM survey / заявитель CAPTROL AS. – № NO20210285A ; заявл. 03.03.2021 ; опубл. 09.09.22. –2022.
102. Persova, M.G. Sequential 3D inversion strategy of airborne geophysical survey data for exploration of ore mineral deposits overlapped by layers with heterogeneous conductivity and magnetic susceptibility / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, A.P. Sivenkova, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, Y.I. Koshkina //Journal of Applied Geophysics. – 2025 – Vol. 238. – Art. 105738 (22 p.).
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105738>

103. Persova, M.G. The approaches to geometric EM 3-D inversion with consideration for IP effect in survey with electric lines / M. G. Persova, Y. G. Soloveichik, O. S. Trubacheva, D. V. Vagin, D. S. Kiselev, A. P. Sivenkova, Y. I. Koshkina //GeoBaikal 2020. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – T. 2020. – №. 1. – C. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202052022>.
104. Persova, M.G. The design of high-viscosity oil reservoir model based on the inverse problem solution / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, A.M. Grif, D.S. Kiselev, I.I. Patrushev, A.V. Nasybullin, B.G. Ganiev //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – T. 199. – Art. 108245. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108245>.
105. Persova, M.G. The induced polarization effect in airborne EM prospecting of ore deposits in the Ural Region / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, A.P. Sivenkova, E.I. Simon, M.G. Tokareva //Engineering and Mining Geophysics 2020. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – T. 2020. – №. 1. – C. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051105>.
106. Persova, M.G. The possibilities of geometric 3-D inversion for processing the UAV-TDEM data / M. G. Persova, Y. G. Soloveichik, D. V. Vagin, A. P. Sivenkova, A. S. Kiseleva, M. G. Tokareva //Engineering and Mining Geophysics 2021. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – T. 2021. – №. 1. – C. 1-7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152042>.
107. Persova, M. G. Three-dimensional inversion of airborne data with applications for detecting elongated subvertical bodies overlapped by an inhomogeneous conductive layer with topography / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, A.M. Grif, Y.I. Koshkina, A.P. Sivenkova //Geophysical Prospecting. – 2020. – T. 68. – №. 7. – C. 2217-2253. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12979>.
108. Persova, M. G. Transient electromagnetic modelling of an isolated wire loop over a conductive medium / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, G.M.

- Trigubovich, D.V. Vagin, P.A. Domnikov //Geophysical Prospecting. – 2014. – T. 62. – №. 5. – C. 1193-1201. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12122>.
109. PL887 //Status Report at Licence Lapse [report], PGNiG Upstream Norway, Skagen44, Concedo, Petrolia NOCO. - 2020.
110. Qi, Y. Three-dimensional modeling of frequency-and time-domain electromagnetic methods with induced polarization effects / Y. Qi, H. El-Kaliouby, A. Revil, A. S. Ahmed, A. Ghorbani, J. Li, //Computers & geosciences. – 2019. – T. 124. – C. 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.12.011>.
111. Ren, X. 3D time-domain airborne electromagnetic inversion based on secondary field finite-volume method / X. Ren, C. Yin, J. Macnae, Y. Liu, B. Zhang //Geophysics. – 2018. – T. 83. – №. 4. – C. E219-E228. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0585.1>.
112. Ren, X. Efficient Modeling of Time-domain AEM using Finite-volume Method / X. Ren, C. Yin, Y. Liu, J. Cai, C. Wang, F. Ben // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2017. – T. 22. – №. 3. – C. 267-278. <https://doi.org/10.2113/JEEG22.3.267>.
113. Ren, X., Macnae, J., Hennessy, L. Three conductivity modelling algorithms and three 3D inversions of the Forrester test site AEM anomaly //Exploration Geophysics. – 2020. – T. 51. – №. 1. – C. 14-24. <https://doi.org/10.1080/08123985.2018.1552072>.
114. Rieben, R. N., Rodrigue, G. H., White, D. A. A high order mixed vector finite element method for solving the time dependent maxwell equations on unstructured grids //Journal of Computational Physics. – 2005. – T. 204. – №. 2. – C. 490-519. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2004.10.030>.
115. Robinson, D. A. Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: A vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods / D. A. Robinson, A. Binley, N. Crook, F. D. Day-Lewis, T. P. A. Ferré, V. J. S. Grauch, R. Knight, M. Knoll, V. Lakshmi,

- R. Miller, J. Nyquist, L. Pellerin, K. Singha, L. Slater //Hydrological Processes. – 2008. – T. 22. – №. 18. – C. 3604-3635. <https://doi.org/10.1002/hyp.6963>.
116. Schenk, O., Gärtner, K. Solving unsymmetric sparse systems of linear equations with PARDISO //Future Generation Computer Systems. – 2004. – T. 20. – №. 3. – C. 475-487. <https://doi.org/10.1016/j.future.2003.07.011>.
117. Scholl, C., Neumann, J., Watts, M. D. Geo-steered 3D inversion of airborne electromagnetic data in rugged terrain //First European Airborne Electromagnetics Conference. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2015. – T. 2015. – №. 1. – C. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201413864>.
118. Schwalenberg, K. Analysis of marine controlled source electromagnetic data for the assessment of gas hydrates in the Danube deep-sea fan, Black Sea / K. Schwalenberg, R. A. Gehrman, J. Bialas, D. Rippe //Marine and Petroleum Geology. – 2020. – T. 122. – Art. 104650. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104650>.
119. Schwalenberg, K. Marine-controlled source electromagnetic study of methane seeps and gas hydrates at Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand / K. Schwalenberg, D. Rippe, S. Koch, C. Scholl //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2017. – T. 122. – №. 5. – C. 3334-3350. <https://doi.org/10.1002/2016JB013702>.
120. Senger, K. Resistivity of reservoir sandstones and organic rich shales on the Barents Shelf: Implications for interpreting CSEM data / K. Senger, T. Birchall, P. Betlem, K. Ogata, S. Ohm, S. Olaussen, R.S. Paulsen //Geoscience Frontiers. – 2021. – T. 12. – №. 6. – Art. 101063. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.007>.
121. Šolín, P. Partial differential equations and the finite element method. – John Wiley & Sons, 2005.
122. Soloveichik, Y.G. Comparative Analysis of Airborne Electrical Prospecting Technologies Using Helicopter Platforms and UAVs when Searching for Kimberlite Pipes / Y.G. Soloveichik, M.G. Persova, A.P. Sivenkova, D.S. Kiselev, E.I. Simon, D.A. Leonovich, //2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument

- Engineering (APEIE). – IEEE, 2023. – C. 1-4.
<https://doi.org/10.1109/APEIE59731.2023.10347567>.
123. Soloveichik, Y.G. Comparative analysis of computational schemes for FEM modeling of 3D time-domain geoelectromagnetic fields excited by a horizontal grounded-wire source / Y.G. Soloveichik, M.G. Persova, D.V. Vagin, A.P. Sivenkova, D.S. Kiselev, Y.I. Koshkina //Computers & Geosciences. – 2024. – T. 183. – Art. 105514. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2023.105514>.
124. Soloveichik, Y. G. Finite-element solution to multidimensional multisource electromagnetic problems in the frequency domain using non-conforming meshes / Y.G. Soloveichik, M.G. Persova, P.A. Domnikov, Y.I. Koshkina, D.V. Vagin //Geophysical Journal International. – 2018. – T. 212. – №. 3. – C. 2159-2193. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx530>.
125. Theuerkorn, K. Reservoir characterisation using macromolecular petroleum compounds including asphaltenes: A case study of the Heidrun oil field in the Norwegian North Sea : дис. - Berlin. - 2012. – 291 с.
126. Thrana, C. Updated depositional and stratigraphic model of the Lower Jurassic Åre Formation, Heidrun field, Norway / C. Thrana, A. Næss, S. Leary, S. Gowland, M. Brekken, A. Taylor //From depositional systems to sedimentary successions on the Norwegian continental margin. – 2014. – C. 253-289. <https://doi.org/10.1002/9781118920435.ch11>
127. Um, E. S., Kim, S. S., Fu, H. A tetrahedral mesh generation approach for 3D marine controlled-source electromagnetic modeling //Computers & Geosciences. – 2017. – T. 100. – C. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.11.007>.
128. Volakis, J. L. Finite element method for electromagnetic / J. L. Volakis, J. L. Volakis, A. Chatterjee, L. C. Kempel // Universities Press, 1998.
129. von Planta, C. Modelling of hydro-mechanical processes in heterogeneous fracture intersections using a fictitious domain method with variational transfer operators / C. von Planta, D. Vogler, X. Chen, M.G. Nestola, M. O. Saar, R. Krause //Computational Geosciences. – 2020. – T. 24. – C. 1799-1814. <https://doi.org/10.1007/s10596-020-09936-7>.

130. Yang, D., Oldenburg, D. W., Haber, E. 3-D inversion of airborne electromagnetic data parallelized and accelerated by local mesh and adaptive soundings // *Geophysical Journal International*. – 2014. – Т. 196. – №. 3. – С. 1492-1507. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt465>.
131. Yang, D., Oldenburg, D. W. Three-dimensional inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to a porphyry deposit // *Geophysics*. – 2012. – Т. 77. – №. 2. – С. B23-B34. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0194.1>.
132. Ye, Y. Three-dimensional magnetotelluric modeling in general anisotropic media using nodal-based unstructured finite element method / Y. Ye, J. Du, Y. Liu, Z. Ai, F. Jiang // *Computers & Geosciences*. – 2021. – Т. 148. – Art. 104686. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104686>.
133. Yin, C. 3D time-domain airborne EM forward modeling with topography / C. Yin, Y. Qi, Y. Liu, J. Cai // *Journal of Applied Geophysics*. – 2016. – Т. 134. – С. 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.08.002>.
134. Yin, C., Qi, Y., Liu, Y. 3D time-domain airborne EM modeling for an arbitrarily anisotropic earth // *Journal of Applied Geophysics*. – 2016. – Т. 131. – С. 163-178. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.05.013>.
135. Zhu, X. An efficient parallel algorithm for 3D magnetotelluric modeling with edge-based finite element / X. Zhu, J. Liu, Y. Cui, C. Gong, // *Computational Geosciences*. – 2021. – Т. 25. – С. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10596-020-09976-z>.
136. Zlobinskiy, A. Detection of low-contrast objects by electrical prospecting methods // *Journal of Applied Geophysics*. – 2024. – Т. 229. – Art. 105492. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2024.105492>.
137. АО «ГНПП «Аэрогеофизика»: [Электронный ресурс]. URL: <https://aerogeo.ru/>. (Дата обращения: 04.06.2024).
138. Геотехнологии: [Электронный ресурс]. URL: <https://gtdv.ru/>. (Дата обращения: 04.06.2024).
139. Аэрогеофизическая разведка, Новосибирск: [Электронный ресурс]. URL: <https://aerosurveys.ru/>. (Дата обращения: 04.06.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ


RU2021661749

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

2021661749

Дата регистрации: 15.07.2021

Номер и дата поступления заявки:

2021660996 15.07.2021

Дата публикации и номер бюллетеня:

15.07.2021 Бюл. № 7

Автор(ы):

Персова Марина Геннадьевна (RU),

Соловейчик Юрий Григорьевич (RU),

Вагин Денис Владимирович (RU),

Сивенкова Анастасия Павловна (RU)

Правообладатель(и):

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ

БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ

УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО

ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программный модуль для расчета нестационарных электромагнитных полей, порождаемых заземленной электрической линией в трехмерных средах с сложной геометрией поверхностей геологических слоев

Реферат:

Программный модуль предоставляет возможность массовых расчетов электромагнитных (ЭМ) полей, порождаемых заземленной электрической линией в трехмерных средах с сложной геометрией поверхностей геологических слоев. Для измерения ЭМ поля используются заземленные или индукционные приемники, включая БПЛА-вариант. В основе программы лежит новая математическая модель, основанная на двухэтапном выделении поля: поля вмещающей горизонтально-слоистой среды и поля трехмерных неоднородностей в шаблонной системе координат (с горизонтальными границами слоев и 3D-объектов). Вычислительная эффективность обусловлена возможностью использования трехмерных сеток с существенно меньшим числом ячеек по сравнению с вариантом расчета поля напрямую, без двойного выделения поля. Для аппроксимации по пространству используется векторный и скалярный МКЭ на неконформных сетках с шестигранными ячейками.

Язык программирования:

C++

Объем программы для ЭВМ:

138 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2020664136**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

2020664136

Дата регистрации: 09.11.2020

Номер и дата поступления заявки:

2020662787 22.10.2020

Дата публикации и номер бюллетеня:

09.11.2020 Бюл. № 11

Контактные реквизиты:

нет

Автор(ы):

Персова Марина Геннадьевна (RU),
Соловейчик Юрий Григорьевич (RU),
Вагин Денис Владимирович (RU),
Сивенкова Анастасия Павловна (RU)

Правообладатель(и):

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программный модуль для расчета процесса индукционной вызванной поляризации**Реферат:**

Программный модуль предоставляет возможность массовых расчетов электромагнитных полей с совместным учетом электродинамических процессов и индукционной вызванной поляризации (ВП) в сложных трехмерных геологических средах. В основе программы лежит математическая модель и подход к 3D-моделированию процессов ВП, основанные на следующем физическом принципе: токи и электрическое поле ВП порождаются источниками, которые в задачах электромагнетизма квалифицируются как сторонние ЭДС. Эти источники определяются токами электродинамического процесса. Аппроксимация по пространству выполнена с использованием векторного и скалярного метода конечных элементов на неконформных сетках с шестигранными ячейками. Для обеспечения возможности проведения массовых расчетов электромагнитных полей в задачах аэроэлектромагнитной разведки с большим количеством положений приемно-генераторной установки в программе реализовано группирование подзадач по положениям приемно-генераторной установки и по временам. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows Server 2008/2012.

Язык программирования:

Visual C++

Объем программы для ЭВМ:

1,3 МБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2019662177

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2019662177

Дата регистрации: 18.09.2019

Номер и дата поступления заявки:
2019661263 12.09.2019

Дата публикации и номер бюллетеня:
18.09.2019 Бюл. № 9

Контактные реквизиты:
нет

Автор(ы):

Персова Марина Геннадьевна (RU),
Соловейчик Юрий Григорьевич (RU),
Вагин Денис Владимирович (RU),
Гриф Александр Михайлович (RU),
Киселев Дмитрий Сергеевич (RU),
Кошкина Юлия Игоревна (RU),
Патрушев Илья Игоревич (RU),
Сивенкова Анастасия Павловна (RU),
Симон Евгения Игоревна (RU),
Токарева Марина Георгиевна (RU)

Правообладатель(и):

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Информационно-программная система обработки данных для сопровождения электромагнитных технологий геологоразведки

Реферат:

Программа предоставляет возможность решения трехмерных прямых и обратных задач для технологий электроразведки с контролируемыми источниками различной формы, магнитотеллурических зондирований в наземном и аэровариантах, с учетом сложной структуры геоэлектрической модели, включая искривленные субгоризонтальные границы и трехмерные объекты сложной формы. Программа включает в себя модули расчета электродинамических процессов и двухфазной фильтрации, графический интерфейс и систему сохранения геоэлектрических моделей с практическими и расчетными данными. Решение прямых задач основано на методе конечных элементов, для оптимизации расчетов используются несогласованные сетки, технология двойного выделения поля, пространственно-временное группирование подзадач, распараллеливание в неоднородной вычислительной системе. При решении обратных задач используется адаптивная регуляризация. Программа выполнена в рамках государственного задания №5.978.2017/ПЧ от 01.01.2017г. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows Server 2008/2012.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 4,1 Мб

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Акты внедрения научных результатов диссертационной работы**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования
**Иркутский национальный
исследовательский
технический университет
(ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)**



**SIBERIAN SCHOOL OF GEOSCIENCES
(СИБИРСКАЯ ШКОЛА ГЕОНАУК)**
г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3
тел. 8 (3952) 40-54-81
e-mail: ssg@geo.istu.edu

УТВЕРЖДАЮ

Научный руководитель института «Сибирская
школа геонаук»

А.В. Паршин

03.06.2024 г.

АКТ

об использовании результатов научных исследований, выполненных соискателем Сивенковой А.П. в диссертационной работе "Методы и алгоритмы трехмерной обработки данных высокоразрешающих технологий электромагнитных зондирований"

Разработанное соискателем программное обеспечение, реализующее решение прямых и обратных задач электроразведки, применялось при обработке данных, полученных методом электромагнитных зондирований и вызванной поляризации на рудных месторождениях Северного Казахстана и золоторудных месторождениях Дальнего Востока.

Руководитель департамента геофизики,
д.г.-м.н.

К.М. Константинов

Геофизическое предприятие «СИБГЕОТЕХ»
sibgeotech.ru



Исх. № 81 от «05» мая 2024г.

АКТ

об использовании результатов научных исследований, выполненных соискателем **Сивенковой А.П.** в диссертационной работе "Методы и алгоритмы трехмерной обработки данных высокоразрешающих технологий электромагнитных зондирований".

Разработанное соискателем программное обеспечение, реализующее решение прямых и обратных задач электроразведки, применялось при обработке данных, полученных методом аэроэлектроразведки и методом ЗСБ по договору: **«Аэрогеофизические (полевые и камеральные) работы на участке недр Чипали»** в рамках проекта: «Геологическое изучение, включающее поиски и оценку месторождений меди и рудного золота в пределах участка недр Чипали в Советско-Гаванском районе Хабаровского края».

Директор
ООО ГП «Сибгеотех»

Т.Н. Багаева

05.06.2024 г.

